



**Thèse
Présentée par
Awa NIANG**

**UCAD - FLSH
DEPARTEMENT DE
GEOGRAPHIE**

**Suivi de l'environnement et gestion
qualitative des eaux du Lac de Guiers :
approche globale et perspectives de la
télédétection et des systèmes
d'information géographique**

1999

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES LETTRES ET SCIENCES HUMAINES

DEPARTEMENT DE GEOGRAPHIE

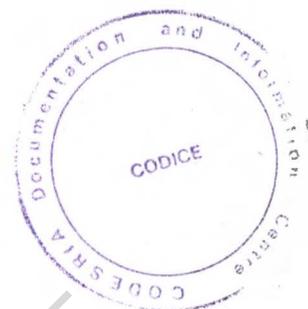
17.05.05

NIA

11189



20 AVR. 1999



Thèse de doctorat de 3^e cycle en Géographie Physique

SUIVI DE L'ENVIRONNEMENT ET GESTION QUALITATIVE DES EAUX DU LAC DE GUIERS

**APPROCHE GLOBALE ET PERSPECTIVES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET
DES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE**

Présentée par

Awa NIANG

Soutenue publiquement le

devant le jury composé de

Mamadou Moustapha SALL

François-Xavier COGELS

Amadou Abdoul SOW

Alioune KANE

Président

Rapporteur

Examineur

Examineur

U.C.A.D.

F.U.L.

U.C.A.D.

U.C.A.D.

Avec le concours scientifique de l'



et le soutien financier du **C O D E S R I A**



A la mémoire de ma grand-mère Fa Bineta NDIAYE

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	5
AVANT-PROPOS.....	7
INTRODUCTION.....	10
PREMIERE PARTIE : LE SYSTEME FLUVIO-LACUSTRE DU GUIERS	
<i>Cadre géographique, caractéristiques physiques et humaines</i>	
<i>Contraintes majeures et évolution récente.....</i>	13
CHAPITRE I - LE CADRE PHYSIQUE GÉNÉRAL.....	14
CHAPITRE II - LES HOMMES ET LEURS ACTIVITÉS ADAPTATION AUX CONDITIONS CLIMATIQUES	
ET HYDROLOGIQUES.....	79
CHAPITRE III - LES ÉTAPES DE LA MISE EN VALEUR DANS LE DELTA ET LES IMPACTS SUR	
L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET HUMAIN.....	103
DEUXIEME PARTIE : QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX DU LAC DE GUIERS	129
CHAPITRE I - SYNTHÈSE DE LA QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX	
LES EFFETS DU BARRAGE DE DIAMA.....	130
CHAPITRE II - MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DES EAUX DU LAC DE GUIERS.....	176
CHAPITRE III - APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION A LA CARACTÉRISATION DE LA QUALITÉ	
GÉNÉRALE DES EAUX ET AU SUIVI DES PLANTES AQUATIQUES.....	201
TROISIEME PARTIE : SIG GUIERS	
<i>Un système d'information géographique la gestion intégrée</i>	
<i>et la planification des ressources en eau du système fluvio-lacustre</i>	
<i>du guiers.....</i>	241
\ CHAPITRE I - DE LA BASE DE DONNÉES AU SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE :	
DÉFINITIONS, FONCTIONNALITÉS, MISE EN ŒUVRE.....	242
\ CHAPITRE II - PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES GUIERS.....	259
\ CHAPITRE III - QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DU SIG GUIERS DANS LE CADRE	
DE LA GESTION DU SYSTÈME FLUVIO-LACUSTRE.....	276
\ CONCLUSION GÉNÉRALE.....	311
\ BIBLIOGRAPHIE.....	313
\ ANNEXES.....	327
\ LISTE DES FIGURES.....	338
\ LISTE DES TABLEAUX.....	342
\ GLOSSAIRE.....	344
\ TABLE DES MATIÈRES.....	346

REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats acquis dans le cadre de ce travail d'études, de recherches et d'observations sur le terrain, je voudrais tout d'abord remercier l'ensemble du corps professoral du Département de Géographie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar à qui je dois ma formation et mon initiation au métier de la recherche.

Une mention spéciale au Professeur Mamadou Moustapha SALL, Doyen de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines, qui a assuré mon encadrement depuis le diplôme d'études approfondies. Ses conseils éclairés et avisés ainsi que sa grande expérience m'ont été très précieux. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de ma profonde reconnaissance pour la pertinence de son enseignement qui marquera toute une génération de géographes.

A l'ORSTOM, mon encadrement a été assuré par François Xavier COGELS, Chargé de recherches, Docteur en Ecologie et chargé de cours à la Fondation Universitaire Luxembourgeoise (F.U.L.). Je voudrais le remercier de son soutien moral, du temps consacré, des conseils et des moyens investis pour la réalisation de cette thèse. Je garderai toujours le souvenir de journées de navigation, sur le lac de Guiers, où les campagnes de mesure ne furent pas toujours sans péril.

Jean Yves GAC, Responsable scientifique du programme EQUÉSEN a également suivi le déroulement de ce travail. Son sens de l'organisation et sa passion pour la Géochimie resteront toujours attachés à son souvenir. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

La partie technique de cette étude a été réalisée avec l'aide et l'appui de Michel CARN, Ingénieur géologue et Pape Abdou DIALLO, Informaticien. Ils ont consolidé ma formation en traitement d'images satellitaires débutée à ULIS sous la responsabilité de Hervé CHEVILLOTTE, à qui je réitère mes remerciements.

Michel CARN nous a accompagné durant toutes ces années, que ce soit sur le terrain ou pour la recherche d'informations. Sa constante bonne humeur, ses conseils avisés et son habileté à la manipulation de l'outil informatique m'ont été d'un grand secours. Pape Abdou DIALLO, spécialisé en traitement d'images, a joué un rôle capital dans la constitution de la base Guiers depuis le modèle conceptuel jusqu'à la base de données relationnelle. Sa brillante intervention dans un domaine qui lui est peu familier (la Géographie) et les résultats obtenus méritent d'être soulignés.

Sont associés à ces remerciements l'ensemble du personnel de l'UTIS, en particulier ses responsables successifs, Jean CITEAU puis Madiagne DIAGNE, André PESIN, Aminata MBOW et Alassane Oumar BA ainsi que les techniciens A. KA et D. NIANG.

Au Département de Géographie les encouragements et les conseils ont été constants. Je citerai à cet égard le Professeur Salif DIOP qui au cours de rencontres, certes brèves et souvent informelles, n'a jamais cessé de se soucier de l'état d'avancement de mes travaux et de me prodiguer ses conseils.

Amadou Abdoul SOW, maître assistant, qui a guidé mes premiers pas dans la recherche, depuis la préparation du mémoire de maîtrise, s'est toujours préoccupé de la fiabilité de mes argumentations et interprétations. Ses conseils d'ainé dans la recherche ont été constants et réconfortants. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance que je partage, j'en suis sûre, avec tous mes camarades de promotion.

Honoré DACOSTA, maître-assistant, chercheur associé à l'ORSTOM avec qui j'ai partagé, pendant de longs mois, le couloir du bâtiment d'Hydrologie de Hann a été permanent dans la gentillesse, à l'occasion d'entretiens fructueux et enrichissants. Bien souvent, les discussions à bâtons rompus ont apporté des réponses à mes interrogations d'apprenti chercheur.

Alioune KANE avec qui nous avons partagé la fièvre des derniers jours d'EQUÉSEN dont il était l'un des acteurs. Je le remercie vivement pour ses encouragements et lui réitère mes meilleurs souhaits de réussite pour sa thèse d'Etat qui à n'en pas douter sera un grand moment pour le Département et l'ensemble des hydrologues.

Paul NDIAYE, un de mes premiers enseignants au Département de Géographie, qui en quelque sorte m'a initiée à la Géographie Physique et pour qui j'éprouve un très grand respect. Qu'il me soit permis ici de rendre un hommage particulier à l'éducateur autant qu'à l'homme et à ses qualités morales.

Sont également associés à ces remerciements le Professeur Cheikh BA, Alioune BA, Gorgui CISS, Amadou KANE, Diène DIONE, Pascal SAGNA, Amadou DIOP. Ma formation de Géographe leur doit beaucoup.

Mes remerciements vont aussi à Philippe MATHIEU, ancien Représentant de l'ORSTOM au Sénégal et à Michel RIEU, Chef du Département Eaux Continentales pour leur accueil et leur soutien financier.

Je ne saurais oublier mon compagnon de route, Adrien COLY, ni passer sous silence les longues journées autour du lac de Guiers. Certes la cohabitation n'a pas toujours été facile mais quel enrichissement mutuel. Puisse cette collaboration vécue se poursuivre dans l'avenir et conforter notre amitié. Toute mon affection va à mes camarades de la promotion 1991 du Laboratoire d'Hydrologie, en souvenir des longues heures de dur labeur passées ensemble. Tous mes encouragements et mes remerciements à mon ami Lamine KONATE qui m'a accompagné avec dévouement lors de ces derniers mois. Meilleurs vœux de succès à Mame Dagou DIOP.

Je voudrais redire toute ma reconnaissance à Monsieur Alioune Badara CAMARA, chef de la Division des Sciences de l'Information du CRDI. L'intérêt qu'a suscité chez lui notre problématique de travail nous a valu un important appui financier au cours des deux premières années de cette étude. A ces remerciements, j'associe ses assistantes Catherine DAFPE puis Marie FALL pour leur diligence à faciliter nos démarches au niveau du CRDI et aussi pour leur constante disponibilité.

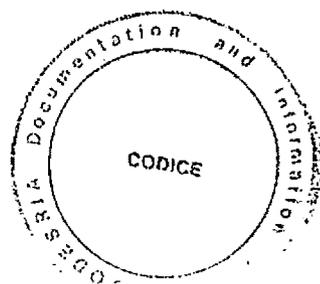
Au Secrétaire exécutif du CODESRIA et à Madame Marie FALL, Directrice du Programme de Petites Subventions, je redis toute ma gratitude. Leur appui financier a été d'un grand apport pour la documentation de cette thèse ainsi que pour la réalisation de nombreuses missions sur le terrain. Puisse ce travail être à la mesure de leurs attentes.

Durant ces années, il m'a été donné de vivre au quotidien les amitiés et la sympathie de l'ensemble du personnel de l'ORSTOM local et expatrié. J'aimerais qu'ils trouvent à travers ces mots l'expression de ma gratitude la plus sincère. Une mention spéciale au personnel du Centre Régional de documentation (CRDO) qui n'a ménagé aucun effort pour diligenter nos recherches bibliographiques.

Cette étude doit aussi beaucoup au personnel du Laboratoire de Géochimie de l'ORSTOM : Souandy BADJI et Lamine SAGNA qui de tout temps et à tout moment ont apporté leur aide humaine et matérielle. Mes amitiés également à Hubert SANE.

Je voudrais enfin remercier ma famille pour son soutien indéfectible toutes ces années durant : mon père et ma mère, pour leur compréhension et leur tolérance devant les longues absences qu'ont nécessité les recherches sur le terrain ; mes frères et sœurs pour leur participation effective et affective à toutes mes entreprises, surtout à Lamine qui bien souvent a dû jouer à la secrétaire pour me soulager des tâches combien éprouvantes de saisie de données et de dactylographie. Je n'oublie pas Astou et Mamy, mes deux sœurs cadettes, à qui je demande pardon pour leur avoir souvent fait état de mon angoisse et de mon anxiété au cours de la préparation de cette thèse ; merci d'avoir été des confidentes attentionnées. A ma cousine et amie Isabelle NIANG DIOP je dis un grand merci pour le soutien moral et matériel ; merci d'avoir toujours été une grande sœur attentive et affectueuse.

A tous mes amis, à tous ce qui me sont proches, je dis un très grand merci avec dans le cœur la peine de ne pouvoir les citer tous. Mais je suis persuadée que chacun de vous sait et sent combien j'ai apprécié sa présence, toujours. Comment oublier ma grande amie de toujours Mame Dior ? Notre amitié vieille déjà de quinze ans s'est consolidée d'avantage ces dernières années. Merci d'avoir été là à chaque fois qu'il le fallait. Merci aussi à toute ma famille de Bargny, pour m'avoir adoptée sans réserves. Cela me va droit au cœur.



AVANT-PROPOS

Débutée au Laboratoire de Géochimie de l'ORSTOM, cette thèse a été finalisée à l'UTIS (Unité de traitement de l'imagerie satellitaire), Laboratoire commun ISRA-ORSTOM. Son thème : « *Suivi de l'environnement et gestion qualitative des eaux lac de Guiers. Approche globale et perspectives de la télédétection et des systèmes d'information géographiques* » qui semble s'écarter de notre formation initiale de géographe physicienne, est justifiable à plusieurs égards. Surtout si l'on considère le contexte hydrologique, chimique, biologique et hydraulique récent qui prévaut dans l'ensemble du bassin du fleuve, en particulier dans sa rive gauche (partie sénégalaise).

Au Sénégal comme dans beaucoup de pays de la zone sahélienne, l'eau demeure l'un des problèmes cruciaux; elle occupe une place centrale dans toutes les politiques de développement en vigueur ces dernières années. Cependant, très peu de véritables politiques de l'eau ont été élaborées. Celles qui ont vu le jour ont presque toujours été placées sous le signe de la lutte contre la sécheresse et la désertification, sans réel programme de validation de ces politiques à l'échelle régionale ; même si, au niveau de la sous région ouest-africaine, des organismes comme le CILSS (Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel) ou l'OMVS (Organisation de mise en valeur du fleuve Sénégal) œuvrent dans ce sens.

La recherche et la conservation des ressources en eau ont donc longtemps été favorisées, occultant le problème de la qualité de ces eaux. Le fleuve Sénégal à cause de la sécheresse a connu des intrusions marines intenses ; la Casamance au même moment faisait face à l'augmentation du taux de salinité de ses eaux, empêchant la mise en valeur des rizières traditionnelles. Enfin les populations du Sine et du Saloum, « rivières fossiles » fortement envahies par la mer, doivent faire face au manque d'eau potable induite par la présence de lames d'eau salée dans les puits. Le Ferlo était à sec depuis 30 ans, depuis qu'une digue a fermé sa communication avec le lac de Guiers, au niveau de Keur Momar Sarr. Le colmatage de la brèche de Nieti-Yone en 1956 a été l'un des facteurs de l'assèchement de la cuvette du Ndiael, auparavant réserve ornithologique et zone de chasse réputée. Pendant ce temps, le bas delta, sous l'effet conjoint des actions éoliennes et de la salinité n'est plus qu'une vaste aire de désolation, malgré d'immenses efforts de mise en valeur. Et le retour à une pluviométrie normale se fait toujours attendre...

Dans le bassin du fleuve Sénégal, le problème de la disponibilité de l'eau ne se pose plus avec autant d'acuité depuis 1985 avec la réalisation successive de deux grands barrages : Diama en aval et Manantali en amont (1987). Gérer ces ressources et surtout envisager de nouvelles méthodes de viabilisation, tels doivent être désormais les préoccupations majeures des structures dirigeantes.

Au lac de Guiers, corollairement à l'accroissement des ressources en eau, sont apparues de nouvelles contraintes à leur gestion ; à savoir :

- faire face à la multiplication des périmètres irrigués, donc à une demande croissante en eau ;
- s'opposer à la prolifération de plantes aquatiques qui pourrait être les signes avant-coureurs d'une eutrophisation des eaux ;
- réguler l'utilisation accrue des produits chimiques dans une agriculture irriguée plus que rudimentaire ;
- s'attaquer aux problèmes sanitaires issus de l'adoucissement des eaux.

Le critère qualitatif est donc, à l'heure actuelle, le paramètre clé de la gestion des eaux dans le système fluvio-lacustre du Guiers. Les contraintes de qualité des eaux y revêtent, en effet, un aspect tout particulier. La réalisation des projets de développement comme le canal du Cayor ou la remise en eau des vallées fossiles devrait à terme compliquer le suivi de la qualité des eaux par la multiplication des paramètres d'entrées et de sorties du bilan hydrologique. A partir de 1989 et surtout en 1991, l'envahissement de la région sud du Guiers et de la cuvette du Djoudj par *Pistia stratiotes*, une salade d'eau douce, a marqué le début d'un intérêt croissant pour les problèmes hydrobiologiques.

Face à cette situation, de nouvelles approches doivent être préconisées pour prévenir les risques de dégradation de la qualité des eaux, notamment par un contrôle strict des entrées et sorties du bilan hydrologique, la mise en place d'une structure centralisée dans la gestion de l'eau. Pour le lac de Guiers, le problème est d'autant plus crucial que c'est, à concurrence de 20 %, un fournisseur d'eau pour Dakar et sa banlieue. Cette contribution pourrait s'accroître avec la construction du canal de Cayor, pour une satisfaction des besoins de la capitale jusqu'à l'horizon 2030 environ.

Les données récentes sur le développement de la bilharziose dans la vallée et l'apparition d'intenses foyers d'infestation par *Schistosoma sp.* devraient constituer une source d'inquiétude pour tout le monde. La gestion des eaux au Sénégal et en particulier dans la vallée doit désormais beaucoup insister sur les facteurs hydrobiologiques et sanitaires. La première approche pour une prise en compte des aspects qualitatifs dans le cadre de la gestion des eaux consiste en l'établissement d'une base de connaissance géochimique solide et un contrôle strict des différents paramètres du bilan hydrologique dans un milieu donné. Les méthodes classiques d'investigation restent bien entendu valables à une échelle locale. Cependant, dans une perspective régionaliste, de nouvelles approches doivent être testées.

La mise en fonction des grands barrages sur le fleuve Sénégal, a fait du lac de Guiers un espace prioritaire de développement. L'augmentation des ressources en eau a favorisé la multiplication des projets de mise en valeur agricole et semi-industrielle. Cet environnement était déjà fortement marqué par la présence, depuis le début des années soixante-dix, de la CSS (Compagnie sucrière sénégalaise) qui y exploite quelques 8 000 hectares de canne à sucre. L'avènement de l'initiative villageoise dans les cultures irriguées ne se fait pas sans risque majeurs pour l'environnement et la qualité des eaux malgré l'encadrement de la SAED dans certains secteurs. En effet, le système d'irrigation est rudimentaire et caractérisé par l'absence de réseau de drainage, entraînant d'importantes pertes en eau. On observe en outre une utilisation non contrôlée des produits chimiques (engrais, pesticides, fongicides...), souvent d'origine douteuse.

Les risques de contamination existent si l'on sait que la majorité des populations riveraines s'approvisionne en eau directement dans le lac. Risques réels, autant pour les hommes que pour le bétail comme le confirme un article paru dans le journal Sud Quotidien n° 105 du 09/07/1993 intitulé « Boire à Guiers et mourir ».

Ainsi dressé, le tableau de l'environnement du lac de Guiers mérite que l'on s'y penche. De nombreuses études y ont été menées et ce depuis très longtemps (D'AVEZAC, 1840 ; DELISLE, 1726 ; HENRY, 1918 ; GROSMIRE, 1957 ; ADAM, 1965 ; MBENGUE 1981 ; ISE, 1983 ; COGELS, 1984 ; THIAM, 1984 ; CHATEAU, 1986 ; COLY, 1992 ; NIANG, 1992 ; GAC *et al.*, 1981, 1990, 1991, 1993 ; COGELS *et al.*, 1990, 1992, 1993, 1994, 1996 et la liste n'est pas exhaustive). Malgré une bibliographie très abondante et diversifiée, il n'y a jamais eu de tentatives de centralisation de toute cette information disponible.

Tenir les informations à jour est une nécessité qui bien avant notre époque avait été comprise par le baron ROGER. Ne disait-il pas, en juillet 1824, à son jardinier RICHARD, à propos du jardin expérimental de Richard-Toll, « *Tenez note et même journal de vos expériences, afin qu'elles puissent profiter à d'autres temps et à d'autres hommes* » (CHATEAU, 1986).

Le petit Atlas informatisé de la ville de Richard-Toll sur « l'environnement urbain et la bilharziose intestinale » (HANDSCHUMACHER *et al.*, 1994) est un premier pas important dans la structuration et la mise à jour des informations sur ce milieu. Cependant, le seul paramètre bilharziosique, qui est certes très lié à la qualité des eaux, ne rend pas entièrement compte impacts sur l'environnement des aménagements récents du fleuve Sénégal.

Notre approche dans le cadre de cette étude est différente en ce sens que nous avons voulu lier le milieu, les hommes et leurs activités de manière à pouvoir analyser les différentes interactions et leurs incidences majeures sur le lac et son environnement. Faire un système d'information géographique complet et performant est une entreprise ambitieuse pour une thèse de troisième cycle ; c'est pourquoi nous avons surtout axé notre analyse sur la nécessité d'un tel outil pour la gestion de l'environnement et aussi sur la méthodologie pour le mettre au point. Les jalons étant posés (mise au point des modèles de données validés sur des objets réels), il reste à faire, ultérieurement, les dernières finitions.

A l'avenir, le rôle du lac de Guiers dans l'économie du pays pourrait devenir prépondérant, si l'on considère les développements actuels du secteur de l'irrigation et de la production maraîchère. Des projets comme ceux du canal du Cayor et des Vallées Fossiles devraient mobiliser d'importantes ressources tant naturelles qu'humaines et matérielles. Avoir des informations à jour et très rapidement mobilisables devrait être une des préoccupations majeures pour les gestionnaires. Puisse donc la base de données esquissée dans le cadre de cette thèse servir de départ à une telle opération. Et, pourquoi pas, à une structure centralisée de gestion de l'espace du lac de Guiers ?

INTRODUCTION

La sécheresse persistante qui sévit dans l'espace sahélien depuis le début des années soixante-dix, constitue une contrainte supplémentaire au développement dans les pays de la sous-région ouest-africaine. Dans ces pays, la lutte contre la sécheresse et ses corollaires a été au centre de toutes les politiques de développement. Quelques organismes et institutions, à l'image du CILSS, se sont entièrement dévoués à cette cause.

Dans cet ordre d'idée, la mise en valeur du bassin du fleuve Sénégal menée par l'OMVS procède d'une volonté commune des Etats riverains du fleuve de lutter contre la sécheresse et la désertification pour permettre une autosuffisance alimentaire dans ces pays. Cette mise en valeur se fonde essentiellement sur une politique de grands aménagements hydrauliques et hydro-agricoles.

Dans la partie sénégalaise du bassin, la réalisation du barrage de Diama en 1985 et celle du barrage de Manantali en 1987 ont ouvert une nouvelle ère de « prospérité », suivie d'une nouvelle politique de développement, dite de l'« Après Barrages » ; le lac de Guiers en est devenu l'espace de développement potentiel prioritaire.

Les grands ouvrages hydrauliques du fleuve Sénégal ont permis une amélioration sensible des remplissages du lac et de la qualité physico-chimique de ses eaux. Ils ont également permis annuellement, depuis 1988, une remise en eau de la basse vallée du Ferlo. La réalisation du canal du Cayor devrait entraîner dans un futur proche, des modifications hydro-géochimiques importantes et des implications sur l'environnement le long de son parcours. Celles-ci seront d'autant plus accusées que la réserve du Guiers devra faire face au nombre sans cesse croissant de ses utilisateurs et de leurs besoins en eau.

Aujourd'hui, le Guiers est régulièrement approvisionné à partir du fleuve et la disponibilité de l'eau a favorisé l'extension des cultures sur son pourtour immédiat. D'ici quelques années, il devrait servir de zone de transit aux eaux dirigées vers le canal du Cayor, grand projet d'adduction d'eau vers le Sud du pays et Dakar. Les besoins très importants de ce canal nécessiteront une gestion précise des approvisionnements du lac à partir du fleuve. Le doublement de la conduite de Ngnith renforcerait l'alimentation en eau de la capitale ; les travaux du programme « vallées fossiles » ont déjà commencé ; la remise en eau de la vallée du Car-Car et celle de la vallée du Ferlo, notamment, sont prévues à partir du sud du lac ; celle de la cuvette du Ndiael pourrait être envisagée par la réouverture du chenal de Nieti-Yone. A terme, la réalisation de ces projets permettrait le rétablissement du schéma de libre circulation des eaux entre le fleuve Sénégal, le lac de Guiers, la basse vallée du Ferlo et le Ndiael. Vu le nombre élevé d'utilisateurs aux intérêts souvent divergents, la gestion hydrologique du lac risque de devenir assez complexe et chaotique dans les années à venir.

Cette nouvelle dynamique du lac de Guiers n'est pas sans poser de nouveaux problèmes dans l'environnement lacustre : la progression fulgurante de plantes aquatiques, comme *Typha australis* et *Pistia stratiotes*, qui colonisent les marges du lac traditionnellement vouées à la culture de décrue ; le développement de maladies hydriques, comme la bilharziose ; l'absence de système de drainage, les importantes pertes en eau au niveau du réseau d'irrigation, l'utilisation croissante et non maîtrisée de produits chimiques dans la production agricole, donc des risques certains de pollution des eaux.

Une gestion stricte de la réserve lacustre, rationnelle et concertée est désormais nécessaire. Elle se heurte néanmoins à de nombreuses difficultés dont un déficit d'informations concernant la partie méridionale du lac ; les cartes les cartes topographiques et thématiques existantes étant trop anciennes. L'inexistence d'une structure centralisée de gestion de l'espace du lac et de son environnement constitue également un manque réel. Trois types de gestion du milieu seraient nécessaires :

- gestion intégrée de la ressource en eau et de ses impacts à court et moyen termes ;
- gestion de l'espace agricole et des impacts de l'agriculture irriguée paysanne ;
- gestion de la santé des populations.

Ce travail de recherche se veut une contribution à la résolution des problèmes de gestion qui se posent à l'environnement du Delta d'une manière générale et plus particulièrement à celui du lac de Guiers. La démarche adoptée est la suivante :

- dresser le tableau général du milieu, ses caractéristiques physiques et humaines et son évolution récente en relation avec la construction des grands barrages sur le fleuve Sénégal ;
- inventorier et analyser les potentialités d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale dans le suivi de la qualité des eaux et de l'environnement du lac de Guiers ;
- élaborer une base de données environnementale géoréférencées intégrant l'imagerie satellitaire et les données géographiques pour définir ainsi les grands traits d'un système d'information géographique du système fluvio-lacustre ; la vocation principale de ce dernier étant la gestion intégrée des eaux et de leurs impacts sur l'environnement

Cette étude s'organise en trois grandes parties divisées chacune en trois chapitres.

La première partie décrit la zone d'étude et la replace dans son contexte actuel ; elle procède à un tour d'horizon complet des principales composantes du milieu. L'approche, tant physique qu'humaine, permet de dégager les grands axes de réflexion pour les deuxième et troisième parties.

La deuxième partie présente une approche de la gestion intégrée du système fluvio-lacustre. Deux campagnes d'analyses physico-chimiques ont eu lieu : la première, entre 1979 et 1982 ; la seconde, de 1989 à 1993. Les résultats obtenus permettent de mesurer l'impact de la construction du barrage de Diama sur le bilan et l'évolution de la qualité générale des eaux. Le modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers (GIL), premier outil de gestion globale, est brièvement présenté. Enfin, une approche par télédétection est proposée.

La troisième partie détaille les caractéristiques du système d'information géographique (SIG) du lac de Guiers ; on insiste particulièrement sur la méthodologie et sur les concepts. Les données de la base relationnelle Guiers sont décrites ; leur critique, qui permet d'en comprendre la distribution sur le terrain, donne un aperçu des méthodes à mettre en œuvre en cas de corrections nécessaires.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ASECNA	: Agence pour la sécurité de la navigation aérienne
BRGM	: Bureau de recherches géologiques et minières
CIEH	: Comité inter état d'études hydrauliques
CILSS	: Comité inter état de lutte contre la sécheresse
CODESRIA	: Conseil pour le développement de la recherche économique et sociale en Afrique
CRDI	: Centre de recherches pour le développement international
CSE	: Centre de suivi écologique
CSS	: Compagnie sucrière sénégalaise
CTFT	: Centre technique forestier tropical
DEFCCS	: Direction des eaux et forêts, chasse et de la conservation des sols
EQUESEN	: Environnement et qualité des eaux du fleuve Sénégal
FUL	: Fondation Universitaire Luxembourgeoise
GIE	: Groupement d'intérêt économique
GMP	: Groupe motopompe
IFAN	: Institut fondamental d'Afrique noire
ISE	: Institut des sciences de la terre
ISRA	: Institut sénégalais de recherche agricole
MAS	: Mission d'aménagement du fleuve Sénégal
MCD	: Modèle conceptuel des données
MCT	: Modèle conceptuel des traitements
MEACC	: Mission d'étude et d'aménagement du canal du Cayor
MEAVF	: Mission d'étude et d'aménagement des vallées fossiles
MLD	: Modèle logique des données
MOPT	: Modèle opérationnel des traitements
MOT	: Modèle organisationnel des traitements
MPD	: Modèle physique des données
OMVS.	: Organisation de mise en valeur du fleuve Sénégal
ONG	: Organisation non gouvernementale
ORSTOM	: L'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération
PIV	: Périmètre irrigué villageois
PRVF	: Programme de revitalisation des vallées fossiles
SAED	: Société d'aménagement et d'exploitation des terres du Delta et de la Falémé
SDE	: Sénégalaise des eaux
SDRS	: Société de développement de la riziculture au Sénégal
SGBD	: Système de gestion de base de données
SIG	: Système d'information géographique
SONEES	: Société nationale d'exploitation des eaux du Sénégal
SPOT	: Système pour l'observation de la terre
UCAD	: Université Cheikh Anta Diop
UTIS	: Unité de traitement de l'imagerie satellitaire

Première partie

LE SYSTEME FLUVIO-LACUSTRE DU GUIERS

Cadre géographique, caractéristiques physiques et humaines Contraintes majeures et évolution récente

Le système fluvio-lacustre du Guiers est situé au nord-ouest du Sénégal, dans la région du Delta¹. De par sa position, ses caractéristiques physiques et humaines, elle possède d'immenses potentialités agricoles et économiques.

Sa configuration actuelle, ses perspectives de développement résultent autant de facteurs physiques qu'humains, notamment politico-économiques.

Cette première partie se propose de faire la synthèse des connaissances acquises sur le système fluvio-lacustre et d'en dégager les tendances générales de son évolution récente.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

¹ Nous reprenons ici le découpage proposé par Pierre MICHEL (1973) qui précise que le Delta est le nom d'une région qui ne correspond que partiellement à l'ancien delta du fleuve qui s'est formé à partir de Bogué au cours du Quaternaire.

Chapitre I

LE CADRE PHYSIQUE GÉNÉRAL

L'étude des conditions générales du milieu physique du Delta du fleuve Sénégal et du lac de Guiers poursuit un double objectif :

- comprendre d'abord les mécanismes de fonctionnement des composantes majeures du milieu à travers une analyse de leur évolution spatio-temporelle récente ;
- procéder ensuite à une comparaison des conditions du milieu en relation avec la sécheresse.

1. LE RELIEF ET L'HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique est une des composantes essentielles du paysage du bassin du fleuve Sénégal ; il participe à la formation et à la délimitation des grandes zones géographiques. Le relief du Delta est marqué par une platitude d'ensemble, perturbée çà et là par quelques massifs de dunes. Le réseau hydrographique est composé du fleuve Sénégal, du lac de Guiers, du Ndiael et du Bounoum ou bas Ferlo.

1.1. le bassin du fleuve Sénégal et le Delta

Le bassin versant du fleuve Sénégal (figure 1) est compris entre 10° 30' et 17° 30' de latitude nord et entre 7° 30' et 16° 30' de longitude ouest. Entièrement situé dans la zone tropicale à saison sèche (MICHEL, 1973) et réparti entre quatre États, la Guinée, le Mali, la Mauritanie, et le Sénégal. Il couvre une superficie de 343 000 km².

D'une longueur de 1 790 km, le fleuve Sénégal est le septième fleuve d'Afrique et le second d'Afrique de l'ouest, après le Niger (4 200 km). Il est formé par la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé, à 255 km en amont de Bakel et à environ 130 km au sud-est de Kayes. En aval de la confluence, il sert, par endroits, de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie jusqu'à son embouchure située à environ 20 km au sud de Saint-Louis.

Le bassin du Sénégal se subdivise en trois grandes zones hydro-géographiques, fortement différenciées en fonction de la topographie, de la géologie, de l'hydrographie et du climat (figure 2) :

- le haut bassin en amont de Kayes ;
- le bassin inférieur ou vallée alluviale qui s'allonge sur 630 km de Kayes à Dagana, parsemée de hautes levées fluvio-deltaïques ;
- le Delta, situé à l'aval de Richard-Toll.

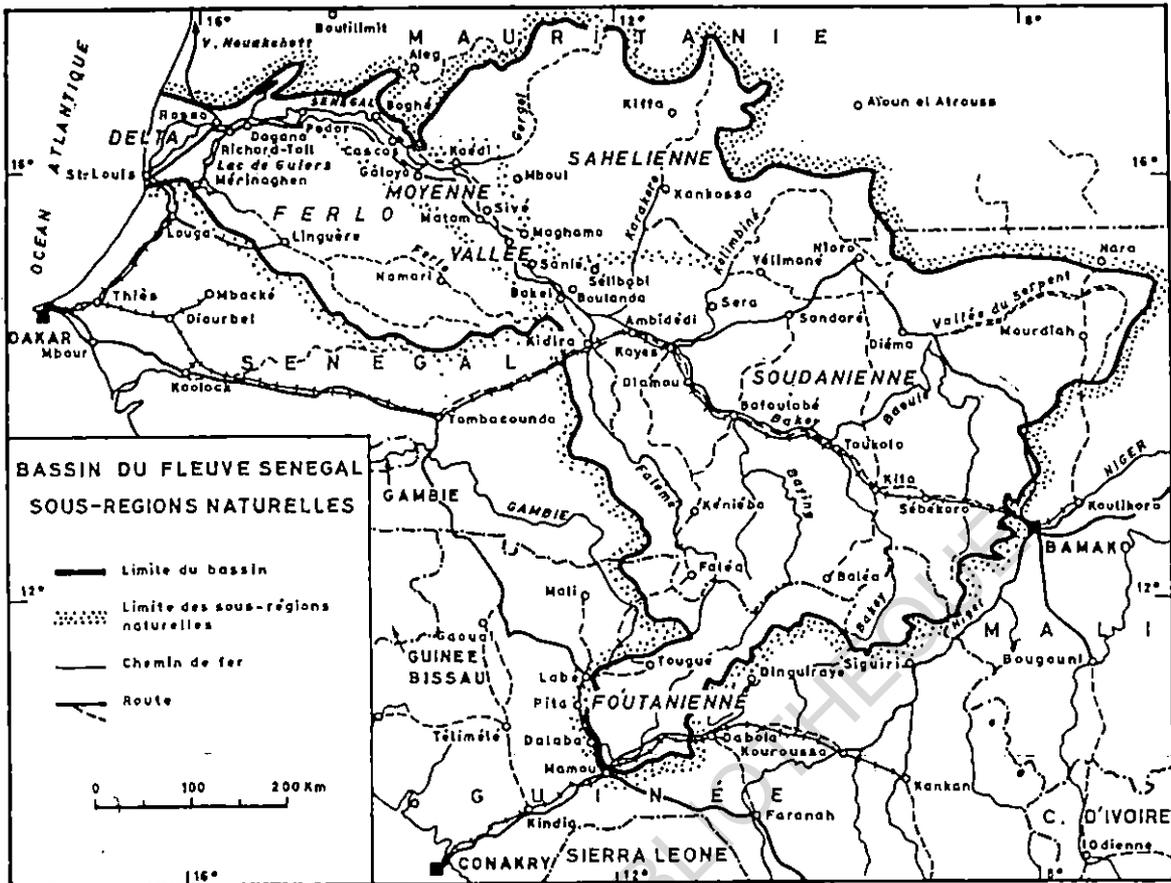


FIGURE 1. - - Situation du bassin versant du fleuve Sénégal en Afrique de l'ouest
(Source : MAIGA, 1995)

Le haut bassin ou bassin supérieur est la zone où le fleuve reçoit la quasi totalité de ses apports en eau ; les altitudes y culminent à 1538 m au Mont Loura, dans le massif de Mali en Guinée.

A partir de Kayes, le fleuve entre dans le bassin inférieur ; la vallée s'élargit et atteint 10 à 15 km en période de crue. La vallée alluviale se subdivise en : haute vallée, de Kayes à Matam ; moyenne vallée, entre Matam et Podor et basse vallée, de Podor à Dagana.

Au niveau de Richard-Toll, le fleuve entre dans le Delta ; les hautes levées s'estompent et laissent la place à une vaste zone d'inondation d'altitude moyenne inférieure à 2 m IGN. Le Delta est une région plate et monotone, légèrement accidentée au sud-ouest par la présence de massifs de dunes ogoliennes ; il s'étend jusqu'à l'embouchure, au sud de l'Île de Saint-Louis. Le lit du fleuve s'élargit et atteint 400 à 500 m de large avec des profondeurs supérieures à 6 m dans le grand bras² et de l'ordre de 3 m dans le petit bras. Le profil longitudinal du fleuve Sénégal indique que le lit du fleuve se situe, sur 450 km, en contrebas de l'océan (en dessous du 0,00 m IGN). Entre Dagana et Saint-Louis, on note des pentes très faibles, de l'ordre de 0,006 ‰.

² La profondeur maximale mesurée est de 11,1 m au Pont Faidherbe (KANE, 1985)

La formation du Delta remonte au Nouakchottien, vers 5 500 BP ; les différents bras se rejoignent ou sont à nouveau capturés avant que le fleuve ne se jette dans l'océan en une seule embouchure dont la position connaît une grande variabilité spatio-temporelle (GAC, KANE, MONTEILLET, 1981 ; KANE, 1985). En effet, sur plusieurs kilomètres, le fleuve longe l'océan Atlantique dont il n'est séparé que par une étroite bande de terre, la Langue de Barbarie, flèche littorale sableuse édiflée par les courants de dérive littorale induits par la houle du nord-ouest.

Dans le Delta, le fleuve alimente une série de cuvettes argileuses de décantation (Ndiael, Khant, Nguine, Djoudj) et tout un réseau de marigots et de mares (Djoudj, Gorom-Lampsar, Djeuss) coulant le plus souvent sur des sols salés. En aval de Richard-Toll, deux cuvettes lacustres s'étirent de part et d'autre du fleuve : le système lac de Guiers - vallée du Ferlo en rive gauche et le lac de R'Kiz en rive droite.

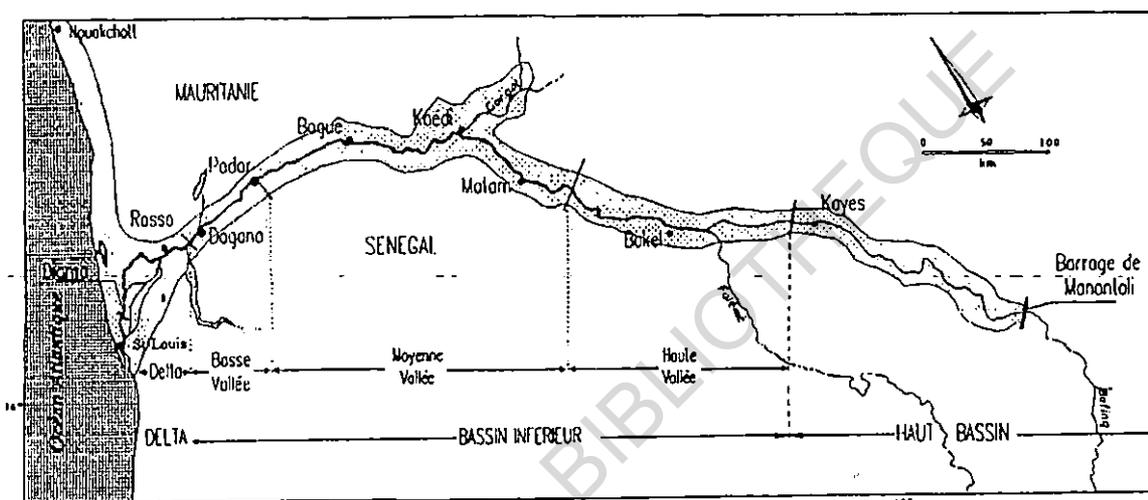


FIGURE 2. — Les zones hydro-géographiques du bassin du fleuve Sénégal.

1.2. Le lac de Guiers

Le lac de Guiers est situé dans le Delta en rive gauche du fleuve Sénégal, au sud de la ville de Richard-Toll, entre $15^{\circ} 55'$ et $16^{\circ} 23'$ de latitude nord et entre $16^{\circ} 04'$ et $16^{\circ} 16'$ de longitude ouest. Il occupe une étroite dépression orientée NNE-SSW, longue de 50 km et large de 7 km environ. A la cote +1,00 m IGN, la superficie du lac est de 240 km^2 pour un volume moyen de 390 millions de m^3 . C'est un lac plat d'origine tectonique (TRICART, 1954) formé à la fin du Quaternaire, vers 30 000 ans BP. L'origine tectonique du lac est corroborée par les travaux de TRENOUS et MICHEL (1971) et de MICHEL (1973) qui ont mis en évidence un réseau de failles orientées NNE-SSW (figure 3).

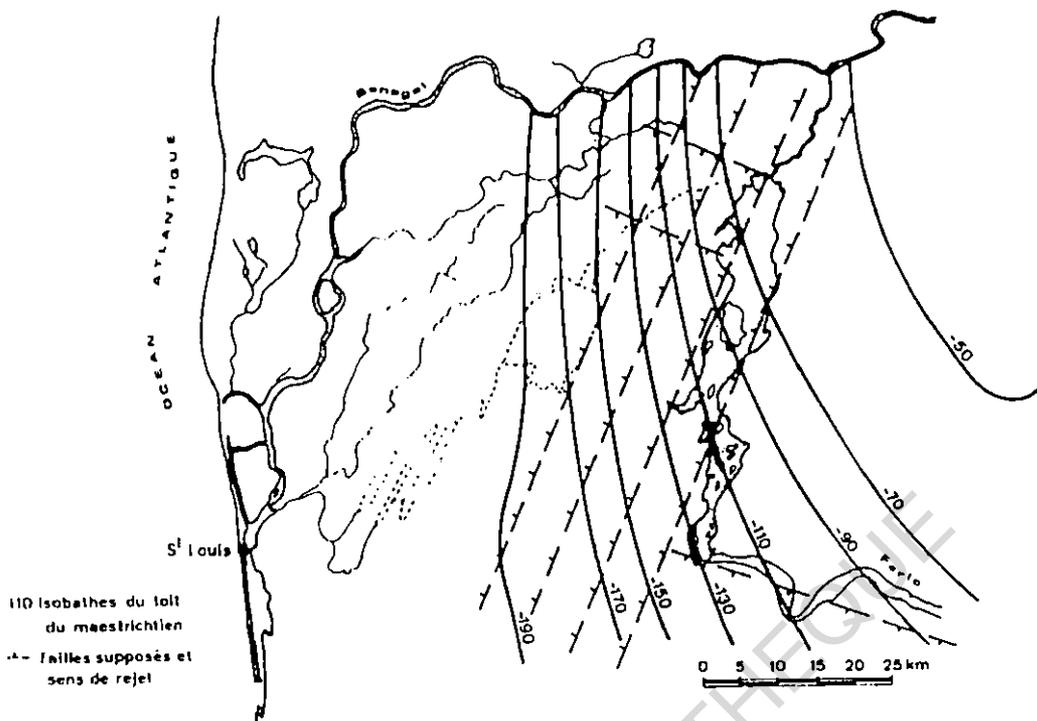


FIGURE 3. — Cartes des isobathes du toit du Mœstrichtien et failles (cotes basées sur le 0 IGN)
(source : TRENOUS et MICHEL (1971) et MICHEL (1973))

La première localisation précise du lac de Guiers sur un document cartographique date du début du XVIII^e siècle. Connu d'abord sous le nom de lac "Paniéfole" (DELISLE, 1726) sur les documents historiques, le nom de lac de "Guiers" est apparu pour la première fois en 1840 sur la carte de D'AVEZAC (1840). Le toponyme « Guiers » viendrait de la transcription de « Ngher » (*Guiera senegalensis*), arbuste typique de la région du lac (COGELS, 1984).

Le lac de Guiers se divise en trois grandes régions naturelles³ (figure 4) :

- une région nord, limitée par les endiguements de la CSS, le seuil de Foss et l'Île de Diokhor : elle contient 85 % des eaux du lac ;
- une région centrale, directement soumise aux pompages de la SDE et qui s'étend jusqu'au seuil de Sier ;
- une région sud, limitée par la digue de Keur Momar Sarr et parsemée d'îlots inhabités plus ou moins apparents selon la cote du lac.

³ Cette division tient aussi compte du volume et des caractéristiques physico-chimiques des eaux, volet qui sera traité dans la deuxième partie de l'étude.

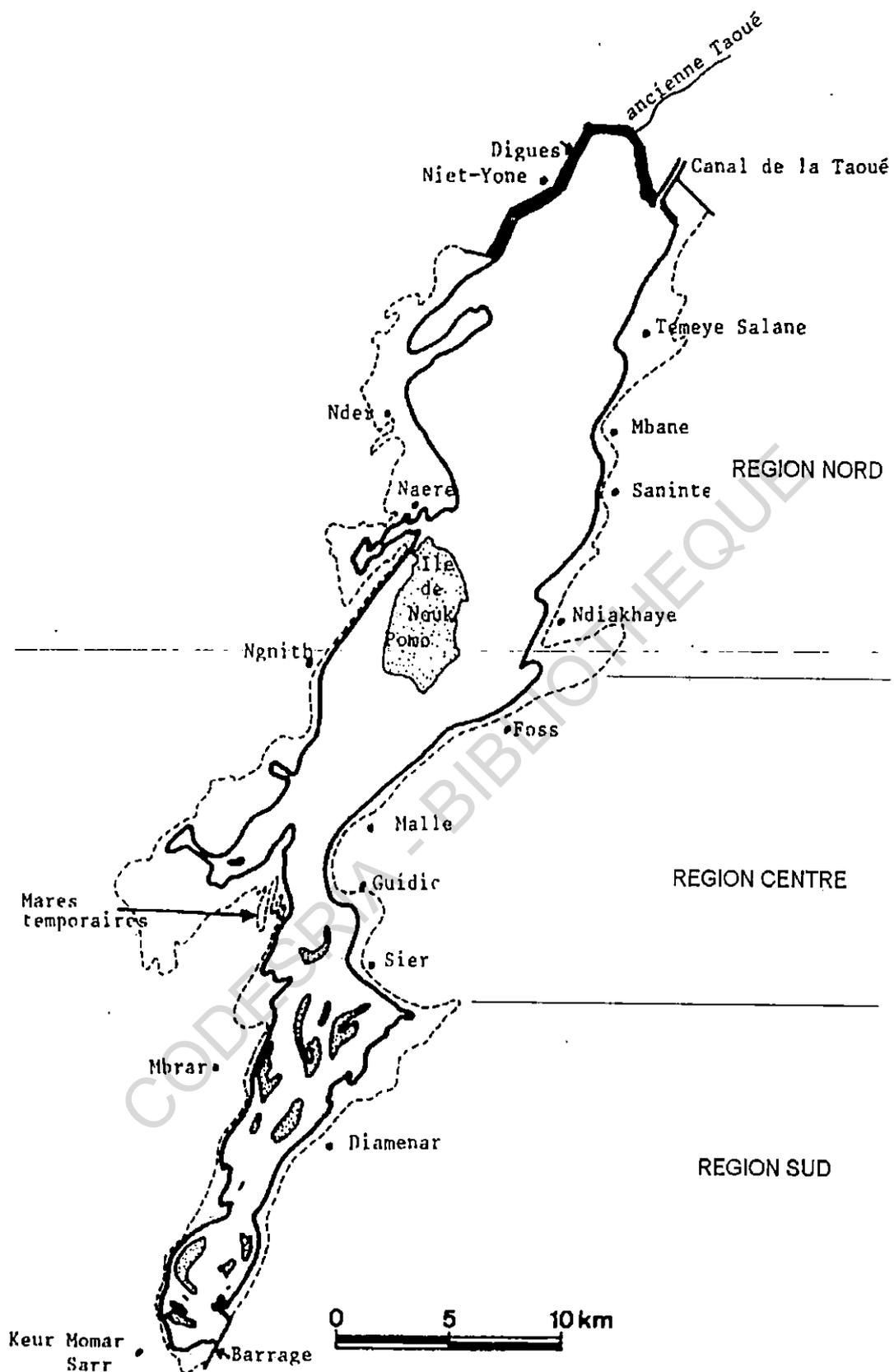


FIGURE 4. — Les régions naturelles du lac de Guiers
(Source : COGELS, 1984)

La région nord du lac de Guiers présente un relief monotone et peu marqué. En rive ouest on note quelques alignements de dunes, entre Nder et Naéré, qui constituent le soubassement de l'île de Diokhor. Le relief se relève légèrement au niveau de Ngnith puis s'accroît davantage au nord du village de Mbrar où les alignements de dunes atteignent plus de 50 m de hauteur et sont séparés par des mares isolées lors du retrait des eaux du lac.

L'alimentation en eau du lac dépend des réserves du fleuve Sénégal auquel il est relié par la Taoué, marigot sinueux de 26 km de long ; un canal de substitution rectiligne long de 17 km a été creusé et mis en service en 1974. Sa fonction est d'optimiser les remplissages du lac.

Le Guiers formait à l'origine la partie aval du réseau hydrographique fossile du Ferlo dont il était le prolongement naturel. Celle-ci, connue aussi sous le nom de vallée du Bounoum, dans sa partie amont est orientée E-W puis s'incurve vers le nord au niveau de Keur Momar Sarr, avant de rejoindre le lac de Guiers (figure 5). Au nord-ouest, il communique avec la cuvette du Ndiael (figure 6) à laquelle il est relié par le chenal de Nieti-Yone fermé depuis 1956 par une digue. Cet ensemble forme ce que l'on appelle le « Système fluvio-lacustre du Guiers ».

Le lac de Guiers a très tôt suscité l'intérêt des populations riveraines et des autorités ; intérêt amplement justifié par le fait qu'il s'agit du seul grand réservoir d'eau douce de surface de tout le pays. Les différents aménagements mis en place n'ont fait que confirmer son rôle. Avec l'édification des grands barrages sur le fleuve Sénégal, la région du Guiers est devenue un important pôle de développement avec des projets de l'envergure du canal du Cayor et plus récemment celui des Vallées Fossiles.

Le lac de Guiers fournit actuellement une partie des besoins en eau d'irrigation des casiers de canne à sucre de la CSS installés au nord du lac et ceux des petits périmètres irrigués villageois installés à sa périphérie. Il alimente également les parcelles de la SAED qui exploite les casiers de l'ancien Colonat de Richard-Toll. Environ 20 % des besoins en eau de la ville de Dakar sont pompés et traités sur place à l'usine de la SDE à Ngnith, puis acheminés vers l'agglomération par conduite forcée. L'alimentation en eau du bas Ferlo est assurée par la réserve lacustre depuis septembre 1988.

Dans un futur proche, les réserves du Guiers devraient assurer les besoins en eau du canal de Cayor, important projet d'adduction d'eau vers Dakar et le sud du pays. De plus, il est envisagé de réalimenter la vallée du Car-Car et celle du Ferlo jusqu'à Linguère, dans le cadre du programme « Vallées Fossiles ».

La zone d'étude est donc un ensemble complexe qui comprend outre le lac de Guiers et la Taoué, le Ndiael et la basse vallée du Ferlo ou Bounoum ; elle est située dans la région du Delta. L'histoire de la région et les projets actuels n'autorisent pas une séparation entre les différentes entités composant le système fluvio-lacustre du Guiers. Même si à un moment donné de leur histoire cette séparation a été effective, les voies d'eau sont toujours là pour attester de la profonde unité de la région.

Aujourd'hui, se pose donc la nécessité d'une relecture des zones hydro-géographiques du fleuve Sénégal ; les grands ouvrages hydrauliques ont apporté toute la matière nécessaire à une telle entreprise qui n'est cependant pas l'objet de cette étude.

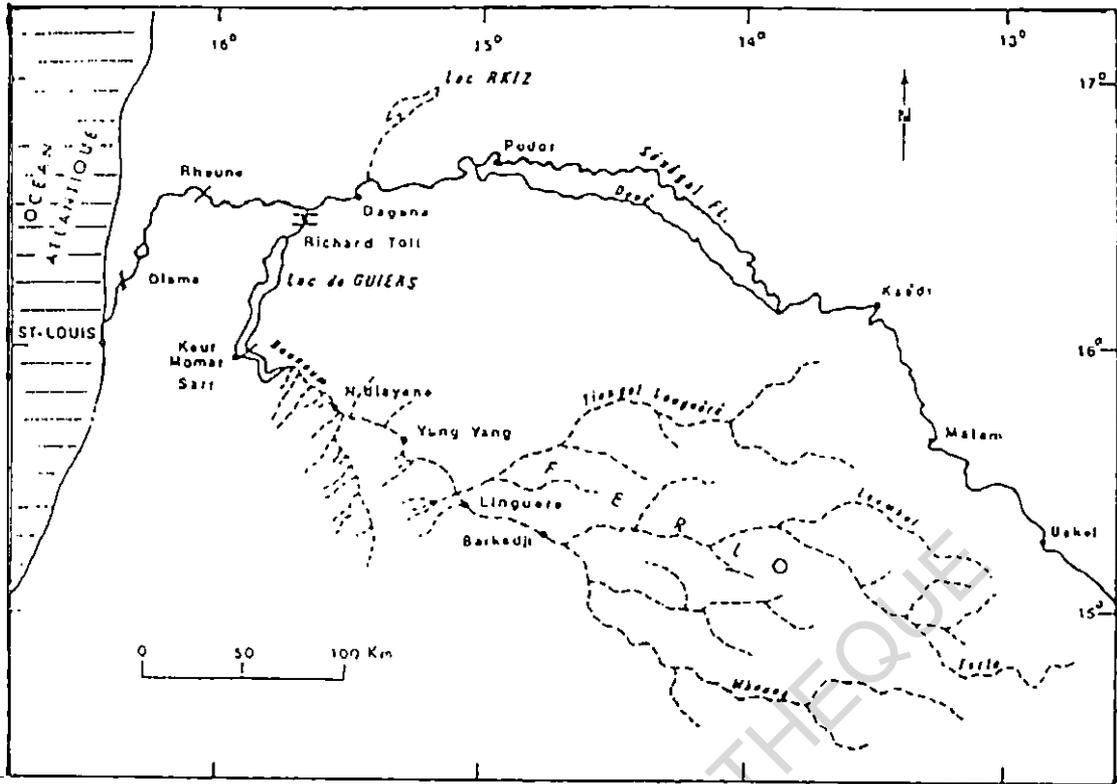


FIGURE 5. — Configuration de la basse vallée du Ferlo
(Source : GAC et al., 1991)

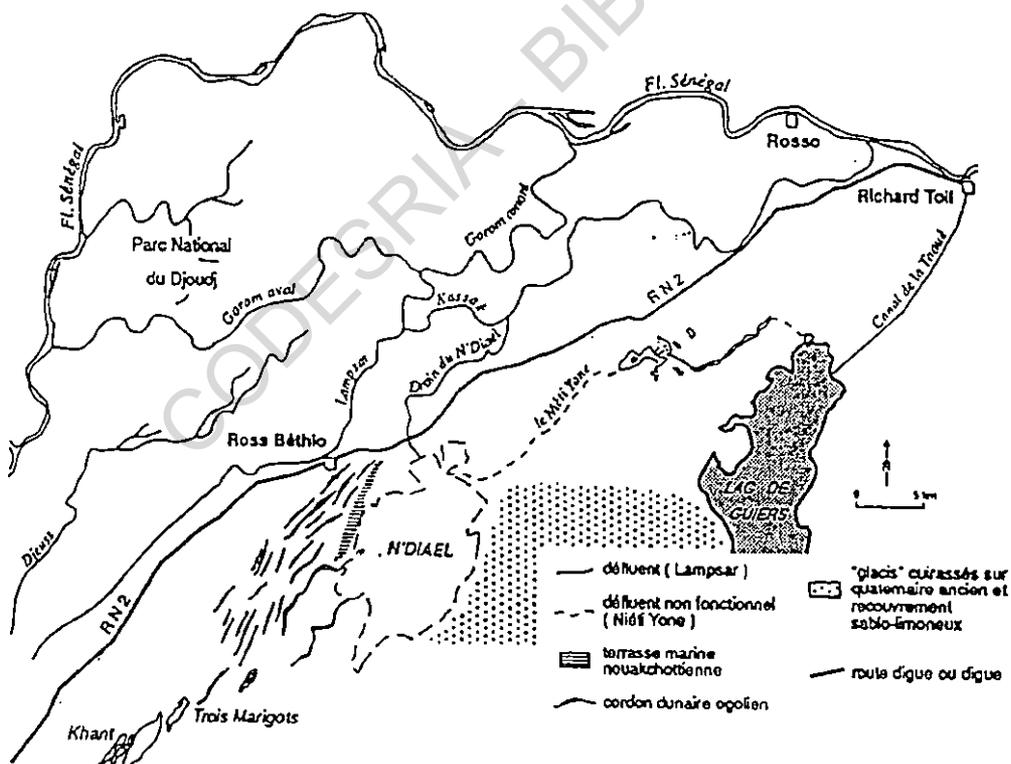


FIGURE 6. — La cuvette du Ndiel
(Source : MICHEL et al., 1993).

2. LA GEOLOGIE ET LA GEOMORPHOLOGIE

Le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien est né entre la fin du Trias et le début du Jurassique supérieur (Pliensbachien), soit entre 200 et 140 millions d'années, au moment du processus de "rifting" qui a conduit à la séparation entre l'Afrique et l'Amérique. Son histoire géologique, marquée principalement par une succession de régressions et d'invasions marines, a permis la mise en place de différentes formations qui constituent aujourd'hui son substrat.

L'évolution du bassin au cours du Quaternaire a été déterminante car elle a abouti à la structure actuelle du système fluvio-lacustre qui conserve encore les héritages de ce passé dont témoignent les formations affleurantes.

2.1. Structure géologique

Le lac de Guiers appartient au bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien ; il est établi sur des formations marines ou continentales (figure 7) mises en place entre le Jurassique supérieur et l'Eocène (BRGM, 1967 ; MICHEL, 1973). C'est une vaste zone de subsidence caractérisée par de rares affleurements de formations tertiaires et la prédominance des dépôts « Plio-Quaternaires⁴ ».

L'épaisseur des formations sédimentaires présentes dans le Delta varie entre 6 000 m à Saint-Louis et à environ 400 m à l'est vers la basse vallée du Ferlo.

2.1.1. Les formations du Tertiaire

Les formations tertiaires sont représentées par les séries de l'Yprésien (Eocène inférieur) et du Continental Terminal. Le Lutétien inférieur (Eocène moyen) n'affleure qu'au sud du lac de Guiers, en amont de Keur Momar Sarr ; il est constitué d'un faciès grésos-argileux.

2.1.1.1. L'Yprésien

Les formations éocènes de l'Yprésien présentent généralement des faciès de marnes et d'argiles blanches ou gris clair, feuilletées, de calcaires et de phosphates de chaux qui se sont déposés sur des sédiments mis en place entre le Néocomien et le Mæstrichtien. Leur épaisseur varie entre 200 m à Saint-Louis et 30 m à Rosso.

L'Yprésien est reconnu dans les sondages en bordure du lac de Guiers (TRENOUS, 1968) : il se rencontre fréquemment en rive est du lac ainsi qu'en rive ouest, notamment au nord de la cuvette de Nder et vers le village de Mbrar. A Ngnith, le toit de l'Yprésien se rencontre à 12 m de profondeur.

⁴ Les sédiments marins rencontrés dans les sondages effectués à Saint-Louis, attribués au Quaternaire, pourraient cependant appartenir partiellement au Pliocène ; ils se seraient mis en place avec le retrait de la mer, qui n'occupe plus alors qu'une étroite bande de quelques kilomètres de long à l'embouchure du fleuve Sénégal (SAOS *et al.*, 1981)

2.1.1.2. Le Continental Terminal

À l'Éocène supérieur, un soulèvement épéirogénique a engendré une forte érosion différentielle sous un climat alors de type subaride. Le matériel détritique issu de cette érosion différentielle s'est déposé dans les parties basses du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien où il recouvre les formations marines de l'Éocène inférieur et forme la série du Continental Terminal.

Le Continental Terminal présente généralement un faciès sidérolithique, composé essentiellement de grès hétérométriques, argileux, bariolés, blancs ou rouges, contenant quelque fois des graviers, des lentilles et des niveaux d'argile kaolinique. Les couches détritiques sont par endroits surmontées d'une cuirasse ferrugineuse ; cette cuirasse atteint parfois un mètre d'épaisseur.

Le Continental Terminal n'affleure pas autour du lac mais apparaît à l'extrême est, sur le dôme du Guiers. Après l'Éocène, le Ferlo qui s'est affaissé voit les dépôts détritiques du Continental Terminal s'y entasser au cours du Néogène ; aujourd'hui encore ce faciès y demeure le plus répandu.

2.1.2. Les formations du Plio-Quaternaire

Les formations plio-quaternaires forment la majeure partie des affleurements dans la région du lac de Guiers (figure 8). Certaines de ces formations – notamment la cuirasse ferrugineuse – sont partiellement attribuées au Pliocène. Elles sont constituées de deux niveaux de cuirasse ferrugineuse, des massifs de dunes ogoliennes et des formations Nouakchottiennes et Post-Nouakchottiennes.

Sur le rebord septentrional du delta, on note quelques affleurements de calcaires lacustres, plutôt des taches, masqués par des sables de couverture.

2.1.2.1. La cuirasse ferrugineuse

Il s'agit d'une cuirasse ferrugineuse compacte et piquetée de grains de quartz qui revêtait la surface de remblaiement de la fin du Pliocène. Elle est recouverte par endroits d'une cuirasse gravillonnaire bien indurée dite cuirasse secondaire ; à proximité se retrouvent des gravillons ferrugineux non cimentés, avec une matrice argilo-sableuse ; elle est datée de la fin du Pliocène.

Cette cuirasse dite aussi fini-pliocène est complexe ; elle tronque soit le sommet de la cuirasse pliocène, soit le Continental Terminal. C'est en réalité un glacis polygénique façonné à plusieurs reprises au cours du Quaternaire ancien et moyen (MICHEL, 1973).

Les cuirasses ferrugineuses se rencontrent essentiellement à l'est du lac de Guiers où elles recouvrent les formations détritiques du Continental Terminal. Elles affleurent à Mbane, Saninthe, Sier, Diamenar et aussi à Richard-Toll, près du terrain d'aviation. Quelques témoins de ce niveau de cuirasse sont également présents à l'est de Ross-Béthio.

À Saninthe, les blocs de cuirasse gravillonnaire reposent sur des marnes blanches, probablement Yprésiennes. On note également une superposition de cuirasses sur le bas plateau à l'est de la digue de Keur Momar Sarr ; ce plateau, incliné vers le SSW, est recouvert d'une cuirasse épaisse d'environ 1,50 m.

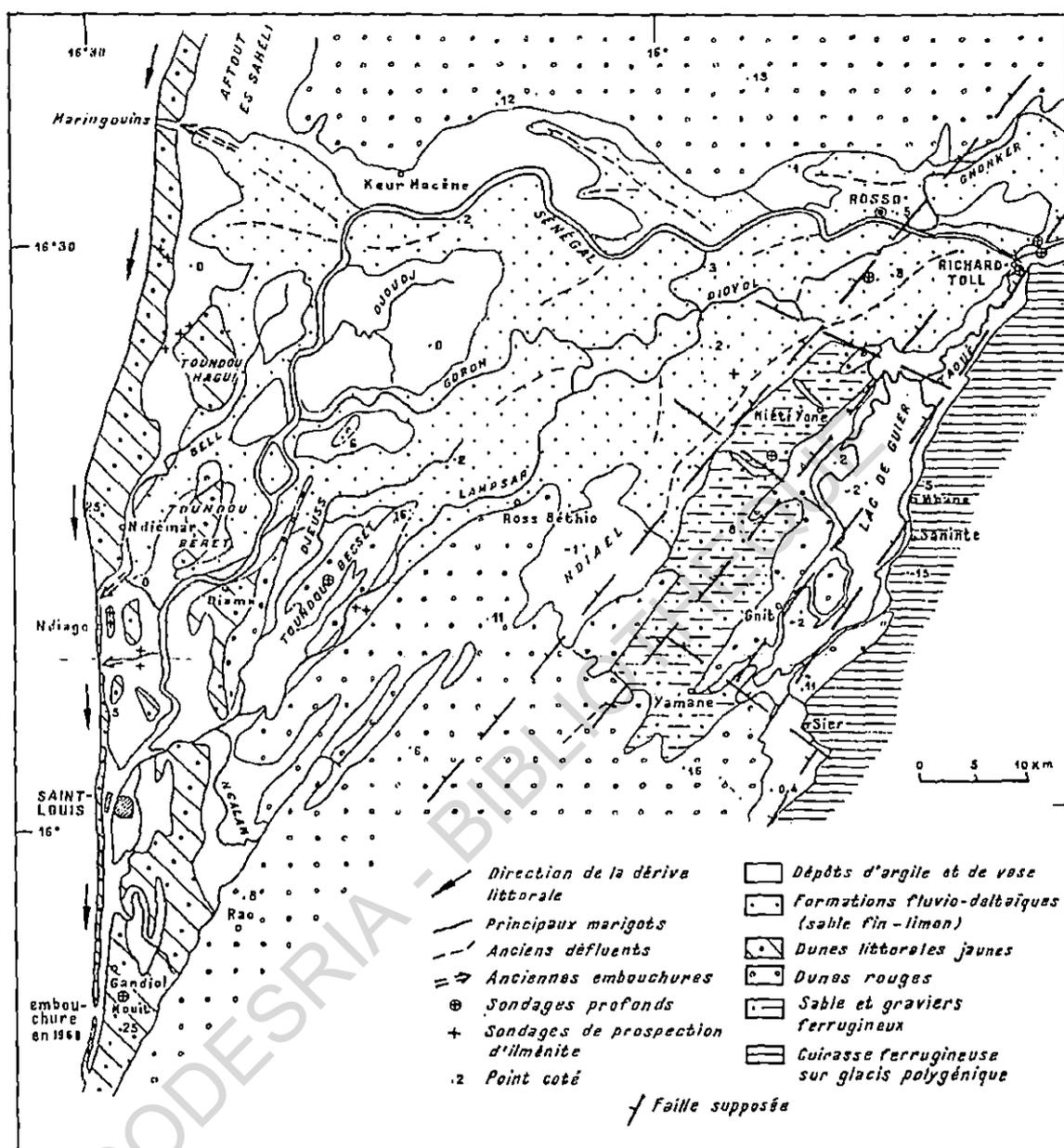


FIGURE 7. — Croquis géologique et géomorphologique du Delta du Sénégal (MICHEL, 1973).

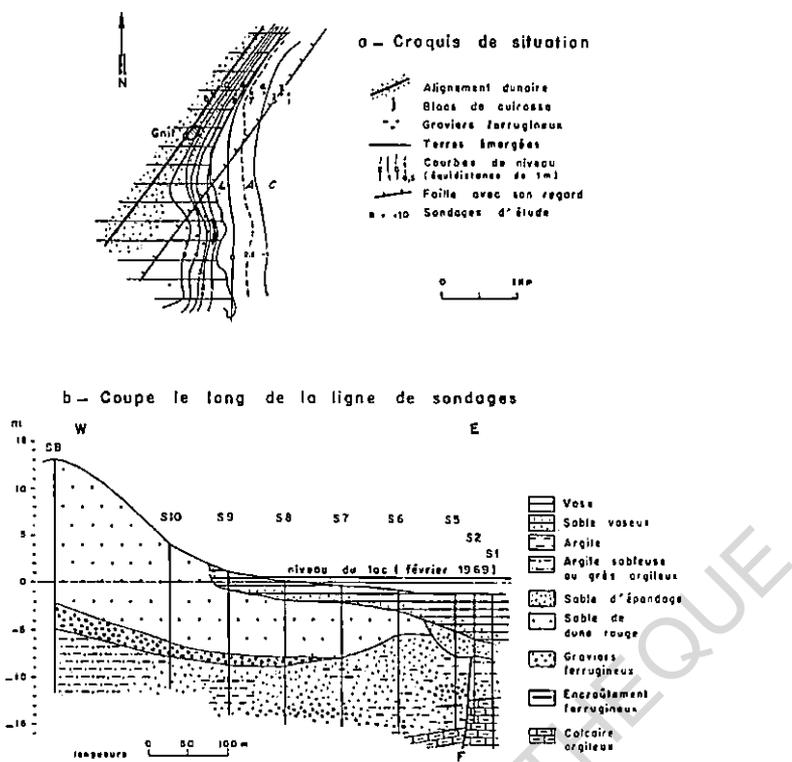


FIGURE 8. — Les formations quaternaires sur la rive occidentale du lac de Guiers à Ngnith (source : MICHEL, 1973).

2.1.2.2. Les dunes ogoliennes

Les dunes ogoliennes dites aussi dunes rouges sont formées de sables homogènes rouges en surface et tirant sur l'orange en profondeur. Elles s'alignent en massifs de plusieurs dizaines de kilomètres de long avec des hauteurs variant de 10 à 30 m.

Ces formations ogoliennes, aujourd'hui relativement fixées, sont présentes autour du lac de Guiers, notamment en rive ouest où l'on retrouve d'importants alignements de dunes élevées, entre Ngnith en région centrale et Keur Momar Sarr à l'extrême sud. Elles sont également présentes à l'est, vers Malle. Elles recouvrent la majeure partie du Ferlo.

2.1.2.3. Les formations Nouakchottiennes et Post-Nouakchottiennes

Les formations Nouakchottiennes et Post-Nouakchottiennes sont essentiellement composées de sables fins, de limons, d'argiles et de sables vaseux et argileux qui se sont déposés dans la partie terminale du Delta. Le Nouakchottien affleure en plusieurs endroits et présente généralement un faciès de sables marins contenant des coquilles, notamment de *Anadara senilis*, de *Dosinia isocardia*, et de *Cardium edule*.

Les levées Post-Nouakchottiennes et deltas de rupture de levées formés de sables fins et de limons, sont aussi dénommés "bourelets de berges". Les cordons littoraux de la partie aval du Delta, appelés dunes jaunes, se sont édifiés au cours de l'épisode du Tafolien ; ils sont formés de sables allant du brun pâle au jaune clair et ont une hauteur moyenne de 6 m.

2.2. Paléoclimatologie et évolution géomorphologique au Quaternaire récent

Au cours du Quaternaire, différentes fluctuations climatiques et glacio-eustatiques ont été mises en évidence (MICHEL, 1973 ; GAC *et al.*, 1993). Elles se sont traduites par des phases de transgressions et de régressions marines. Les transgressions coïncident avec les épisodes humides et les régressions avec des épisodes climatiques arides.

L'évolution géomorphologique de la vallée du fleuve Sénégal au cours du Quaternaire a été déterminée par ces deux facteurs essentiels que sont les phases de régressions et de transgressions marines et les grandes oscillations climatiques. Celles-ci ont provoqué successivement des phases de sédimentation et d'érosion.

L'interaction de ces deux phénomènes a été déterminante sur la morphogenèse, aussi ont-ils fortement marqué les paysages qui conservent encore à l'heure actuelle les témoins de ce passé. Le lac de Guiers en tant qu'entité géographique incluse dans le Delta est tributaire de son évolution géomorphologique.

Divers travaux ont contribué à préciser les grandes étapes de la morphogenèse ; nous citerons ceux de AUDIBERT (1970), MICHEL (1973), SALL (1982), MONTEILLET (1988). Le constat majeur à ce niveau est qu'elle est dictée par les grandes oscillations climatiques du Quaternaire qui se sont déroulées suivant trois grandes phases (tabl. I) :

- le Quaternaire ancien et moyen⁵ marqué par trois épisodes humides, longs d'environ 200 000 ans chacun, séparés et encadrés par trois phases arides marquées par un recul de la mer (- 100 mètres par rapport au niveau actuel, (MICHEL, 1973) ; dans l'ordre chronologique, on distingue les transgressions marines du Tafarien (vers 125 000 ans BP), de l'Aïoujien⁶ et de l'Inchirien⁷ ;
- le Quaternaire récent qui a aussi connu des successions d'épisodes humides et d'épisodes secs dont l'Ogolien, le Tchadien, le Nouakchottien et le Post-Nouakchottien ;
- l'époque subactuelle et actuelle marquée surtout par une péjoration climatique.

Mais c'est surtout au Quaternaire récent que se sont édifiés les grands ensembles de paysage que l'on rencontre aujourd'hui dans la région du Delta et au lac de Guiers. L'évolution à l'époque subactuelle et actuelle contribue au remaniement des paysages.

⁵ Le Quaternaire ancien et moyen a abouti à la formation de trois glacis cuirassés et étagés connus sous les noms de haut, moyen et bas glacis raccordés par des terrasses ; ses effets ont été minimes sur la morphogenèse du Delta du Sénégal

⁶ L'Aïoujien correspondrait au Harounien, le niveau marin le plus élevé observé pendant le dernier interglaciaire

⁷ L'Inchirien correspondrait à un interstade de la dernière glaciation ; elle séparerait le Würm ancien du Würm récent

TABLEAU I
Les principales phases de la formation de la vallée du Sénégal
 (Source : BRGM, 1967)

Morphogenèse		Climat	Ages absolus (années avant 1950)	Nomenclature	
Erosion	Sédimentation			Régionale	Générale
agrandissement des méandres légère entaille	dépôts argileux des cuvettes levées de rives convexe	sahélien plus sec	2 000 BP	Actuel Subactuel	} Holocène
	hautes levées, delta cordons littoraux sable marin et vase	assez humide	5 500 BP		
	remaniement de dunes	humide		Post- Nouakchottien Nouakchottien	
	dépôt d'argile fluviale	sec	8 000 BP à 11 000 BP ?		
recreusement du lit	premier remblai barrage de dunes rouges nappe de graviers	très aride	Ogolien	Würm récent	
creusement sous le niveau de la mer	basse terrasse (graviers)	subaride (contrasté)			
creusement (bas glacis)	calcaires lacustres moyenne terrasse (poudingue)	subaride	30 000 BP à 40 000 BP ?	Inchirien supérieur	Interstade
creusement	haute terrasse	(sud soudanien)		Inchirien inférieur	Würm ancien Inter-glaciaire
creusement		subaride			Riss ? Inter-glaciaire ?
Surface cuirassée sur les grès du Continental terminal					Pliocène supérieur

2.2.1. Les étapes de la morphogenèse au Quaternaire récent

Au Quaternaire récent, c'est-à-dire depuis environ 30 000 ans BP, une succession de régressions et de transgressions marines conjuguée aux grandes oscillations climatiques a entraîné la formation des grands ensembles de paysages de la façade atlantique du bassin du Sénégal. C'est durant cette période, qui recoupe approximativement la seconde moitié du Pléistocène supérieur et l'Holocène, que le relief du bassin a acquis sa configuration actuelle. À cette époque, s'est mis en place le modelé du Delta. La figure 9 résume les grandes étapes de

la morphogenèse, en rapport avec les variations du niveau marin et les différents épisodes climatiques. Parmi ces épisodes, les plus marquants ont été : l'Ogolien, le Tchadien, le Nouakchottien et le Post-Nouakchottien.

D'abord aride à l'Ogolien, le climat est devenu plus humide au Tchadien puis au Nouakchottien où survint une importante invasion marine, puis retour à un climat plus aride après. La pente très basse du fleuve, environ 0,02 ‰, fit que les impacts de ces variations de niveau marin se répercutèrent jusque dans le haut bassin.

La morphogenèse a été essentiellement marquée par une succession de phases d'érosion et de phases de dépôt. Cette succession se résume à deux grandes phases : la grande phase aride et l'invasion nouakchottienne.

2.2.1.1. La grande phase aride ou Ogolien

Au cours de la dernière grande régression glacio-eustatique, le climat a évolué vers l'aridité, avec un niveau marin très bas (environ -120 m). L'épisode de l'Ogolien (21 000 à 13 000 ans BP) coïncide avec une importante régression marine ; le niveau de la mer serait descendu jusqu'à -110 ou -120 m entre 20 000 et 17 000 ans BP.

Le début du Quaternaire récent a été marqué par un creusement intense dans tout le bassin du fleuve Sénégal consécutif à un abaissement du niveau de base et à l'installation progressive d'un climat aride. On assiste alors à la mise en place de la nappe des graviers sous berge en contrebas de la basse terrasse

Sous un climat de type subaride, une érosion linéaire s'est mise en place, favorisée par de violentes crues de courte durée qui ont entraîné un creusement le long du cours inférieur du Sénégal, dans les formations gréseuses du Continental Terminal et dans les formations calcaires et argileuses de l'Éocène.

Après la jonction des différentes branches vers Linguère, le Ferlo, alors fonctionnel creuse dans les formations éocènes de la vallée du Bounoum et le sillon du lac de Guiers et rattrape ainsi le cours inférieur du Sénégal (BRGM, 1967 ; MONTEILLET, 1988).

Le réseau de failles de la bordure Est du Delta a du rejouer, au début de la régression, en même temps que la subsidence se poursuivait sur le littoral. Le Ferlo suit le réseau de fractures sud-ouest du bombement anticlinal du lac de Guiers qui s'infléchit vers le sud-est en direction Yang-Yang.

L'aridité très intense au cours de l'Ogolien, conjuguée à l'action des alizés continentaux a eu comme conséquence la formation de grands ergs dunaires longitudinaux orientés NE-SW que l'on retrouve dans le Trarza et le Brakna (au sud-ouest de la Mauritanie), dans le Cayor, la région de Thiès et jusque dans le Saloum.

Ces massifs dunaires sont également présents dans la bordure sud du Delta, entre Ross-Béthio et Rao. Elles recouvrent le Ferlo septentrional où leur épaisseur ne dépasse guère 3 m, la présence d'une cuirasse compacte gênant la mise en place d'un modelé dunaire continu.

C'est ELOUARD (1959) qui leur a attribué le nom de « Ogolien », à partir de l'Ogol massif dunaire situé au nord du lac R'kiz. Connues aussi sous le nom de dunes rouges, à cause de leur aspect rubéfié, ces dunes ont barré le lit du fleuve jusqu'à la hauteur de Kaédi ainsi que le Bounoum, en aval de Linguère et le Gorgol, comme en témoignent les lambeaux de dunes que l'on retrouve dans le lit majeur entre Podor et Kaédi. Le rôle des dunes rouges reste encore aujourd'hui déterminant dans le colmatage de certains axes hydrauliques, en particulier dans le Ndiael. Le régime du fleuve Sénégal à l'Ogolien était endoréique ; il abandonne sa charge

solide pour édifier dans la vallée le premier remblai sablo-argileux dont les dépôts bordent le lit majeur du fleuve entre Bakel et Kaédi.

L'Ogolien revêt une grande importance pour la pédologie mais aussi pour l'agronomie ; ses dépôts portent généralement des sols jeunes, peu évolués, riches en matières organiques. Dans le bassin du Sénégal, ils fournissent les principales terres arables.

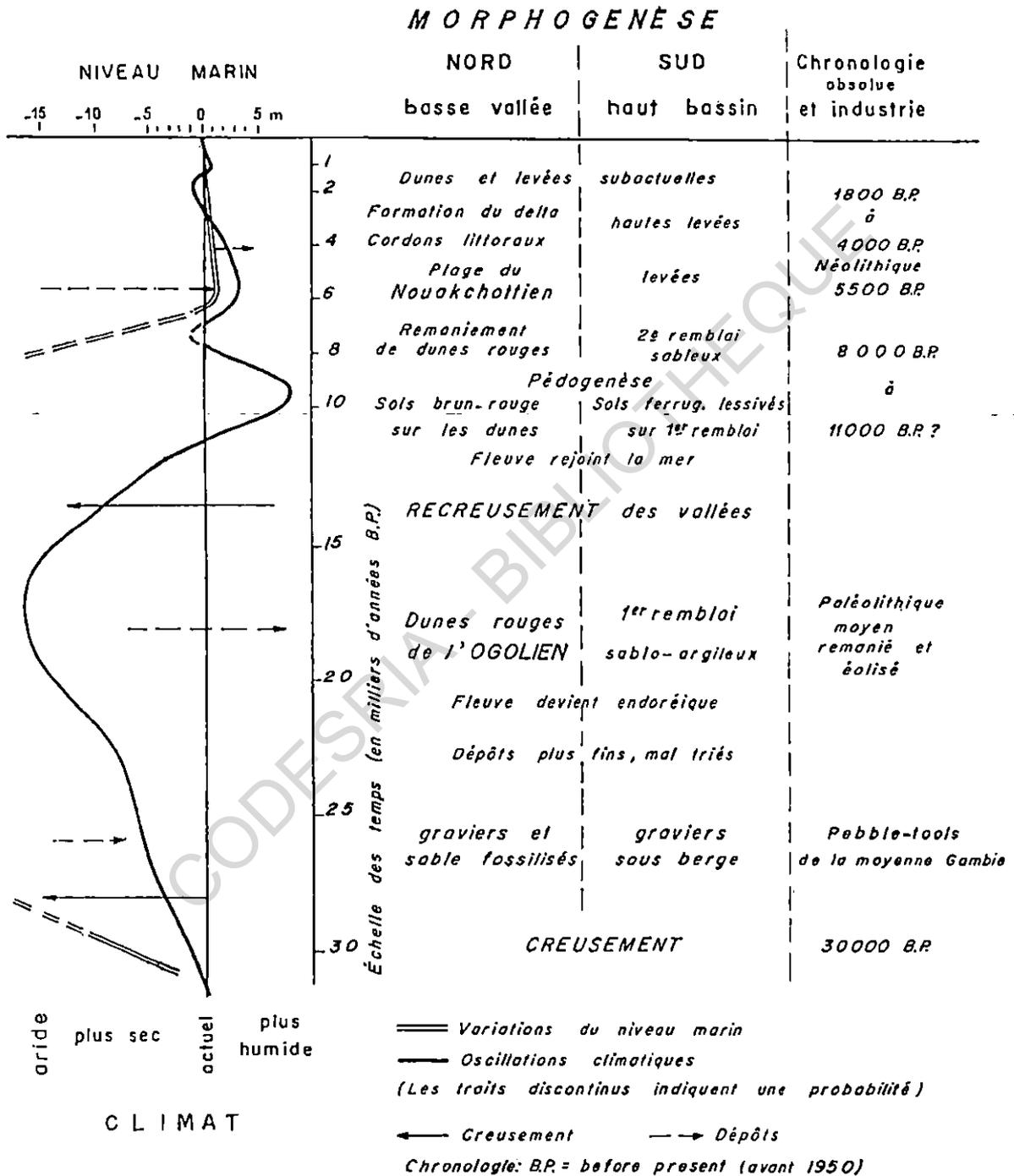


FIGURE 9. — Les fluctuations climatiques et les grandes étapes de la morphogenèse (Source : MICHEL, 1973).

2.2.1.2. L'invasion nouakchottienne

Après l'Ogolien, le climat est devenu progressivement plus humide. C'est l'épisode du Tchadien (10 000 à 6 800 ans BP) au cours duquel le niveau de la mer s'est élevé progressivement vers -50 m. Le niveau marin aurait atteint -77 m vers 14 000 ans BP selon FAURE et ELOUARD (1967). Les dunes, fixées par la végétation, se sont rubéfiées (MICHEL et SALL, 1984).

Le Tchadien débute par un bref épisode communément appelé seconde phase d'entaille du réseau hydrographique. La côte atlantique s'est régularisée et des dunes littorales se sont édifiées dans le Delta et la région des Niayes. La pédogenèse durant cette période a été marquée par la formation de sols bruns - rouges sur les grands ergs dunaires du Trarza, du Brakna et du Sénégal septentrional.

Les axes hydrauliques secondaires comme le Ferlo et le Gorgol, colmatés lors de l'Ogolien, creusent dans le substratum (en l'occurrence la surface du premier remblai) pour atteindre le fleuve Sénégal qui entaille les cordons dunaires pour rejoindre de nouveau l'océan. Le Ferlo, redevenu fonctionnel, a repris le cours de son ancienne vallée. Il trace de grands méandres en amont de Keur Momar Sarr et franchit ensuite le sillon du lac de Guiers pour se jeter dans le fleuve, en amont de Richard-Toll.

La fin du Tchadien est marquée par un éphémère épisode aride appelé petite phase sèche datée entre 8 000 et 6 800 ans BP. Celle-ci a été principalement marquée par le remaniement des dunes ogoliennes et la formation d'alignements dunaires dont l'écart varie entre 200 et 400 m. Au sud-ouest du lac de Guiers, en face de Sier, des alignements de dunes orientées nord-sud se sont formés. Sur le bord méridional du Delta, sur les grands cordons de surbaissés de Toundou Besset, Ross-Béthio et Makhana se sont formés de petits alignements orientés NNE-SSW avec un écartement voisin de 300 m ; les interdunes sont occupées par des mares temporaires comme au lac de Guiers.

La mer est progressivement remontée, entraînant une sédimentation de type marin ou lagunaire. Le Nouakchottien (6 800 à 4 200 ans BP), qui est la dernière grande transgression marine, a vu s'esquisser l'actuelle configuration du paysage du système fluvio-lacustre du Guiers (figure 10). La sédimentation marine a débuté vers 8 800 ans BP dans le secteur de Rosso. Dans un premier temps, la mer n'occupait que le lit du fleuve formant une ria allongée qui, avec la montée de la mer s'est élargie en un petit golfe avec une sédimentation sableuse. La mer a également occupé les interdunes des cordons dunaires ogoliens à l'est de Saint-Louis et les a élargi en doigts de gant.

Au maximum de la transgression nouakchottienne, vers 5 500 BP, correspond une élévation du niveau de la mer jusqu'à 1,5 à 2,5 m au-dessus du zéro actuel. Il en a résulté la formation d'un vaste golfe, largement ouvert sur la mer, se terminant vers Bogué, à 250 km de l'embouchure actuelle, et dont les rives étaient colonisées par une dense formation de mangrove. La langue salée atteignait probablement Diouldé Diabé, à 450 km de l'actuelle embouchure. Le lac R'kiz, le lac de Guiers et le Ferlo sont noyés dans une vaste ria. La mer a remonté le Bounoum jusqu'en amont de Naudi ; c'est ce qui sans doute explique le micro-relief de sols salés et la nappe phréatique très chargée en chlorures de sodium que l'on trouve actuellement dans cette vallée morte ainsi que dans le Delta, l'Aftout es Sahéli et la rive orientale du lac de Guiers.

Une forte houle de nord-ouest a engendré une dérive littorale nord-sud qui mobilisait d'importantes quantités de sables. Des cordons littoraux allongés dans le même sens se sont alors formés et ont transformé le golfe en une lagune qui a d'abord occupé la partie la plus septentrionale du Delta puis s'est progressivement étendue vers le sud. Une sédimentation de type marin ou lagunaire se met alors en place, favorisée par la montée du niveau marin. Le matériel ainsi mobilisé est repris par les eaux de mer, donnant naissance à la terrasse nouakchottienne, large de 4 km, longue d'environ 25 km et d'altitude +1 à 2 m IGN. Cette terrasse est constituée de sables légèrement argileux et vaseux où se développe une steppe arbustive à *Acacia Seyal* et une faune dominée par *Anadara senilis*.

De nos jours encore, la terrasse nouakchottienne occupe une place importante dans le modelé du Delta ; elle borde à l'est l'ensemble dunaire de Maka Diama. Quelques lambeaux subsistent entre le Djeuss et le cours inférieur du Lampsar, de même qu'aux pieds des dunes rouges de Toundou Besset et de Ross-Béthio et aussi au sud de Keur Momar Sarr. Près de Ngnith, la base de ces dépôts se retrouve à la cote -6,55 m ; ils reposent sur des sables d'épandage du Quaternaire moyen. La terrasse nouakchottienne porte des sols hydromorphes à pseudo gley et est généralement couverte d'une forêt mixte marginale, arbustive et herbacée.

C'est à cette époque que s'est développée la civilisation du Néolithique ; les îlots de dunes rouges de la région de Saint-Louis étaient des sites d'habitat de pêcheurs comme en témoignent les débris de poterie et les niveaux de cendre découverts à environ 1 m dans le sable dunaire.

Le Post-Nouakchottien débute par le bref épisode du Tafolien (4 000 à 2 000 BP) qui correspond à une période aride ; il coïncide avec une régression marine qui, à son maximum, se caractérise par un lent retrait de la mer. Le régime du fleuve était beaucoup plus contrasté que de nos jours, d'où une sédimentation et un alluvionnement très importants. Les débits très élevés et la compétence du fleuve lui permettaient de charrier de grandes quantités d'éléments fins en suspension. Il édifia un réseau de levées, dites Post-Nouakchottiennes, des deltas de rupture de levées et un delta digité, en forme de patte d'oie à la hauteur de Richard-Toll.

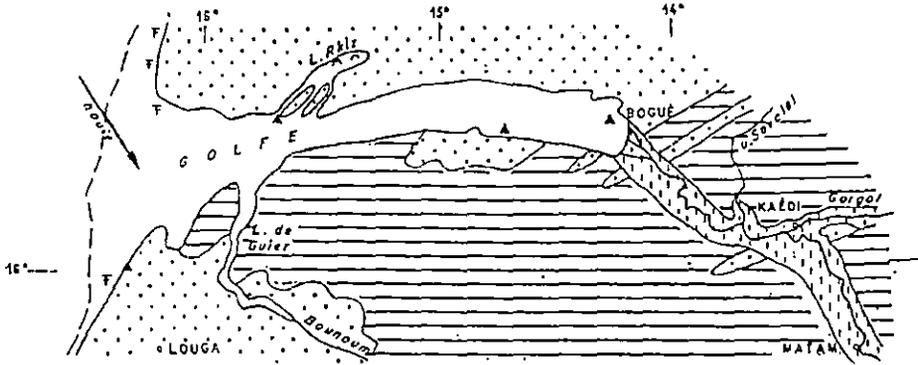
Ce delta, long de plus de 200 km, s'est substitué au golfe Nouakchottien. À l'ouest de Bogué, le fleuve se divisait en plusieurs bras qui coulaient parmi les dunes littorales, formant autant d'embouchures.

La vallée du Ferlo présentait un réseau de méandres accompagnés d'un faisceau de levées encore visibles sur les photographies aériennes. En amont de l'étroite lagune qui occupait le sillon du lac de Guiers et la vallée du Bounoum, le Ferlo a construit un delta miniature. Le lac de Guiers s'est formé à la suite du barrage de la dépression par les dépôts deltaïques du Sénégal près de Richard-Toll. À la fin du Post-Nouakchottien, le fleuve dessinait déjà dans certains secteurs des séries de méandres encore visibles de nos jours.

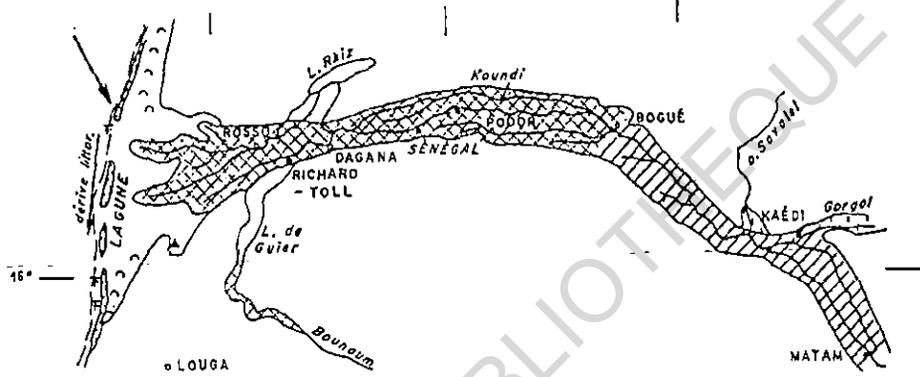
Au plan bioclimatique, on assiste à l'installation d'une formation arbustive composée essentiellement d'Acacias ; parallèlement, on note l'intensification des alizés et la formation de nouveaux cordons littoraux, connus sous le nom de dunes jaunes orientés nord-sud, dans le sens de la dérive littorale. Elles conservent, encore, à l'heure actuelle, une dynamique importante.

Les hautes levées fluviales ou fluvio-deltaïques appelées *fondé* par les paysans toucouleurs constituent le trait majeur de la vallée alluviale du Sénégal. Les parties les plus hautes de ces levées portent des villages où les hommes sont à l'abri des inondations.

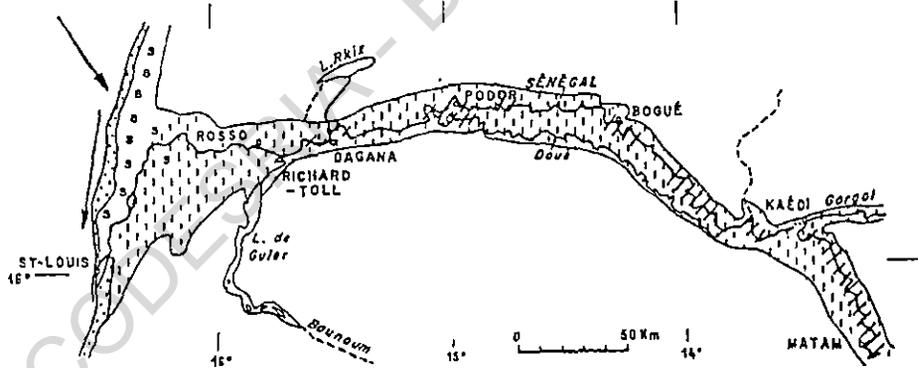
a - Maximum de la transgression : Nouakchottien 5500 ans B.P.



b - Formation du delta : Situation vers 2500 ans B.P.



c - Époque subactuelle et actuelle



- | | | | |
|-----|--------------------------------|-------|--------------------------|
| — | Glacis généralement cuirassés | | Décantation d'argile |
| ••• | Dunes rouges | /// | Levées fluviales |
| F | Plage fossilifère | ⊗ | Dépôts fluvia-deltaïques |
| o o | Faune lagunaire abondante | — | Cardons littoraux |
| ▲ | Pollens ou racines de mangrove | s | Sebkha |
| — | Littoral actuel | - - - | Vallée morte |

FIGURE 10. — Evolution de la basse vallée du Sénégal depuis la dernière transgression (BRGM, 1967)

2.2.2. L'évolution subactuelle et actuelle

A partir de 2 000 ans BP, le climat a évolué vers la sécheresse ; il était beaucoup plus sec que l'actuel avec comme conséquences majeures :

- l'installation de l'aridité dans le Sahara ;
- la recrudescence des actions éoliennes dans les régions littorales et le changement de direction des alizés maritimes ;
- l'arrêt de l'édification des hautes levées post-nouakchottienne et l'édification de levées plus petites dites levées subactuelles ;
- l'agrandissement des méandres et la fermeture des anciennes embouchures par les dunes littorales ;
- la mise en place de méandres façonnés par le sapement des bourrelets de berge lors de la crue annuelle.

Entre les réseaux de levées et deltas de rupture de levées s'installent des cuvettes inondées par les crues annuelles du fleuve et où les eaux se décantent, en tapissant le fond d'argiles brunes. Les cordons littoraux s'épaississent et comblent progressivement le golfe ; l'écoulement du fleuve est désorganisé. Les embouchures septentrionales se ferment et le fleuve prend alors une direction sud-ouest.

L'intensification de l'érosion fluviale et le sapement des bourrelets de berge lors de la montée de la crue entraîne la formation des levées subactuelles et actuelles à l'intérieur des méandres ; leur matériel est le même que celui des levées post-nouakchottiennes mais avec des formes plus fraîches et une altitude plus basse.

Le Ferlo a subi des transgressions holocènes accompagnées d'une sédimentation active entre 3 340 et 1 545 ans BP malgré des étiages prononcés. Vers 1 900 BP, suite à une baisse des écoulements dans le haut bassin et à un changement des lignes de rivage dans le delta, le Ferlo a connu une invasion saline durable via la dépression du lac de Guiers jusque vers 1 545 ans BP (MONTEILLET, 1988). Les récits de voyage de la période historique fournissent de nombreux témoignages de la submersion de la vallée du Sénégal, du lac de Guiers et du Ferlo par les eaux du fleuve ou la mer.

La mise en évidence d'une faune riche en espèces marines et saumâtres dans les sédiments de la partie terminale de la vallée du Ferlo (figure 11) atteste d'une communication avec la mer plusieurs mois par an, peut-être sur une longue période. Cette présence, due vraisemblablement à une invasion marine dans la basse vallée et le Ferlo, datée d'environ 1 900 BP (Holocène supérieur), serait à l'origine des forts taux de salinité que l'on mesure aujourd'hui encore dans cette zone (MONTEILLET et al, 1981).

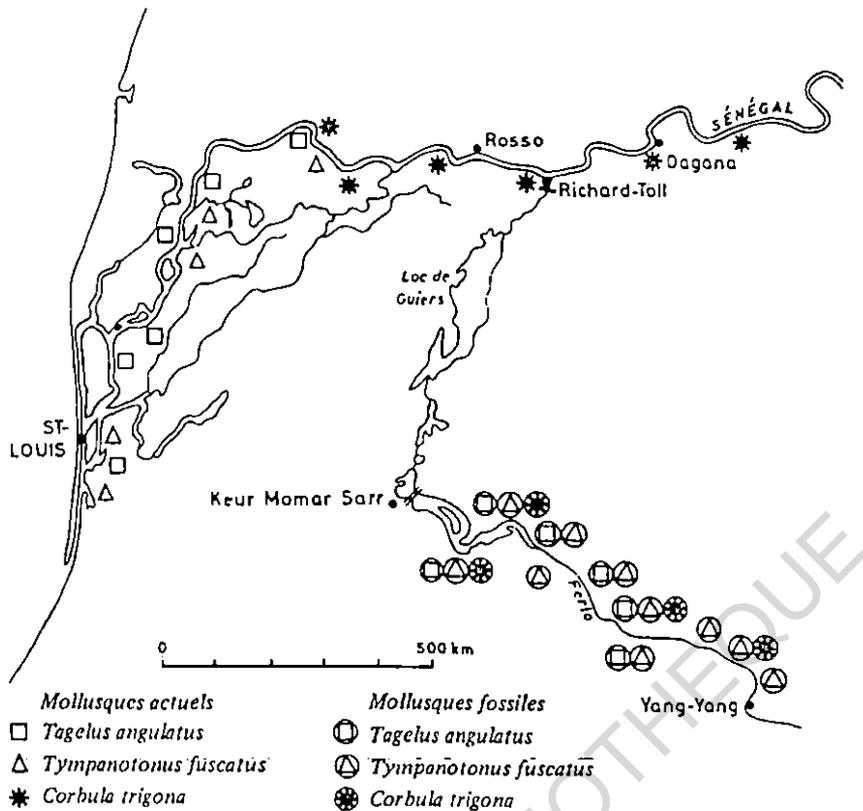


FIGURE 11. — Mise en évidence d'une faune marine dans les sédiments de la basse vallée du Ferlo (Source : MONTEILLET et al., 1981)

La sédimentation a également eu comme résultat l'édification d'une flèche littorale sableuse : la Langue de Barbarie qui borde le fleuve Sénégal et qui, selon MICHEL (1973) existerait depuis au moins le milieu du XVII^e siècle. En 1658, elle se terminait à la « Pointe aux Chameaux », à 2,5 km au sud de l'Île de Saint-Louis, selon la carte de JOIRE (1947). En 1970, l'embouchure se situait à 20 km environ au sud de Saint-Louis.

La morphodynamique actuelle dans le Delta est marquée par deux facteurs interdépendants qui sont l'accentuation du processus de sécheresse et la recrudescence des actions éoliennes. La crue annuelle façonne la vallée alluviale tandis qu'en saison sèche, les terrains subissent les effets de la déflation éolienne.

La vallée du Bounoum, est progressivement colmatée par les apports des petits oueds latéraux et par les dépôts au pied des ravines qui incisent son rebord. Les oueds charrient du sable qu'ils abandonnent dans la vallée sous forme de cônes aplatis.

Certaines cuvettes sursalées, soumises à une importante déflation éolienne en fin de saison sèche évoluent en *sebkha* ; c'est le cas du Ndiael et du Djoudj. La déflation éolienne trouve également un terrain favorable dans les espaces défrichés et planés pour l'irrigation, mais souvent non exploités. Le sable fin et les limons soulevés s'accumulent et se fixent contre de petites plantes herbacées, formant des champs de *nebkha* (MICHEL et al., 1993), visibles sur la route de Ross-Béthio en bordure ouest du Ndiael, à proximité des campements peuls. Ces *nebkha* constituent localement de véritables dunes d'obstacles. Une autre conséquence des actions éoliennes est le colmatage par le matériel éolien des anciens axes hydrauliques qui se réduisent localement à un chapelet de mares (SALL, 1993).

L'évolution géomorphologique du bassin du fleuve Sénégal est donc fortement tributaire des fluctuations climatiques qui ont eu lieu au cours des temps géologiques. La mise en place du modelé du Delta est un phénomène récent dans l'histoire du bassin sédimentaire sénégalomauritanien. La dynamique actuelle, héritée de l'histoire géologique et géomorphologique, conditionne, de nos jours encore, son évolution. Cette histoire se reflète sur la pédogenèse et sur les caractéristiques biogéographiques.

Cependant, la mise en place des grands aménagements hydrauliques sur le fleuve a quelque peu perturbé les grandes tendances de l'évolution actuelle ; il serait intéressant dans le cadre d'une étude géomorphologique d'en mesurer les principaux impacts.

3. LES SOLS ET LA VÉGÉTATION

La pédogenèse est un des aspects importants de la morphogenèse : sa connaissance se révèle très utile dans l'étude de l'évolution du milieu biophysique. L'évolution géomorphologique oriente d'ailleurs la pédogenèse d'une région donnée et la répartition de ses différents types de sols.

Les chercheurs de l'ORSTOM et de l'IRAT⁸ ont été à l'origine de la majorité des études pédologiques menées dans le Delta du fleuve Sénégal ; ces études ont eu pour base la classification française de AUBERT (1963 et 1965). L'un des traits caractéristiques de la pédogenèse, est qu'elle est marquée essentiellement par la présence de sel d'origine marine : presque tous les sols sont halomorphes.

Sur ces sols salés et acides, très marqués par les conditions hydriques, s'est développée une végétation que nous caractériserons de steppe sahélienne arbustive composée essentiellement d'espèces ligneuses, en général des épineux de la famille des Acacias. Dans les cuvettes et autres milieux très souvent inondés on retrouve une végétation aquatique et ou semi-aquatique.

3.1. Les grandes classes de sols

Dans le Delta du Sénégal et le lac de Guiers, on différencie deux grandes classes de sols (figure 12) : les sols zonaux et les sols intrazonaux. Comme types de sols zonaux, on retrouve surtout des sols subarides tropicaux eux-mêmes répartis en deux sous-types :

- les sols bruns modaux et intergrades hydromorphes, autour du lac de Guiers ;
- les sols bruns rouges sur sables et grès, recouvrant les ergs dunaires ogoliens à l'ouest du lac de Guiers et le plateau du Ferlo à l'est.

Les sols subarides tropicaux sont typiques des régions sahéliennes ; ils se caractérisent par un pH neutre et une teneur en matière organique assez faible. La présence du fer en minces pellicules leur donne cette coloration brune, plus ou moins accentuée selon la teneur en fer.

Les sols brun-rouge ont une épaisseur dépassant parfois deux mètres ; ils contiennent généralement 0,3 à 0,6 % de matière organique. Ils se forment sur des roches à texture légère. Dans le Delta, il s'agit généralement des grès argileux du Continental Terminal.

⁸ Institut de Recherches d'Agronomie Tropicale et des Cultures vivrières

Le nord-est et l'ouest du lac de Guiers est le domaine des sols isohumiques bruns et bruns rouges. Les sols bruns sont caractérisés par une coloration foncée se prolongeant jusqu'à la roche mère et de faibles teneurs en matières organiques, environ 1 %. Les sols bruns rouges recouvrent le Ferlo et le nord-est du lac de Guiers ; ils dépassent en général 2 m d'épaisseur. Le sud-est du lac est occupé par des sols ferrugineux tropicaux lessivés sans concrétions.

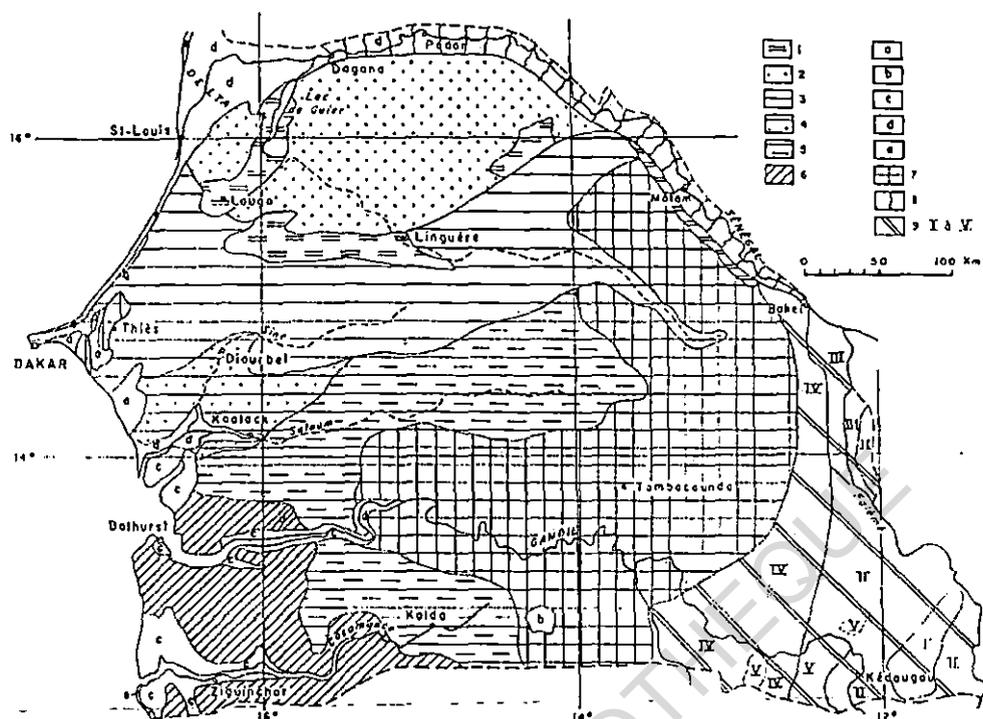
Les sols intrazonaux sont ici représentés par des sols de types salins et à alcalis, type le plus fréquent dans le Delta en aval de Richard-Toll et au nord-ouest du lac de Guiers. Leur limite se situerait selon MAYMARD (1960), repris par SAOS *et al.* (1981), entre Richard-Toll et Dagana. Le bas Delta est surtout occupé par des solontchaks vifs, surtout dans la région de Ross-Béthio où ils fournissent de vastes aires de déflation éolienne et permettent la mise en place de véritables "forêts" de *nebkha*.

Les sols salins et à alcalis sont des sols halomorphes contenant au moins 0,2 % de sels sodiques ; ils ont un pH acide et une texture plutôt fine en surface et moyenne en profondeur. Ils se différencient en solontchaks vifs et crypto-solontchaks. On parle de solontchaks vifs lorsque des efflorescences salines sont visibles en surface et de crypto-solontchaks lorsque l'on n'en note pas. Le sel est d'origine marine, il provient des estuaires lors des basses eaux ; une partie de ce sel a été hérité de l'époque lagunaire Nouakchottienne. La présence d'efflorescences salines rend ces sols improductifs.

Dans les cuvettes régulièrement inondées par l'eau douce de la crue, la tendance est au dessalement des sols, entraînant l'apparition de sols hydromorphes à gley ou pseudo gley. Leur évolution est déterminée par la présence d'un excès d'eau dans leur profil, au moins à certaines périodes. Leur hydromorphie est liée à un engorgement, soit temporaire, soit permanent, par l'eau d'un horizon ou de l'ensemble du profil.

Les fortes teneurs en sel dans les sols du Delta influencent négativement la morphodynamique actuelle du Delta. Étant à la base des principales actions éoliennes, elles conditionnent par conséquent l'évolution de certaines cuvettes en *sebkha* et la mise en place d'un modelé de *nebkha*. Ce sel a une double origine :

- en période de basses eaux, le biseau salé remonte le lit mineur jusqu'à Richard-Toll ; les eaux sont refoulées dans les marigots de vidange, lors de la montée des eaux de crue, et dans les parties basses des cuvettes ;
- l'origine résiduelle de ce sel a également été démontrée par TRICART (1961) ; selon cet auteur, il proviendrait du régime lagunaire qui a prévalu dans le Delta au maximum de la dernière transgression marine. Ce même sel atteint les nappes phréatiques ; en saison des pluies, il est lessivé sur les zones non submergées et s'accumule en profondeur dans les profils ; en saison sèche, il remonte en surface et se concentre sous forme de cristaux ou d'efflorescences.



A. Sols zonaux

Sols subarides tropicaux

1. Sols bruns modaux et intergrades hydromorphes
2. Sols brun-rouge sur sable et grès

Sols ferrugineux tropicaux

3. Sols non lessivés sur sable et grès (*dior*)
4. Sols lessivés sans concrétions
5. Sols lessivés à concrétions et parfois à cuirasse

Sols ferrallitiques

6. Sols rouges faiblement désaturés

II. Sols intrazonaux

- a. Vertisols
- b. Sols hydromorphes
- c. Sols de mangrove
- d. Sols salins et à alcalis
- e. Sols minéraux bruts et peu évolués sur dunes littorales

C. Sols d'érosion

7. Prédominance de sols peu évolués gravillonnaires sur cuirasse ferrugineuse

D. Associations de sols

8. Vallée alluviale du Sénégal

Surtout sols peu évolués d'apport, vertisols et sols hydromorphes (I.H.A.T., 1989), avec des sols salins en aval de Podor.

9. Socle et Paléozoïque plissé-métamorphique

- I. Sols ferrugineux tropicaux lessivés à taches et concrétions et sols hydromorphes
- II. Sols squelettiques et sols ferrugineux tropicaux lessivés à carapace
- III. Sols halomorphes, à alcalis non lessivés, et vertisols
- IV. Sols squelettiques, sols ferrugineux peu différenciés et sols hydromorphes
- V. Sols squelettiques, sols bruns eutrophes et vertisols

FIGURE 12. — Carte de répartition des principaux sols au Sénégal et en Gambie
Reprise de MICHEL (1973) d'après MIGNEN (1965), CHARREAU et FAUCK (1965)

L'évolution géomorphologique au cours du Quaternaire a fortement marqué la pédogenèse dans toute la vallée du Sénégal (figure 13). Les hautes levées fluvio-deltaïques sont toujours formées de sables fins et de limons jaunes compacts ; ils occupent près de la moitié de la vallée alluviale et forment les terrains du *fondé* (MICHEL et SALL, 1984). Les levées subactuelles portent un complexe de sols peu évolués d'apport et de sols hydromorphes : ce sont les terrains du *diacré*. On retrouve les mêmes types de sol sur le lit mineur avec le *falo*.

Entre les levées et deltas de rupture de levées se situent les cuvettes argileuses inondées par les eaux du fleuve Sénégal qui s'y décantent ; leur fond est tapissé d'une épaisse couche d'argile brune riche en montmorillonite qui recouvre les sables blancs du golfe nouakchottien dans la vallée et les dépôts fluviaux plus en amont. On y rencontre des vertisols ou sols topomorphes non grumosoliques qui forment les terrains *hollaldé* blancs et noirs tandis que les sols hydromorphes à gley correspondent au *vendou*. Le *waalo* regroupe les terrains du *hollaldé* et ceux du *vendou*. Sur la terrasse nouakchottienne, et les dunes rouges fixées par la végétation, on a des sols hydromorphes à pseudo gley et des sols isohumiques subarides brun rouge ; ces terrains portent le nom de *dieri*.

Les levées et deltas de rupture de levées portent des sols peu évolués d'apport, plus ou moins hydromorphes, à pseudo gley comportant des tâches et des concrétions ferrugineuses. Des vertisols et sols topomorphes s'y sont également façonnés tandis que dans les parties basses apparaissent des sols hydromorphes à gley de surface ou d'ensemble.

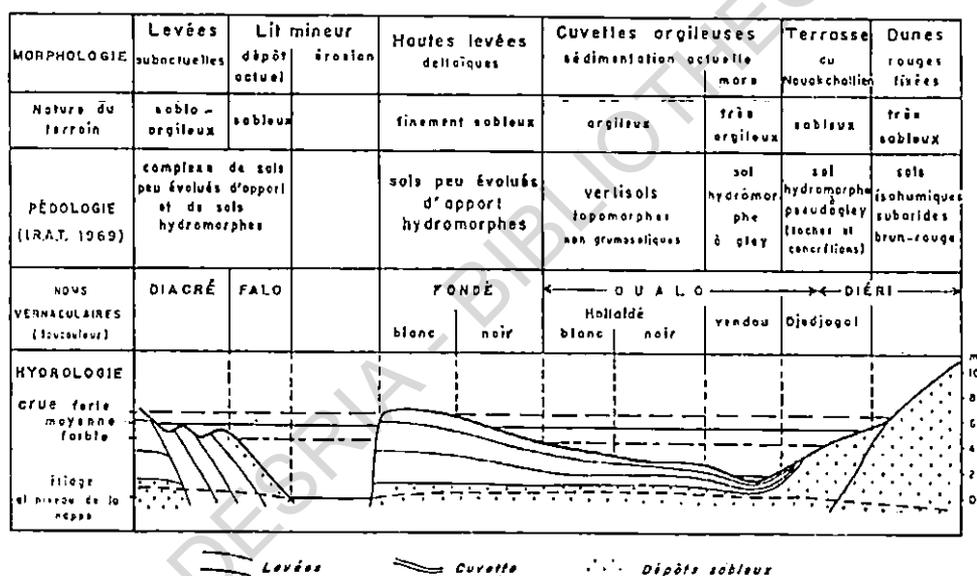


FIGURE 13. — Coupe schématique des sols de la vallée du fleuve Sénégal (source : MICHEL, 1985).

3.2. Les formations végétales

Il ne sera question ici que des grandes formations végétales continentales ; la végétation aquatique, considérée à la fois comme marqueur et comme indicateur de la qualité des eaux, sera traitée dans la deuxième partie de cette étude.

Les sols du Delta portent généralement une maigre steppe arbustive, généralement composée d'épineux de type sahélien (figure 14). La bordure de la vallée est souvent occupée par un boisement dense marquant la transition entre le *waalo* (lit majeur) et le *dieri* (terrains jamais atteints par la crue : dunes ogoliennes, glacis, terrasse nouakchottienne). La steppe sahélienne est une formation herbeuse mêlée de plantes ligneuses dont une majorité d'Acacias.

Avant l'installation de la sécheresse, le *waalo* était occupé par une forêt à *Acacia nilotica* et une vétiveraie tandis que dans le *dieri*, on retrouvait une steppe arbustive ou arborée composée de *Acacia raddiana* en association avec *Cocculus pendulus*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida mutabilis* et *Eragrostis tremula*.

La zone de transition *waalo - dieri*, était occupée par une forêt mixte marginale avec *Acacia albida*, *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Salvadora persica*, *Celtis integrifolia*, *Bauhinia rufescens*, *Guiera senegalensis* et *Maytenus senegalensis*.

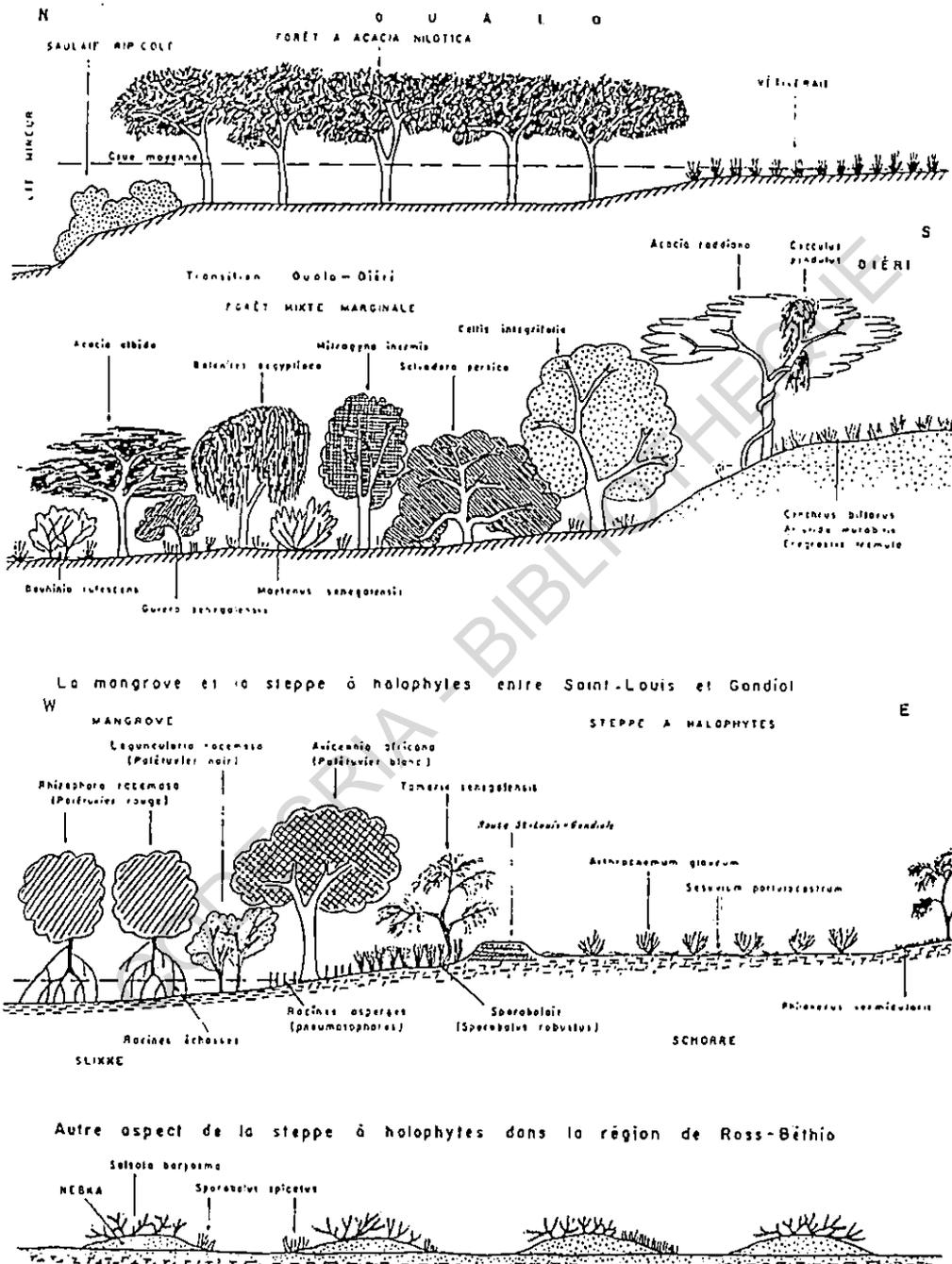


FIGURE 14. — Représentation schématique de la végétation du Delta et de la vallée du Sénégal (source : MICHEL, 1973).

La végétation du lac de Guiers est composée de prairies aquatiques à graminées flottantes ou bourgou composées essentiellement d'*Echinochloa stagnina* ; de prairies semi-permanentes moins longuement inondées à *Brachiara mutica* et *Leersia hexandra* ; de steppes peu inondables à *Vetivera nigrifolia* ou *Sporobolus robustus* sur des sols légèrement salés. L'abondance de *Typha australis* qui forme de « véritables jungles aquatiques ou marécageuses de plus de 4 m de hauteur sur le pourtour du lac » est également à signaler. D'après ADAM (1965), la superficie de cette typhaie était évaluée à environ 1 000 ha par TROCHAIN (1956). Le développement de la typhaie serait lié à la construction du barrage de Richard-Toll qui empêchait la pénétration des eaux salées dans le lac. Les rives du lac étaient colonisées par une steppe arbustive avec comme espèces dominantes *Acacia raddiana*, *Acacia seyal* et *Balanites aegyptiaca* que l'on retrouve encore de nos jours.

Le Ferlo occidental avec ses dunes aux formes émoussées avait un couvert végétal uniforme composé essentiellement d'espèces ligneuses et herbacées. Les arbres y atteignaient 8 à 12 m de haut. Sur les sols sablonneux, la strate arborée était surtout composée de *Acacia raddiana*, *Acacia senegal* et de *Balanites aegyptiaca* et d'autres espèces comme *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum* ou *Sclerocarya birrea*. La strate arbustive était composée de *Boscia senegalensis*, *Dalbergia melanoxylon* et de *Grewia bicolor*. Le tapis herbacé comprenait *Schœnefeldia gracilis*, *Aristida mutabilis* et *Eragrostis tremula* et quelques touffes d'*Andropogon gayanus*.

Le Delta est aujourd'hui occupé par des pseudo steppes arborées avec comme espèces majeures *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia seyal*, *Cenchrus biflorus*, *Aristida stipoides*, *Tephrosia purpurea*, *Indigofera aspera* avec localement quelques individus de *Ziziphus mauritania*, *Schœnefeldia gracilis*, *Chloris ovalifolius* (DAT, 1986).

Aux environs de Ngnith, on note, en plus des espèces citées, *Sclerocarya birrea*, *Guiera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Eragrostis tremula* et *Zornia glochidiata*.

En bordure du fleuve, en particulier dans le bas delta, on retrouve encore de rares individus d'*Acacia nilotica* mais aussi d'*Acacia seyal*, *Salvadora persica* en association avec *Salsola baryosma*.

Dans les tannes, vers le Ndiavel, on note la présence de *Chloris prieurii*, *Schœnefeldia gracilis* et *Salsola baryosma* ainsi que de *Balanites aegyptiaca*, *Tamarix senegalensis* et *Salvadora persica*.

Le long de la vallée du Ferlo, les espèces dominantes sont *Acacia seyal*, *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Schœnefeldia gracilis*, *Chloris prieurii*, *Zornia glochidiata*, *Alysicarpus ovalifolius*.

En fait, il n'y a pas eu de changement notable dans la composition spécifique de la végétation dans le Delta, hormis la raréfaction de *Acacia nilotica*. Le changement s'est plutôt opéré dans la densité des peuplements. La situation est telle qu'à certains endroits, il n'existe plus que de vastes aires de désolation avec quelques rares touffes de végétation qui, avec l'action du vent, contribuent à la formation des champs de *nebkha*.

3.3. Y-a-t-il désertification dans le Delta du Sénégal ?

La désertification et la déforestation, d'abord exclusivement attribuées à l'action de l'homme semblent désormais s'intégrer dans des processus naturels dont la dimension globale résulte d'une dynamique climatique générale (BONNEFILLE, 1986). Pour certains auteurs, la désertification actuelle, constatée presque partout au Sahel, est à mettre au compte d'une dynamique de changements globaux de l'environnement qui affecteraient la Planète.

Depuis le début de ce siècle, l'extension des cultures commerciales puis la baisse du potentiel hydrique au début des années soixante-dix ont contribué au recul de la végétation naturelle du Delta et de l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal. A certains endroits, la situation est si critique que l'on avance parfois le terme de désertification ou « désertisation ».

Le recul de la végétation naturelle du Delta peut s'expliquer de plusieurs manières. C'est généralement la baisse de la pluviométrie qui est le plus incriminée car elle a beaucoup joué sur le recul de la régénération naturelle des plantes. Cependant, le facteur déterminant nous paraît être l'extension des surfaces cultivées.

En fait, depuis l'expérience du jardin d'essai de Richard-Toll, dans la première moitié du dix-neuvième siècle, les surfaces cultivées en cultures commerciales n'ont cessé de s'accroître au détriment des cultures de décrue et des forêts et réserves sylvo-pastorales. Ce phénomène découle d'une volonté politique clairement affirmée de fournir aux paysans de la vallée des ressources financières suffisantes toute l'année. C'est ainsi que de très grandes portions de forêts ont été défrichées et vouées à la culture irriguée avec plus ou moins de réussite.

L'élimination des parcours traditionnels du bétail, reconvertis en champs pour les paysans du *waalo* a eu pour résultats l'émergence d'une multitude de conflits entre agriculteurs et éleveurs ; et au-delà de ces conflits, l'augmentation de la pression animale qui se trouve ainsi concentrée sur des espaces très réduits. D'où un impact double sur la régénération naturelle dans certaines zones. L'élevage intensif, favorisé par l'installation de nombreux forages, et la sédentarisation de nombreux pasteurs ont aussi contribué à cette dégradation du couvert végétal.

L'action anthropique est donc prépondérante sur l'accélération du processus de déforestation dans la vallée du fleuve Sénégal ; l'un des périls les plus fréquents et les plus sévères étant les feux de saison sèche qui se propagent rapidement, aboutissant à la destruction de plusieurs hectares de forêts et d'espaces boisés. Ces feux sont généralement le fait des paysans lors des défrichements ou de pasteurs cherchant à favoriser la repousse d'une herbe plus tendre et mieux appréciée du bétail.

Pour étayer ces assertions, nous présentons deux cas ponctuels de phénomènes ayant abouti à une destruction totale ou partielle d'un milieu.

Tout d'abord, le cas du Ferlo qui jusqu'au début des années soixante-dix était recouvert d'un tapis végétal discontinu : une steppe à *Acacia raddiana*, *Acacia senegal* et *Balanites aegyptiaca* occupait les terrains sablonneux. Après la saison des pluies très déficitaire de 1972⁹, des mesures faites par des chercheurs de l'ORSTOM ont montré que toute la strate herbacée avait été détruite, de même que 53 % des *Acacia senegal*. La surface des feuilles s'est réduite et la fructification n'a pas eu lieu cette année-là (POUPON, 1976).

COUREL (1985) a mis en évidence, grâce à l'interprétation d'images diachroniques LANDSAT de 1973 et 1979, une adaptation de la végétation à l'assèchement du milieu. Cette adaptation s'est traduite dans le Ferlo par une concentration des ligneux dans les dépressions et les vallées et leur disparition sur les dunes.

⁹ Fété-Olé au cœur du Ferlo aurait reçu un total annuel de 33 mm de pluie en 1972

L'Île de Diokhor située au centre du lac de Guiers regroupe trois grands villages : Diokhor, Ndiemeul et Dialang. Des images de cette île en 1989 et 1993 la montrent complètement dénudée à certains endroits. Cette disparition quasi totale des espèces ligneuses serait la conséquence de l'installation d'un producteur de charbon de bois, d'après les renseignements obtenus auprès des notables de Ndiemeul. En moins de dix années, environ 80% des arbres ont disparu sous l'action de ce charbonnier, tandis que des défrichements intensifs pour la préparation des parcelles irriguées à partir du lac étaient pratiqués.

4. LE CLIMAT

D'importantes séries de mesures et des indicateurs permettent de caractériser l'évolution spatio-temporelle du climat du bassin du fleuve Sénégal durant les périodes géologiques et actuelles.

Le Delta, qui constitue la marge occidentale du bassin du fleuve Sénégal, est sous l'influence à la fois du milieu océanique et du milieu continental. Son climat est de type sahélien avec une pluviométrie moyenne annuelle comprise entre 200 et 300 mm. C'est un milieu fortement marqué par les déficits pluviométriques enregistrés depuis 1969 et caractérisé par une très forte variabilité spatio-temporelle des éléments climatiques. Cette péjoration climatique récente conditionne bien évidemment la distribution des espèces et formations végétales, en rapport avec la nature des terrains.

L'insuffisance et la disparité des séries de mesures, en certaines stations de la zone d'étude, a nécessité que l'on s'intéresse à d'autres stations situées sur les marges mais appartenant au même domaine climatique. Car si l'on considère uniquement la région du lac de Guiers, le taux de couverture par les postes pluviométriques est très mauvais.

4.1. Les mécanismes de la circulation générale et la délimitation climatique

Le climat du bassin du fleuve Sénégal est essentiellement déterminé par la conjonction des facteurs que sont les centres d'action, les masses d'air et les discontinuités qui déterminent les mécanismes des différents éléments du climat et induisent donc un climat local ou sous-régional (figure 15).

Trois centres d'actions sont identifiés comme responsables des types de temps au-dessus du bassin du Sénégal : l'anticyclone des Açores, l'anticyclone de Sainte Hélène et celui de Libye, dit aussi anticyclone saharien.

Les anticyclones des Açores et de Sainte Hélène sont des systèmes météorologiques permanents, d'origine dynamique, centrés, l'un sur l'Atlantique nord, l'autre sur l'Atlantique sud. Le premier est présent au-dessus du continent de novembre à avril tandis que le second est observé entre mai et octobre.

L'anticyclone Saharien ou anticyclone de Libye est d'origine thermique ; il est centré au dessus du Sahara. De janvier à mai, il est présent dans l'hémisphère Nord grâce aux renforts thermiques qu'il reçoit du continent. En été boréal, il est remplacé au sol par une dépression.

Ces trois centres d'action, présents au-dessus du bassin, induisent deux types de masses d'air : les alizés et la mousson (figure 16).

Les alizés proviennent des cellules des Açores et de Libye, avec des caractères différents hérités des régions traversées. Ils sont présents au-dessus du bassin de novembre à mai et n'engendrent pas de précipitations importantes. L'anticyclone des Açores donne des alizés maritimes et alizés maritimes continentalisés qui ont eu un parcours plus ou moins long sur le

continent et sont de ce fait plus ou moins chargés d'humidité. L'anticyclone saharien donne l'alizé continental ou Harmattan, vent très chaud et sec, qui mobilise une importante quantité de sables et génère des poussières.

La genèse de la mousson est associée à l'évolution de l'anticyclone de Sainte Hélène. C'est un alizé qui, après avoir franchi l'Equateur, change de direction à cause de la force de Coriolis et prend une direction SW-NE. Elle apporte la pluie car très chargée en humidité. La mousson ne circule que durant l'été boréal.

Ces différentes masses d'air, du fait de leurs origines et de leurs caractères différents, sont séparées par des discontinuités : l'Equateur météorologique et l'inversion d'alizés.

L'Equateur météorologique sépare la mousson des alizés maritimes ou continentaux. Au sol, la présence de l'équateur météorologique est matérialisée par le Front Intertropical (FIT). Celui-ci est marqué par un balancement saisonnier lié à celui des cellules anticycloniques et qui entraîne la migration des zones pluvieuses du sud vers le nord du bassin et inversement.

L'inversion d'alizé sépare deux alizés d'origine différente, elle est généralement orientée nord-sud. En altitude, la discontinuité d'alizés se transforme en inversion d'alizé à cause des différences de températures entre les deux flux.

Centres d'action, masses d'air et discontinuités connaissent de très fortes variations saisonnières. Leur distribution au-dessus du bassin conditionne l'évolution spatio-temporelle des éléments du climat et donc la définition des différents domaines climatiques.

Le climat sahélien ou "sénégalien" (VIERS, 1990) est caractérisé par des pluies estivales et un hiver très sec. Le maximum des températures se situe avant l'arrivée des pluies, généralement au mois d'avril ou mai. Ce domaine est marqué par des températures moyennes supérieures ou égales à 30° C, une humidité relative moyenne inférieure ou égale à 40 % et des précipitations annuelles souvent inférieures à 500 mm, réparties entre mai et septembre.

Le Delta est entièrement compris dans le domaine sahélien ; cependant, sur la façade maritime, l'introduction de nuances sous-régionales par l'alizé maritime de type I¹⁰ (LEROUX, 1980 et SOW, 1984) permet de distinguer un sous-domaine climatique, dit d'influence de l'alizé maritime de type I, dont l'humidité relative moyenne est comprise entre 60 et 70 %. L'alizé maritime de type I est reçu sur la façade orientale de l'anticyclone des Açores ; il aborde la côte nord-ouest de l'Afrique. C'est un alizé stable, du fait de la subsidence supérieure et relativement humide. Cependant, du point de vue de la pluviométrie, ce domaine fait partie intégrante du domaine sahélien.

¹⁰ Provenant directement de la mer, cet alizé maritime, dit de type I, n'a encore reçu aucune influence du continent

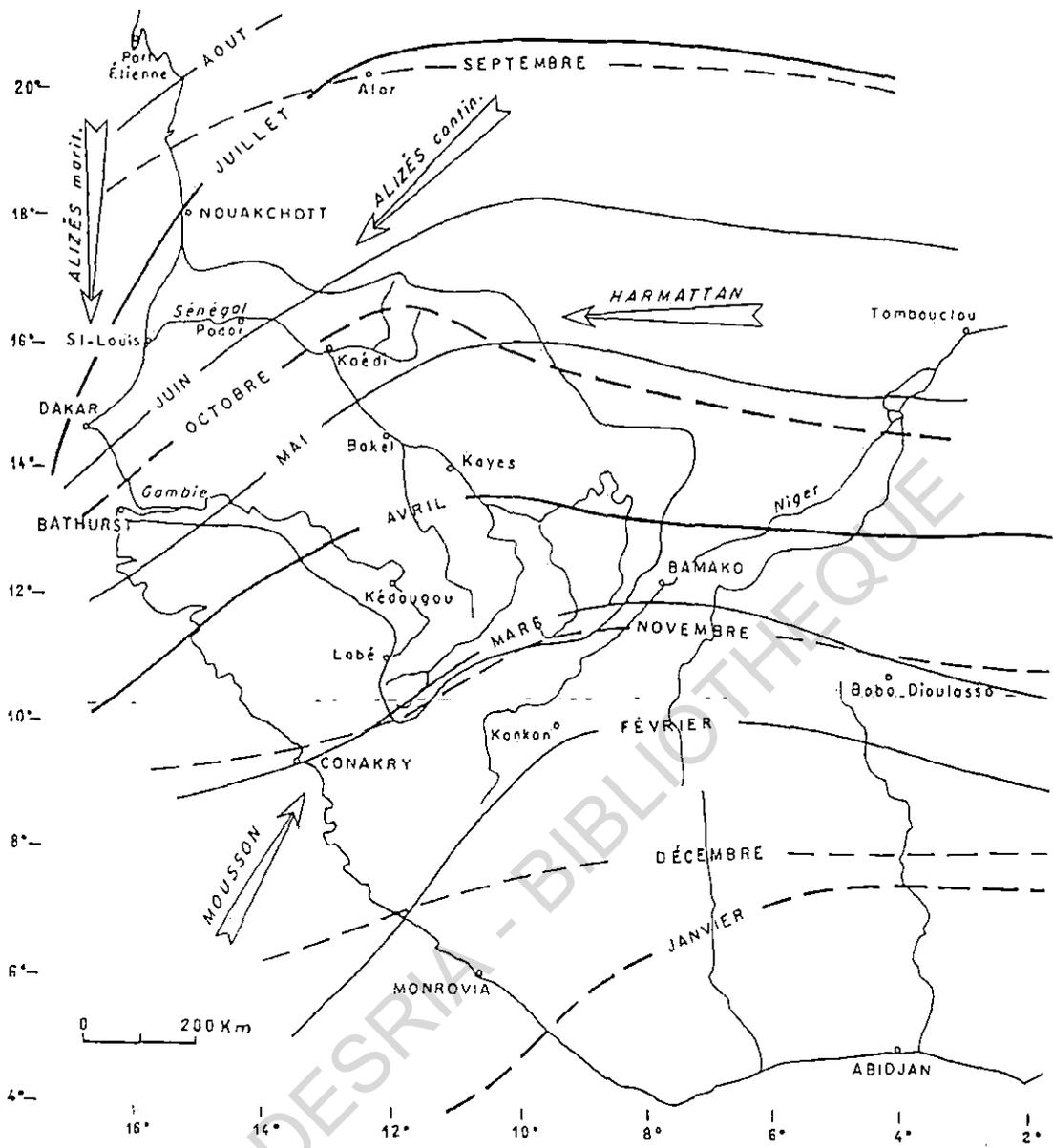


FIGURE 15. - Schéma de la circulation troposphérique générale (LEROUX. 1973).

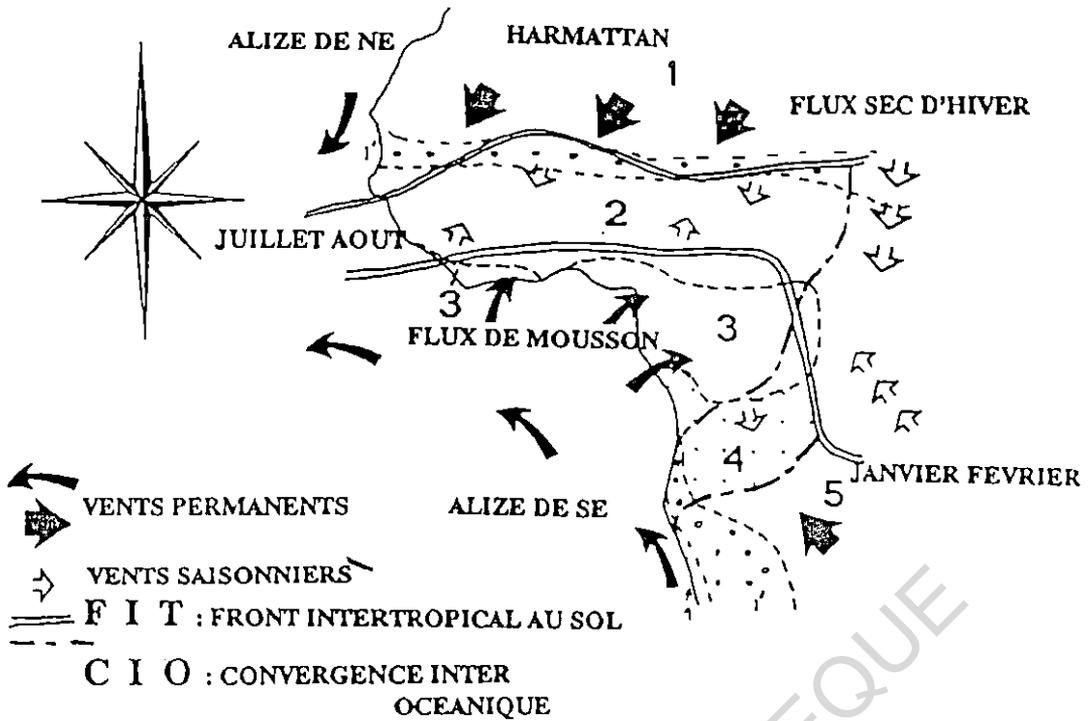


FIGURE 16 – Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août (MAHE, 1994).

4.2. Evolution des profils pluviométriques moyens

La pluviométrie au nord du Sénégal est marquée par un déficit généralisé depuis le début des années Soixante-dix. A la pluviométrie presque exceptionnelle de 1969 a succédé une série d'années sèches. Ce déficit peut être imputé aux « sécheresses » qui sévissent cycliquement dans la zone sahélienne. À titre indicateur, la partie sahélienne du bassin a vu sa pluviométrie annuelle réduite de 35 % entre les périodes 1951-1980 et 1969-1991 (ALBERGEL *et al.*, 1993).

L'évolution des totaux pluviométriques est analysée aux stations identifiées comme étant représentatives des différents domaines ou sous-domaines climatiques de la zone d'étude (figure 17) ; leurs caractéristiques sont données au tableau II.

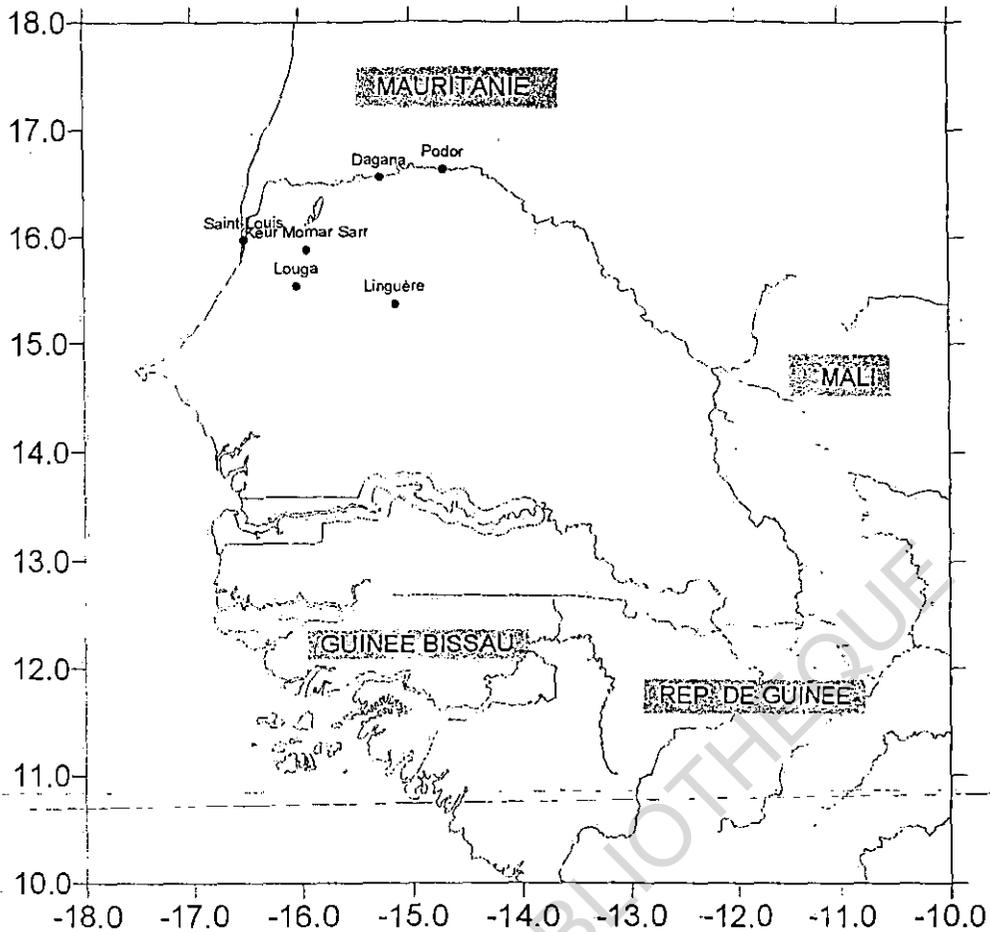


FIGURE 17. — Situation géographique des stations de mesure du climat.

TABLEAU II
Caractéristiques des stations de mesure de l'étude

Nom	Type	Latitude nord	Longitude ouest	Altitude m IGN
Dagana	P	16° 31'	15° 30'	05
Keur Momar Sarr	P	15° 56'	15° 58'	15
Linguère	S	15° 23'	15° 07'	20
Louga	C	15° 37'	16° 13'	38
Podor	S	16° 39'	14° 58'	06
Saint-Louis	S	16° 03'	16° 27'	04

P : Pluviométrique S : Synoptique C : Climatologique

4.2.1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle est caractérisée par une forte variabilité spatio-temporelle (figure 18). On remarque un léger gradient ouest-est, c'est-à-dire entre Saint-Louis et Podor d'une part, Louga et Linguère d'autre part. Considérant l'intégralité des séries de mesures, on passe ainsi de 330 mm à Saint-Louis, 315 mm à Dagana, 274 mm à Podor, 456 mm à Linguère, 382 mm à Louga et 302 mm à Keur Momar Sarr en moyenne (tableau III).

TABLEAU III
Moyennes annuelles de la pluviométrie (en mm) à différentes périodes

	<i>Moy. Série</i>	<i>1931-1961</i>	<i>1961-1990</i>	<i>1970-1994</i>
<i>Saint-Louis</i>	330	342	262	215
<i>Dagana</i>	315	322	229	207
<i>Podor</i>	274	333	214	183
<i>Linguère</i>	456	533	408	368
<i>Louga</i>	382	457	313	270
<i>Keur Momar Sarr</i>	302	-	309	269

Le calcul des moyennes mobiles sur une période de cinq ans met en évidence les variations interannuelles à l'intérieur de chaque série. Cette variabilité a amené certains climatologues dont LEROUX (1980), OLIVRY (1982), FRECAUT (1983) et SOW (1984) à étudier le climat en termes de périodes et non d'années et à définir des séquences sèches ou humides. C'est ainsi que SIRCOULON (1976) fait état de sécheresses centrées sur les années 1910 et 1940. GAC *et al.* (1993) ont montré l'existence d'une séquence humide à la station de Saint-Louis autour des années 1916-1930.

Le déficit de pluviométrie annuelle est une réalité depuis les années 1970-71, malgré quelques années à précipitations moyenne à excédentaires. À l'instar de OLIVRY *et al.* (1993), nous pensons cependant que « rien ne permet de trancher vers un appauvrissement durable ou à un retour à des conditions plus clémentes [...] il ne peut se dégager qu'une physionomie toute relative des fluctuations climatiques ».

La « sécheresse » actuelle tant par sa durée que par son extension reste, dans tous les cas, un événement exceptionnel au Sahel.

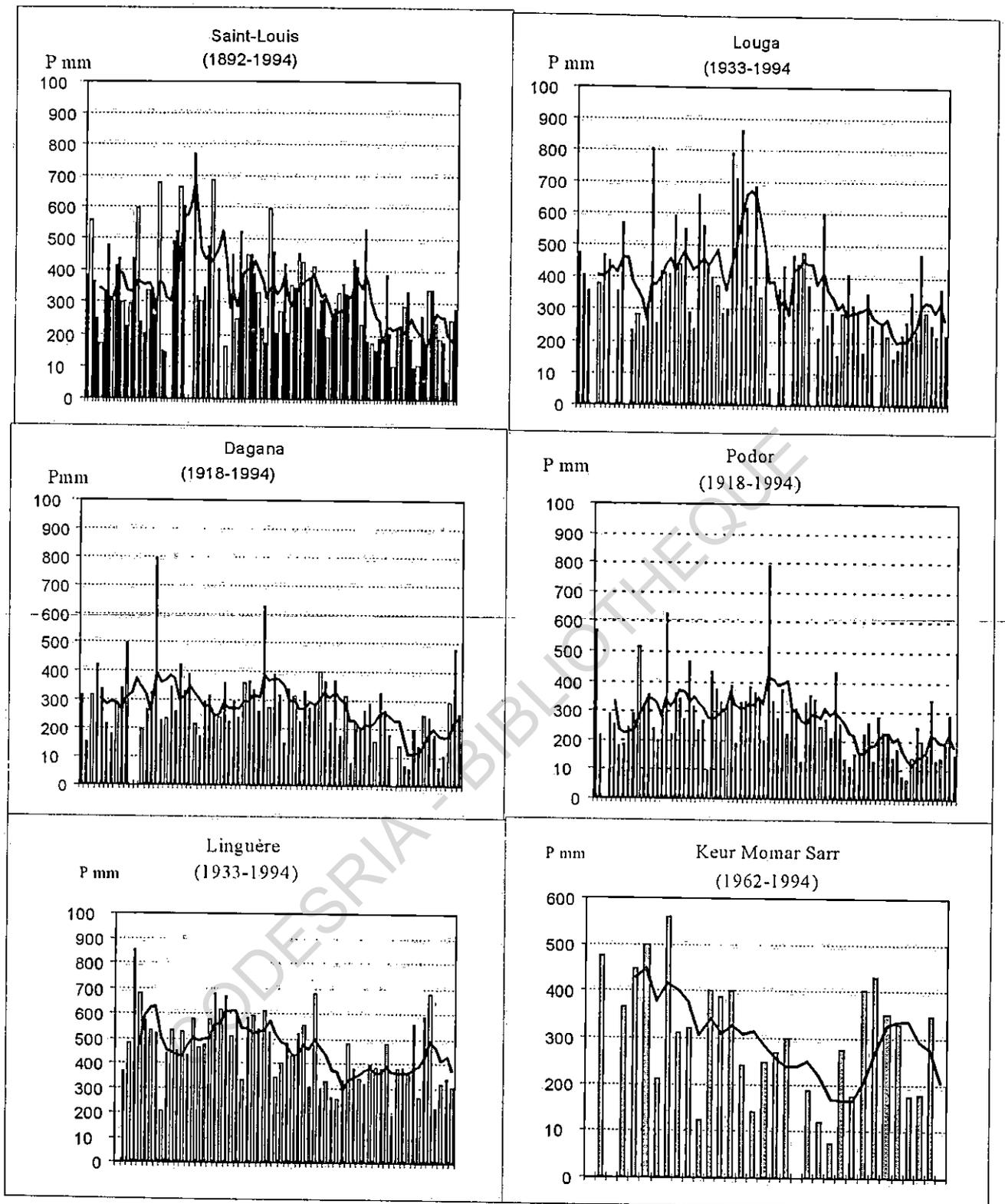


FIGURE 18. — Evolution interannuelle de la pluviométrie et moyennes mobiles sur cinq ans en différentes stations (Source données : ASECNA)

4.2.2. Distribution mensuelle des précipitations

L'évolution mensuelle de la pluviométrie dans le Delta est unimodale avec un maximum en août et un minimum en avril - mai (tableau IV et figure 19). La saison pluvieuse débute généralement en mai et s'achève en septembre-octobre. Durant la saison sèche, quelques rares précipitations¹¹ tombent sur la région, provoquées par les phénomènes d'advection d'air polaire.

Les totaux mensuels précipités sont très variables d'une année à l'autre comme en attestent les coefficients de variations particulièrement élevés de novembre à mai. Le mois d'août qui reçoit le maximum des précipitations annuelles enregistre 30 à 40% du total. La saison pluvieuse enregistre au total 90% de la pluviométrie totale à presque toutes les stations. Cette irrégularité dans la distribution mensuelle de la pluviométrie contribue à accentuer le déficit hydrique durant les mois secs.

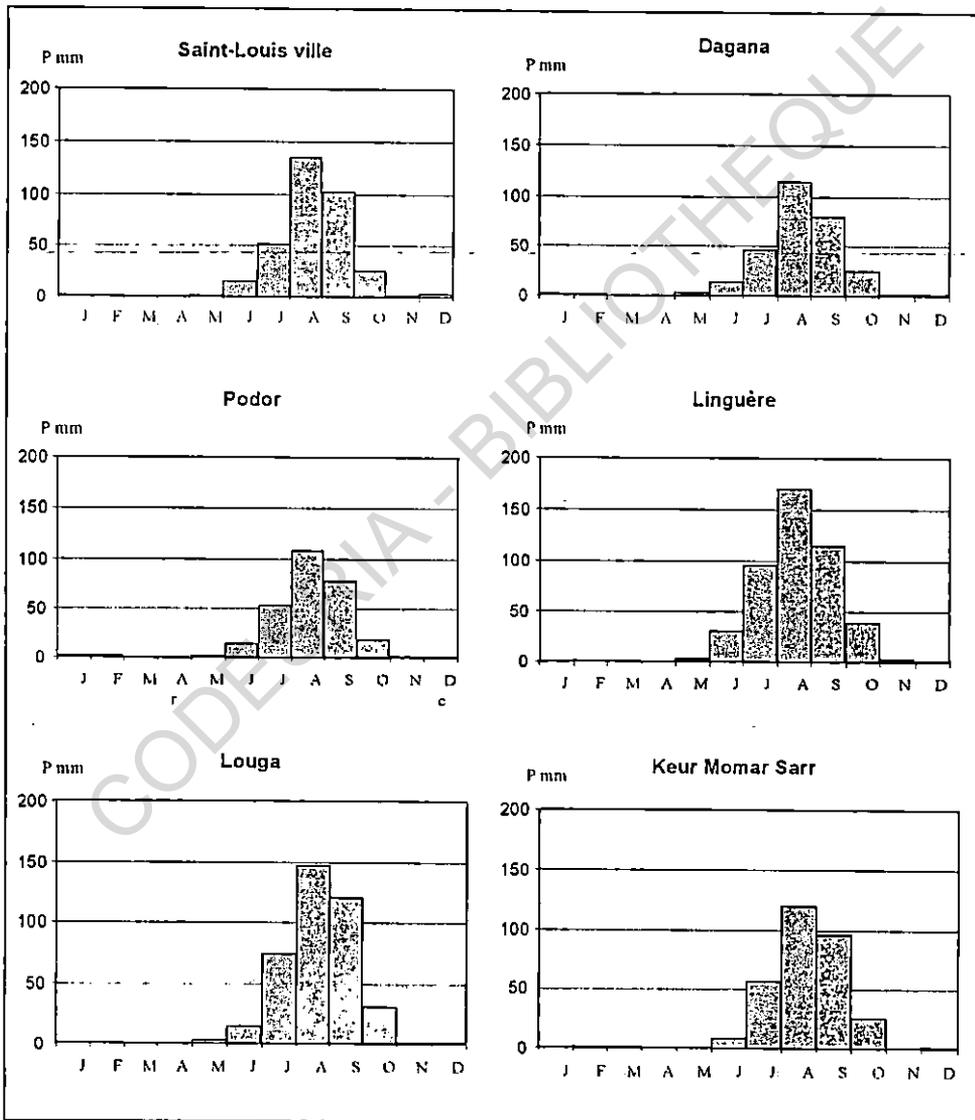


FIGURE 19. — Distribution mensuelle des précipitations

¹¹ Ces pluies qui tombent généralement en janvier-février sont dénommées "heug"

TABLEAU IV
Données mensuelles de la pluviométrie (en mm) dans le Delta

<i>Mois</i>	<i>Jan</i>	<i>Fév</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil</i>	<i>Août</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Déc</i>
Saint-Louis (1892-1994)												
Moyenne	1.8	1.5	0.5	0.1	1.5	14.5	51.7	134.0	101.9	25.5	1.7	2.8
Écart Type	5.5	4.2	2.8	0.6	4.9	22.9	44.2	80.4	68.6	37.9	4.8	9.7
CV	3.0	2.8	5.1	4.9	3.3	1.6	0.9	0.6	0.7	1.5	2.9	3.4
IV	42.2	25.2	25.0	3.4	30.0	144.0	228.3	381.5	393.2	197.9	24.4	66.8
CP (%)	0.6	0.5	0.2	0.0	0.4	4.4	15.7	40.6	30.9	7.7	0.5	0.9
Dagana (1918-1994)												
Moyenne	0.9	1.7	0.1	0.1	2.1	13.4	46.3	114.6	79.3	25.4	1.4	1.6
Écart Type	2.6	4.0	0.4	0.3	6.9	18.0	37.4	68.4	48.5	35.5	5.6	6.5
CV	3.1	2.4	4.4	4.0	3.3	1.3	0.8	0.6	0.6	1.4	3.8	4.1
IV	16.1	18.3	2.9	1.9	38.0	82.2	220.0	377.8	230.0	153.1	36.0	46.6
CP (%)	0.3	0.6	0.0	0.0	0.8	4.8	16.6	41.0	28.4	9.1	0.5	0.6
Podor (1918-1994)												
Moyenne	0.8	1.9	0.6	0.1	2.0	13.7	52.3	107.1	75.9	19.0	1.5	1.2
Écart Type	2.0	5.8	3.2	0.4	5.8	17.5	43.8	66.7	54.7	31.1	6.0	4.9
CV	2.4	3.0	5.5	3.4	2.9	1.3	0.8	0.6	0.7	1.6	4.1	4.1
IV	10.0	29.3	25.8	2.5	31.0	80.7	210.5	297.8	312.7	197.7	49.0	36.1
CP (%)	0.3	0.7	0.2	0.0	0.7	5.0	19.1	39.1	27.7	6.9	0.5	0.4
Linguère (1933-1994)												
Moyenne	0.5	1.8	0.8	0.2	2.2	29.9	95.9	169.9	115.4	38.6	3.0	1.7
Écart Type	2.2	6.4	5.7	1.0	5.8	33.4	47.4	80.0	55.4	45.1	7.8	5.3
CV	4.3	3.5	7.2	4.2	2.6	1.1	0.5	0.5	0.5	1.2	2.6	3.1
IV	15.7	34.5	43.8	5.6	31.5	153.8	245.8	368.8	260.9	212.9	33.3	30.9
CP (%)	0.1	0.4	0.2	0.1	0.5	6.5	21.0	37.3	25.3	8.5	0.7	0.4
Louga (1918-1994)												
Moyenne	1.5	1.5	0.2	0.1	1.8	13.9	74.2	147.2	120.4	30.2	1.4	1.5
Écart Type	5.6	4.4	1.2	0.4	4.6	16.2	54.7	78.8	64.8	37.5	3.8	6.8
CV	3.7	2.8	5.2	4.8	2.6	1.2	0.7	0.5	0.5	1.2	2.7	4.5
IV	31.1	25.7	8.7	2.5	19.8	94.6	254.5	338.8	287.4	245.2	17.0	43.3
CP	0.4	0.4	0.1	0.0	0.5	3.6	19.4	38.6	31.5	7.9	0.4	0.4
Keur Momar Sarr (1962-1994)												
Moyenne	0.4	0.9	0.6	0.0	0.6	7.9	56.6	120.3	96.2	24.6	0.1	0.6
Écart Type	1.1	2.2	2.3	0.0	2.2	11.9	47.8	75.2	60.5	26.2	0.3	2.2
CV	2.7	2.5	3.6	0.0	3.7	1.5	0.8	0.6	0.6	1.1	5.0	3.5
IV	4.2	8.3	9.6	0.0	11.2	49.3	168.6	279.6	262.9	91.8	1.7	10.7
CP (%)	0.1	0.3	0.2	0.0	0.2	2.6	18.8	39.9	31.9	8.1	0.0	0.2

CP : Coefficient de pluviosité mensuelle CV : Coefficient de variation

IV : Intervalle de variation

4.3. Les facteurs thermiques et l'évaporation

4.3.1. Les facteurs thermiques

L'étude des facteurs thermiques a été menée aux stations de Saint-Louis Aéroport, Podor, Linguère et Louga. La connaissance des facteurs thermiques tels que les températures, l'humidité relative, la tension de vapeur et l'insolation est capitale car ils ont une très forte incidence sur les processus d'évaporation et d'évapotranspiration.

4.3.1.1. Les températures

Le tableau V indique les moyennes mensuelles des températures ainsi que l'amplitude diurne moyenne. Leur évolution, représentée sur la figure 20, est dans tous les cas bimodale avec quelques nuances dues à l'éloignement relatif de la mer.

Saint-Louis, de par sa position géographique, connaît une évolution particulière ; la baisse des températures en avril - mai est due à la présence des alizés maritimes frais et humides. Le maximum principal y intervient en septembre et le maximum secondaire est enregistré en mars.

Podor, Louga et Linguère, représentatives du climat sahélien, connaissent leurs maxima principaux en mai - juin et leurs maxima secondaires en octobre. Les minima principaux interviennent en général au mois de janvier tandis que les minima secondaires interviennent en août en plein hivernage. Les minima et maxima sont centrés respectivement sur la saison sèche et la saison pluvieuse. La température moyenne passe de 25,9° C à Saint-Louis à 28,6° C à Podor, 28,7° C à Linguère et 27,7° C à Louga. La température maximale moyenne est souvent très élevée à Linguère, Podor et Louga où elle dépasse souvent 40° C en saison sèche.

TABLEAU V
Moyennes mensuelles des températures en degrés Celsius (°C)

Station		Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	An
Saint-Louis 1951-1994	<i>TX</i>	29.7	30.9	31.4	30.2	29.1	29.9	30.3	31.1	32.0	32.9	32.6	30.3	31.2
	<i>TN</i>	15.6	16.5	17.3	17.9	19.4	22.5	24.5	25.0	25.1	23.7	20.0	16.8	20.5
	<i>TM</i>	22.7	23.7	24.3	24.0	24.2	26.2	27.4	28.1	28.6	28.3	26.3	23.5	25.9
	<i>Am</i>	14.1	14.4	14.1	12.3	9.7	7.4	5.8	6.1	6.9	9.2	12.6	13.5	10.7
PODOR 1951-1994	<i>TX</i>	31.1	33.9	36.7	39.1	41.2	40.7	37.5	36.2	36.4	37.6	35.1	31.5	36.5
	<i>TN</i>	15.4	17.0	18.9	20.9	23.3	24.4	24.6	24.8	25.0	24.3	20.6	16.4	21.3
	<i>TM</i>	22.7	25.4	27.1	30.0	32.2	32.5	31.0	30.4	30.7	30.9	27.8	23.0	28.6
	<i>Am</i>	15.7	16.9	17.8	18.2	17.9	16.3	12.9	11.4	11.4	13.3	14.5	15.1	15.2
Linguère 1951-1994	<i>TX</i>	32.9	35.3	37.6	39.7	40.8	39.0	35.5	34.0	34.2	36.8	36.2	33.0	36.5
	<i>TN</i>	15.9	17.5	19.2	20.8	22.5	23.6	24.1	24.0	23.6	22.5	24.1	16.5	21.2
	<i>TM</i>	24.4	26.4	28.4	30.3	31.7	31.3	29.8	29.0	28.9	29.6	30.1	24.8	28.7
	<i>Am</i>	8.5	8.9	9.2	9.4	9.1	7.7	5.7	5.0	5.3	7.2	6.1	8.2	15.3
Louga 1980-1994	<i>TX</i>	31.2	33.8	36.1	37.0	37.2	35.6	34.0	33.8	34.5	37.3	35.5	32.0	34.8
	<i>TN</i>	16.5	17.7	18.7	19.3	20.3	22.5	24.1	23.9	24.2	22.9	20.3	17.8	20.6
	<i>TM</i>	23.8	25.7	27.4	28.1	28.8	29.0	29.1	28.9	29.4	30.1	27.9	24.9	27.7
	<i>Am</i>	14.7	16.1	17.4	17.7	16.9	13.1	9.9	9.9	10.3	14.4	15.2	14.2	14.2

TX : température maximale TN : température minimale TM : température moyenne Am : amplitude diurne

(Source données : ASECNA)

L'amplitude diurne est maximale en saison sèche ; elle baisse rapidement dès le début de la saison pluvieuse et atteint son minimum au mois d'août. On remarque que les écarts diurnes sont plus faibles à Linguère, où ils dépassent rarement 10°C. Ceci pourrait s'expliquer par la position géographique de la station mais pourrait également se justifier par des erreurs d'étalonnage des thermomètres au moment des mesures.

Les écarts thermiques annuels qui sont de 5,9°C à Saint-Louis, contre 0,6°C à Podor et Linguère et 0,3°C à Louga montrent la forte opposition qui existe entre le domaine côtier et le domaine continental, suite au gradient de température entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid. On note un gradient thermique S-N, moins accusé cependant que le gradient W-E.

Les températures moyennes mensuelles calculées pour la période 1970-1994 à Saint-Louis, Linguère et Podor (tabl. VI), rapportées à la moyenne globale (1951-1994) montrent une légère augmentation au cours des deux dernières décennies.

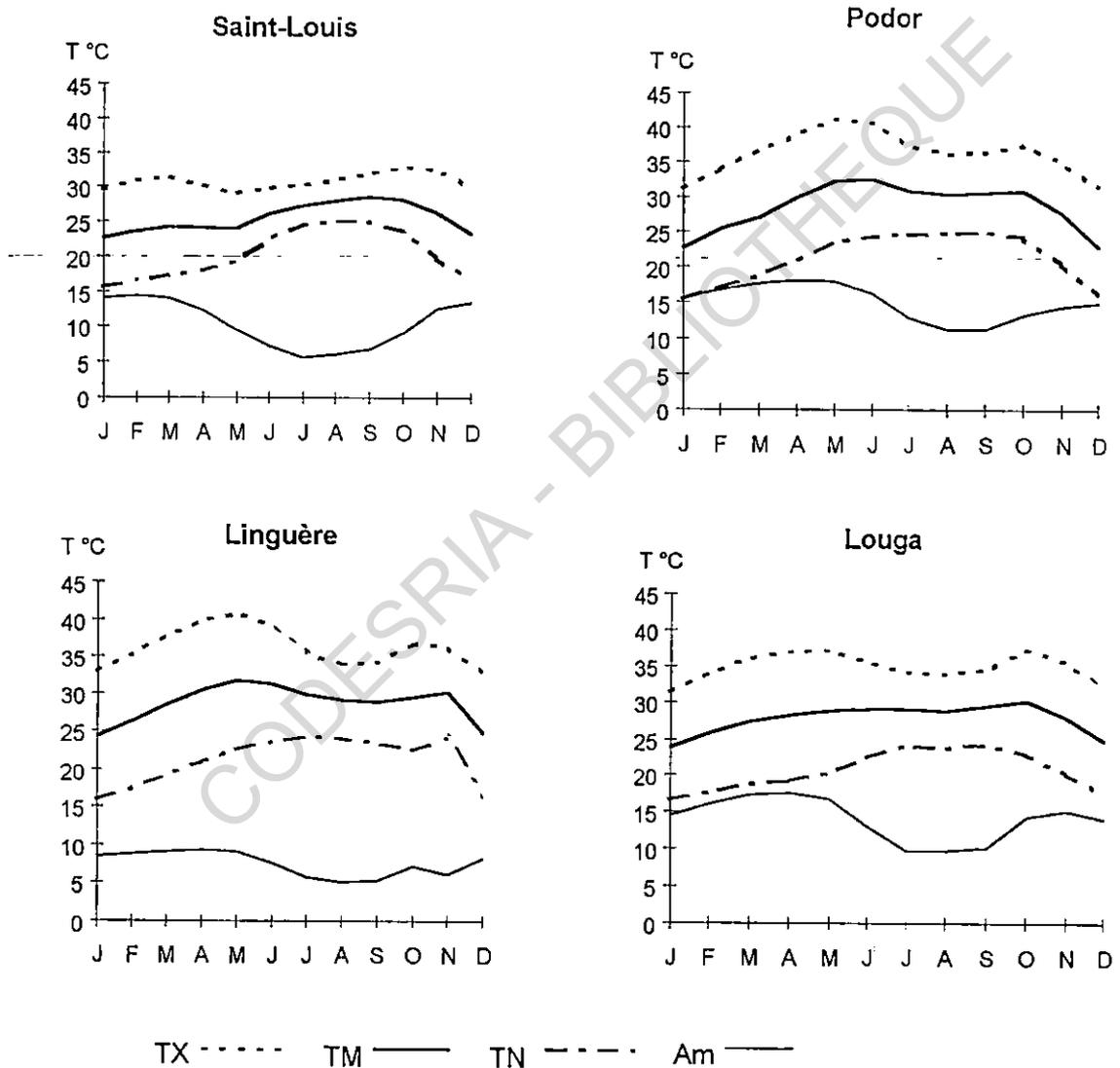


FIGURE 20. — Evolution moyenne mensuelle des températures au cours de la période 1951-1994 (Source données : ASECNA)

TABLEAU VI
Moyennes mensuelles de la température (en degrés Celsius) pour la période 1970-1994

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Saint-Louis	22.9	24.3	25.0	24.8	24.8	26.5	27.5	28.3	28.9	28.7	26.5	23.9	26.4
Linguère	24.6	26.6	28.5	30.7	31.9	31.8	30.2	29.5	29.4	30.3	32.2	25.3	29.2
Podor	23.4	25.6	27.8	30.3	32.4	32.8	31.2	30.9	31.3	31.7	27.7	24.4	29.1

(Source données : ASECNA)

4.3.1.2. Humidité relative et tension de vapeur

L'évolution de l'humidité relative est de type unimodale (figure 21) avec un maximum en août à Saint-Louis et en septembre aux trois autres stations ; le minimum intervient entre janvier et mars. Les moyennes de l'humidité relative varient entre 66,5 % à Saint-Louis, 48,5 % à Linguère, 43,6 % Podor et 56,4 % à Louga. En août les moyennes de l'humidité relative maximale sont presque partout supérieures à 90 %, sauf à Podor. On remarque qu'aux stations de Podor et Linguère, les variations de l'humidité relative sont plus fortes qu'à Saint-Louis et Louga. À la station de Saint-Louis, l'influence maritime se fait sentir.

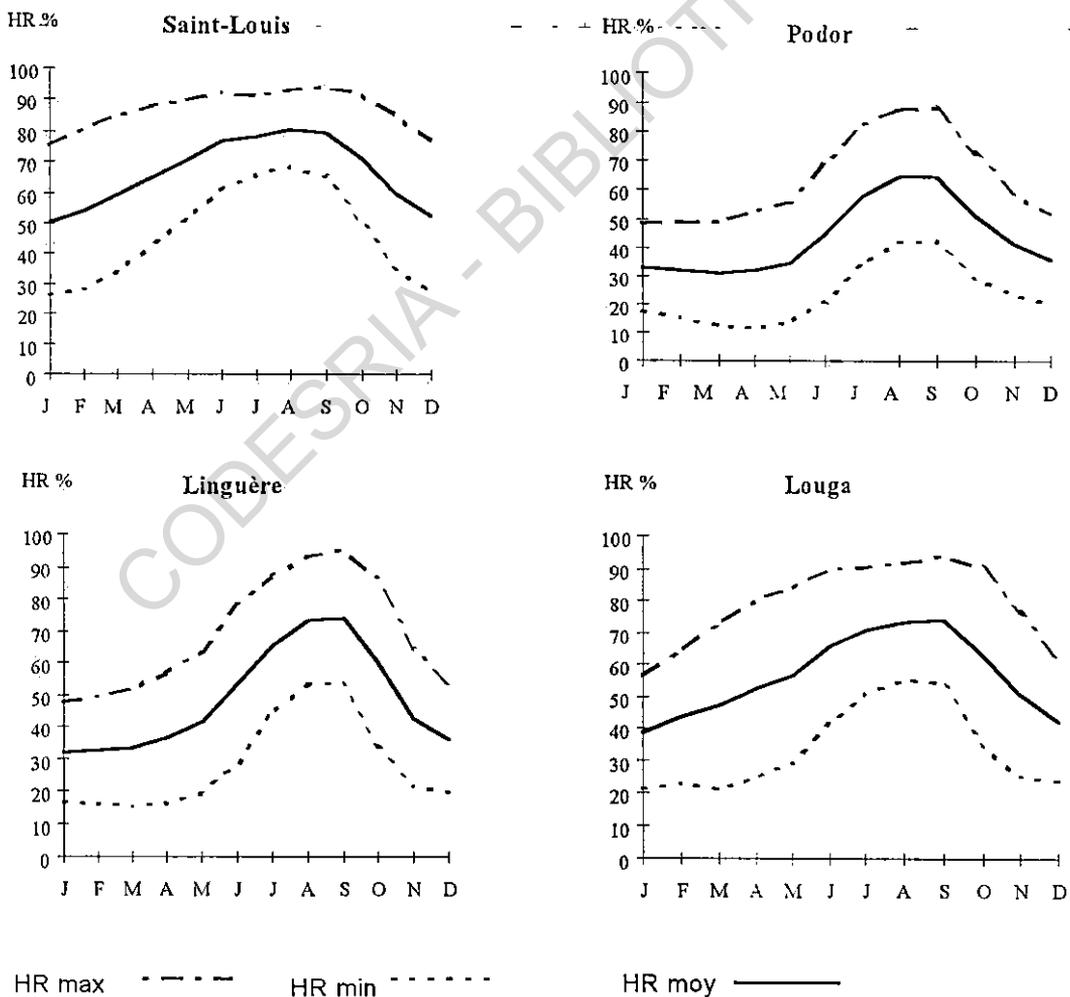


FIGURE 21. — Evolution moyenne mensuelle de l'humidité relative (source données : ASECNA)

A Podor, les maxima varient entre 50 et 60 % de janvier à mai tandis que les minima s'abaissent entre 11 et 12 % en mars - avril (tabl. VII). A Saint-Louis, l'humidité relative reste élevée toute l'année : les maxima sont toujours supérieurs à 80 % ; en mai, ils dépassent souvent 90 %. Les minima varient entre 35 et 40 % en janvier - février tandis qu'au cœur de la saison des pluies, ils atteignent 60 %.

TABLEAU VII
Moyennes mensuelles de l'humidité relative (en %)

Station		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AN
Saint-Louis 1951-1994	HR max	75.1	80.3	84.7	88.0	89.5	92.2	91.0	93.0	94.1	92.0	85.0	77.2	86.8
	HR min	26.0	28.1	33.6	42.4	51.7	60.9	65.5	68.0	64.9	49.9	34.9	27.5	46.3
	HR moy	50.6	54.2	59.1	65.2	70.6	76.5	78.2	80.5	79.5	70.9	60.0	52.3	66.5
Linguère 1951-1993	HR max	47.7	49.2	51.6	57.0	63.7	77.9	87.1	93.0	95.1	86.9	64.1	52.9	69.0
	HR min	16.5	15.9	15.0	16.0	19.0	28.5	43.9	53.4	53.1	33.2	21.1	19.5	28.0
	HR moy	32.1	32.6	33.3	36.5	41.3	53.2	65.5	73.2	74.1	60.0	42.6	36.2	48.5
Podor 1951-1994	HR max	48.5	49.0	49.0	52.3	55.6	68.8	82.2	87.6	87.9	72.7	59.4	51.7	63.8
	HR min	17.2	15.1	12.5	11.5	13.2	20.9	33.7	41.6	41.8	29.5	23.3	20.0	23.5
	HR moy	32.8	32.0	30.7	31.9	34.4	44.8	57.9	64.6	64.8	51.1	41.3	35.8	43.6
Louga 1980-1994	HR max	56.6	64.6	72.7	80.3	83.8	89.9	90.2	91.4	93.8	90.4	76.3	61.1	79.4
	HR min	20.9	22.8	21.1	24.5	29.1	41.2	50.9	55.2	54.4	34.7	24.8	23.4	33.4
	HR moy	38.8	43.7	46.9	52.4	56.5	65.6	70.5	73.3	74.1	62.6	50.6	42.3	56.4

Source : ASECNA

Les données de la tension de vapeur (tableau VIII) ne sont disponibles qu'aux stations de Saint-Louis et Podor. Leur évolution (figure 22) est similaire à celle de l'humidité relative avec un maximum qui intervient en septembre et un minimum en janvier. La moyenne annuelle de la tension de vapeur est de 21 Mb à Saint-Louis et de 16 Mb à Podor.

TABLEAU VIII
Moyennes mensuelles de la tension de vapeur en millibars
(source données : ASECNA)

Station	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	An	Période
Saint-Louis	12.1	13.6	15.1	17.3	20.1	25.4	28.6	30.4	30.9	26.3	18.6	13.5	21.0	1951-1993
Podor	8.4	8.7	9.3	10.4	13.0	18.3	23.6	26.6	27.1	21.1	14.3	9.8	16.0	1951-1991

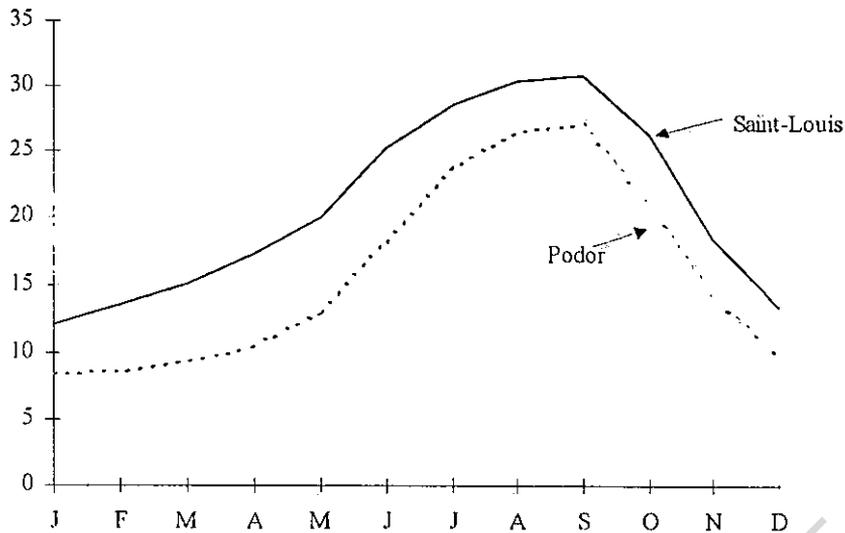


FIGURE 22. — Evolution mensuelle de la tension de vapeur à Saint-Louis et Podor.

4.3.1.3. L'insolation

L'insolation est un des paramètres clés qui permettent de calculer l'évapotranspiration selon la formule de Turc. Son évolution intermensuelle est présentée pour Saint-Louis, Linguère et Louga (tabl. IX). Les données d'insolation de la station de Podor sont inutilisables.

TABLEAU IX
Moyennes mensuelles de l'insolation en heures (Source : ASECVNA)

Station	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Saint-Louis	225	230	264	273	266	198	228	247	228	259	232	219
Linguère	249	247	277	280	284	259	262	253	241	270	253	241
Louga	240	235	256	272	264	246	255	258	235	269	251	236

L'évolution de l'insolation est très irrégulière : le minimum absolu intervient au mois de décembre ; le maximum absolu est enregistré en mai. Linguère se présente comme la station la plus ensoleillée avec une moyenne annuelle de 259 heures alors qu'on note 239 heures à Saint-Louis et 252 heures à Louga. Au mois de septembre correspond une baisse générale de l'ensoleillement.

La moyenne annuelle de l'insolation se chiffre à 240 heures pour la station de Saint-Louis, 260 heures pour Linguère et 252 heures pour Louga.

4.3.2. L'évaporation et l'évapotranspiration

4.3.2.1. Evaporation PICHE

Les totaux moyens mensuels de l'évaporation (mesurée à l'évaporomètre PICHE) entre 1951 et 1994 à Saint-Louis, Podor, Linguère sont donnés au tableau XI et présentés à la figure 23. La station de Louga ne dispose de données que pour la période de 1970 à 1994.

Le minimum de l'évaporation PICHE intervient en septembre, au cœur de la saison pluvieuse, tandis que le maximum est atteint en saison sèche : en janvier pour Saint-Louis, en mai pour Podor et mars à Linguère et Louga. Son évolution est similaire à celle des températures.

Ici encore, on note l'opposition entre le domaine maritime, représenté par la station de Saint-Louis et le domaine continental, représenté par les stations de Podor, Linguère et Louga. L'influence maritime caractéristique de Saint-Louis fait qu'on y note les plus bas totaux moyens annuels évaporés : 151,3 mm contre 245,1 mm à Podor, 270,3 mm à Linguère et 246,6 mm à Louga pour la période 1970-94.

TABLEAU X
Moyennes de la demande évaporative en millimètres à différentes périodes
(Source : ASCENA)

Station	Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Saint-Louis	1951-1994	209.3	190.7	200.7	161.7	134.5	111.1	105.6	98.0	94.7	128.8	167.0	207.4	154.3
	1951-1980	218.8	204.3	211.2	174.3	139.9	120.0	116.1	106.2	102.3	133.1	177.0	217.6	165.1
	1980-1994	181.8	159.3	173.2	133.1	121.1	89.6	81.3	77.7	75.6	117.6	142.7	182.2	127.9
Podor	1951-1994	225.3	235.9	301.3	328.0	364.7	306.4	230.7	168.5	144.5	207.0	211.4	212.5	245.1
	1951-1980	205.6	223.8	291.6	328.2	365.6	308.1	231.6	162.1	134.2	187.8	191.9	191.1	236.1
	1980-1994	261.2	260.4	319.3	328.8	362.9	302.2	229.6	180.6	167.0	247.6	249.8	255.2	263.7
Linguère	1951-1994	330.5	341.2	413.5	401.9	379.4	265.0	168.7	110.5	105.1	190.2	278.8	302.1	270.3
	1951-1980	367.4	382.2	462.8	443.1	410.4	286.6	177.1	115.3	104.8	195.1	303.5	328.4	291.7
	1980-1994	257.1	259.6	313.7	320.2	316.0	219.2	150.0	99.0	103.8	181.2	224.6	245.6	223.9
Louga	1970-1994	318.1	303.4	335.2	303.6	279.9	190.4	159.4	131.0	119.6	217.3	282.5	321.4	246.6
	1980-1994	351.5	337.0	369.3	334.4	308.6	203.8	172.4	147.7	128.1	231.9	308.4	360.6	272.6

On note une baisse de la demande évaporative pendant la période 1980-94 à Saint-Louis et Linguère. Aux stations de Podor et Louga par contre, on enregistre une augmentation pour la même période. Ces variations s'expliquent par des conditions ou « contextes » climatiques locaux spécifiques à chaque station. En réalité, ces données sont à manipuler avec précaution vu les conditions dans lesquelles se font parfois les mesures sur le terrain.

Il semblerait que l'évaporation mesurée à l'évaporomètre PICHE soit trop élevée. Elle doit être multipliée par 0,6 pour avoir une bonne approximation de l'évaporation réelle sur eau libre (MICHEL, 1973).

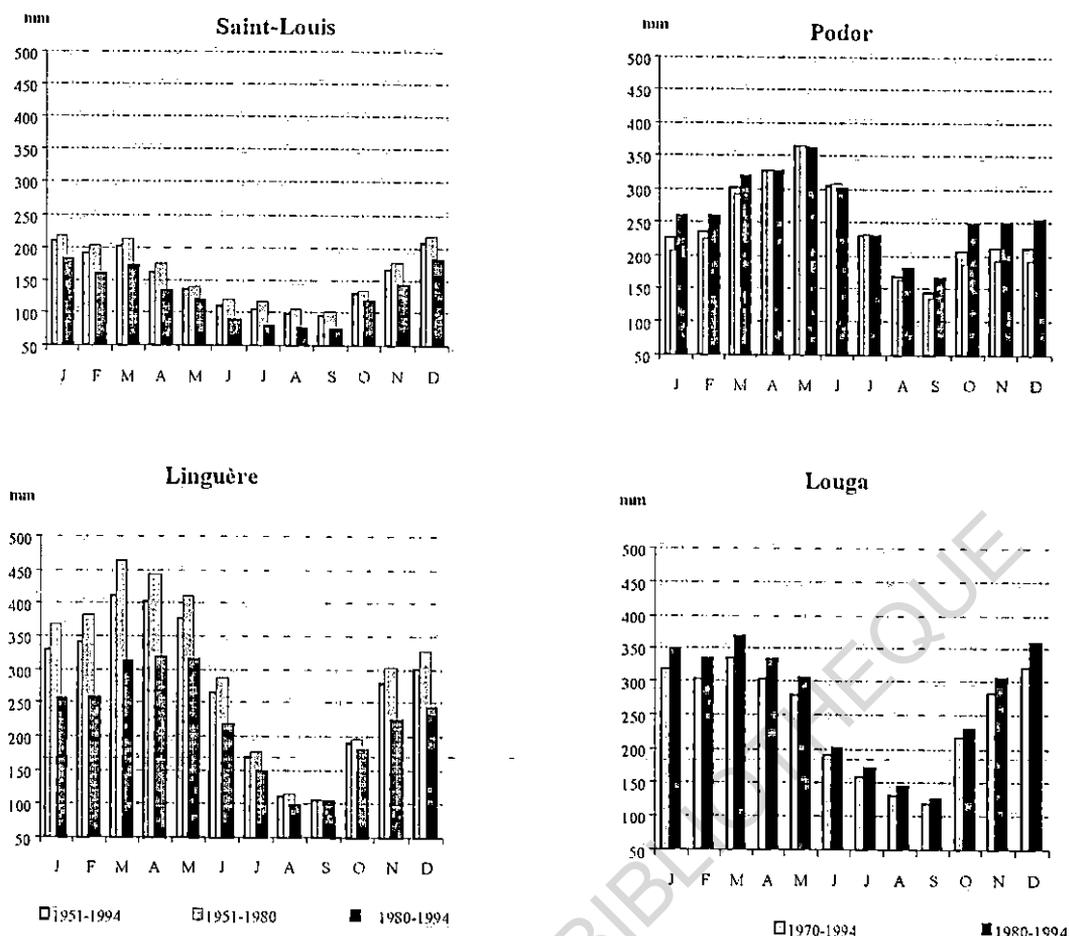


FIGURE 23. — Evolution de la moyenne mensuelle de la demande évaporative en mm.

4.3.2.2. Evapotranspiration TURC et PENMAN

L'évapotranspiration (ETP) par la formule de TURC a été calculée aux stations de Saint-Louis, Linguère, Louga, pour la période 1951-1994 (tabl. XII).

L'ETP TURC évolue de la même manière que l'évaporation PICHE ; elle ne s'en différencie que par le fait qu'elle est toujours moins élevée, car elle tient compte d'autres paramètres tels que l'humidité relative, la température et le rayonnement solaire.

Cependant, les valeurs de l'ETP TURC sont sous-estimées par rapport à celles obtenues par la formule de PENMAN qui repose sur une évaluation rigoureuse du bilan énergétique de la surface évaporante. Elle associe l'albédo de la surface évaporante (environ 0,25 % pour le bassin du fleuve Sénégal) déterminant un coefficient de correction sous la forme $1 - 0,25$ qui permet de corriger les valeurs données par les abaques de la radiation solaire directe.

TABLEAU XI
Moyennes mensuelles de l'évaporation TURC (en mm)

Station	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Saint-Louis	108	118	142	149	146	124	138	146	136	140	117	104
Louga	133	136	153	157	155	166	151	152	141	147	126	125
Linguère	150	162	193	196	188	154	155	150	142	147	144	137

L'ETP décadaire par la formule de PENMAN a été calculée par Constance MBAYE (1995) pour la période 1980-89 aux stations de Saint-Louis, Louga, Linguère et Podor (tabl. XII). Les cumuls annuels, comparés à ceux de la pluviométrie, sont présentés à la figure 24. Pour la décennie 1980-89, on enregistre les valeurs moyennes suivantes : 2 161 mm à Saint-Louis, 2 358 mm à Podor, 2 176 mm à Linguère et 2 370 mm à Louga.

L'année 1983 apparaît comme une année particulière : elle allie un fort déficit pluviométrique et une évapotranspiration extrême. Si la demande évaporative annuelle varie entre 2000 et 2200 mm à Saint-Louis, pour les autres stations par contre, elle atteint et dépasse même parfois 2600 mm. Entre 1981 et 1983, la demande est maximale, correspondant aux grandes années de déficit pluviométrique.

TABLEAU XII
Estimation de l'évapotranspiration en millimètres calculée par la formule de PENMAN (MBAYE, 1995)

Station	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	(1980-89)
Saint-Louis	2248.6	2222.8	2106.1	2199.4	2144.4	2069.1	2203.3	2163.6	2055.1	2202.4	2161.4
Podor	2608.3	2314.1	2332.7	2420.4	2335.5	2202.3	2035.6	2292.8	2398.6	2647.7	2358.8
Linguère	2023.0	2250.5	2139.5	2300.2	2100.7	1951.9	2254.4	2430.5	2217.8	2094.9	2176.3
Louga	2329.3	2376.5	2679.5	2491.9	2521.7	2232.2	2175.8	2271.9	2257.1	2366.0	2370.2

4.4. Le régime des Vents

En février, le régime des alizés et de l'harmattan prédomine partout. A Saint Louis, soufflent des alizés maritimes de direction NNW, dépassant la vitesse de 7 m.s^{-1} . Les alizés continentaux, de direction nord-est, sont dominants dans l'ensemble de la basse vallée. En mai, les alizés maritimes soufflent toujours à Saint-Louis, leur vitesse est parfois supérieure à 7 m.s^{-1} . En août, la mousson couvre entièrement le bassin ; les vents sont de direction ouest à sud-ouest avec des vitesses très faibles. Dès novembre, s'installe le régime de saison sèche avec des alizés maritimes orientés NNE à NW à la station de Saint-Louis où 80 % des vents observés au cours de l'année ont une vitesse supérieure à 3 m.s^{-1} .

Dans le Delta, souffle la brise de mer, notamment en fin de saison sèche. Elle s'intensifie en fin d'après-midi et atteint parfois les environs de Dagana.

Les vents de sables apparaissent en fin de saison sèche ; ils soulèvent des grains de poussière d'une dimension de 0,1 à 1 mm, à des altitudes de 0,1 à 1 m. Ils ont une action morphogénétique très efficace.

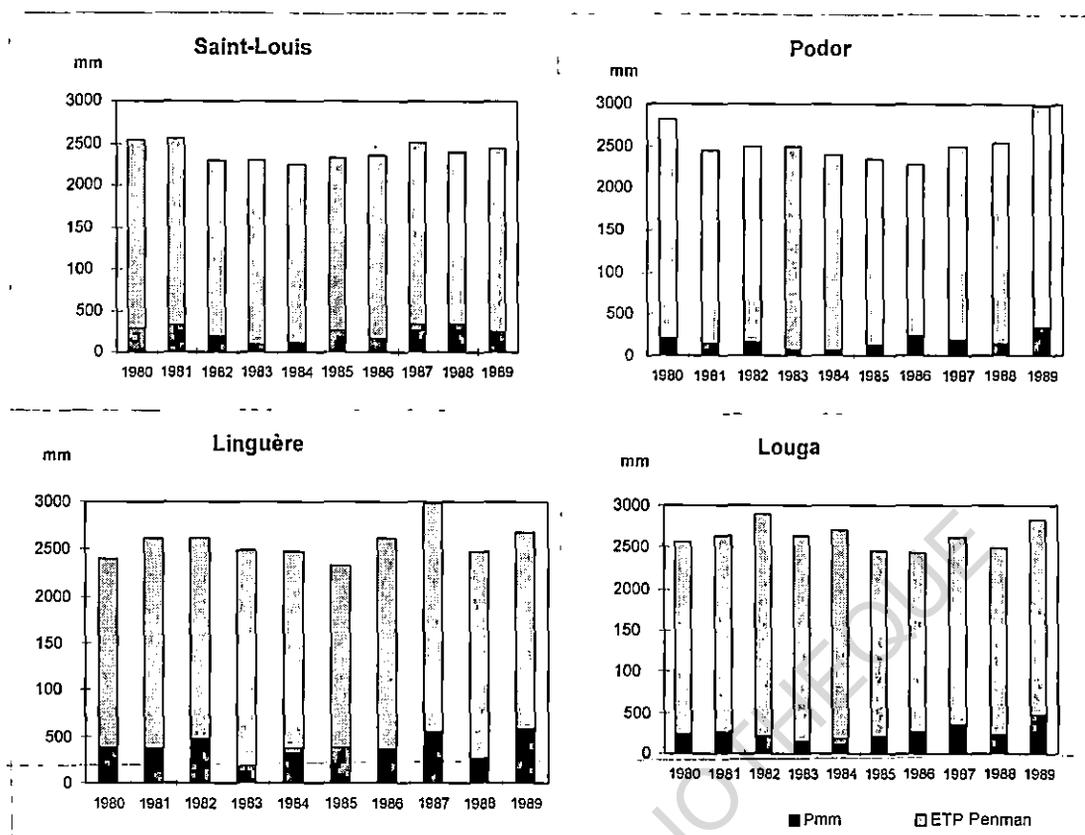


FIGURE 24. — Pluviométrie et évapotranspiration (calculée par la formule de Penman) annuelles (Source : MBAYE, 1995).

4.5. Caractérisation de la sécheresse récente dans le Delta

Au plan climatique, la zone sahélienne a souvent été marquée par des sécheresses qui sévissent cycliquement ; la dernière en date est celle qui sévit depuis 1968. Auparavant, deux grandes sécheresses de moindre intensité avaient marqué la première moitié du XX^e siècle : la sécheresse de 1910-1916 et celle des années 1940.

Cette succession de cycles de sécheresse a fait dire à FRÉCAUT et PAGNEY (1983) que, « [...] le cas sahélien contemporain s'inscrit peut-être plus simplement dans d'incessantes pulsions récentes à caractère « accidentel » que dans une tendance authentique ; la situation moyenne serait donc sans grands changements ».

En fait, la définition de la notion de sécheresse ne fait pas l'unanimité ; chaque auteur l'appréhende en fonction de son domaine de recherche propre.

4.5.1. Quelques définitions de la sécheresse

Beaucoup d'auteurs se sont intéressés à la sécheresse sahélienne, ses causes et ses mécanismes, les moyens de lutte mais aussi des prévisions quant à son évolution (MICHEL, 1973 ; LEROUX, 1980 ; FRÉCAUT et PAGNEY, 1983 ; SOW, 1984 ; COUREL, 1985 ; FAURE et GAC, 1987 ; et la liste n'est pas exhaustive).

Pour COUREL (1985), la sécheresse s'explique par l'existence d'anomalies dans la circulation générale de l'atmosphère bien plus que par la modification des états de surface attribuée de manière abusive à l'action de l'homme. Cet auteur va en contresens des raisons invoquées par CHARNEY (1975 et 1977) qui expliquait l'apparition et le maintien de la sécheresse par une altération de l'albédo de surface¹² du fait de l'action de l'homme. Pour cet auteur, les activités agricoles et pastorales ont entraîné une destruction de la végétation et augmenté ainsi l'albédo de surface des sols.

LE FLOC'H *et al.* (1992) perçoivent la sécheresse comme un phénomène accidentel de durée et de périodicité variables. Elle se caractérise par un déficit en eau et peut affecter toute région géographique. En zone aride ou semi-aride, ses conséquences sont désastreuses au niveau des écosystèmes et systèmes de production agricole.

LEROUX (1986) précise que les explications aux changements climatiques en Afrique sont souvent contradictoires mais que toute tentative d'explication doit reposer sur la connaissance de l'évolution climatique africaine, celle de la planète et des conditions actuelles.

En hydrologie, la sécheresse caractérise un état lié au manque d'eau. La sécheresse peut revêtir plusieurs aspects : elle est d'abord atmosphérique avant d'être pédologique, potamologique et enfin géologique (GEORGES, 1990). L'aridité, quant à elle, est une situation qui résulte du manque d'eau suite à une insuffisance des précipitations.

-- La sécheresse caractérise donc l'évolution d'un milieu sous l'effet de phénomènes climatiques dont le plus important est la variabilité spatio-temporelle des précipitations. À ce titre l'aridité, qui est un ensemble de facteurs climatiques caractérisant une région, est une conséquence de la sécheresse.

Le Delta du Sénégal situé à la limite nord du Sahel est caractérisé, depuis la fin des années 1970, par un déficit généralisé des précipitations, un allongement de la saison sèche et l'intensification des vents (alizés continentaux), soit un état que l'on qualifie généralement de sécheresse. Le début de la sécheresse est généralement fixé en 1968 alors que, pour LE BORGNE (1988), c'est 1965 qui constitue le point de départ réel.

L'étude de quelques indices d'aridité contribue à préciser cet état de sécheresse.

4.5.2. Les indices d'aridité

L'aridité peut-être appréciée, soit par des critères bioclimatiques, soit par les variations de l'écoulement superficiel. Des méthodes empiriques permettent de la caractériser. Parmi elles, nous avons retenu : les moyennes mobiles, la méthode des quintiles et les écarts des précipitations par rapport à la moyenne. La méthodologie de calcul de ces indices est donnée en annexe.

Les indices d'aridité de même que les variations annuelles et mensuelles des pluies sont étudiés à quatre stations présentant les plus longues séries de mesure : Saint-Louis, Louga, Podor et Linguère ; leurs localisations et leurs caractéristiques sont données à la figure 19 et au tableau II.

¹² L'albédo de surface correspond au degré de réflectance effective du sol (dans la région spectrale du rayonnement solaire) ; il peut être mesuré à l'aide de satellites météorologiques comme METEOSAT ou NOAA et aussi à partir des données de LANDSAT ou SPOT

4.5.2.1. Les moyennes mobiles

Le calcul des moyennes mobiles sur sept et onze ans met en évidence l'existence de cycles dans la distribution annuelle de la pluviométrie (tableau XIII et fig. 25). On note une baisse importante de la pluviométrie au début des années soixante-dix. Auparavant, signalons les sécheresses des années 1910 et 1940 qui ont eu moins d'impacts en terme de temps et d'intensité.

Durant la période 1961-1980, les précipitations annuelles dans le Delta étaient comprises entre 500 et 250 mm. En 1983-84, la plupart des stations sahéliennes atteignent leur minimum absolu ; Saint-Louis n'enregistre que 99,7 mm en 1983.

TABLEAU XIII
Caractéristiques des stations et des séries étudiées à la figure 25

Station	Série	Pluviométrie moyenne	Domaine climatique
<i>Saint-Louis</i>	1892-1994	330 mm	Alizé maritime de type I
<i>Dagana</i>	1918-1994	280 mm	Sahélien
<i>Podor</i>	1918-1994	274 mm	Sahélien
<i>Linguère</i>	1934-1994	456 mm	Sahélien

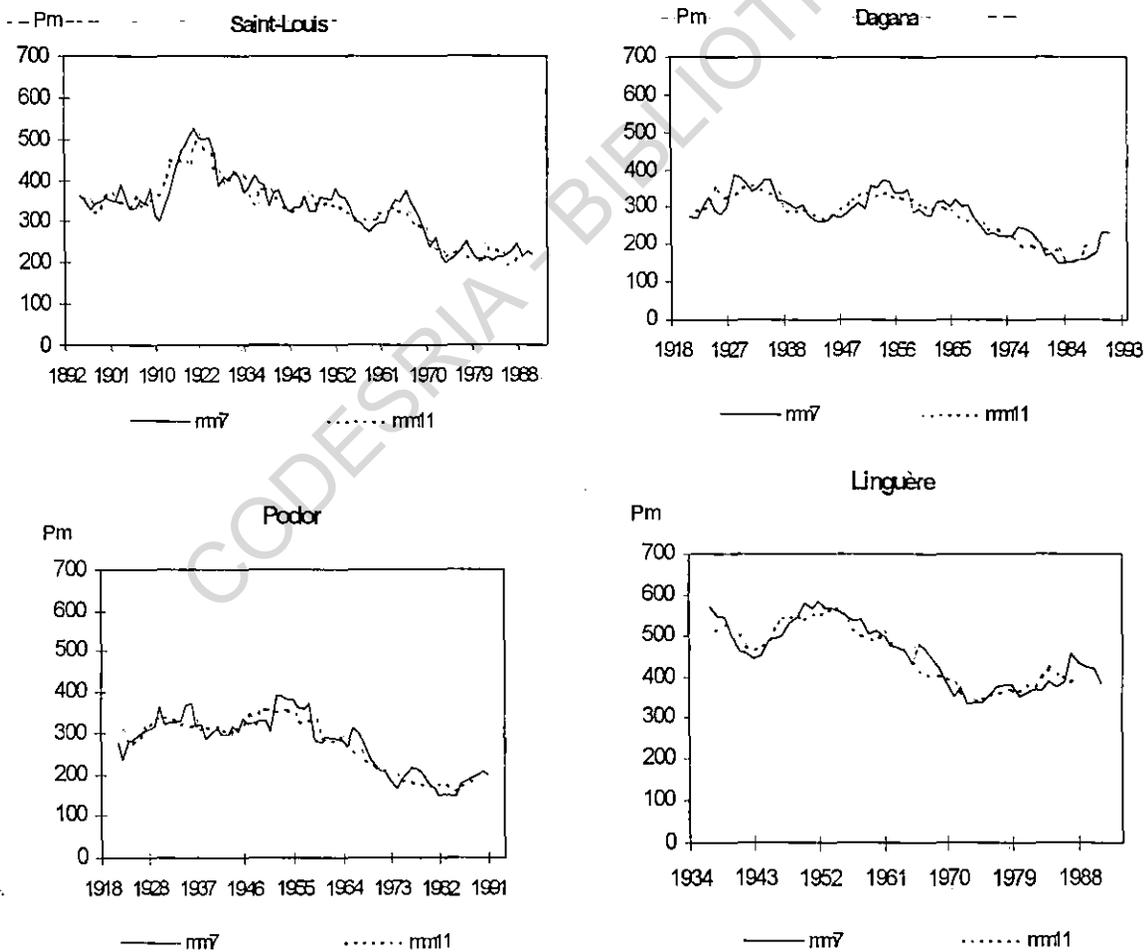


FIGURE 25. — Moyennes mobiles sur 7 et 11 ans (Source des données : ASECNA).

La courbe des moyennes mobiles sur 11 ans montre une légère reprise à partir de 1990. Cependant, rien ne permet de conclure, à l'instar de GAC et FAURE, au retour à une pluviométrie normale. Ces deux auteurs dans deux articles très controversés (FAURE et GAC, 1981 ; GAC et FAURE, 1987) prévoyaient le retour à une pluviométrie normale autour de 1985 puis 1991. Leur assertion était basée notamment sur une étude statistique de la variabilité des débits et des précipitations à la station de Bakel (figure 26). La réalité des observations sur l'ensemble du bassin leur a en partie donné tort car « le retour à l'humide » se fait encore attendre.

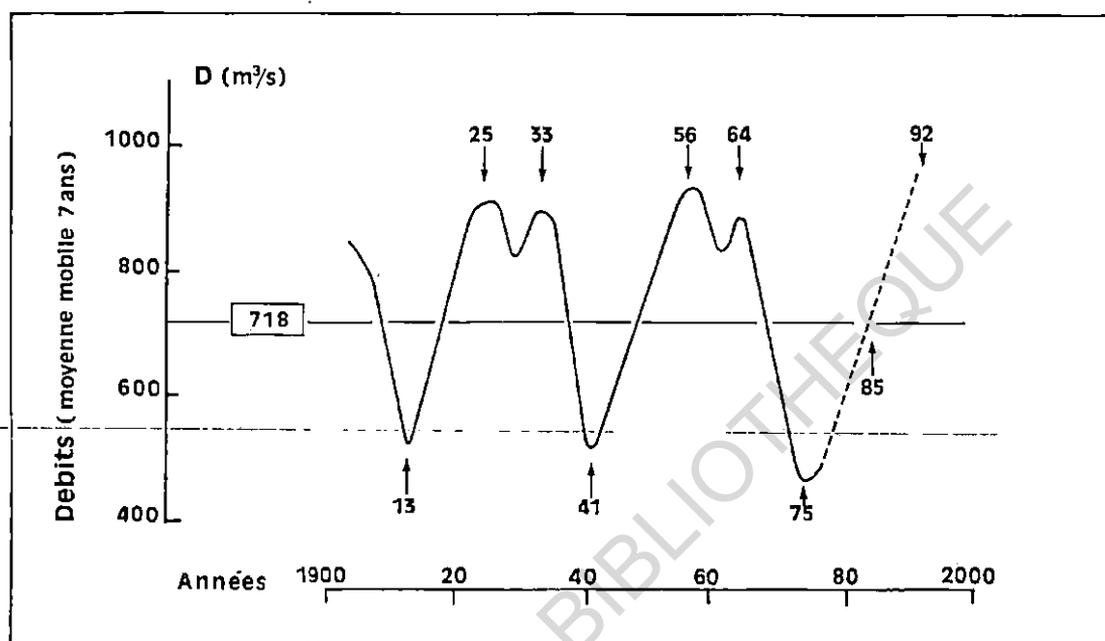


FIGURE 26. — Débits moyens annuels du fleuve Sénégal à Bakel et moyennes mobiles sur 7 ans (source : GAC et FAURE, 1987)

4.5.2.2. La méthode des Quintiles

La méthode des Quintiles (Annexe 3) a été appliquée aux données des stations de Saint-Louis, Podor, Dagana, Louga et Linguère pour deux périodes : 1931-1960 et 1961-1990 (tabl. XIV). Pour Saint-Louis et Podor, nous reprenons les valeurs calculées par MICHEL (1973) pour la normale 1931-1960.

Entre les deux périodes, on observe un abaissement très important des seuils moyens d'excédent et de déficit ; il en est de même des valeurs normales avec une diminution de 25 % à Linguère et à Dagana, de 30 % à Saint-Louis, de 35 % à Louga et de 45 % à Podor.

TABLEAU XIV

Répartition de la pluviométrie par quintiles pour les normales 1931-1960 et 1961-1990

<i>Station</i>	<i>Linguère</i>	<i>Louga</i>	<i>Saint-Louis</i>	<i>Dagana</i>	<i>Podor</i>
Période 1931-1961					
Record supérieur	853	865	593	795	793
Année	1936	1952	1943	1933	1955
<i>Premier quintile : très excédentaire</i>					
Valeur limite	612	659	439	367	379
<i>Deuxième quintile : excédentaire</i>					
Valeur limite	570	443	367	329	344
<i>Troisième quintile : normale</i>					
Valeur limite	506	401	314	276	318
<i>Quatrième quintile : déficitaire</i>					
Valeur limite	434	304	222	240	228
<i>Cinquième quintile : très déficitaire</i>					
Record inférieur	241	240	173	151	98
Année	1941	1942	1942	1959	1942
Période 1961-1990					
Record supérieur	681	599	531	403	431
Année	1990	1969	1969	1966	1969
<i>Premier quintile : très excédentaire</i>					
Valeur limite	523	436	343	315	309
<i>Deuxième quintile : excédentaire</i>					
Valeur limite	399	353	293	264	246
<i>Troisième quintile : normale</i>					
Valeur limite	377	259	220	206	169
<i>Quatrième quintile : déficitaire</i>					
Valeur limite	317	220	180	142	137
<i>Cinquième quintile : très déficitaire</i>					
Record inférieur	189	151	100	58	66
Année	1983	1983	1983	1984	1984

Sources : MICHEL (1973) complété par NIANG (1997)

4.5.2.3. Les écarts par rapport à la moyenne

Depuis 1968, soit au début du cycle actuel de sécheresse, presque toutes les années sont déficitaires par rapport aux moyennes des séries étudiées (figure 27). A Saint-Louis, par exemple, même l'année 1994¹³ a enregistré un déficit de 13,85 % par rapport à la moyenne.

Cette succession d'années humides et d'années sèches joue un très grand rôle dans le façonnement actuel du modelé : les périodes sèches favorisent les actions éoliennes ; les périodes humides amplifient l'action des eaux superficielles et souterraines. Les fortes pluies possèdent un pouvoir érosif d'autant plus élevé en zone sahélienne que le sol n'est jamais couvert, même en pleine saison des pluies, d'un tapis végétal bien dense.

¹³ Cette année-là, la ville a connu une sévère inondation ; une pluie exceptionnelle concentrée sur 24 heures avait été tenue comme responsable d'incidents techniques survenus au barrage de Diama et ayant nécessité son ouverture

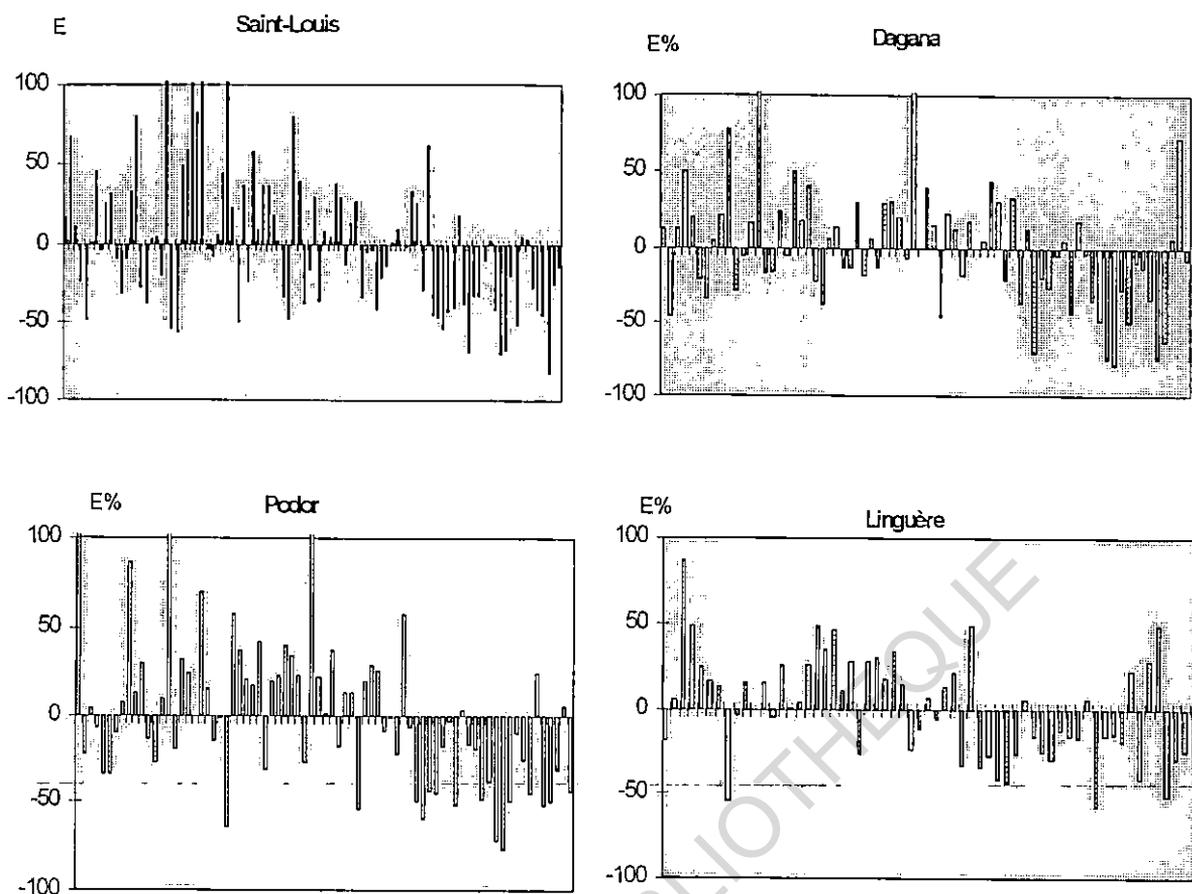


FIGURE 27. — Écarts par rapport à la moyenne (en %)

Le climat du Delta apparaît comme particulier dans le contexte du bassin du fleuve Sénégal. C'est un climat de type sahélien avec une légère nuance régionale sur la façade maritime. Chaleur et sécheresse y prédominent. Les alizés contribuent à façonner ce paysage si particulier dont la formation a débuté au Quaternaire. Elle a été marquée par la sécheresse récente qui sévit au Sahel depuis le début des années Soixante-dix.

La réalité d'une sécheresse hydrique dans le bassin du fleuve Sénégal depuis les années 1972-73 ne fait aucun doute. De l'avis des climatologues, c'est au Sahel, la sécheresse la plus longue et la plus lourde de conséquences que ce siècle ait connu. Elle a justifié et légitimé bien des choix d'aménagements et de politiques de développement dans le pays.

5. LES RESSOURCES EN EAU

Le Delta du fleuve Sénégal est parcouru par un important réseau de cours d'eau qui, pour la plupart, alimentent les aménagements hydro-agricoles. Ce réseau de défluent est alimenté par le fleuve Sénégal, soit naturellement, soit par des jeux de digues et vannes. Nous nous attacherons surtout à décrire le système fleuve Sénégal - Taoué - lac de Guiers. L'hydrogéologie porte encore les traces d'un passé récent qui se manifeste par des nappes généralement sursalées et un débit assez faible. Le cumul d'années sèches a entraîné des phases de tarissement précoce et des recharges insuffisantes de la nappe phréatique.

5.1. L'hydrologie du lac de Guiers

Le lac de Guiers est la principale réserve d'eau douce de surface du pays. Son évolution, son fonctionnement, de même que son bilan hydrologique sont étroitement dépendants de ceux du fleuve Sénégal. De l'origine à la mise en place des premiers grands aménagements, l'évolution de la cote du lac a suivi de près celle du fleuve Sénégal.

L'hydrologie du lac de Guiers a fait l'objet de nombreuses études qui ont permis d'affiner la connaissance de son fonctionnement, de son évolution limnimétrique et de ses bilans hydrologiques (ISE, 1983 ; COGELS, 1984 ; COGELS *et al.*, 1990, 1992, 1993, 1994, 1995 ; GAC *et al.*, 1991, 1992, 1993).

De sorte que dans cette partie, nous nous attacherons surtout à présenter les grands traits de l'hydrologie du lac, en insistant sur les effets du barrage de Diama.

5.1.1. Fonctionnement hydrologique du lac

Jusqu'aux alentours de 1916, le lac de Guiers fonctionnait en système naturel, avec un remplissage largement tributaire des crues et décrues du fleuve Sénégal et de celles du réseau hydrographique du Ferlo. Si l'arrivée d'eau salée est attestée jusqu'à Richard-Toll certaines années, elle ne constituait cependant pas une réelle menace aux activités agro-économiques.

C'est à partir des faibles crues fluviales de 1912, 1913 et 1914, que la remontée de la langue salée dans le fleuve a commencé à constituer un phénomène gênant pour l'activité économique, les eaux salées piégées annuellement dans le lac n'ayant pu être refoulées jusqu'à l'extrémité sud comme cela se faisait traditionnellement (HENRY, 1918). Cette situation est venue aggraver l'intense minéralisation des eaux du sud du lac héritée de l'époque Holocène où il y eut une invasion marine, comme en témoignent les sédiments marins trouvés dans la zone (MONTEILLET *et al.*, 1981).

Le fonctionnement du lac de Guiers a connu quatre situations successives, liées à l'évolution progressive de la mise en valeur de la région (COGELS *et al.*, 1990).

De 1916 à 1946, le fonctionnement hydrologique annuel du Guiers comporte deux phases distinctes : une phase de remplissage lors des crues du fleuve Sénégal et une phase d'isolement par la construction d'un ouvrage en terre argileuse à l'entrée de la Taoué. Cet ouvrage en terre empêchait la pénétration de la langue salée dans le lac en période d'étiage du fleuve Sénégal ; il était régulièrement détruit lors de l'arrivée de la crue.

A partir de 1947, la construction du premier pont-barrage de Richard-Toll, ouvert en moyenne du 15 juillet au 15 octobre, permet d'isoler en période d'étiage du fleuve Sénégal. Le reste de l'année, le lac évolue en fonction de l'évaporation, des pompages auxquels il est soumis et des pertes d'eau vers la basse vallée du Ferlo. En 1956, l'achèvement de la digue de Keur Momar Sarr augmente les capacités de stockage de la réserve lacustre et cause également l'assèchement progressif du Ferlo par élimination de son remplissage.

Entre 1957 et 1976, le lac de Guiers évolue alors en fonction de l'évaporation, des pompages de la SDE à partir de 1969 et de ceux de la CSS à partir de 1970. Les principaux utilisateurs de l'eau du lac sont alors :

1. la CSS qui prélève ses eaux d'irrigation à la station de pompage P1 dans le canal de la Taoué.
2. la SDE, qui pompe à la station de Ngnith, limitée par la profondeur de la prise d'eau de sa tour d'exhaure ; ses pompages doivent être interrompus pour des niveaux du lac inférieurs à -0,85m IGN ;
3. les cultures irriguées, concentrées en rive nord-est, autour de Mbane ; la SAED pratique également la riziculture, en rive ouest de la Taoué, où elle dispose de plusieurs petites stations de pompage ;
4. les cultures traditionnelles de décrue, sur tout le pourtour du lac, qui présentent un très grand intérêt économique (MATHIEU, 1983).

La période entre 1916 et 1976 est marquée par une série d'aménagements qui, avec plus ou moins de succès, sont destinés à soustraire le plan d'eau du Guiers aux effets conjugués de la sécheresse et de l'influence maritime. La CSS est le plus gros utilisateur de l'eau du lac ; l'importance de ses prélèvements et ses besoins sans cesse croissants, rendent aléatoire le développement de l'initiative privée.

Entre 1976 et 1985, le fonctionnement annuel du lac (figure 28) comporte schématiquement trois phases :

- PHASE 1 : en moyenne du 15 juillet au 15 octobre : remplissage du lac par les crues du fleuve Sénégal ; les pont-barrages de Richard-Toll (B1) et de Ndombo (B2) restent ouverts ;
- PHASE 2 : du 15 octobre au 15 février, la SONEES prélève ses eaux dans le lac et la CSS dans le fleuve ; B1 reste ouvert et B2 est fermé ;
- PHASE 3 : du 15 février au 15 juillet, la CSS et la SONEES pompent toutes deux leurs eaux dans le lac ; B1 est fermé pour empêcher l'arrivée des eaux salées aux pompes alimentant les canaux d'irrigation, tandis que B2 reste ouvert pour permettre à la CSS de pomper ses eaux d'irrigation à partir du lac.

Durant cette période, la SONEES a du souvent interrompre ses pompages pour cause de niveau trop bas et d'eaux de mauvaise qualité. Le lac est moins soumis aux pompages CSS mais subit les impacts de conditions hydrologiques défavorables dans le fleuve Sénégal. On note une diminution des volumes moyens annuels du lac, un marnage assez important (en moyenne 2,09 m) et l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation.

De 1976 à la mise en fonction du barrage anti-sel de Diama en novembre 1985, la région a connu de nombreux bouleversements dictés d'une part, par des conditions climatiques peu clémentes et d'autre part, par les besoins d'une population très affectée par la pénurie d'eau.

Certaines années, les mauvais remplissages et l'augmentation des prélèvements ont entraîné des situations hydrologiques extrêmes comme en 1982-83, par exemple, où la cote du lac atteint -1,40 m IGN en juin, avec un assèchement complet de sa région sud, la région nord se réduisant à une mare de 70 km² environ. L'inconvénient de ce fonctionnement est qu'il reste largement dépendant de l'importance des étiages dans le fleuve Sénégal et donc de la précocité de l'arrivée de la langue salée à Richard-Toll.

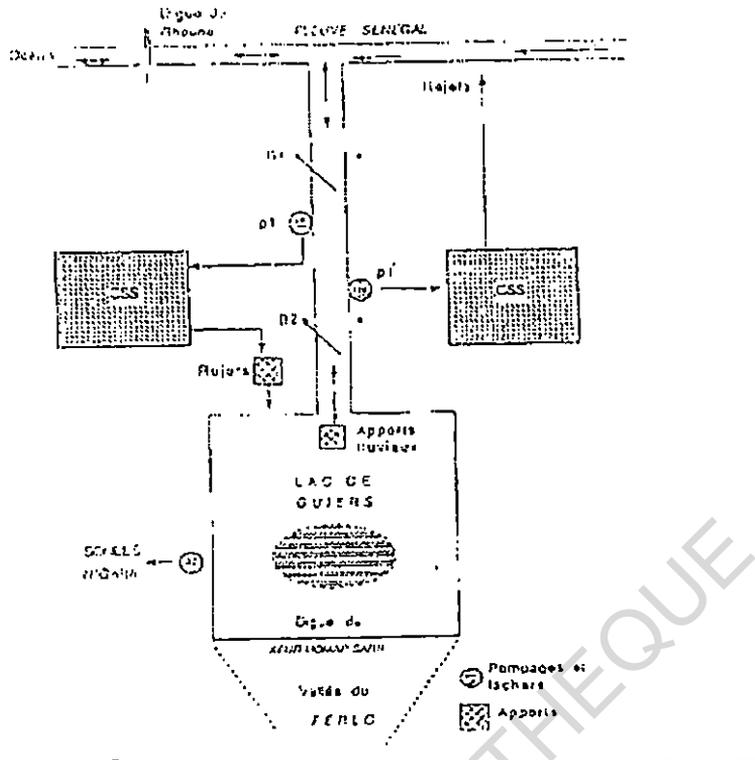


FIGURE 28. — *Fonctionnement annuel du lac de Guiers de 1976 à 1985.*

La mise en service du barrage de Diama, le 14 novembre 1985, a suscité de nombreux espoirs au niveau de l'agro-industrie et des exploitations traditionnelles. L'entrée en fonction du barrage de Manantali en 1988 complète désormais le dispositif.

Entre 1985 et 1987, le fonctionnement du Guiers est assez semblable à ce qu'il était lors de la période précédente. On note un niveau plus stable et la remontée de la langue salée ne constitue plus un problème. La gestion de la retenue de Diama étant parfois problématique, le lac sert quelques fois d'appoint au fleuve. A la mise en service du barrage de Manantali en 1987, la régularisation des débits du fleuve Sénégal assure à la réserve lacustre un niveau d'eau plus que suffisant durant toute l'année, à la hauteur de la jonction fleuve-Taoué.

En 1989, la CSS étend ses cultures au sud-est de la Taoué où elle installe une nouvelle station de pompage P3 ; elle installe également une seconde station de rejet au nord-est du lac.

L'année hydrologique 1991-92 débute de manière normale avec fermeture de B2 en octobre 1991, suivie d'une baisse progressive du niveau en phase d'isolement, en février 1992. La grande disponibilité de l'eau fluviale incite les autorités à ouvrir B2. La remontée brutale des eaux dans le lac noie les cultures de décrue alors en pleine activité dans la zone d'inondation traditionnelle du Guiers.

En 1992-93, B2 n'est fermé qu'en janvier 1993, puis rouvert encore en avril ; les vannes de la digue de Keur Momar Sarr restent ouvertes en permanence.

La limnimétrie du lac est de plus en plus dépendante de celle du fleuve dont les variations de cote provoquent des mouvements hydrauliques ponctuels du lac vers le fleuve et même du Ferlo vers le lac.

L'alimentation du lac en eau douce étant possible toute l'année, les barrages de Ndombo (B2) et Richard-Toll (B1) sont ouverts ou fermés en fonction des besoins de la CSS. En phase de remplissage, la digue de Keur Momar Sarr reste ouverte pour permettre l'évacuation des eaux très minéralisées du sud du lac vers le Ferlo et en même temps, une réalimentation de la vallée fossile du Ferlo. Ce fut le cas en 1988 et 1989 et en permanence depuis 1991. Le barrage de Richard-Toll étant resté ouvert depuis juillet 1987, la CSS prélève donc l'essentiel de ses eaux directement dans le fleuve où elles sont douces toute l'année.

Le fonctionnement du lac se déroule désormais selon deux scénarios (figure 29) que sont l'ouverture ou la fermeture des deux barrages sur la Taoué et de la digue de Keur Momar Sarr au sud. Notons enfin l'augmentation de la demande en eau, liée à l'extension des périmètres irrigués autour du lac. Il s'agit surtout d'initiatives privées, individuelles ou collectives, souvent soutenues financièrement par des ONG nord-américaines installées dans la région. Le maintien du lac à des cotes très élevées allié à la stabilité du niveau d'eau a entraîné l'abandon progressif des cultures de décrue. Ce nouveau type de fonctionnement influe nettement sur l'évolution limnimétrique de la réserve lacustre.

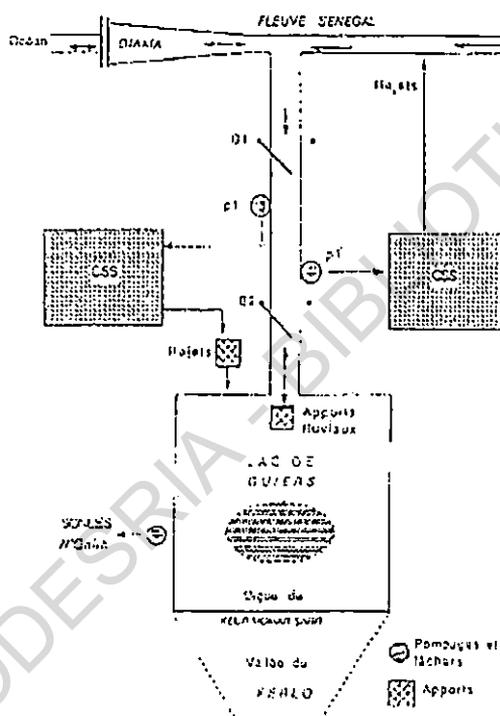


Figure 29. — Fonctionnement annuel du lac de Guiers depuis 1985.

5.1.2. Evolution limnimétrique

Plusieurs échelles installées autour du système lacustre permettent le suivi de la cote du lac ; les hauteurs d'eau du Guiers sont lues quotidiennement à l'échelle limnimétrique de la station de Ngnith depuis 1976. L'évolution du niveau lacustre depuis 1976 est indiquée à la figure 30. Avant la mise en service du barrage de Diama, l'évolution de la cote du lac était assujettie à celle du fleuve Sénégal ; les fluctuations du plan d'eau étaient fonction des périodes de remplissage et d'isolement.

Des cotes de -0,50 m IGN n'étaient pas exceptionnelles en fin de phase d'isolement. Certaines années, comme en 1980 et 1983, des cotes de -1,00 m IGN ont été observées, d'où un assèchement complet de la partie sud du lac. Le niveau moyen annuel du lac était de 0,38 m.

La limnimétrie du Guiers était caractérisée par un marnage assez important, en moyenne 2,09 m par an, le maximum étant de 2,55 m en 1982-83. En moyenne 150 km² de rivage étaient annuellement exondés permettant aux populations riveraines de pratiquer les cultures de décrue.

La construction du barrage de Diama et la formation du lac du même nom ont permis, dès la première année de fonctionnement de l'ouvrage, de relever sensiblement le niveau moyen du lac qui est passé à 1,05 m, soit 0,67 m de plus que la période antérieure.

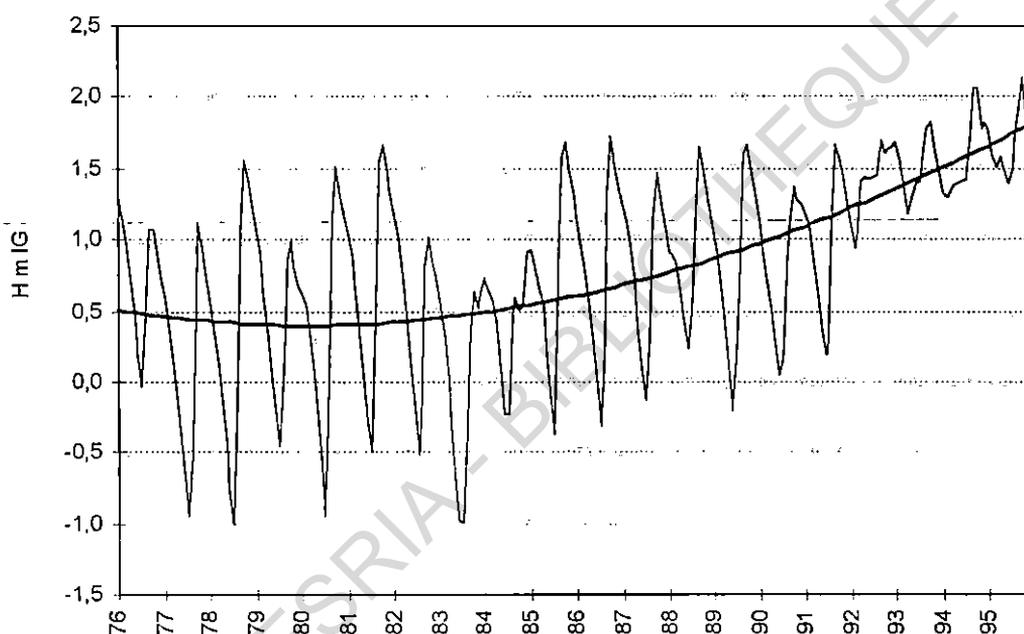


FIGURE 30. — Courbes de variation et tendance d'évolution des niveaux d'eau du lac de Guiers de 1976 à 1995.

Depuis 1985, avec la stabilisation du niveau d'eau du fleuve Sénégal et la disparition de la langue salée, on a noté de meilleurs remplissages de la dépression lacustre parfois même en dehors des périodes classiques.

La courbe de variation du niveau du Guiers traduit nettement l'influence positive du barrage de Diama sur l'élévation du plan d'eau. Avant 1985, les variations annuelles des hauteurs du plan d'eau présentaient de très larges amplitudes. Le niveau du lac n'est jamais descendu au delà de -0,50 m IGN, avec une diminution très sensible des amplitudes des variations annuelles. Cela s'explique par l'amélioration du remplissage et la diminution des pompages. Le rehaussement du niveau d'eau du lac est désormais apparent ; si l'évolution actuelle se confirmait, on ne devrait plus atteindre des cotes inférieures critiques.

Entre 1985-86 et 1990-91, l'évolution du plan d'eau du Guiers est restée sensiblement équivalente à ce qu'elle était lors de la période précédente, avec cependant des niveaux beaucoup plus élevés (environ 0,85 m). A partir de 1991-92, le mode de gestion du lac est caractérisé par des ouvertures et des fermetures anarchiques de la jonction fleuve - lac. L'année hydrologique 1992 en est l'exemple le plus édifiant.

En 1992, la cote du lac de Guiers a connu une évolution inhabituelle (figure 31). En effet, cette année a été marquée par :

- un remplissage précoce, dès le mois de mars par la crue artificielle ;
- une stabilisation du niveau autour de + 1,40 m IGN, en fin de saison sèche ;
- un remplissage secondaire par la crue naturelle ;
- une rupture des endiguements au nord-ouest et à l'est ;
- une submersion de la vallée du Ferlo sur 90 km² et sur une longue durée jusqu'à Yang-Yang ;
- une augmentation de 130 Mm³ en volume.

Le maximum absolu du Guiers est intervenu en septembre 1993 avec une cote de +1,92 m IGN. Sous une telle pression, les digues nord-ouest et est du lac cédèrent ; il s'en suivit une baisse importante du niveau.

Le niveau du lac de Guiers s'est désormais stabilisé avec des hauteurs toujours supérieures à 1,00 m IGN toute l'année. La réfection des digues au nord et à l'ouest devrait permettre un rehaussement de sa capacité de stockage, en prévision de la construction du canal du Cayor.

Un des inconvénients majeurs de l'évolution limnimétrique actuelle est qu'elle empêche la pratique des cultures de décrue. L'application d'une gestion rationnelle à ce niveau consisterait à stocker dans le lac les volumes juste nécessaires à la bonne marche de ses activités.

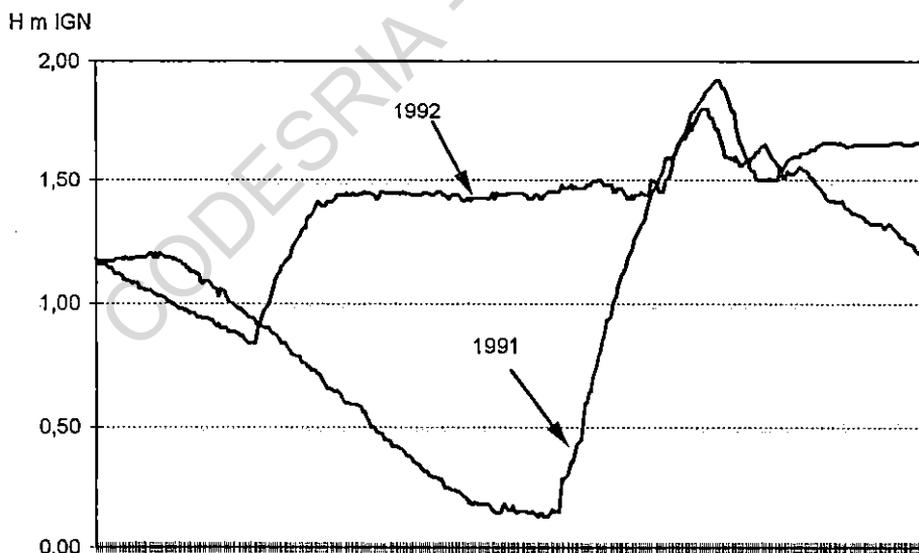


FIGURE 31. — Evolution limnimétrique journalière du lac de Guiers en 1991 et 1992.

5.1.3. Bilan hydrologique

Comme base du calcul du bilan hydrologique, il y a le calcul de la surface et du volume du lac dont les abaques (figure 32) ont été présentés par COGELS et GAC (1982), COGELS (1984) et affinés par COGELS et *al.* (1990).

Des équations polynomiales permettent de les calculer pour des cotes du lac (H) comprises entre -1,50 m et +3,00 m IGN ; elles s'écrivent :

$$\text{Surface (km}^2\text{)} = 170,72 + 80,03 H + 3,01 H^2 + 10,03 H^3 - 1,71 H^4 - 1,93 H^5 - 0,79 H^6 + 0,08 H^7$$

$$\text{Volume (10}^6\text{m}^3\text{)} = 181,69 + 169,54 H + 39,48 H^2 + 1,137 H^3 - 1,246 H^4 - 0,411 H^5$$

À la cote de référence 1,00 m IGN, le lac de Guiers couvre une superficie de 240 km², pour un volume de 390 millions de m³ et une profondeur moyenne maximale de 1,63 m (COGELS, 1993). Les zones les plus profondes, en région centrale, sont situées à -2,50 m IGN, sous le niveau actuel de la mer.

Compte tenu des nouvelles alternatives de gestion issues de Diama et Manantali, il est évident que de nouveaux abaques de surface et de volume devront être mis au point. Ou bien le lac devra être géré de telle sorte que la Taoué ne recevra que l'eau strictement nécessaire à la bonne marche des aménagements hydro-agricoles. Et cela suppose une connaissance précise des volumes d'eau pouvant transiter par le canal de la Taoué

La connaissance de l'évolution limnimétrique à Richard-Toll est également l'une des conditions nécessaires à l'établissement du bilan hydrologique du lac de Guiers. Cependant, il se pose encore le problème de la régularité des mesures et du suivi des échelles, de même que le calcul des débits transitant par le canal de la Taoué. Un début de réponse a été apporté par COLY (1996).

La connaissance du bilan hydrologique du lac de Guiers et de la distribution de ses différentes composantes est déterminante dans la compréhension de l'évolution qualitative des eaux. Le bilan hydrologique est lui-même assujéti aux différents types de fonctionnement découlant des aménagements.

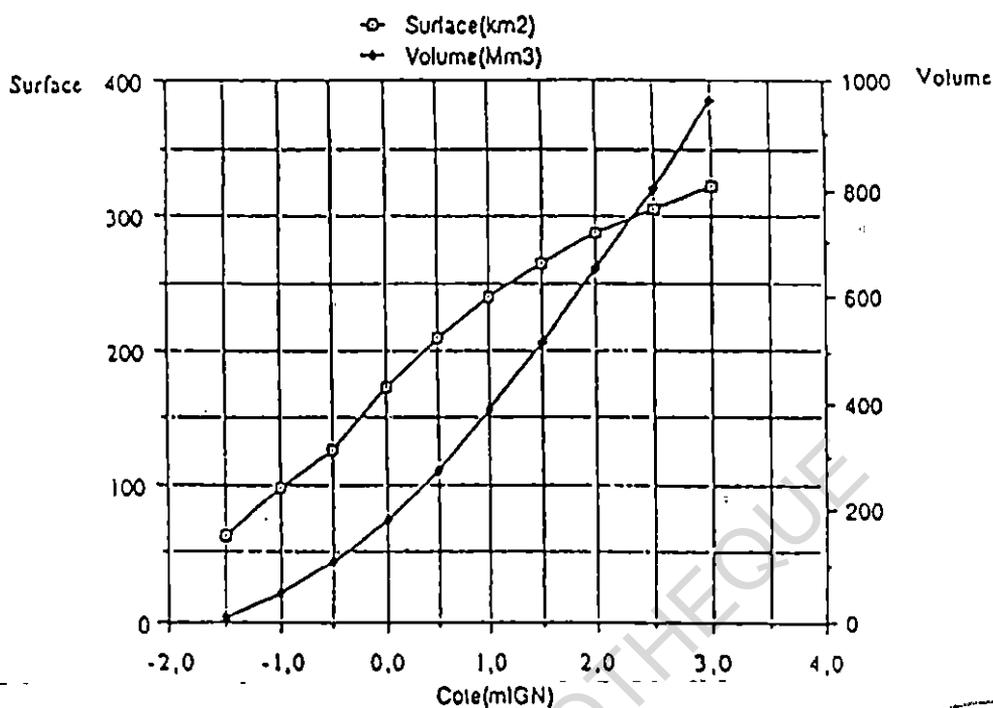
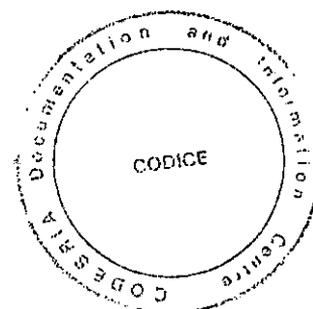


FIGURE 32. — Relation entre la surface et le volume du lac
(Source : EQUENSEN, 1993)



5.1.3.1. Les termes du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique du lac de Guiers résulte des apports et des prélèvements durant une période déterminée qui peut être soit l'année civile, soit l'année hydrologique ou alors l'intervalle de temps entre deux crues. L'équation générale du bilan s'écrit sous la forme :

$$V_2 - V_1 = (V_F + V_{po} + V_r) - (V_E + V_{p1} + V_{p2} + V_{p3})$$

V_1 représente l'état initial tandis que V_2 représente l'état final.

Les apports sont représentés par les apports fluviaux (V_F), les apports pluviométriques (V_{po}), les rejets de la CSS (V_r). Comme pertes, il y a l'évaporation (V_E), les pompages de la CSS (V_{p1}), les pompages de la SDE (V_{p2}) et les lâchers au Ferlo ou au Fleuve (V_{p3}).

Les pertes par infiltration et les échanges réciproques entre les nappes et le lac ne sont pas pris en compte dans le calcul du bilan hydrologique car étant considérées comme étant du même ordre de grandeur. Les composantes du bilan hydrologique sont schématisées sur la figure 33 (GAC et al, 1993).

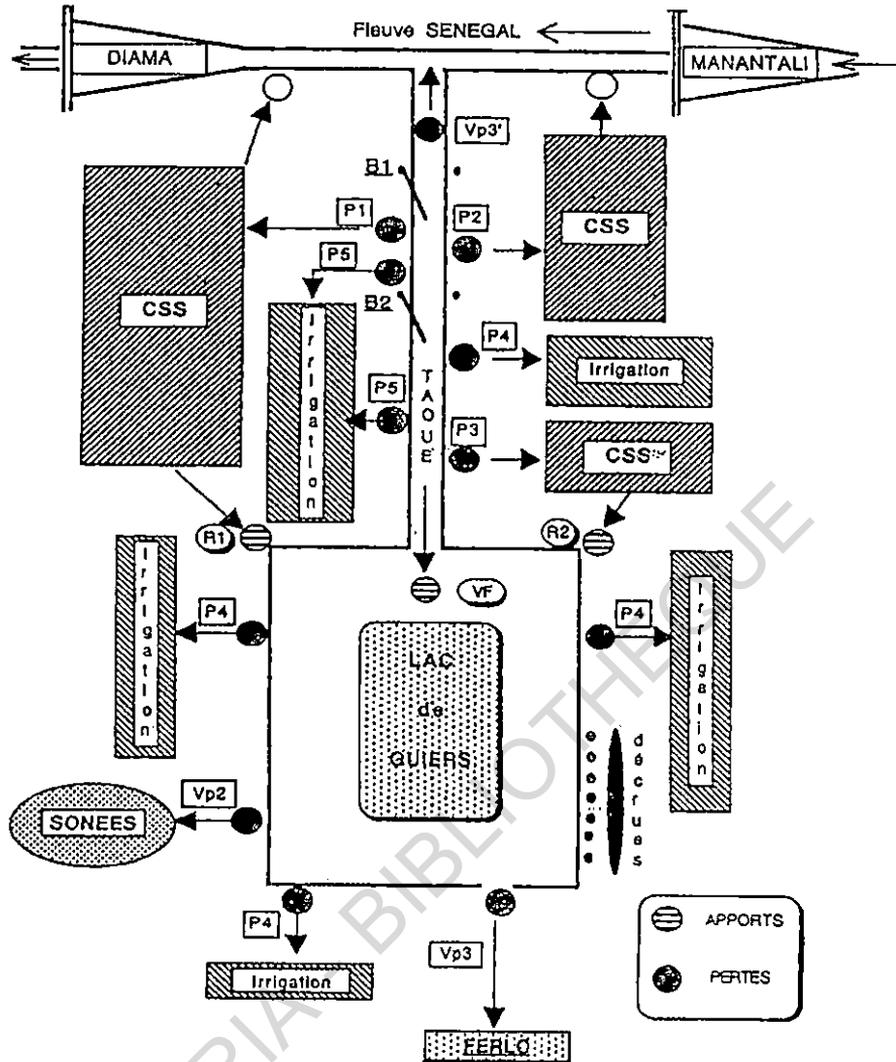


FIGURE 33. — Les composantes du bilan hydrologique du lac de Guiers (source : EQUENSEN, 1993).

5.1.3.1.1. Les apports

Les apports fluviaux (V_f) dépendent des disponibilités en eau dans le fleuve Sénégal ; leur quantification est difficile à cause de l'imprécision des abaques hauteurs - débits du canal de la Taoué. Avant le barrage de Diama leur intervention était régulée par l'ouverture des barrages sur la Taoué (B1 et B2) et se faisait généralement du 15 juillet au 15 Octobre. Depuis l'avènement des grands barrages, on a noté un accroissement des volumes d'eau en provenance du fleuve Sénégal via le canal de la Taoué.

Le terme V_f est estimé à partir des abaques de l'OMVS ; abaques qui se révèlent inadaptés du fait des rectifications opérées sur le système et des nouvelles conditions hydrologiques issues de la construction des grands barrages.

Une nouvelle courbe d'étalonnage a été définie par LAMAGAT et *al.* (1990) ; elle prend en compte deux échelles : celle du quai de Richard-Toll qui donne le niveau du fleuve (zéro à -0,40 m IGN) et celle située à l'embouchure de la Taoué (zéro à -0,37 m IGN). La formule de calcul de V_F est la suivante :

$$Q^2 = 21,7 (Z + 2)^{4,8} - (z + 2)^{4,8}$$

Q^2 : débit en $m^3.s^{-1}$; Z : cote du fleuve à Richard-Toll en m IGN ; z : cote du lac en m IGN

L'évolution des apports pluviométriques au lac (V_{po}) est directement liée à celle des conditions climatiques ; leur calcul se fait sur la base des données des trois stations climatologiques de l'exploitation de la CSS. Les apports pluviométriques ont été dissociés en apports directs et apports indirects en raison de la grande variabilité des surfaces et du contenu du lac. Les apports indirects sont estimés suivant une surface du lac limitée à l'altitude 4 m et un coefficient de ruissellement de 10% qui peut paraître excessif mais se justifie par l'étroitesse du bassin, la rareté de la végétation et l'occurrence des périodes d'hivernage. L'apport pluviométrique direct est calculé en fonction de la hauteur précipitée et de la surface du plan d'eau au jour j . Au cours de chaque averse, V_{po} est calculé selon la formule suivante :

$$V_{po} = P \times 10^{-3} (35,4 + 0,9 S)$$

P : pluie en mm S : surface du lac en km^2

Le terme (V_r) regroupe les quantités d'eaux de drainage rejetées aux deux stations de la CSS : R1 fonctionnant depuis 1976, à raison de $91\ 000\ m^3.j^{-1}$ pour environ 1875 ha et R2 depuis 1990, à raison de $21\ 240\ m^3.j^{-1}$ pour 550 ha.

Ces apports sont très chargés en sels, pesticides, engrais et produits chimiques divers et sont déversés aux deux stations nord-ouest et nord-est du lac, de part et d'autre du canal de la Taoué. Leur influence sur la qualité des eaux du lac est sensible.

5.1.3.1.2. Les pertes

Les pertes par évaporation (V_E) sont déduites du bilan hydrologique lorsque V_F et V_{p3} ne sont pas effectifs. En phase de remplissage du lac, l'imprécision des calculs de V_F et de V_{p3} rend aléatoire le calcul de l'évaporation du lac. Dans ce cas, V_E est estimée sur la base de sa corrélation moyenne avec les données d'évaporation en bac installés sur les périmètres de la CSS (COGELS et GAC, 1982). Les valeurs de V_E évoluent proportionnellement à celles de la surface du lac ; elles sont en augmentation depuis 1985.

Les pompages de la CSS (V_{p1}) regroupent les pompages des stations P1, P2 et P3. Ce terme prend aussi en compte les différents autres pompages pour l'irrigation sur le pourtour est du lac et le long de la Taoué (P4) ainsi que les pompages des rizières de la rive ouest (P5). Les pompages CSS se font soit dans le fleuve, soit dans le lac par le jeu de l'ouverture ou de la fermeture des ponts-barrages de Richard-Toll et de Ndombo, suivant le sens de l'écoulement. Les besoins en eau sont estimés à $100\ m^3.j^{-1}.ha^{-1}$ pour les 6 000 ha en culture continue des stations P1, P2 et P3 qui prélèvent leur eau dans le canal de la Taoué entre les deux ponts-barrages. Les pompages CSS sont respectivement de $600\ 000\ m^3$ et $44\ 000\ m^3$ pour la grande et la petite pompe. Les pompages SAED se font aux stations P4 (irrigation autour du lac et le long de la Taoué) et P5 [500 ha de riziculture en rive ouest et 150 ha de polyculture (tomate, arachide) en rive est]. Les données sur ces prélèvements sont inexistantes : elles sont estimées sur la base de la connaissance des besoins en eau des cultures. Jusqu'en 1985, les prélèvements

pour l'irrigation se faisaient presque exclusivement dans le lac durant plus de huit mois (15 Octobre - 15 Juillet). Depuis la mise en fonction du barrage de Diama, l'essentiel de ces pompages s'effectue directement à partir des eaux fluviales.

Les pompages de la SDE (V_{p2}) s'effectuent en région centrale ; ils sont assez constants en volume. Ils sont destinés à l'alimentation de la région de Dakar en eau potable. Les eaux sont pompées, traitées à la station de Ngnith, puis acheminées par conduite forcée jusqu'à Dakar. Les volumes moyens journaliers pompés sont passés de 30 000 m³ en 1976 à 42 000 m³ en 1989.

Le terme V_{p3} regroupe les lâchers au Ferlo et les transferts épisodiques du lac vers le fleuve (exemple de 1983-84). Ces lâchers au Ferlo ont débuté en 1988, dans le but de chasser les masses d'eau très minéralisées du sud du lac ; ils se font par l'ouverture de la digue de Keur Momar Sarr, en fin de phase de remplissage lorsque le lac est à une hauteur suffisante. Il semblerait que ces lâchers ne puissent se faire qu'avec un niveau moyen de +1,30 m IGN par le plan d'eau du lac. Les volumes déversés au Ferlo sont estimés ; cependant, l'installation d'échelles en amont et en aval de la digue de Keur Momar Sarr pourrait donner plus de précision quant aux volumes écoulés, dès lors que des jaugeages seront effectués.

5.1.3.2. Le bilan hydrologique général

- Le bilan hydrologique qui établit le solde entre les pertes globales et les apports traduit en fait les différents scénarios de fonctionnement du plan d'eau. Chaque nouveau type de fonctionnement induit un changement dans les termes du bilan et dans le bilan lui-même. La différence entre la période avant Diama et celle après Diama apparaît clairement ; elle montre l'aspect positif de cet ouvrage sur l'évolution du bilan hydrologique et donc sur la disponibilité en eau.

Il n'existe pas de données limnimétriques du lac de Guiers avant 1976. C'est seulement à partir de cette date que le lac a commencé à faire l'objet d'un suivi régulier.

5.1.3.2.1. Période 1976-1985

Le bilan hydrologique entre 1976 et 1985, indiqué sur la figure 34, a été calculé d'après les données de COGELS *et al.* (1990, 1991, 1992, 1993). Les entrées se chiffrent en moyenne à 548 millions de m³ contre 552 millions de m³ pour les pertes.

Le déficit du bilan hydrologique de 1976 à 1985 s'explique par trois faits principaux :

- la faiblesse des apports fluviaux, liée aux mauvaises conditions pluviométriques dans le haut bassin du fleuve Sénégal ;
- l'accroissement des transferts d'eau du lac vers le fleuve dans le but de compenser le déficit hydrométrique de ce dernier lors des étiages ;
- la croissance des besoins des cultures irriguées (extension des casiers de la CSS).

Certaines années, ceci s'est traduit par des situations extrêmes comme en 1980 et 1983 où les hauteurs d'eau du lac étaient largement inférieures à -1,00 m IGN.

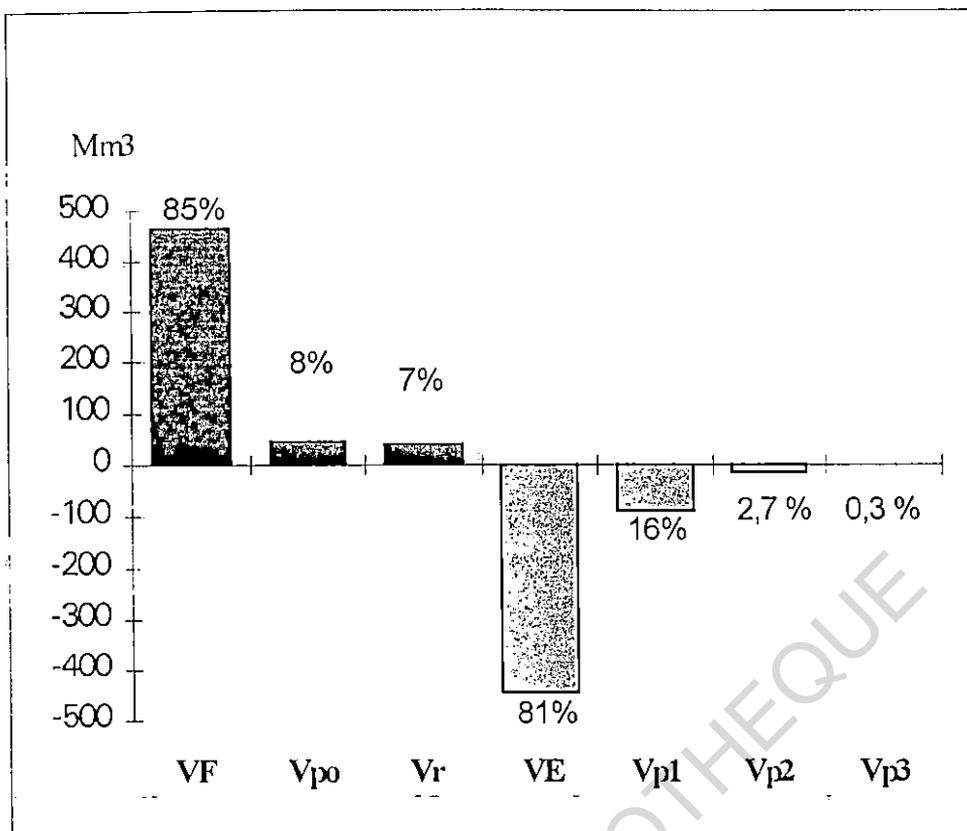


FIGURE 34. - - Bilan hydrologique moyen du lac de Guiers : période 1976-1985

5.1.3.2.2. Période 1986-1994

A partir de 1985 et surtout après 1987, on note un changement important dans le bilan hydrologique du lac (figure 35). La moyenne des apports annuels passe à 652 millions de m^3 soit 12 % de mieux par rapport à la période précédente. Au même moment, les pertes ont augmenté de 9 % et se chiffrent à 636 millions de m^3 .

Paradoxalement, cette augmentation des pertes est due aux processus évaporatoires liés à l'augmentation de la surface moyenne du lac. On note, par contre, une nette diminution des pompages destinés à l'irrigation ; la CSS, gros utilisateur de l'eau jusqu'en 1985, a désormais la possibilité de pomper en permanence dans le fleuve. Le terme Vp1 n'est plus soumis qu'à l'influence des différentes exploitations privées installées sur le pourtour du lac. Parallèlement, on observe une augmentation des pompages Vp3, due cette fois-ci à la remise en état de la confluence entre le lac et le Ferlo depuis 1988.

Il en résulte que les quantités d'eau stockées annuellement dans le lac de Guiers sont en croissance depuis l'ouverture du barrage de Diama.

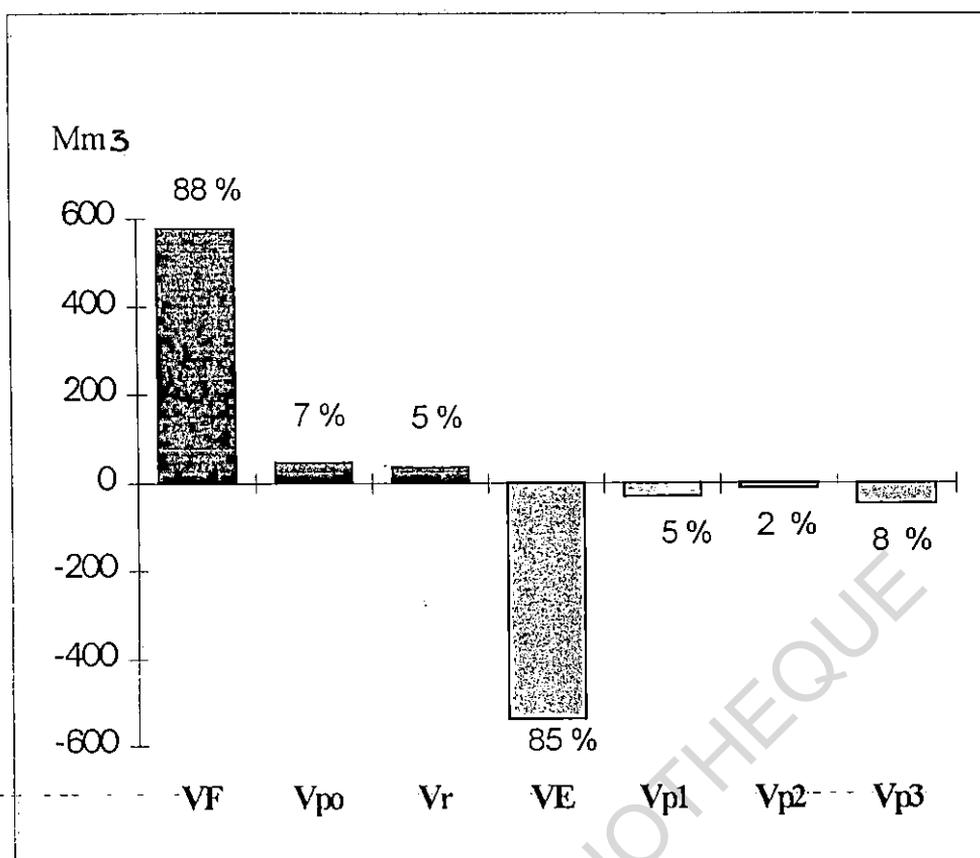


FIGURE 35. — *Bilan hydrologique moyen du lac de Guiers : période 1986 à 1994.*

La comparaison du fonctionnement et des bilans hydrologiques avant et après la mise en fonction du barrage de Diama montre nettement l'effet bénéfique de l'ouvrage sur les volumes d'eau stockés annuellement dans le lac. Cependant, malgré l'augmentation des disponibilités en eau douce, la persistance des rejets de la CSS et la présence d'eaux minéralisées dans le sud du lac font que l'on n'a pas abouti à un changement qualitatif conséquent de la réserve lacustre. Le problème de la qualité des eaux du lac de Guiers reste plus que jamais d'actualité : elle fait l'objet de la deuxième partie de cette étude.

5.2. L'hydrogéologie

Le bassin du fleuve Sénégal, presque entièrement inclus dans le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, possède plusieurs systèmes d'aquifères dont :

- le Quaternaire et le Continental Terminal à dominante sableuse et sablo-argileuse, l'Eocène ;
- le Paléocène essentiellement calcaire ;
- les sables du Maastrichtien ;
- les formations du socle.

Dans la région du lac de Guiers, ce sont les formations sablo-argileuses du Quaternaire, le Continental Terminal et le Mæstrichtien qui sont les plus représentés ; elles se superposent avec parfois des discontinuités. Leur type et leur nature est déterminée par la configuration géologique décrite plus haut. Ces différentes formations se classent en aquifères superficiels (sables quaternaires et Continental Terminal) et aquifères profonds (calcaires éocènes et sables mæstrichtiens). Le tableau XV présente les différentes caractéristiques de ces systèmes aquifères.

5.2.1. Les aquifères superficiels

Les aquifères superficiels sont au nombre de deux : les formations sablo-argileuses du Quaternaire et les dépôts du Continental Terminal en rive orientale du lac de Guiers. Leur épaisseur moyenne est de 60 m ; 20 m sur l'axe Dagana - Mbour. Ils sont exploités par des puits plus ou moins profonds. Ces aquifères superficiels sont caractérisés par la présence de sel d'origine géologique ; leur concentration en sel dépasse parfois celle de l'eau de mer selon DA BOIT (1993).

Le Quaternaire est surtout exploité dans les systèmes dunaires et alluvionnaires de la vallée du fleuve Sénégal, du Ferlo et du delta où il est souvent contaminé par l'eau salée d'origine marine. L'eau douce s'y présente généralement sous forme de lentilles au dessus des eaux saumâtres. La nappe des sables quaternaires est communément en contact avec celle du Continental Terminal dont il contribue à réguler le bilan soit par réalimentation, soit par reprise évaporatoire. L'épaisseur de cet aquifère varie de quelques mètres dans les zones érodées à plusieurs dizaines de mètres sur la côte Atlantique et le Ferlo.

La nappe du Quaternaire varie saisonnièrement de 50 à 80 cm, d'après l'étude de 12 piézomètres suivis de 1986 à 1991 par la DGRH¹⁴ ; les hauteurs maximales sont observées entre mai et juillet et les hauteurs minimales entre octobre et novembre. Son niveau piézométrique est généralement stable d'une année à l'autre.

Le Continental Terminal est une formation à dominante sableuse et sablo-argileuse. C'est l'aquifère le plus fréquent dans le bassin sédimentaire sénégalais ; il est généralement subaffleurant sous le Quaternaire. Son épaisseur varie de 10 m sur la côte à 150 m vers Tambacounda. Le Continental Terminal connaît de très fortes variations, généralement rapides et désordonnées. Celles-ci pourraient être liées aux pompages pour l'irrigation plutôt qu'à une exploitation par les puits (MH-PNUD, 1994).

Les aquifères superficiels ont un important potentiel en eau, notamment par le biais de l'infiltration des eaux de pluie. Cependant l'évapotranspiration et la drainance vers des aquifères sous-jacents réduisent considérablement les débits, surtout en années à pluviométrie déficitaire. Les débits pompés dans ces aquifères sont difficiles à évaluer, surtout dans le Delta où ils sont essentiellement exploités par des puits. Dans la région de Dakar, par exemple, l'apport de ces nappes constitue 25 % de l'adduction d'eau potable.

¹⁴ Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique

La forte dépendance vis à vis des conditions hydroclimatiques (pluviométrie, crues fluviales et évapotranspiration) représente une contrainte pour les aquifères superficiels. Traditionnellement, la submersion du walo par les eaux de crue représentait un excellent moyen de recharge pour ces nappes. Aujourd'hui, du fait de l'artificialisation du régime du fleuve et de la mise en place d'aménagements hydro-agricoles, ces apports sont supprimés. La recharge se fait essentiellement par les eaux des périmètres irrigués, du fait de la multiplication de ces derniers et d'inefficacité du système de drainage (DA BOIT, 1993). Ceci détermine des risques de contaminations et de pollution diverses pour ces aquifères.

5.2.2. Les aquifères profonds

Dans le Delta et la vallée du Sénégal, il s'agit essentiellement de formations mæstrichtiennes formées d'épaisses couches sableuses à gréseuses et sablo-argileuses à argileuses datées du Crétacé supérieur. C'est la plus importante réserve d'eau profonde du pays.

Le toit du Mæstrichtien s'abaisse d'ouest en est passant de 400-500 m dans le secteur de Saint-Louis à environ 100 m vers Richard-Toll. La profondeur de la nappe varie entre 10 et 50 cm. Ce sont généralement des eaux salées avec un taux moyen de Chlorures inférieur à 350 mg.l⁻¹ (norme OMS de potabilité). Il n'est atteint que par quelques forages profonds. Plusieurs atouts militent en faveur de l'exploitation des ressources en eau du Mæstrichtien, notamment :

- son extension spatiale (4/5 du territoire national) ;
- ses bonnes caractéristiques hydrodynamiques et son homogénéité ;
- ses réserves statiques définissant une pérennité à long terme ;
- sa bonne qualité hydrochimique d'ensemble.

Cependant la baisse rapide de sa surface piézométrique, les menaces de contamination par l'eau salée ancienne ou récente, la présence de fluor et la cherté des forages du fait des profondeurs à atteindre constituent autant de contraintes à l'exploitation des nappes mæstrichtiennes.

TABLEAU XV
Caractéristiques générales des systèmes aquifères du Delta du Sénégal
 (source : MH - PNUD, 1994)

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES	SYSTEMES AQUIFERES		
	Superficiel	Profond	
Lithostratigraphie	sables, sables argileux, argiles du QT, CT et OM	sables, sables argileux, argiles du Maastrichtien	
Unités aquifères et localisation	Aqu. Infrabasaltique Aqu. Lac. Thiaroye Aqu. Du Littoral Nord Aqu. De Basse Casamance Aqu. Du Sine-Saloum	Aqu. Libre du horst de Ndiass et captif dans le reste du bassin sédimentaire	
Type aquifère	Système généralisé intergranulaire libre sauf Infrabasaltique captif	Système généralisé intergranulaire libre (horst de Ndiass) à captif	
Nb de forages exploités	548	718	
Nb de piézomètres	147	35	
Profondeur du toit (m)	0 à qqs mètres	40 à 500	
Épaisseur	0 à 150	100 à 200	
Profondeurs eau (m)	1 à 80 (30)	+5 à 50 (25)	
Fluct. Interannuel. (m/an)	± 0.1 à 0.2	-0.3 à -0.8	
Fluct. Saisonnières (m)	± 0.1 à 0.4	± 0.5 à 1	
Salinité (g/l)	< 1 sauf deltas	< 1 sauf 1/3 occid.	
Fluorures (mg/l)	< 1	> 1 en zone côtière	
Débits unit. (m ³ /h)	5 à 100 (15)	10 à 250 (75)	
Débits spécif. (m ³ /h/m)	10 à 20	5 à 10	
Transmissivités (m ² /s)	1.10 ⁻² à 1.10 ⁻³	5.10 ⁻² à 1.10 ⁻³	
Coeff. d'emmagasinement	8 à 13 %	-	
Débits exploités	m ³ /j	110.000	165.000
	m ³ /an	40 millions	60 millions
Potentiel	Réserves (m ³)	60 à 110 milliards	300 à 400 milliards
	Recharge (m ³ /an)	1 à 1.5 milliards	0.5 milliard
Bilan	Bon potentiel aquifère mais sensible à la sécheresse, à la salinisation et à la pollution.	Excellent potentiel sur tout le bassin sédimentaire mais sérieux problèmes de surexploitation et de salinisation dans les régions côtières.	
Diagnostic	Exploité par des milliers de puits et céanes dans les nappes alluviales.	Forages coûteux mais économie d'échelle car débits élevés.	
Conclusion	Les problèmes préoccupants posés par la surexploitation des aquifères, aggravés par les risques de contamination saline dans les zones côtières, doit faire prendre conscience de la nécessité urgente de mettre en place des structures renforcées pour le suivi, la protection et la préservation de l'important capital en eau souterraine dont peut bénéficier le Sénégal pour son développement s'il en fait une gestion adéquate et planifiée.		

Chapitre II

LES HOMMES ET LEURS ACTIVITES ADAPTATION AUX CONDITIONS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES

L'ère d'abondance espérée avec les grands barrages a été un facteur déterminant dans la sédentarisation de la population, surtout des jeunes qui ont investi le secteur de l'irrigation artisanale. C'est ainsi que le nombre de périmètres irrigués villageois est en constante progression grâce à la disponibilité permanente de l'eau.

La ressource en eau est donc au centre de la dynamique socio-économique du Delta ; elle conditionne à la fois l'évolution démographique et la distribution spatiale des établissements humains. A ce sujet, Boubacar BARRY a écrit en 1984 :

« Ainsi, le fleuve Sénégal et le lac de Guiers constituant de par leurs vallées fertiles le nerf de la vie économique du Waalo, garderont une importance capitale tout au long de son histoire. Car il suffirait de la dévastation de leurs abords pour neutraliser toutes les cultures et réduire le pays à la famine. [...] En effet, le reste du pays est constitué de sables où nomadisent quelques pasteurs qui d'ailleurs, ne peuvent non plus se passer, pendant une période de l'année, des alentours verdoyants du fleuve et des rivières pour faire paître leurs troupeaux. [...] ».

C'est dire donc que la présence du fleuve Sénégal et de ses défluent a fortement marqué la répartition des établissements humains dans toute la région du Delta. Au plan ethnique, on note encore la domination des *waalo-waalo* qui restent supérieurs en nombre et propriétaires de l'essentiel des terres.

Les importantes perspectives de développement offertes par la pratique de l'irrigation ne sont pas arrivées à supplanter totalement les systèmes traditionnels de production tels que l'agriculture pluviale, l'élevage extensif de transhumance et la pêche qui sont encore les principaux moyens de subsistance dans la région du lac de Guiers.

1. LE MILIEU HUMAIN

1.1. Composition ethnique

La population autour du lac de Guiers est composée essentiellement de wolofs dit *waalo-waalo*, de peuls et de maures harratines ; sa distribution spatiale reste encore fortement dépendante de l'opposition classique entre le *waalo* et le *dieri*.

Les wolofs ou *waalo-waalo* sont le groupement ethnique dominant ; ils représentent 57 % de la population du lac de Guiers (MBENGUE, 1981 ; KANE, 1992). Dans la région de Saint-Louis, ils représentent 27,7 % de la population selon les chiffres du dernier RGPH¹. Dans le département de Dagana, les wolofs ou *waalo-waalo* représentent 58 % des effectifs. Ils sont traditionnellement installés sur les terres du *waalo* et ce, depuis l'époque du royaume du même nom. Entre 1920 et 1956, quelques villages ont été cependant fondés par les wolofs dans le *dieri*.

¹ Recensement Général de Population Humaine (1988)

Les peuls, « véritables maîtres du *dieri* », constituent 33 % de la population de la région du Guiers et 14,8 % de la population totale de la région de Saint-Louis. Ils vivent dans de petits campements dispersés à travers le *dieri* ; dans les années 1980, on a recensé environ 150 campements peuls dans la région. Leur fixation dans cette région remonterait à la mise en place des Chefferies et le creusement de puits à l'est du lac par l'autorité coloniale.

Traditionnellement éleveurs, les peuls ont su, à la faveur de l'augmentation des disponibilités en eau dans le lac, s'impliquer dans l'agriculture irriguée. Des villages comme Témèye Peul et Ndiack Fall, par exemple, exploitent trois périmètres de 50 hectares chacun à Ndombo et Thiago.

Les maures Harratines, environ 10 % de la population rurale de la région du Guiers, vivent dans de petits campements à proximité des points d'eau. A titre indicatif, ces maures ne représentent, selon le dernier RGPH, que 4,1 % de la population de la région de Saint-Louis. Ils sont répartis en deux groupes, suivant leur appartenance socioprofessionnelle :

- les agriculteurs - éleveurs, installés dans la région depuis le début du siècle ;
- les pêcheurs installés à Bountou Back dont l'implantation est plus récente.

On trouve également dans la région différentes autres minorités ethniques (toucouleurs, diolas, sérères, soninkés...) attirées par l'industrie sucrière et aussi, de plus en plus, par l'embauche d'ouvriers agricoles sur les périmètres irrigués. À noter aussi, la présence d'une communauté *laobé*, dispersée dans les villages *wolofs* ; leur principale activité est la sculpture et leur répartition dans la région est donc fonction de la facilité à trouver du bois d'œuvre.

Cependant, le facteur ethnique n'est plus aussi déterminant qu'il y a une dizaine d'années. Cette tendance à la spécialisation ethnique au niveau des activités traditionnelle a aujourd'hui fortement régressé.

1.2. Evolution démographique

Le lac de Guiers n'est pas circonscrit dans une seule entité administrative (figure 36). Sa partie nord appartient à la région de Saint-Louis (département de Dagana) tandis qu'au sud, il déborde sur la région de Louga (département de Keur Momar Sarr). D'où donc une difficulté pour déterminer la population de la région du lac.

L'accroissement de la population du système fluvio-lacustre était un phénomène prévisible, même si la vallée du fleuve Sénégal est traditionnellement une terre d'émigration. Depuis la mise en service du barrage de Diama en 1985, la tendance est au retour à la terre. L'autre autre phénomène nouveau est la concentration des peuls nomades autour du lac de Guiers et dans le Ferlo. La forte compétition entre élevage et agriculture irriguée ayant fortement contribué à cette concentration suite à l'occupation des anciens parcours du bétail.

Quelques données démographiques issues du recensement de 1988 ainsi que des données issues d'enquêtes de l'ENEA² sont présentées aux tableaux XIV et XV. Elles donnent une idée de l'évolution démographique au Delta et dans la région du lac de Guiers.

² École Nationale d'Économie Appliquée

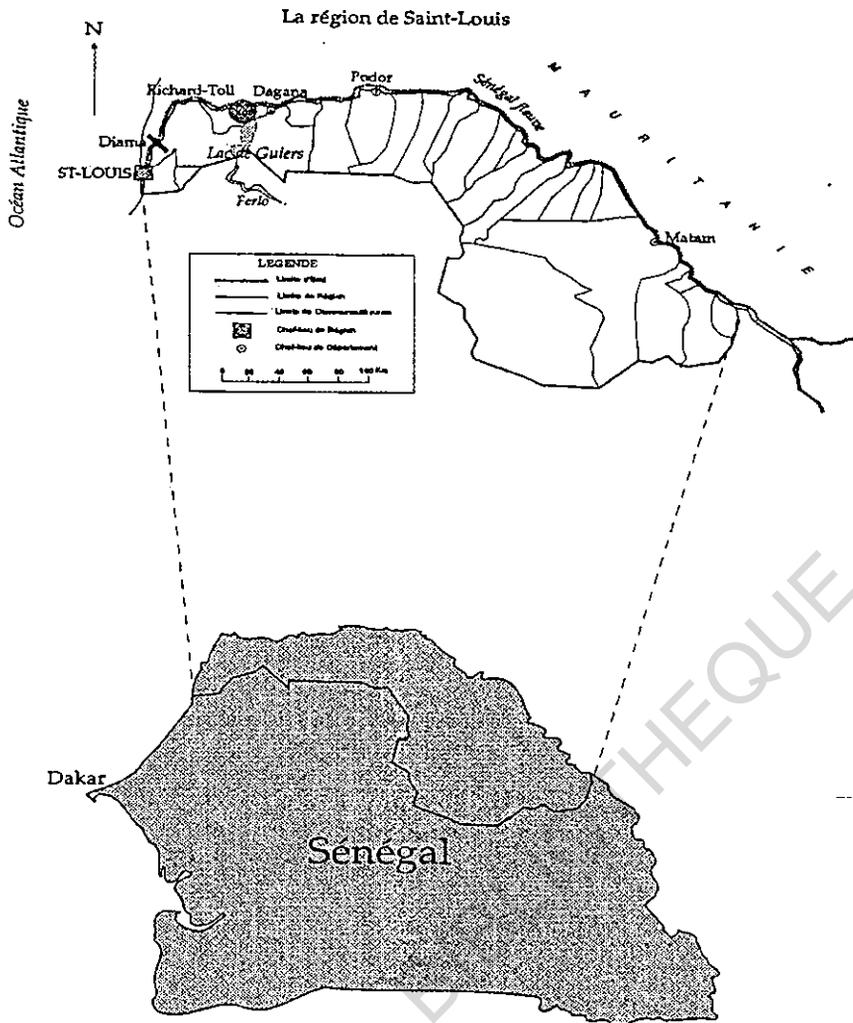


FIGURE 36. — Situation administrative du Delta.

TABLEAU XVI
Quelques données de population dans la région du Delta

Entité	Superficie (km ²)	Population 1988	Population 1990
A Ross-Béthio	2986.20	50407	54169
CR Ross-Béthio	2385.30	33208	35097
CR Keur Momar Sarr	759.00	12844	13702
A Mbane	2285.20	32779	35304
CR Mbane	1673.30	19251	21087
CR Rosso Sénégal	594.90	17199	19073
CR Syer	828.10	3653	3706
D Dagana	6336.50	285348	307464
ZU Saint-Louis	-	115372	122049
ZU Richard-Toll	-	29611	35022

A : arrondissement ; CR : communauté rurale ; ZU : Zone urbaine

(Sources : BNR³, RGPH, 1988) ; ENEA, 1992)

³ Bureau National du Recensement

TABLEAU XVII
Population des principales localités du lac de Guiers, selon le RGPH de 1988
 (Source : Direction de la Statistique)

Communauté rurale	Nom localité	Nbre Concessions	Nbre Hommes	Nbre femmes	Population totale
KEUR MOMAR SARR	<i>Mbrar</i>	15	158	167	325
	<i>Diamenar Keur Kane</i>	13	75	86	161
	<i>Diamenar Loyene</i>	19	106	113	249
	<i>Diamenar Peulh</i>	5	18	12	30
	<i>Diokoul</i>	23	123	130	442
	<i>Ganket Balla</i>	51	298	319	669
	<i>Gankette Guent</i>	30	142	154	296
	<i>Keur Momar Sarr</i>	76	421	470	891
MBANE	<i>Foss Ndiakhaye I</i>	16	75	88	163
	<i>Foss Ndiakhaye II</i>	9	19	15	34
	<i>Tèmèye Salane</i>	26	124	141	265
	<i>Tèmèye Peulh</i>	19	70	59	129
	<i>Mbane</i>	70	423	400	823
	<i>Ndiakhaye</i>	55	183	366	549
	<i>Ndombo</i>	147	940	975	1915
	<i>Saneinte Tacque</i>	41	172	177	349
	<i>Saneinte Kaw</i>	9	47	36	83
	<i>Sinthie (Malla)</i>	16	60	77	137
	<i>Tèmèye</i>	25	158	175	333
	<i>Thiago</i>	76	488	480	968
ROSS-BETHIO	<i>Dialang</i>	11	48	39	87
	<i>Diokhor 1</i>	22	167	156	323
	<i>Diokhor 1</i>	22	112	93	205
	<i>Diokhor 2</i>	6	49	42	91
	<i>Ngnith</i>	151	799	810	1609
	<i>Malle</i>	20	114	117	231
	<i>Mhayènne (Gollom)</i>	20	126	135	261
	<i>Naéré</i>	2	11	11	22
	<i>Nder</i>	22	143	142	285
	<i>Yamane</i>	21	161	166	327
ROSSO SENEGAL	<i>Bountou Back</i>	36	125	116	241
	<i>Colommat</i>	17	111	132	243
	<i>Pakh</i>	17	137	126	263
	<i>Yetty Yone</i>	10	64	62	126
RICHARD-TOLL	<i>Ndombo Alarba</i>	51	331	378	709

Il n'existe aucun recensement précis de la population évoluant autour du lac de Guiers ; tout au plus y a-t-il quelques approximations faites par divers auteurs ou organismes. La mobilité d'une partie de cette population (transhumance des éleveurs, campements de pêcheurs) rend en effet très difficile l'établissement de statistiques précises. En plus, le lac de Guiers n'est pas une région administrative ; il recoupe à la fois la commune de Richard-Toll, une partie de l'arrondissement de Ross-Béthio, l'arrondissement de Mbane et celui de Keur Momar Sarr.

Selon les estimations de MBENGUE (1988), la population du lac de Guiers serait passée de 40 000 habitants en 1981 à 100 000 en 1987. Pour la même période, la densité moyenne au kilomètre carré est passée de 14 à 36 habitants. Cette répartition dissimule cependant d'importantes disparités spatiales. Le nord du lac reste encore beaucoup plus peuplé que la partie sud où les villages sont très éloignés les uns des autres. Mais l'accroissement des ressources en eau semble avoir favorisé la stabilisation des populations au sud du lac ; les peuls traditionnellement nomades se consacrent de plus en plus à l'agriculture irriguée, soit comme activité principale, soit comme moyen de subsistance lors des périodes de soudure.

Avec plus de 100 000 habitants aujourd'hui, le lac n'est pourtant pas une région surpeuplée. La population est restée très jeune mais très inégalement répartie : les zones riveraines du lac et de la Taoué abritent environ 75 % de la population totale. Dans le Delta, il existe un axe de densité moyenne de 30 à 70 habitants au km² autour des zones à périmètres irrigués, c'est à dire entre Ross-Béthio et le long de l'axe Gorom-Lampsar.

Au delà, il faut noter les disparités entre Richard-Toll qui regroupe, sur 15 km², plus du quart de la population de la région du lac de Guiers, soit 627 à 687 habitants au km². Les trois quarts restants sont dispersés sur 2 785 km².

L'évolution démographique rapide de Richard-Toll est liée principalement à la présence de la CSS qui y a joué un rôle prépondérant. L'introduction de l'agro-industrie a entraîné une explosion démographique (figure 37). La ville comptait 1 862 habitants en 1958 ; en 1992, elle en compte environ 45 000 à 50 000. Les taux de croissance calculés sur la base des recensements de 1976 et 1988 sont de l'ordre de 12 %.

L'arrondissement de Mbane qui s'étend sur 2 541 km² a une population estimée à 35 360 habitants en 1990. L'arrondissement de Ross-Béthio compte environ 50 400 habitants, soit 16,8 habitants au km² selon le RGPH de 1988. En mars 1995, cette population est estimée à environ 53 000 d'après une étude de l'OMVS. Cette population est répartie comme suit :

- wolofs : 83 %, agriculteurs ;
- maures : 9 %, dans la zone frontalière ;
- peuls : 5 %, concentrés dans le diéri sur la zone du lac de Guiers ;
- toucouleurs : 3 %, dans les villages de Kassack sud, Kassack nord et Tediél toucouleur ;
- sérères : 1,7 % dans les aménagements de la SAED.

Le RGPH de 1988 indiquait au moins cinq localités de plus de 2 500 habitants dans le Delta, dont deux villes : Saint-Louis et Richard-Toll qui à l'horizon 2000 verront leur population quasiment doubler (figure 38).

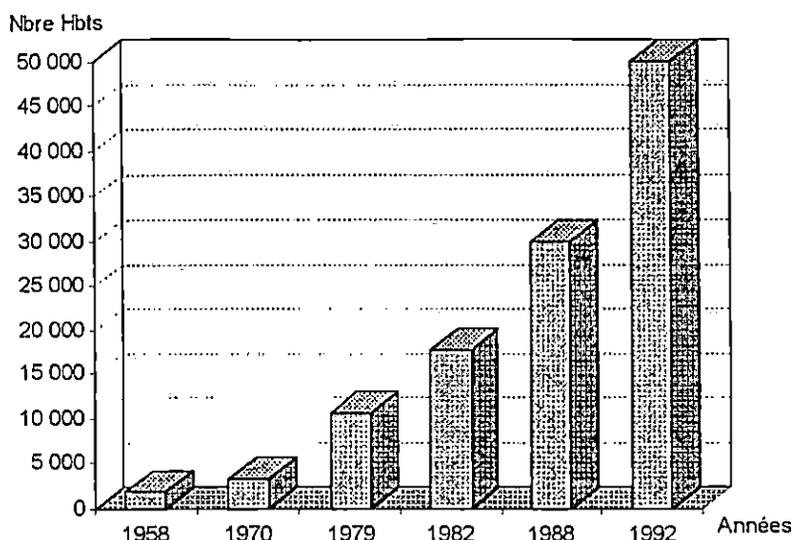


FIGURE 37. — *Évolution de la population de Richard-Toll entre 1958 et 1992*
(Source données : HANDSCHMACHER *et al.*, 1993)

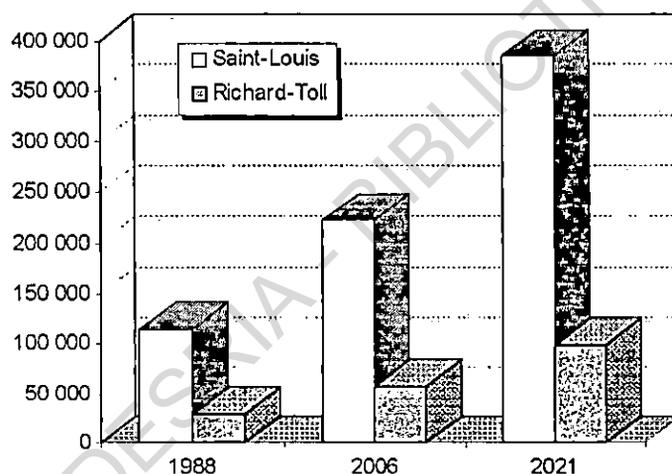


FIGURE 38. — *Prévision d'évolution démographique à Saint-louis et Richard-Toll*
(Source données : OMVS, 1994)

2. LES ACTIVITES ECONOMIQUES : INFLUENCE DU LAC DE GUIERS

L'activité économique dans le Delta et particulièrement dans la région du lac de Guiers, est essentiellement liée à la disponibilité de l'eau. La présence du fleuve Sénégal et de ses défluent tels que le Gorom, le Lampsar et la Taoué sont à l'origine d'une tradition de culture irriguée bien établie dans la région depuis le début des années soixante.

Le nouveau contexte hydrologique, issu de la mise en place des grands aménagements sur le fleuve Sénégal, a accéléré la mise en valeur agricole. Dès 1986, on a noté une réelle explosion de l'initiative privée dans le cadre des périmètres irrigués villageois.

Cette nouvelle forme de mise en valeur des terres s'est accompagnée d'un développement de l'offre de services. Comme effet immédiat, on peut noter un recul de l'émigration et une forte diminution de l'exode rural.

Cette partie de l'étude traite de l'activité agricole, de la pêche continentale et de la production d'eau potable. Le développement sera surtout axé sur l'activité agricole et la pêche traditionnelle ; l'élevage, faute de données qualitatives n'a pas été traité. Même si cette activité est souvent marginalisée dans les études menées sur ce milieu, elle n'en possède pas moins un fort impact sur le milieu et les hommes.

2.1. L'activité Agricole

Si l'on admet, avec TRICART (1984), que le développement rural repose sur des interactions triangulaires (figure 39) entre un milieu naturel, une organisation socio-économique et des techniques disponibles, il est alors inéluctable que l'ensemble de la vallée se trouve dans une dynamique de développement. Les grands ouvrages hydrauliques ont résolu le problème du déficit critique en eau.

Face aux nouvelles conditions hydriques créées, de nouvelles formes de mise en valeur ont été tentées avec plus ou moins de succès. Le fait marquant est l'abandon progressif de la culture de décrue désormais en rupture avec les nouvelles conditions du milieu. De nouveaux aménagements et de nouvelles formes d'exploitation de la terre se sont mis en place, augurant sans doute de mutations au niveau des systèmes traditionnels de production.

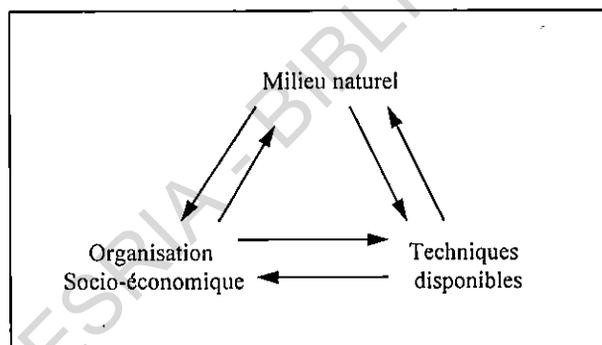


Figure 39. — Cadre d'organisation du développement rural (TRICART, 1984)

2.1.1. L'agriculture traditionnelle et ses contraintes

Avant 1985, les conditions hydrologiques et climatiques permettaient aux paysans du Delta une double culture annuelle :

- une culture de décrue, sur les terres du *waalo*, généralement d'octobre à février ou mars ;
- une culture pluviale, sur les contreforts sableux du *dieri*.

La mise en valeur traditionnelle des terres respectait la succession des différentes unités géomorphologiques (figure 13) : cultures maraîchères traditionnelles sur le *falo*⁴ ; cultures pluviales sur le *fonde*⁵ ; cultures céréalières sur le *waalo*⁶ ; cultures pluviales sur le *jejugol*⁷ ; cultures sous pluie du mil, des arachides et haricots dans le *dieri*.

Le *waalo* était un espace stratégique, dont la gestion était communautaire. Les *subalbé* (pêcheurs) y ont des droits, car c'est un milieu de reproduction des poissons ; les *fulbé* (éleveurs) y laissent paître leurs troupeaux après la récolte et fertilisent en même temps les terres.

Les paysans pratiquaient depuis longtemps la culture de décrue du sorgho, du manioc, des patates douces, de la tomate, des courges et du niébé dans la vallée, et sur les terres *hollaldes* (cuvettes de décantation) bien drainées. En cas de forte crue, ils cultivaient aussi les terres du *fondé*. Les surfaces cultivées variaient d'une année à l'autre, en fonction de la crue. Ils pratiquaient une monoculture sans assolement, d'où des rendements médiocres.

Ces cultures de décrue jouaient « un rôle de sécurité alimentaire essentiel, directement par l'autoconsommation, indirectement par les revenus monétaires de la vente et les achats de céréales qu'ils permettaient » (COGELS, 1984).

Au début de la sécheresse, en 1972, seuls 15 000 ha ont été ensemencés en culture de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal contre 80 000 à 180 000 ha auparavant, selon l'importance de la crue. Des temps de submersion très courts dans les cuvettes de décantation ont entraîné des rendements très faibles, moins de 10 % de la récolte normale (LÉRICOLLAÏS, 1976). Le déficit pluviométrique a donc entraîné une diminution des surfaces cultivées en décrue et une aggravation de l'exode rural.

Le cas du lac de Guiers est édifiant à ce propos. En effet, les rives du lac étaient traditionnellement vouées à la culture de décrue. Depuis 1988, ces cultures de décrue sont devenues impossibles du fait de l'extension de la surface du plan d'eau et de la colonisation des rives par un important tapis végétal qui y trouve des conditions favorables à son épanouissement.

Les cultures pluviales se faisaient dans le *dieri*, elles débutaient généralement en mai par le défrichage des champs et se terminaient à la récolte, en octobre-novembre. La productivité moyenne à l'hectare était d'environ 475 F CFA en année à pluviométrie normale (MBENGUE, 1981). L'irrégularité des précipitations rendait impossible toute planification du calendrier cultural. Annuellement une bonne partie du stock de semences était perdue, faute de pluie après les semailles. En 1983, suite à une pluviométrie presque inexistante, les récoltes furent nulles.

Le système traditionnel de culture a donc été bouleversé :

- d'abord par la sécheresse qui a entraîné la réduction des cultures du *dieri* ;
- puis par les aménagements hydrauliques qui ont causé l'extension des plaines d'inondation des cours d'eau, au détriment des cultures du *waalo*.

⁴ Rives convexes des méandres

⁵ Parties basses des anciennes levées et deltas de rupture de levées post-nouakchottiens

⁶ Cuvettes de décantation des eaux de crue

⁷ Transition entre *waalo* et *dieri*

Dans un premier temps, cette situation a justifié de forts taux d'émigration, malgré la mise en place des périmètres irrigués par la SAED. Ceux enregistrés dans la vallée procédaient, en fait, d'une gestion rationnelle des terroirs qui voulait que la pression démographique soit limitée à un seuil de 60 à 80 habitants au km² (NUTALL, 1991).

Aujourd'hui, avec l'apparition d'un nouveau type de gestion à la fois de l'espace et des ressources en eau – en fait d'un manque de gestion – l'agriculture traditionnelle connaît une phase de décadence qui pourrait se solder par son abandon. Dans le contexte de l'« Après Barrages », la priorité est aux grands systèmes de production, avec un degré de technicité plus ou moins important. L'accroissement et la stabilité du potentiel hydrique permettent d'envisager désormais une production agricole plus importante sur le plan spatio-temporel. Les structures d'une telle organisation existant déjà, il reste à les rentabiliser au maximum mais au détriment de l'agriculture traditionnelle. La persistance de la sécheresse a conduit à une disparition quasi totale des cultures de décrue ; le relais est pris par l'irrigation qui s'est pratiquée d'abord dans le Delta.

2.1.2. L'agriculture irriguée et ses problèmes

La pratique de l'agriculture irriguée est connue depuis près d'un demi siècle dans le Delta. En réalité, les premières tentatives ont débuté au XIX^e siècle avec l'expérience du jardin d'essai de Richard-Toll qui n'a pas été concluante du fait des contraintes naturelles (inondation du lit majeur lors de la crue, remontée de la langue salée lors des étiages, inadaptation des espèces introduites au contexte climatique) et humaines (réticences des populations locales) inhérentes à la région. Plus tard, en 1945 le plan PELETIER et DELISLE, marque le début de l'expérimentation de la riziculture irriguée dans le Delta avec le casier de Richard-Toll comme centre. Ce plan préconisait l'aménagement de 50 000 ha de casiers rizicoles. Le casier est géré par le Service de l'Agriculture du Sénégal et la MAS jusqu'en 1953 puis par l'entreprise ORTAL jusqu'en 1960. La SDRS⁸ reprend le casier rizicole de Richard-Toll qui passe casier sucrier au début des années soixante-dix, sous la gestion de la CSS. La création de la SAED, en 1965, a joué un rôle important dans le développement de l'irrigation. Depuis, de nombreux périmètres ont vu le jour dans le Delta et l'ensemble de la vallée du fleuve Sénégal.

Aujourd'hui, la plus grande, sinon la seule unité agro-industrielle du Delta, est la CSS productrice de sucre. D'autres structures, comme la SAED qui de producteur est devenue encadreur, jouent aussi un rôle fondamental dans le développement de la région. Il est peut-être exagéré de parler ici d'agro-industrie. En fait, il s'agit surtout d'agriculture irriguée semi-artisanale, même s'il est vrai que certaines productions, comme la tomate sont directement transformées sur place par de petites unités industrielles. Il y a d'une part la SOCAS⁹, installée près de Ross-Béthio et qui emploie environ 150 salariés et la SNTI¹⁰, installée à Dagana et employant 350 personnes dont 75 permanents.

⁸ Société de développement de la riziculture au Sénégal

⁹ Société de Conserves Alimentaires du Sénégal. La SOCAS exploite la tomate à Témèye Salane, au nord de Mbane, sur les anciens périmètres de maïs de la SENDA. Il s'agit de cultures par aspersion sur des champs circulaires

¹⁰ Société Nationale de Tomate Industrielle

2.1.2.1. La CSS

La CSS (Compagnie Sucrière Sénégalaise) est née au début des années soixante dix de la reprise du casier de Richard-Toll. De bons résultats ont été obtenus (85 t.ha^{-1}) avec les expérimentations de culture de canne à sucre effectuées sur le casier vers la fin des années soixante. Ceci a décidé du remplacement de la culture du riz par la canne à sucre ; puis le casier initial a été étendu jusque dans la zone de Dagana.

Actuellement, la CSS exploite environ 8000 ha de canne à sucre (figure 40) et emploie quelques 15 000 personnes, dont une majorité de saisonniers. Elle a deux filiales : l'IDIS¹¹, producteur de tuyaux en PVC et la SENAL¹², spécialisée dans la fabrication d'aliments pour le bétail à partir de la mélasse.

La CSS vise l'autosuffisance du pays en sucre ; pour cela, un total de 8 500 ha de canne à sucre devront, à terme, être mis en culture, sur la base d'un rendement moyen annuel de 110 t.ha^{-1} et des taux de raffinage d'environ 8 %.

En 1984, soit avant la construction du barrage de Diama, environ 6 500 ha étaient cultivés par la CSS sur des sols souvent très argileux ; ce facteur ajouté à la proximité de la nappe phréatique hypersalée obligeaient la CSS à recourir à des techniques de cultures telles que le dessalement continu des terres cultivables (drainage et emploi de gypse). La consommation annuelle en engrais se chiffrait à 184 kg d'azote, 45 kg de phosphate et 72 kg de potasse (GUYONNET, 1981):

L'utilisation actuelle des engrais est évaluée à 120 kg d'azote, 70 kg de phosphore et 200 kg de potassium pour 100 hectares récoltés. Les besoins en eau s'élèvent à $30\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha} \cdot \text{an}^{-1}$ dont 10 à 15 % seulement proviennent des précipitations (DA BOIT, 1993).

L'irrigation des casiers se faisait à partir du lac de Guiers dont il était le principal utilisateur de l'eau. Depuis l'entrée en fonction du barrage de Diama, ses pompages se font exclusivement dans le canal de la Taoué et le fleuve. Cependant, du fait de la poursuite de ses rejets d'eaux de drainage dans le plan d'eau du Guiers, la CSS continue à peser de tout son poids sur l'écologie du lac. Le branchement à l'Émissaire Delta serait d'un effet sûrement bénéfique. Encore faudrait-il trouver un accord entre les différentes parties ayant en charge l'étude de ce dossier (Cellules Après-barrages et SAED).

L'impact social et économique de la CSS a propulsé la ville de Richard-Toll qui est devenue l'une des plus importantes de la région.

¹¹ Industrial Drop Irrigation System

¹² Société d'aliment du bétail

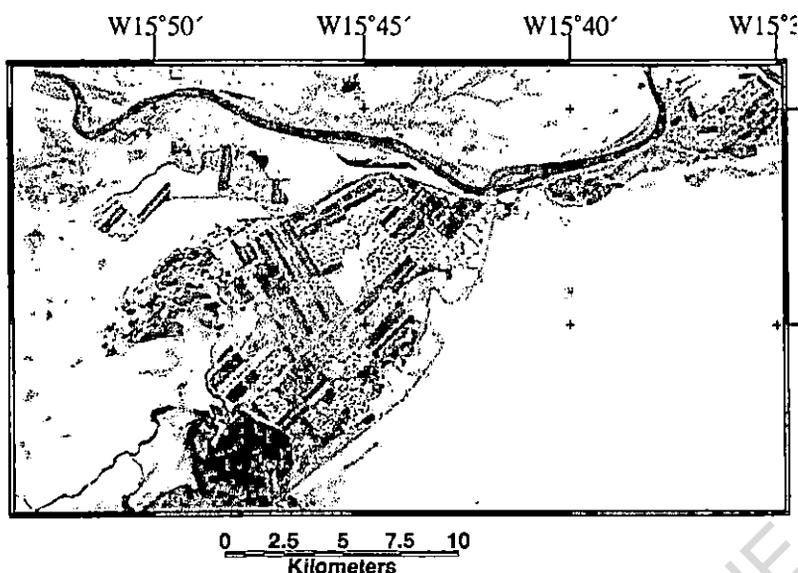


FIGURE 40. — *Vue du casier sucrier de la CSS dans la zone de Richard-Toll en 1989.*

2.1.2.2. La SAED

La SAED (Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta du fleuve Sénégal) a été créée en 1965 par la loi n° 65-001 du 20 janvier. A l'origine, c'était un établissement public à caractère industriel et commercial. La loi n° 79-29 du 24 janvier 1979 étend son champ d'action à l'ensemble de la rive gauche du fleuve Sénégal ainsi qu'à la vallée de la Falémé. Elle devient Société Nationale en 1981, suivant la loi n° 81-57 du 29 juin 1981 avec un siège fixé à Saint-Louis. La SAED comprend quatre délégations départementales : Dagana, Podor, Matam et Bakel.

Dans un premier temps, le rôle de la SAED était la mise en valeur des terres (labour, réseau de canalisation, groupe motopompe (GMP), engrais, semences...) qu'elle facturait ensuite aux paysans qui remboursaient sur le produit de la vente d'une partie de la récolte. Elle exploitait, dans les années 1970-80, quelques périmètres irrigués le long de la Taoué (riz et tomate) et un périmètre rizicole de 70 hectares à Mbane en rive est du lac de Guiers.

Aujourd'hui, la SAED s'occupe de la planification et du contrôle de l'aménagement des terres de la vallée, de l'encadrement des producteurs et de la coordination des programmes de développement. En cas de conflit entre acteurs du développement, la SAED doit pouvoir jouer le rôle d'arbitre ayant en main le suivi et l'évaluation de la mise en valeur dans presque toute la vallée.

Dans le cadre de l'aménagement et de la mise en valeur du fleuve Sénégal, la mission de la SAED a changé. Il ne s'agit plus seulement d'encadrer des périmètres irrigués villageois (PIV) mais aussi d'intervenir dans la promotion et le développement rural de la zone écologique du fleuve Sénégal.

Entre 1987, conformément à la politique de "désengagement de l'Etat", la SAED est passée d'un « encadrement dirigiste à une assistance raisonnée » aboutissant en 1994 à la libéralisation de la production du riz, notamment par l'arrêt des subventions aux intrants et à la préparation des sols.

L'intervention de la SAED se trouve dès lors recentrée autour de trois axes fondamentaux : la coordination du développement rural intégré ; la gestion de l'eau et des axes hydrauliques ; l'appui au développement rural.

La SAED est membre à part entière du comité de gestion du fleuve Sénégal, en collaboration avec l'OMVS. Elle est chargée de la gestion des axes hydrauliques, des stations de pompage collectives, des digues et pistes de production. Elle a également en charge la formation et l'encadrement des organisations paysannes et aussi de les libérer des bailleurs de fonds traditionnels tels que l'État.

L'entrée en vigueur, en 1991, de sa quatrième lettre de mission place désormais la SAED dans une dynamique de développement intégré à long terme avec à la clé cinq programmes :

- 1) la réalisation de l'Émissaire Delta dont le rapport final de l'Avant-projet sommaire a été déposé en juin 1994 et réalisé par le Groupement LAMEYER International/SOGREAH ;
- 2) la réalisation du schéma hydraulique du Delta qui est un des volets du PDRG¹³ : l'étude du modèle hydraulique des adducteurs du Delta a d'ailleurs débuté en mai 1996 ;
- 3) la réhabilitation de 4 500 ha de terres cultivables dans le Delta et la vallée et l'aménagement de 3 240 ha pour de nouveaux périmètres ;
- 4) la réhabilitation de la digue de protection du Delta ;
- 5) le creusement de chenaux d'alimentation pour les périmètres privés situés le long de la digue rive gauche.

La SAED se veut désormais un outil au service de la promotion d'un développement rural harmonieux. En 1982, elle gérait quelques 12 300 ha d'aménagements hydro-agricoles (figure 41) cultivés surtout en riziculture et répartis entre :

- de grands aménagements le long de l'axe Gorom-Lampsar et dans la zone de Dagana sur 10 400 ha ;
- des périmètres irrigués villageois et de périmètres irrigués privés sur 1 350 ha ;
- des aménagements intermédiaires à Ndombo et Thiago, le long de la Taoué, sur 550 ha.

Dix ans plus tard, en 1993 (figure 42), ces superficies sont passées à 42 350 ha, soit une augmentation de 3 400 ha pour les grands aménagements et de 26 650 ha pour les PIV et PIP. C'est dire donc le succès fulgurant de l'irrigation, surtout au niveau des investisseurs privés et des groupements villageois.

Un fait mérite d'être signalé ; il s'agit de la place du lac de Guiers dans les programmes de gestion des terres du Delta et de la vallée du fleuve Sénégal. Seule la partie de la région lacustre située au nord du village de Foss - Ndiakhaye est prise en compte. La partie restante est livrée à elle-même. Ceci repose tout le problème de mise en place d'une gestion intégrée de ce milieu. Car cette fragmentation contribue à fragiliser les équilibres socio-économiques déjà assez fragiles dans le bassin du fleuve Sénégal.

¹³ Plan de Développement de Rive Gauche

2.1.2.3. L'initiative privée : les périmètres irrigués villageois

Dès sa création, la SAED a mis en place les grands périmètres de riziculture dans le Delta ; ces périmètres sont implantés surtout dans les cuvettes dont les sols ont été dessalés par les eaux douces de la crue. Une digue est construite pour empêcher la submersion naturelle et des stations de pompage régulent les apports. Deux grands périmètres de riz ont été installés dans la basse vallée : la cuvette en amont de Dagana et celle de Nianga dans la zone de Podor. L'implantation de ces périmètres se veut à la fois une réponse aux effets cumulés de l'émigration et des contraintes du milieu hydroclimatique et un défi étatique.

A partir de 1974, la SAED installe des PIV dont la superficie varie entre 15 et 20 ha ; ils sont généralement établis sur les terres du *fondé*, c'est-à-dire sur les parties insubmersibles des hautes levées, à proximité des villages. Ces périmètres sont équipés de motopompes, installées sur des bacs flottants et irriguant à partir du fleuve ou de ses défluent. On y pratique surtout la riziculture, en alternance avec la culture de la tomate. Ces exploitations se sont révélées plus rentables que les grands périmètres dont la gestion est trop lourde. La sécheresse et la faiblesse des crues ont favorisé la multiplication de ces périmètres qui s'égrènent le long de la vallée.

Le coût global des aménagements est supérieur au rendement même s'il atteint parfois 4 à 5 tonnes de riz paddy à l'hectare. Une étude de MATHIEU (1982), sur le cas du périmètre de Mbane montra que, compte tenu des remboursements à la SAED, la production des périmètres était loin d'assurer l'autosuffisance alimentaire. Le prix de revient du riz produit par la SAED est d'ailleurs plus de deux fois supérieur à celui du riz importé.

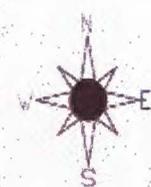
Avec le désengagement de la SAED, et dans un contexte politique et économique marqué par la promotion des initiatives privées, les Conseils Ruraux, la Caisse Nationale de Crédit Agricole (CNCA)¹⁴ et le secteur privé se trouvent impliqués dans la fourniture d'intrants, la gestion de l'espace agricole et la mise en valeur des terres. On assiste dès lors à la naissance d'un entrepreneuriat privé, sous forme d'initiatives individuelles ou collectives : groupements d'intérêt économique (GIE), groupements de producteurs, coopératives, organisations non gouvernementales (ONG) et promoteurs privés.

À titre indicatif, la communauté rurale de Ross-Béthio comptait en 1993 pas moins de 49 sections villageoises, 49 foyers de jeunes, 89 groupements de promotion féminine et 550 GIE.

Ces entreprises sont caractérisées essentiellement par un manque de maîtrise du circuit de production et de distribution des produits. Le coût élevé des aménagements (environ 1 million à l'hectare) et les conditions du crédit sont autant de contraintes au développement des périmètres qui se soldent souvent par une faillite, à court ou moyen terme, du fait des rendements médiocres.

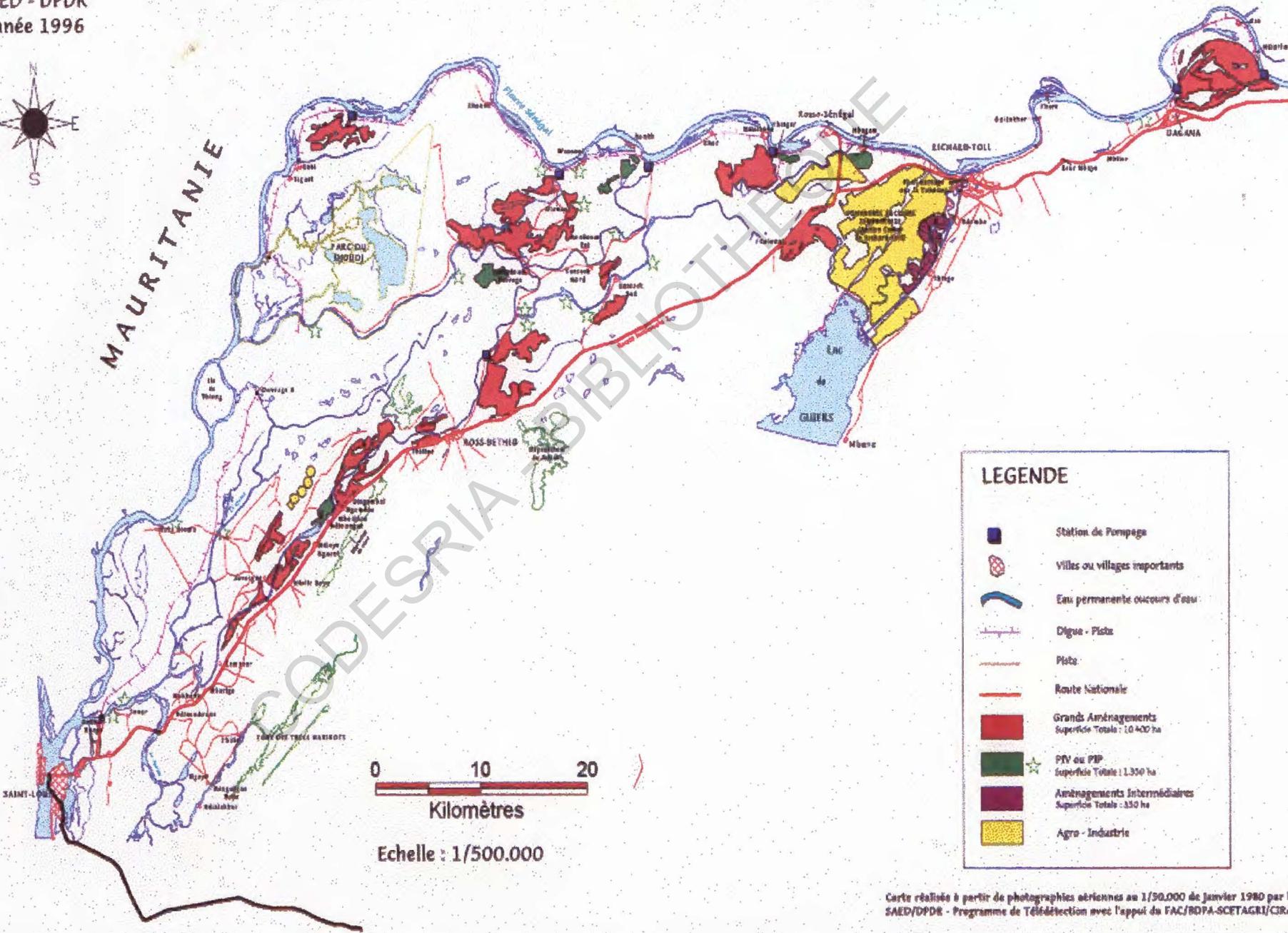
¹⁴ Caisse nationale de Crédit Agricole

SAED - DPDR
Année 1996



MAURITANIE

OCEAN ATLANTIQUE



LEGENDE

- Station de Pompage
- Villes ou villages importants
- Eau permanente ou cours d'eau
- Digue - Pièce
- Pièce
- Route Nationale
- Grands Aménagements
Superficie Totale : 10 400 ha
- PIV ou PIP
Superficie Totale : 1 350 ha
- Aménagements Intermédiaires
Superficie Totale : 350 ha
- Agro - Industrie

Carte réalisée à partir de photographies aériennes au 1/50.000 de Janvier 1980 par l'ONDA/SAED/DPDR - Programme de Télédétection avec l'appui du FAC/BDPA-SCETAGRI/CIRAD

FIGURE 41 — Carte des aménagements hydro-agricoles du Delta en 1982.

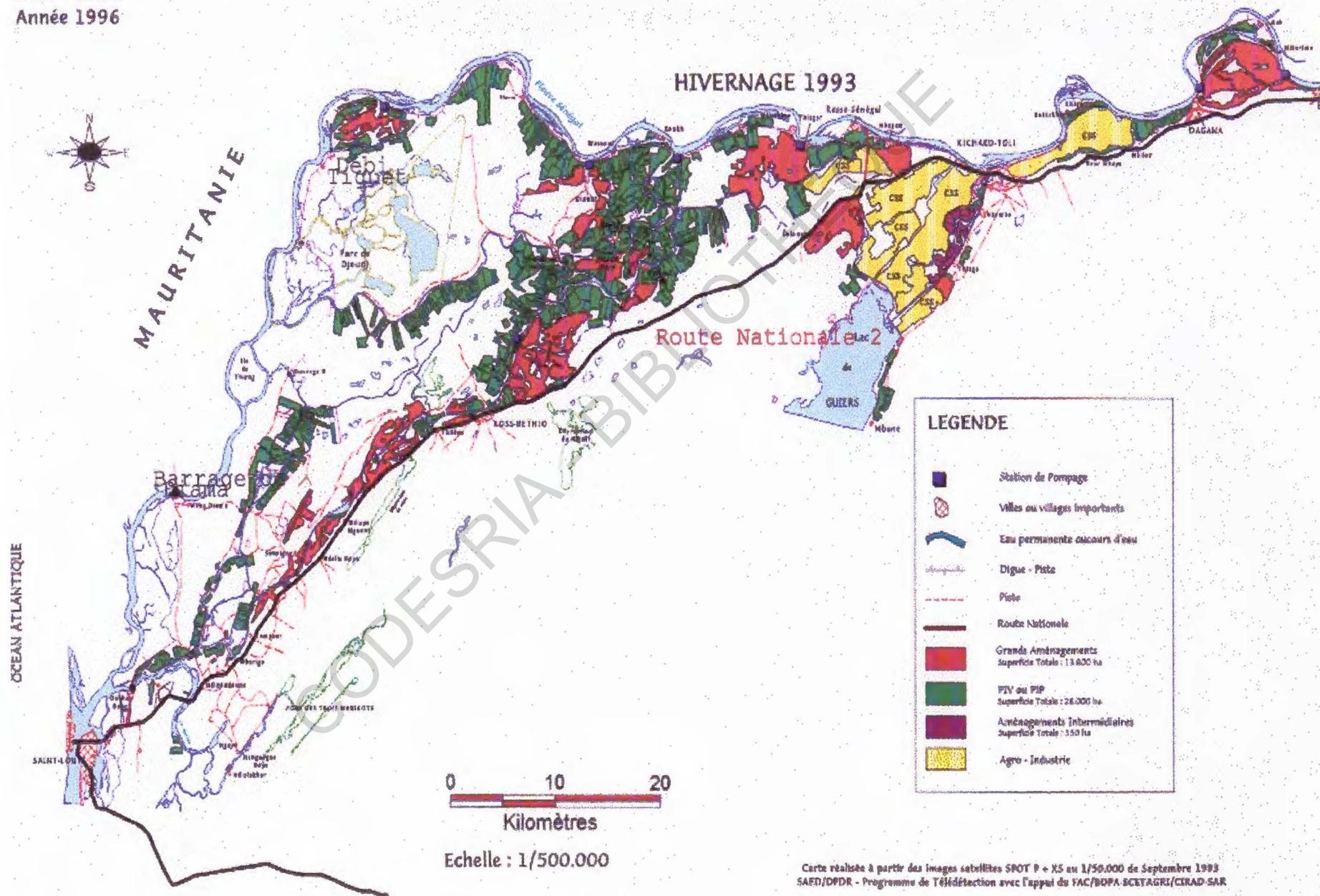


FIGURE 42. — Carte des aménagements hydro-agricoles du Delta en 1993.

Au niveau de la production, on note une prépondérance du riz, avec un taux d'accroissement annuel de 14 % environ. La tomate industrielle, destinée aux usines de la SOCAS et de la SNTI, a atteint son record en 1991 avec 82 000 tonnes. Les productions maraîchères sont également très développées autour du lac de Guiers mais elles n'ont encore jamais fait l'objet d'estimations.

Le lac de Guiers qui, jusqu'en 1985, était le parent pauvre de cette forme de mise en valeur, mis à part quelques périmètres sous gestion SAED installés le long de la Taoué, à Ndombo et Thiago et à proximité de Mbane, n'est pas en reste. Ces périmètres font partie de la vague des années soixante-dix. Le village de Foss constitue la limite d'intervention de la SAED ; au-delà, ce ne sont plus que des initiatives individuelles, autonomes à 100 %.

Des enquêtes réalisées entre septembre et décembre 1995 montrent une ferme volonté des paysans de passer le cap de la culture de décrue. Quelques résultats de ces enquêtes sont présentés au tableau XVIII qui indique une estimation sommaire des surfaces irriguées par village. La production n'est pas encore assez diversifiée : sur plusieurs kilomètres, des carrés d'oignons s'égrènent à l'infini agrémentée par moment de patates douces, pommes de terre, choux, aubergines, etc. Ces données sont à manipuler avec précaution, du fait même du caractère incomplet des informations fournies par les personnes interrogées, notamment des doutes sur la superficie des périmètres. Le "listing" complet de toutes les informations recueillies est présenté en annexe.

- Bien souvent, ces agriculteurs en sont à leurs premières expériences dans le domaine de l'irrigation et connaissent de nombreuses difficultés liées au manque d'encadrement technique. Le réseau d'irrigation est par conséquent soumis à d'importantes pertes en eau et à une inadéquation des aménagements.

Un des problèmes majeurs que posent les PIV dans le Delta est l'occupation anarchique des terres et l'installation sur les voies de passage du bétail. Bien souvent, il y a eu des cas de conflits violents entre agriculteurs et éleveurs ou entre agriculteurs eux-mêmes, pour la répartition de l'eau d'irrigation. Le rythme du développement de l'agriculture irriguée villageoise semble s'être accéléré depuis la mise en service des barrages de Diama et de Manantali. L'augmentation des surfaces irriguées a eu comme corollaire une occupation anarchique de l'espace et le non respect des plans d'aménagement existants. La progression de la mise en valeur des terres du Delta est un phénomène à gérer et à planifier.

L'actuel mode de gestion des eaux et des terres ne peut perdurer, en particulier si tous les projets de développement se réalisent. L'encadrement de la SAED doit nécessairement se renforcer et s'étendre dans certaines zones, notamment au lac de Guiers qui est devenu un nouveau pôle de développement de la petite irrigation villageoise. Une attention toute particulière doit être accordée à l'occupation des parcours traditionnels du bétail qui expliquent les nombreux conflits enregistrés entre agriculteurs et éleveurs.

En fait, c'est le moment de réfléchir davantage sur une structure centralisée de gestion des problèmes du Delta, qu'ils soient fonciers, hydriques, techniques ou financiers.

TABLEAU XVIII

Quelques résultats d'enquêtes sur les périmètres irrigués autour du lac de Guiers : état estimatif au 10/12/95 : d'après des enquêtes de terrain effectuées par NIANG et COLY (1994-1995)

Localité	Surface totale (ha)	Surface cultivée (ha)
Diamenar Loyenne	6,95	1,45
Diokhor 2	49,00	48,00
Diokoul	10,00	0,00
Foss	13,00	13,00
Gankette	27,50	7,00
Géou	15,00	3,50
Gollom (Mbayène)	142,80	22,00
Guidick	55,00	7,60
Loboudou	3,00	3,00
Malla	5,00	5,00
Mayel	207,00	0,00
Mbrar	262,00	171,00
Naéré	800,00	180,00
Nder	419,00	405,00
Ndieumeul	79,50	36,50
Ndiouré	30,00	30,00
Ndombo	4,12	4,12
Ndombo Alarba	52,00	52,00
Ngnith	17,50	9,00
Odabé Kamboubouky	20,00	3,50
Sier	6,00	1,00
Témèye Maure	91,00	5,00

2.2. La pêche au lac de Guiers

La pêche continentale est une activité importante dans le Delta, au même titre que l'agriculture ou l'élevage, à qui elle sert d'appoint. Sa mise en œuvre reste encore artisanale avec quelques rares pirogues motorisées pour une production relativement élevée. Cette activité pourrait se diversifier par le développement de l'aquaculture dans la région.

Les données sur la pêche continentale lac de Guiers sont relativement anciennes et éparées. Cette étude est basée sur les statistiques établies par la Direction de la Pêche Continentale (1986 et 1993) et quelques travaux réalisés par REIZER (1972, 1974), REIZER *et al.* (1972), COGELS (1984) et DIOUF (1991), de même qu'une étude entreprise en 1995 sous l'égide de l'OMVS. Les espèces de poissons pêchées dans la région seront étudiées dans la deuxième partie de ce mémoire.

2.2.1. Le pêcheur du lac de Guiers : typologie et instrumentation

En 1974, le nombre de pêcheurs opérant dans le fleuve était estimé aux alentours de dix mille, rive droite comprise, par le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT). Ces chiffres incluent les pêcheurs occasionnels ou semi-professionnels. Vers la fin des années 1980, avec le conflit sénégal-mauritanien et les nombreuses années de pêche déficitaires du fait de la sécheresse, le nombre de pêcheurs avait sensiblement diminué dans la vallée. Durant cette période, on notait un exode des pêcheurs vers d'autres zones, une reconversion vers l'agriculture ou tout simplement un abandon de cette activité.

Dans les années 1970, une enquête de REIZER (1972) chiffrait la population de pêcheurs professionnels et semi-professionnels du lac à 300 personnes. Cette population de pêcheurs était composée essentiellement de wolofs (79 %), de maures (12 %) installés à Bountou Bath, Teuss, Ngnith et Témèye Salane et de toucouleurs établis surtout à Thiago, Bountou Bath, Ngnith et Géou.

Dans le complexe lac de Guiers – Taoué, COGELS (1984) a recensé, dans les années 1980, 296 pêcheurs professionnels et semi-professionnels ; 510 personnes au total si on y inclut toutes les personnes occupées par l'activité pêche à temps plein ou partiel. Ce chiffre est ramené à 397 personnes pour l'ensemble du lac, soit 3,5 % de la population riveraine, compte non tenu des pêcheurs de Ndombo et de Thiago.

En 1993, une enquête effectuée par la DEFCCS¹⁵ conclut que le nombre de pêcheurs au niveau du complexe fleuve Sénégal – lac de Guiers serait compris entre 2 000 et 2 500 personnes, réparties entre professionnels et semi-professionnels, sans tenir compte des pêcheurs occasionnels dont la production est destinée essentiellement à l'autoconsommation. Dans les 36 villages et campements de pêche autour du lac, 167 pêcheurs professionnels ont été recensés et 411 semi-professionnels. Cette répartition n'est pas exhaustive car n'étant pas basée sur des critères précis. En dehors du pêcheur lui-même, il y a ses aides, la plupart du temps issus de sa propre famille ; le recensement en dénombre 900.

L'évolution de la pêche continentale est calquée sur celle du remplissage des plans d'eau. De mai à novembre, le lac de Guiers est le siège d'importantes migrations ; elles sont surtout l'œuvre des pêcheurs professionnels « Gae-Gae » et des maures des villages de la rive droite du fleuve Sénégal. Les migrants s'installent dans des campements rudimentaires. En phase de remplissage, la Taoué est un des pôles d'attraction. Les pêcheurs semi-professionnels sédentarisés sont essentiellement des agriculteurs. Il existe une certaine forme d'immigration du lac Guiers vers le fleuve Sénégal entre juin et septembre dont la portée est cependant difficile à évaluer.

Le secteur de la pêche a bénéficié de l'accroissement des ressources en eau et de l'agriculture irriguée ; c'est ainsi qu'on trouve de plus en plus de villages de pêcheurs-agriculteurs. Cette activité tend donc à stabiliser les pêcheurs saisonniers sur leur campement, grâce à la possibilité qui leur est offerte de pouvoir travailler la terre en dehors des périodes de pêche intensive.

La pêche dans ce secteur a toujours été pratiquée à l'aide d'engins simples, presque rudimentaires. Le matériel est composé d'engins tels que l'épervier (*mbal* en wolof), les filets maillants dormants (*sabel* en wolof) ou dérivants (*félé-félé* en toucouleur), les filets maillants encerclants, les lignes, les sennes de rivage (*goubol* en wolof). Deux types de pirogues sont utilisées dans tout le Delta :

- la pirogue Saint-Louisienne d'une longueur d'environ 8 à 10 m et constituée d'un assemblage de pièces de bois de caïlcédrat manufacturées ;
- la pirogue casamançaise monoxyle fabriquée en bois de fromager ou de caïlcédrat et longue de 6 à 12 m.

¹⁵ Direction des Eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols

COGELS (1984) avait dénombré quelques 145 pirogues dans le lac tandis que REIZER en avait compté 160 en 1972. Quelques pirogues motorisées, de type casamançais avaient été identifiées en région nord et Centre tandis qu'en région sud, la profondeur très faible ne permettait que la pose de filets sans recours à la pirogue la majeure partie de l'année. Le nombre total de pirogues recensées dans la partie sénégalaise du fleuve en 1972 était de 2 335.

1 700 *sabel* ont été inventoriées pour l'ensemble Guiers - Taoué dont 21 % opérant dans la Taoué. En juillet 1981, au summum de l'activité de pêche, 321 filets ont été dénombrés dans la zone de pêche autorisée de la Taoué, soit environ un filet tous les 30 m et 5,7 par pêcheur en moyenne. Durant la même période, les pêcheurs semi-professionnels du lac ne possèdent que quatre filets contre dix et plus pour les professionnels. Les maillages sont rarement conformes à la législation en vigueur (minimum autorisé de 60 mm) ; les filets ont souvent des mailles de 30 à 40 mm. Les *dolinké* sont surtout utilisés en période de basses eaux ; on en a compté 2 227.

L'enquête de la DEFCCS en 1993 a permis de noter une augmentation du nombre d'engins de pêche ; elle a permis d'identifier 3 258 filets, 2 633 *dolinké* et 160 pirogues. L'impact sur la réduction du stock halieutique du lac n'est pas à négliger. L'introduction d'une réglementation rigoureuse est nécessaire en la matière pour prévenir des catastrophes.

Le développement de ce secteur est ralenti par le faible renouvellement des embarcations depuis 1974 et par le manque général de moyens et d'investissements ; il a surtout connu un frein à cause des années de sécheresse. Cependant, grâce aux ressources nouvelles apportées par le développement de l'agriculture irriguée, l'espoir d'une amélioration est permis. En 1994, un GIE installé à Gankette Balla, « Les Merveilles Maritimes » a proposé une trentaine de pirogues neuves sur le lac en location-gérance. Le développement de telles initiatives serait sans aucun doute un facteur de renouveau pour la pêche au lac de Guiers.

2.2.2. La production halieutique

Il n'existe pas de statistiques précises sur la production halieutique du Delta et du lac de Guiers, du fait même du caractère hétérogène de cette activité. La part destinée à l'autoconsommation ou entrant dans un circuit de commercialisation non classique ne peut en effet être quantifiée. Les quelques données que nous présenterons ici sont donc des estimations car les statistiques de production ne sont relevées qu'en certains endroits par les agents techniques de Eaux et Forêts¹⁶ et presque toujours dans des conditions précaires. La tendance générale qui se dégage est une baisse de la production dans le fleuve Sénégal et une augmentation de celle-ci dans le lac de Guiers.

La baisse de la production piscicole est l'une des raisons essentielles qui, en 1977, ont incité au développement de la pisciculture pour la première fois à Dagana, sous l'égide de la SAED. Dans les années 1980, la production était tombée à environ 10 000 tonnes. Entre 1969 et 1988 (DIOUF et BOUSSO, 1988), la production piscicole annuelle du bassin du fleuve Sénégal est passée de 20 000 à 8 000 tonnes, soit une réduction de 80 %. Cette réduction est due sans aucun doute à celle des superficies inondées qui a joué sur les cycles de reproduction du poisson et par conséquent sur les captures.

¹⁶ Notamment au triage forestier de Ngnith

Au lac de Guiers, la réduction du potentiel halieutique, au début des années soixante-dix, était due à deux causes principales :

- le déficit pluviométrique, la baisse des superficies inondées et l'augmentation de la salinité ;
- la diminution du couvert végétal, source de matières organiques.

Le lac de Guiers a de tout temps été une zone importante de pêche. Pratiquée avant 1960 avec des moyens rudimentaires, cette activité servait d'appoint à la ration alimentaire quotidienne des riverains. Une légère intensification intervenait en période d'hivernage, avec quelques pêcheurs venus du fleuve. D'après les estimations de CREMOUX (1961) et de REIZER (1974), la production moyenne annuelle était d'environ 200 tonnes ; c'était du poisson de bonne qualité avec des tailles assez importantes selon LEMASSON (1957). COGELS (1984) estime que le lac de Guiers était alors sous-exploité du point de vue halieutique. La construction du centre de pêche de Guidick en 1959, de même que l'organisation de campagnes annuelles de pêche, étaient conçus pour servir de catalyseur à l'activité de la pêche dans la région du lac.

Entre 1960 et 1970, avec la croissance de la population des grandes villes côtières comme Saint-Louis et Dakar, la demande en poisson frais a aussi fortement augmenté ; la pêche maritime se trouvant alors dans l'impossibilité de couvrir l'intégralité de la demande. En saison des pluies, le lac devenait un important centre de pêche, avec des campements saisonniers installés le long des rives à Témèye Salane, Mbane, Foss, Malle et Nder en particulier.

Le stade de la surexploitation est atteint avec une production supérieure à 2 000 tonnes entre 1966 et 1968. Les campagnes de pêche sont d'ailleurs interdites à partir de 1970. Désormais, seuls les riverains sont autorisés à pêcher dans le lac et la Taoué moyennant quelques règles : notamment, interdiction des sennes et des filets à mailles inférieures à 60 mm et produits destinés uniquement à l'autoconsommation.

Les rendements de ce type de pêche sont en général assez faibles ; ils tendent à diminuer de l'amont vers l'aval du fleuve. Les rendements maximaux sont atteints dans la partie estuarienne du fleuve où les conditions hydrobiologiques sont les plus favorables à la reproduction et au développement des poissons, en particulier des espèces euryhalines.

Dès la mise en service du barrage de Diama, on a constaté un changement dans la distribution spatiale des prises. La vallée qui fournissait la moitié du volume des prises voit son potentiel réduit à environ 23 % (DIOUF et BOUSSO, 1988). Le lac de Guiers par contre, qui ne fournissait qu'environ 11 % des débarquements voit sa production atteindre 28 % du total enregistré dans l'ensemble du bassin.

Les changements apportés par la construction des deux grands barrages se traduisent également par un changement au niveau de la composition spécifique des captures. Certaines espèces comme *Heterotis sp.*, *Hyperopisius sp.*, *Gymnarchus sp.*, *Lates sp.* et *Ctenopoma sp.* sont devenues de plus en plus rares alors que *Tilapia sp.*, *Labeo sp.* et *Bagrus sp.* sont restés très abondants. Cela traduit sans doute une adaptation de certaines espèces aux nouvelles conditions du milieu.

Le tableau XIX présente la situation moyenne avant et après la mise en service du barrage de Diama et montre l'effet positif des nouvelles conditions hydrobiologiques sur le potentiel halieutique du lac de Guiers et de la Taoué.

Le potentiel de production du lac a tendance à augmenter même si, dans d'autres secteurs du fleuve Sénégal, c'est l'effet inverse qui est observé. La surexploitation des ressources et la forte densité de pêcheurs est aussi un facteur de baisse quantitative et qualitative du potentiel halieutique à long terme.

TABLEAU XIX
Production piscicole du fleuve Sénégal et du lac de Guiers

Bassins	Production avant sécheresse (année normale) en tonnes/an		Production en 1987 (estimations en tonnes/an)	
	Sénégal	Mauritanie	Sénégal	Mauritanie
Fleuve Sénégal	4 000	-	2 000	-
- Bas Delta	5 000	2 500	2 000	1 200
- Haut Delta	10 600	5 400	6 000	2 000
- Vallée	19 600	7 900	10 000	3 200
Total fleuve	27500		13200	
Lac de Guiers et Taoué	2500		3000	
Production totale Eaux intérieures sénégalaises	47 à 60 000		Arrondi à 37 000	

(Source : DEFCCS, 1993)

-La production est le plus souvent transformée artisanalement, faute de moyens adéquats de conservation et de distribution, d'où la prépondérance de l'autoconsommation, surtout pour les espèces à forte valeur marchande. La consommation de poisson d'eau douce dans la région de Saint-Louis se situait en 1986, toujours selon les estimations de la DEFCCS, aux alentours de 14,9 kg.hbts⁻¹.an⁻¹ soit un déficit de l'ordre de 20 kg.hbts⁻¹.an⁻¹. En effet, la consommation idéale par habitant, selon la FAO, serait de 35 kg.an⁻¹.

La production actuelle ne couvre pas les besoins en protéines des populations du lac qui, bien souvent, ont recours au poisson fluvial et marin venant de Saint-Louis, parfois en très mauvais état. Ceci repose le problème du développement et de l'intégration de la pratique de la pisciculture dans les habitudes des riverains du lac.

Les trois quarts des poissons lacustres sont commercialisés localement, dans un rayon de plus ou moins 100 kilomètres, avec des prix au producteur variant entre 100 et 300 Francs CFA le kilogramme pour un prix au consommateur d'environ 800 Francs CFA, variable en cours d'année. Le quart restant est éviscéré puis séché avant d'être commercialisé dans les marchés environnant lors des périodes de soudure.

2.2.3. Les perspectives du secteur pêche : l'aquaculture

Les perspectives de l'activité pêche sont assujetties au développement du secteur de la pisciculture. Celle-ci était motivée par la réduction des surfaces inondées et la diminution du nombre de captures de poisson. Un autre objectif était de prévoir les impacts des grands aménagements de l'OMVS qui risquaient à terme de diminuer le potentiel halieutique du bassin du fleuve Sénégal.

Déjà en 1979, un projet intitulé "Projet d'impact accéléré de la pisciculture intensive dans la région du fleuve" avait vu le jour. Le projet, financé d'abord par l'USAID puis par le Catholic Relief Services, avec la collaboration du Corps de la Paix américain, visait trois objectifs :

1. démontrer d'abord la faisabilité technique de la pisciculture dans la vallée ;
2. développer ensuite la pisciculture en se basant sur un potentiel humain déjà existant, c'est-à-dire les pêcheurs traditionnels ;
3. assurer enfin aux agents des Eaux et Forêts, une formation aux techniques piscicoles

La station de Richard-Toll avait pour mission la production de jeunes *Tilapia nilotica* destinés à l'alevinage des étangs et à diverses expérimentations piscicoles. Ce projet a pris fin en 1988 avec des résultats très mitigés. Le lancement de l'opération en milieu paysan, avant même la maîtrise des techniques de pisciculture dans les conditions de la vallée, mais aussi l'imprécision de l'organisation ont été déterminants dans l'échec du projet (DIOUF, 1989). Son seul mérite est d'avoir démontré la possibilité de construire des étangs de pisciculture dans les périmètres irrigués et d'avoir donné l'ordre de grandeur des coûts de construction.

La Division Pêche Continentale (Direction des Eaux, Forêts, Chasses et de la Conservation des Sols) comprend, outre la station de Richard-Toll, un centre de pêche à Guidick qui a pour vocation d'expérimenter les techniques de pêche et de traitement du poisson et aussi d'établir des statistiques sur les prises. Le centre de perfectionnement des pêcheurs de Richard-Toll, qui ne fonctionne plus depuis plusieurs années, pourrait être transformé en centre de formation des pisciculteurs, d'après le rapport d'un conseil interministériel tenu en 1993 et intitulé "La pêche continentale et l'aquaculture".

Après plusieurs années d'expériences qui se sont toutes soldées par des échecs, force est de constater la nécessité d'un recentrage des objectifs et des modalités de mise en œuvre de la pisciculture. L'échec des différents projets est lié aux contraintes environnementales, techniques et administratives mais aussi socio-économiques.

Des perspectives existent donc au niveau de la pisciculture dans le Delta et la zone du lac de Guiers. Le contexte de l'« Après Barrages » semble plus propice à un développement de la pisciculture. L'eau disponible en quantités suffisantes, devrait permettre au poisson d'eau douce de concurrencer celui en provenance de la mer. La pisciculture pourrait être désormais intégrée aux aménagements hydro-agricoles privés et envisagée comme un moyen de compléter et d'améliorer les recettes domestiques.

2.3. La production d'eau potable : l'usine de la SDE à Ngnith

Jusqu'en 1970, toute la presque île du Cap-Vert était alimentée en eau par les aquifères de cette même région ; ses besoins étaient alors estimés à $70\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ pour l'industrie, le maraîchage et l'usage domestique avec un taux d'accroissement de 10 % par an selon WANE (1983). L'agglomération dakaroise, du fait de la forte expansion démographique, du développement du secteur industriel et surtout de l'impossibilité d'augmenter les captages d'eaux souterraines, s'est vue obligée de trouver une solution. Dans ce but, la construction de l'usine de Ngnith a été décidée en 1971 ; son installation par la SONEES à Ngnith, au centre-ouest du lac de Guiers, a été un des facteurs de polarisation de la région.

Une conduite forcée relie le lac à Dakar sur 250 km, recevant en cours de route les pompages de quelques forages installés sur son parcours. Les pompages moyens journaliers dans le lac tournent autour de $40\ \text{à}\ 45\ 000\ \text{m}^3$ d'eau brute (Figure 43) ; on note une légère baisse de ces pompages à partir de 1988, baisse sans doute imputable aux fréquentes pannes du compteur d'eau brute au niveau de l'usine.

La conduite du lac de Guiers dessert également les villes de Louga et Thiès et quelques petits villages. Environ 75 % de la production de l'usine arrive à Dakar soit quelques 40 000 m³.j⁻¹ qui représentent 20 % des besoins en eaux de la ville de Dakar. Signalons que l'usine ne fonctionne qu'à 60 % de sa capacité.

Un projet de doublement de la capacité de la conduite de Ngnith a été mis en étude ; il est destiné à porter les prélèvements dans le lac à 80 000 m³.j⁻¹. Ce projet, non encore réalisé, représente une priorité, vu la situation critique de l'alimentation en eau dans certains quartiers de Dakar. Sa réalisation permettrait de soulager des milliers de personnes à travers la ville, même si l'autosuffisance n'est pas atteinte, en attendant le canal du Cayor.

Un paradoxe saisissant mérite cependant être souligné : malgré la présence d'une usine de traitement des eaux, les villages riverains du lac en sont encore réduits au prélèvement direct dans les puits et même parfois dans le lac. Paradoxe qui participe à la fragilisation de la santé des riverains, très sujets aux maladies hydriques (Cf. deuxième et troisième parties). La majorité de la population du *waalo* est encore obligée d'utiliser l'eau du fleuve ou de ses défluent pour satisfaire ses besoins journaliers. Les gens du *dieri* ont recours aux mares temporaires ou aux puits superficiels et à quelques rares forages.

D'autres petites unités de production d'eau potable existent dans le Delta. C'est le cas à Saint-Louis où l'usine des eaux de Khor utilise les eaux de la réserve de Bango. Cependant, le réseau d'approvisionnement, datant de l'époque coloniale, se révèle assez déficient. A Richard-Toll, le réseau de distribution ne couvre qu'une partie de la ville ; l'autre partie a recours aux canaux d'irrigation de la CSS et à l'eau du fleuve à la fois pour les travaux domestiques, les bains et les toilettes.

La situation de l'alimentation en eau potable dans le Delta se révèle donc assez précaire. Toute l'attention est focalisée sur l'agglomération dakaroise sans pour autant satisfaire les besoins ni des uns ni des autres. L'ensemble de ce système doit être repensé et réorganisé de manière à prendre en compte les besoins d'au moins la majorité.

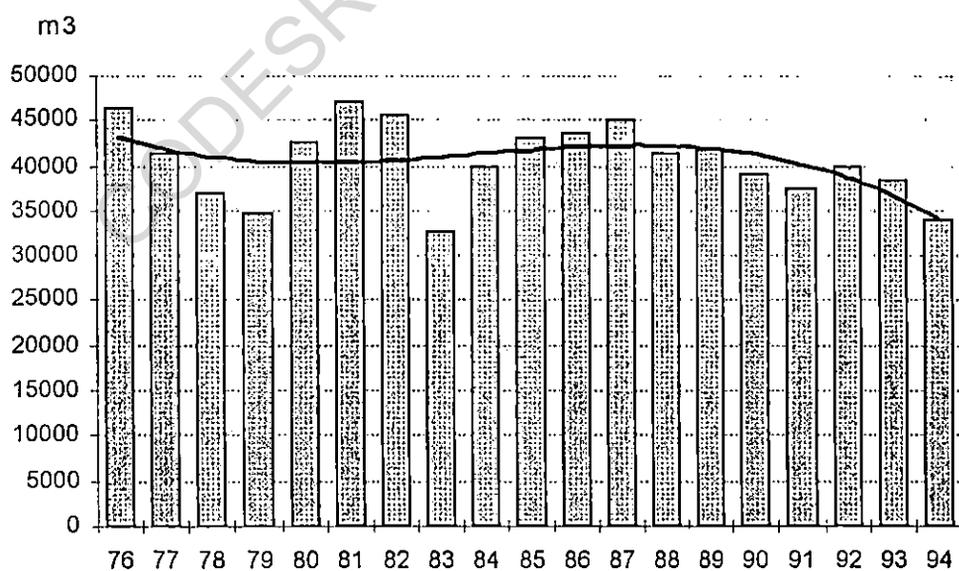


FIGURE 43. — Volumes moyens annuels pompés par l'usine de la SDE à Ngnith de 1976 à 1994 et courbe de tendance. (Source : Usine des Eaux de Ngnith)

Chapitre III

LES ETAPES DE LA MISE EN VALEUR DANS LE DELTA ET LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET HUMAIN

L'abondance de l'eau dans cette région et la qualité des terres auraient dû provoquer un développement agricole durable. Et c'est sans doute ce qui avait inspiré au Colonel SCHMALTZ dans une lettre datée du 8 juillet 1817, la réflexion suivante : « *J'ai beaucoup voyagé, j'ai toujours soigneusement observé les pays que j'ai parcourus et je n'en ai pas vu de plus beau, de plus propres à de grandes entreprises que le Sénégal* ».

Cependant, presque tous les projets de valorisation des ressources qui se sont succédés depuis le début du XIX^e siècle ont échoué et ce, pour les mêmes raisons : inadéquation entre les systèmes de production et les mécanismes climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques et pédologiques mais aussi socio-économiques.

Avec l'entrée en vigueur du programme de développement intégré de l'OMVS, l'heure est à l'espoir : celui de vaincre enfin les contraintes du milieu et aboutir à un développement agro-économique harmonieux. Et pourtant, depuis près de 80 années, l'ensemble du système fluvio-lacustre du Guiers a été l'objet de multiples aménagements et d'une mise en valeur de plus en plus moderne.

Aux ouvrages simples, comme les barrages en terre argileuse, édifiés annuellement au niveau de Richard-Toll pour retenir la langue salée, ont succédé des édifices de plus en plus solides et de plus en plus sophistiqués, comme les barrages de Diama ou de Manantali.

A cause des résultats escomptés, la question des impacts réels de ces édifices n'a presque jamais été posée. Cependant, force est d'admettre que le bon choix était de réaliser ces aménagements pour assurer la survie du milieu. Et l'ensemble des projets en cours semblent s'inscrire dans une dynamique de « développement durable », c'est-à-dire s'efforcer de répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité de satisfaire ceux des générations futures (CMED¹, 1988).

D'une manière générale, les choix d'aménagement et de mise en valeur opérés dans la vallée du fleuve Sénégal ont été dictés à la fois par les conditions climatiques drastiques, la désertification croissante et surtout la nécessité d'un développement agro-industriel, condition préalable à une autosuffisance alimentaire.

1. HISTORIQUE DES AMENAGEMENTS DANS LE DELTA

L'aménagement du Delta du Sénégal a connu plusieurs phases successives jusqu'à sa situation actuelle qui marque le couronnement de près d'un siècle de réalisations.

Tout d'abord, il y eut une série d'aménagements que nous qualifierons d'artisansaux, puis une période transitoire marquée par le souci de pérenniser la liaison entre le lac de Guiers et le fleuve Sénégal. Enfin, en 1985, la construction du barrage de Diama a marqué le début de la mise en place d'aménagements régionaux de grande envergure. Les projets d'aménagements en cours devraient faire du Delta un pôle économique à part entière.

¹ Commission mondiale sur l'environnement et le développement

Le lac de Guiers occupe une place prépondérante dans l'histoire de la mise en valeur de la vallée de fleuve Sénégal. Il est à l'origine de toute la politique d'aménagement développée depuis 1945 dans le Delta et qui visait essentiellement à en faire une réserve d'eau douce pour l'eau potable et les cultures (CHATEAU, 1986). L'expérience du jardin d'essai de Richard-Toll en 1824 et le plan de colonisation agricole, sous l'égide du baron ROGER et de son jardinier RICHARD, est d'ailleurs assez édifiante à ce propos.

1.1. Les aménagements artisanaux (1916-1947) : lutte contre la langue salée

Dès le début du siècle, la faiblesse des crues du fleuve Sénégal a entraîné une expansion de l'influence maritime dans toute la basse vallée. De 1913 à 1915, trois années successives de sécheresse ont pesé lourd sur les cultures autour du lac de Guiers, comme en attestent les récits et relations de l'époque (HENRY, 1918). La gestion des eaux du lac est essentiellement marquée à cette époque par le souci de freiner l'intrusion des eaux marines salées qui remontaient le fleuve jusqu'à Richard-Toll et parfois même au delà de Dagana.

Jusqu'en 1983², la remontée marine à l'intérieur du lit mineur du fleuve Sénégal était un événement normal, que l'on observait chaque année, en phase d'étiage. Ce phénomène a été largement décrit par les auteurs anciens depuis les relations de voyage de CA DA MOSTO en 1455, ADANSON en 1750 et LECARD en 1866 jusqu'aux textes d'auteurs comme HENRY (1918), TROCHAIN (1940), PAPY (1951) et DUBOIS (1955). Plus récentes, des études ont été menées par RÔCHETTE en 1964 et 1974, KANE en 1985 et GAC *et al.*, en 1986, 1990 et 1993. Les données sur l'invasion marine existent en fait depuis 1903, c'est-à-dire depuis le début des observations sur les écoulements du fleuve Sénégal. A propos des causes de l'invasion marine, plusieurs raisons ont été évoquées, parmi elles :

- l'affaiblissement des débits du fleuve et la réduction des précipitations dans le haut bassin ;
- le défoncement du seuil de Faff³ en aval de Richard-Toll, à 125 km en amont de Saint-Louis, entre 1890 et 1900, encore que ceci soit largement contesté.

C'est à partir de 1916 qu'est signalée pour la première fois l'existence d'aménagements plus ou moins viables dont le but évident était de soustraire le lac à l'influence du fleuve Sénégal lors de l'arrivée de la langue salée à Richard-Toll (HENRY 1918 ; TROCHAIN, 1940 ; GROSMIRE, 1957 ; ADAM, 1965). L'arrivée de l'eau salée dans le lac daterait, selon les études de TROCHAIN (1940) et de BANCAL (1923), du défoncement du seuil de Faff, en aval de Richard-Toll, qui a eu comme conséquence la baisse de la hauteur et de la durée de crue ; aucune précision n'est cependant donnée sur les causes de ce défoncement, objet de bien des controverses.

La première tentative d'aménagement du système fluvio-lacustre date vraisemblablement de 1916. TROCHAIN (1940) cité par COGELS (1984), dans son ouvrage sur la végétation du Sénégal, parlant du lac de Guiers, fait les remarques suivantes : « Dès 1915, à la suite du cri d'alarme jeté par le Gouverneur ANTONETTI, la mission Younès entreprit sur la Taouey, à Richard-Toll, l'édification d'un barrage en ciment armé avec un système de vannes. Les

² Le 25 novembre 1983 fut achevé le barrage en terre de Kheune, construit à 114 km de l'embouchure ; l'expérience fut renouvelée l'année suivante. En 1985, le barrage de Diama devint fonctionnel, isolant définitivement le fleuve de l'influence maritime

³ Ce seuil a été évoqué par BANCAL (1924) et PAPY (1951)

travaux furent terminés le 16 Juillet 1916, ... quatre jours plus tard, une crue subite arrachait le barrage dont l'ancrage n'était pas suffisant. Actuellement, ... on construit chaque année... un barrage avec de la terre argileuse maintenue en place par un clayonnage fixé lui-même à des pieux profondément enfoncés dans le lit de la rivière ». L'édification de ces barrages en terre sur la Taoué par les populations locales est attestée de 1925 à 1946.

L'arrivée de la crue rétablissait la communication entre les différentes unités hydrologiques. En fonction de la hauteur de cette dernière, les eaux pénétraient très loin à l'intérieur du Ferlo ; certaines années, elles atteignaient ou même dépassaient Yang-Yang ou Ngouye Diéri, à 20 km de Linguère. Simultanément, la cuvette du Ndiael se remplissait par le Niéti-Yone ou les Trois Marigots.

Dès 1938, la création de la MAS⁴, dont la mission est d'étudier la vallée et de réaliser des aménagements, permet la création du casier rizicole de Richard-Toll pour faire face à la pénurie alimentaire qui a sévi durant la deuxième guerre mondiale.

Le dépôt, en 1944, par les ingénieurs PELTIER et DELISLE d'un plan d'aménagement du delta constitue une étape importante. Ce plan prévoyait déjà à l'époque des pompages dans le lac de Guiers après renforcement de ses capacités par des endiguements et amélioration du remplissage par rectification des méandres de la Taoué. Il était prévu la mise en valeur de 50 000 ha de terres agricoles. C'est dans cette perspective que BAUDURET, chef de la MAS, a décidé de la création d'un casier expérimental pour tester ce plan d'aménagement. Le casier de Richard-Toll, l'ancien périmètre expérimental du jardinier Richard, fut alors choisi à cet effet. Il s'agissait d'une culture extensive de riz en hivernage à l'aide d'engins mécaniques et par irrigation à partir de pompages dans le lac de Guiers.

Ce type de mise en valeur n'était bien évidemment qu'une solution transitoire, viable tant que l'on disposait d'une assez bonne pluviométrie dans le haut bassin. Elle s'est d'ailleurs heurtée à l'opposition du paysannat local qui n'arrivait pas à s'adapter à de telles pratiques culturelles.

1.2. La période transitoire (1947-1985)

La construction du premier pont-barrage de Richard-Toll sur la Taoué est débutée en 1947 et achevée en 1949. Son but est de soustraire le plan d'eau à la remontée de la langue salée et d'assurer ainsi l'alimentation en eau douce pour les rizicultures installées le long de la Taoué, pour améliorer les capacités de stockage du lac. Il remplace le traditionnel bouchon argileux édifié annuellement après les hautes eaux. Le lac est isolé de l'influence marine lors des périodes d'étiage ; la libre circulation des eaux est rétablie dès que la cote du fleuve à Richard-Toll est supérieure à celle du lac ; la communication lac-fleuve est maintenue tant que la crue monte dans le fleuve Sénégal (GROSMAIRE, 1957). Dès la fermeture du pont-barrage de Richard-Toll, le niveau du lac baisse très rapidement à cause de la diffusion des eaux vers le Ferlo. En fonction de la hauteur de la crue, celles-ci peuvent atteindre Mbeuleukhé. On reste encore dans la logique du plan PELTIER et DELISLE.

⁴ Mission d'Aménagement du Sénégal

Les nouvelles conditions favorables, apportées par la construction du pont-barrage de Richard-Toll, ont permis le développement de la riziculture au nord-ouest du lac par la SDRS⁵. Le régime de la salinité est calqué sur celui de la diffusion des eaux, d'où de fortes incidences sur les conditions de vie des hommes, des animaux et des végétaux.

C'est ainsi que, de 1945 à 1955, la MAS aménage plus de 6 000 hectares de riziculture irriguée mécaniquement, avec un prix de revient cependant nettement supérieur à celui du riz mis sur le marché sénégalais. C'était encore une mise en valeur coloniale qui s'est poursuivie jusqu'en 1964 dans les cuvettes inondables de la moyenne vallée.

Avec la construction de la digue de Nieti-Yone en 1951, puis de celle de Keur Momar Sarr en 1956, le lac de Guiers devient véritablement un réservoir d'eau douce presque neuf mois sur douze ; en contrepartie, le Ndiel puis le Ferlo s'assèchent progressivement.

La création de la SAED en 1965 se voulait une réponse au défi de la fixation d'un paysannat regroupé en coopératives ; elle n'a cependant pas empêché l'échec de la riziculture mécanisée.

En 1968, l'installation d'une usine de traitement des eaux par la SONEES à Ngnith, au centre ouest du lac de Guiers, marque une étape importante dans la mise en valeur de la région. Le casier de la SDRS à Richard-Toll est reconverti en 1972 en plantation de canne à sucre, au profit de la Société MIMRAN. C'est le plus grand projet agro-industriel du pays ; il a nécessité un investissement de 50 milliards de Francs CFA et s'est réalisé grâce à l'éviction des Raffineries de Saint-Louis, gérants de la CAPA⁶. L'incertitude liée à la rentabilité de la culture de canne dans la vallée fait que la survie de ce projet n'est due qu'aux importants avantages octroyés à la société et au nombre d'emplois créés.

C'est le début de l'artificialisation du système. La majeure partie de l'année, le lac évolue en vase clos, entièrement soumis à l'influence d'une évaporation très importante. Dès 1974, le souci d'optimiser les ressources du Guiers a entraîné la rectification du tracé de la Taoué, marigot sinueux de 26 kilomètres de long, remplacé par un canal rectiligne de 17 kilomètres.

Cette période est également marquée, sous l'effet de la sécheresse, par la diminution des volumes moyens annuels du lac et l'augmentation des prélèvements hydro-agricoles. Le pont-barrage de Ndombo (B2) sur la Taoué, à 500 mètres de celui de Richard-Toll, est mis en service en 1979 ; il permet à la CSS de pomper dans les eaux du fleuve Sénégal jusqu'à l'arrivée de la langue salée et d'augmenter ainsi les potentialités du lac. Ceci lui a permis de développer son exploitation et d'installer une seconde station de pompage, en rive est de la Taoué.

Des années successives d'étiages sévères ont rendu nécessaire la construction des barrages en terre connus sous les noms de Kheune I et Kheune II, édifiés respectivement en 1983 et 1984, sur le fleuve Sénégal, à 50 km en aval de Richard-Toll. Il préfigurent en quelque sorte le barrage anti-sel de Diama qui entre en fonction dès le 14 novembre 1985.

⁵ Société de Développement Rizicole du Sénégal

⁶ Compagnie Africaine de Produits Alimentaires

1.3. Les grands aménagements du fleuve Sénégal

La réalisation du programme de grands aménagements de l'OMVS est désormais perçue comme la seule alternative face à la conjoncture climatique et économique qui déstructure et paralyse la vallée depuis plusieurs décennies. C'est un projet de développement intégré du bassin du fleuve Sénégal par élimination des contraintes qui pèsent sur son développement économique. Les objectifs poursuivis sont les suivants, selon DIAKHATE (1988) :

- sécuriser et améliorer les revenus des riverains du fleuve et des zones avoisinantes, notamment par la promotion de l'agriculture irriguée ;
- assurer l'équilibre écologique et socio-écologique dans la région et contribuer à l'établissement de tels équilibres dans la zone sahélienne ;
- rendre les économies des pays membres moins vulnérables aux aléas climatiques et aux facteurs économiques exogènes ;
- accélérer le développement économique des pays membres, par la promotion de la coopération régionale.

Ce grand projet a comme origine la grande variabilité interannuelle des débits du fleuve et la persistance des déficits pluviométriques dans la région sahélienne depuis le début des années soixante-dix ; c'est l'un des projets les plus ambitieux et les plus importants d'Afrique de l'ouest. Il comprend la réalisation de deux grands barrages : Diama à l'aval et Manantali en amont du fleuve Sénégal.

Le barrage anti-sel de Diama, construit à 50 km de l'embouchure du fleuve Sénégal, était fonctionnel dès le 14 novembre 1985 ; il fut achevé en 1986. Sa construction était rendue nécessaire par des années consécutives de sécheresse qui, progressivement, rendaient impossible toute mise en valeur agricole à cause de la salinité des eaux et des sols. Le barrage est constitué d'un évacuateur de crues comportant sept passes de 20 m de large équipées de vannes segments mobiles permettant une retenue entre les cotes +1,5 et +2,5 m IGN. Il possède également une écluse de navigation de 175 m sur 13 m. En plus de stopper la langue salée, Diama a comme autre vocation, celle de créer en amont du barrage un lac artificiel de 235 km² et d'une capacité de 250 millions de m³ destiné à l'irrigation de quelques 120 000 ha de terres et aussi à l'alimentation du lac de Guiers en eau douce. La construction de la digue de rive droite devrait permettre une surélévation du niveau de l'eau dans la retenue de Diama qui pourrait alors atteindre +2,50 m IGN et constituer une réserve de 585 millions de m³ sur une superficie de 435 km².

Le barrage régulateur de Manantali, construit sur la branche mère du fleuve Sénégal, le Bafing constitue le second volet du programme. Achevé en 1988, il complète le dispositif. Il est destiné à la régularisation des débits à Bakel autour de 300 m³.s⁻¹ et à la création d'un lac artificiel, le lac de Manantali, dont le bassin couvre 50 000 ha. Il peut stocker jusqu'à 12 milliards de m³ d'eau. Il est aussi prévu : l'irrigation de 275 000 ha de terres dans la vallée, la navigation jusqu'à Kayes et la production d'un minimum de 800 GWh d'électricité par an.

Avec l'entrée en service du barrage de Manantali, la disponibilité en eau douce devient permanente dans le Delta. La CSS pompe 90 % de ses besoins dans les eaux fluviales, d'où l'accroissement des ressources en eau et la recrudescence des aménagements hydro-agricoles. La réouverture de la digue de Keur Momar Sarr, après trente ans, en septembre 1988, à la demande de la SDE est destinée à l'adoucissement des eaux méridionales du lac de Guiers et à

la mise en valeur des terres du Ferlo. La digue fut d'ailleurs restaurée en 1993, puis sa capacité d'évacuation fut doublée en 1995 dans le cadre de l'opération « l'eau à Linguère » du programme "Vallées Fossiles".

Depuis 1994, des perspectives de remise en eau du Ndiael existent, notamment par la réouverture du chenal du Nieti-Yone, fermé 30 ans plus tôt, afin de permettre le développement agricole et la création d'une réserve ornithologique.

L'accroissement des ressources en eau de la vallée n'a pas été sans conséquences sur les infrastructures existantes. C'est ainsi qu'en 1991 et 1992 les digues nord-ouest et est furent restaurées à la hâte tandis qu'au sud, la digue de Keur Momar Sarr, sur le point de céder, a dû être entièrement refaite en 1993.

Les effets de ces ouvrages, même bénéfiques, ne doivent cependant pas occulter les importantes modifications intervenues dans ce milieu, dont certaines constituent de réelles préoccupations, tant pour les gestionnaires que pour les populations locales. Les plus préoccupantes sont : l'impact sur la qualité physico-chimique des eaux ; la réapparition, puis la prolifération de la végétation aquatique et l'intensification de certaines parasitoses.

Les aménagements comme Diama et Manantali permettent aujourd'hui un nouveau découpage de la vallée du Sénégal. On peut redéfinir le concept de dispositif fluvio-lacustre associant le fleuve Sénégal, le lac de Guiers, le Ndiael et la basse vallée du Ferlo. Le canal du Cayor devrait apporter une touche finale à ce schéma d'aménagement.

2. LES GRANDS PROJETS D'AMENAGEMENT

Face à ce nouveau contexte, à savoir de l'eau douce disponible en quantité et en qualité suffisante, de grands projets ont vu le jour. À terme, leur réalisation devrait dessiner un nouveau visage pour l'ensemble de la vallée du fleuve et régler certains problèmes ardues, tels la satisfaction des besoins en eau de la ville de Dakar et la sauvegarde de sites écologiques très importants pour le patrimoine national.

Parmi ces grands projets, les plus importants restent la construction du canal du Cayor, le programme de revitalisation des vallées Fossiles et l'Emissaire Delta. La remise en eau de la cuvette du Ndiael, envisagée depuis 1991 reste encore à l'état de projet.

2.1. Le projet Canal du Cayor

Le canal du Cayor est l'un des plus importants projets d'aménagement hydraulique conçu au Sénégal. Il est destiné à la satisfaction des besoins en eau de l'agglomération dakaroise jusqu'à l'horizon 2030. Sa réalisation reste cependant encore incertaine.

Né dans un contexte de sécheresse, son objectif premier était de compenser le déficit de l'alimentation en eau de Dakar et de sa banlieue. En effet, sur une demande journalière de 210 000 m³ pour l'agglomération dakaroise, la SDE n'en satisfait généralement que 150 000 m³ ; alors que l'accroissement annuel des besoins en eau de la ville est évalué à environ 6%. Cette situation a obligé la SDE à pomper d'avantage dans la nappe de l'Infrabasaltique et des sables quaternaires de Pout et Sébikotane alors que celles-ci étaient déjà surexploitées et placées à un haut niveau de risque (MEACC, 1993). La situation est d'autant plus critique que les pompes intensifs ne sont pas compensés par une réalimentation pluviale des nappes.

Dès 1983, une étude de faisabilité réalisée par le Cabinet allemand RHEIN-RUHR proposait le doublement de la conduite du lac de Guiers à partir de 1989, son triplement en 1994 et son quadruplement vers l'an 2000 et ainsi de suite, avec tout ce que cela suppose comme investissements (environ 150 milliards CFA avant l'an 2000).

Plusieurs autres solutions ont été étudiées, notamment une adduction d'eau à partir de la Gambie ; le dessalement de l'eau de mer aux environs de Dakar ; le transport d'eau brute par conduite à grand diamètre. L'option canal à ciel ouvert finit par remporter l'adhésion des Services Techniques du Ministère de l'Hydraulique. Les premières études confirmèrent sa faisabilité et son coût relativement faible comparé aux autres solutions étudiées.

À l'origine donc, le projet n'avait été pensé que pour répondre aux besoins en eau potable. D'autres objectifs s'y sont greffés notamment : la mise en valeur agricole dans les régions de Thiès et Dakar ; la recharge de la nappe des calcaires paléocènes du compartiment de Pout qui est la seule à présenter des caractéristiques favorables à une telle opération.

La construction du canal du Cayor devrait, à l'horizon 2000, modifier entièrement le fonctionnement du lac de Guiers, celui-ci devenant un simple lieu de transit entre le fleuve et le canal. Long de 240 km depuis le sud du Guiers jusqu'à Dakar, l'ouvrage devrait en effet, prélever annuellement environ 500 millions de m³ dans le lac de Guiers (figure 44), impliquant, du fait de l'évaporation lacustre, des apports fluviaux de 1 100 millions de m³ sur au moins sept mois, la capacité du lac étant de 600 millions de m³. Ceci sera possible tant que tous les projets d'aménagement de la vallée ne seront pas totalement opérationnels. Ensuite, il faudra compter sur seulement la moitié de cette ressource.

Près de la moitié du débit du canal en phase terminale (17,9 m³.s⁻¹) est destinée à l'usage domestique. Les objectifs d'approvisionnement en eau potable tiennent compte des besoins des zones suivantes (tabl. XX) : la zone Ngnith - Thiès, y compris les villes de Thiès et de Louga ; la région de Dakar ; la région Mbour - Petite Côte et la zone d'influence du canal, c'est-à-dire 10 km de part et d'autre de son tracé.

TABLEAU XX
Besoins moyens en eau potable pris en compte par le canal du Cayor
(en m³.j⁻¹, environ 7 mois par an)

Années	Ngnith - Thiès	Thiès - Dakar	Mbour - Petite Côte	Zone d'influence du canal	Total
1995	44 280	311 600	12 000	19 000	386 800
2001	66 090	415 000	17 500	19 000	517 590
2020	110 880	762 000	31 000	19 000	922 880

(Source : MEACC, 1993)

Un programme d'aménagements hydro-agricoles a été prévu le long du parcours du Canal. Il est prévu environ 3 000 ha en double culture maraîchère et arboriculture fruitière dans la région de Dakar et 5 500 ha en arboriculture fruitière et en double culture maraîchère dans la région de Thiès. Les prélèvements en eau pour l'irrigation estimés à environ 70 millions de m³ vers 2001 devraient atteindre 118 millions en 2013 (figure 45). Ce programme est destiné à mettre fin à l'utilisation de l'eau potable à des fins maraîchères comme cela se pratique actuellement en certains endroits de la région de Dakar et de Thiès.

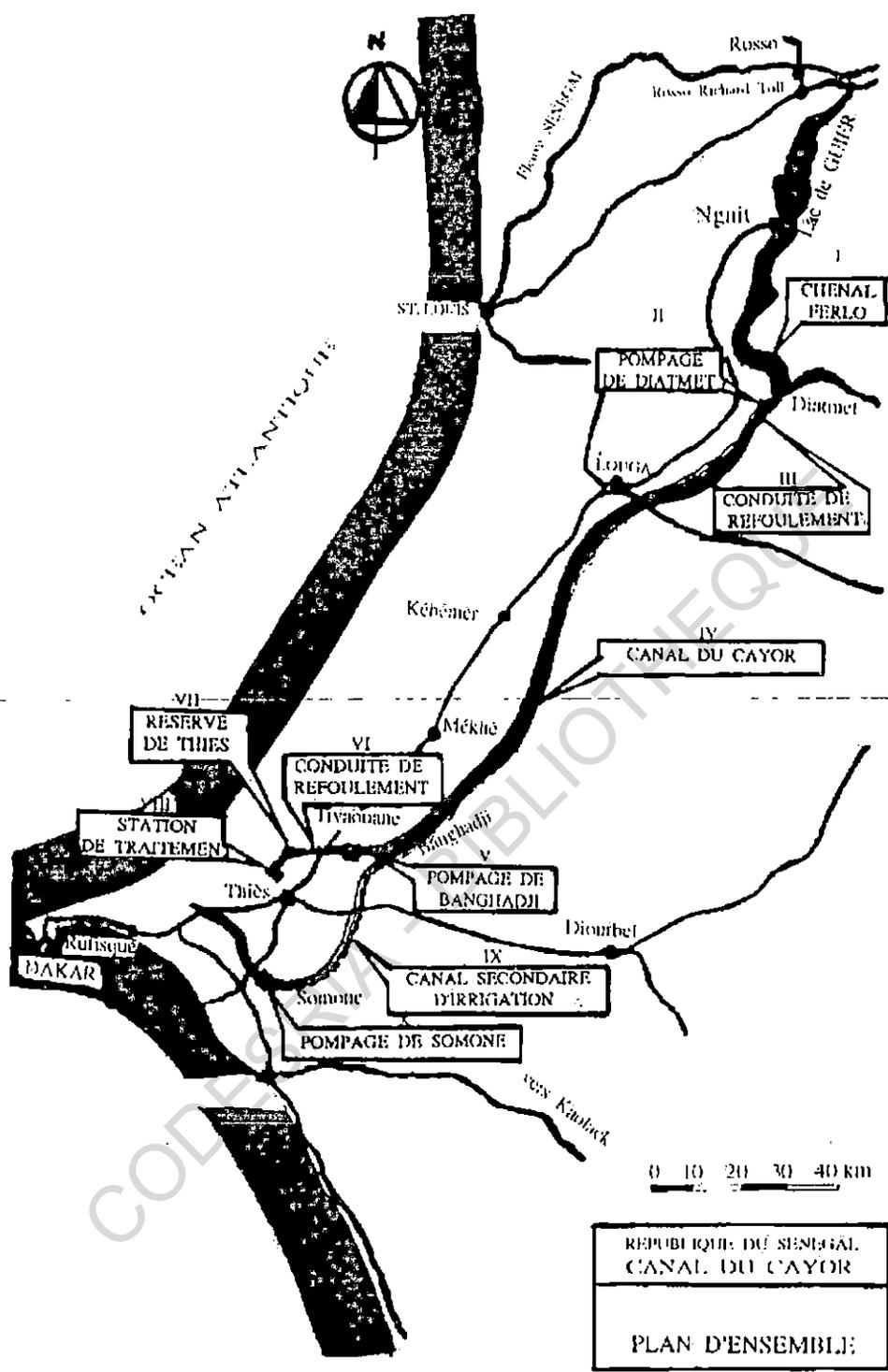


FIGURE 44. — Schéma du tracé du canal du Cayor (source : MEACC, 1993)

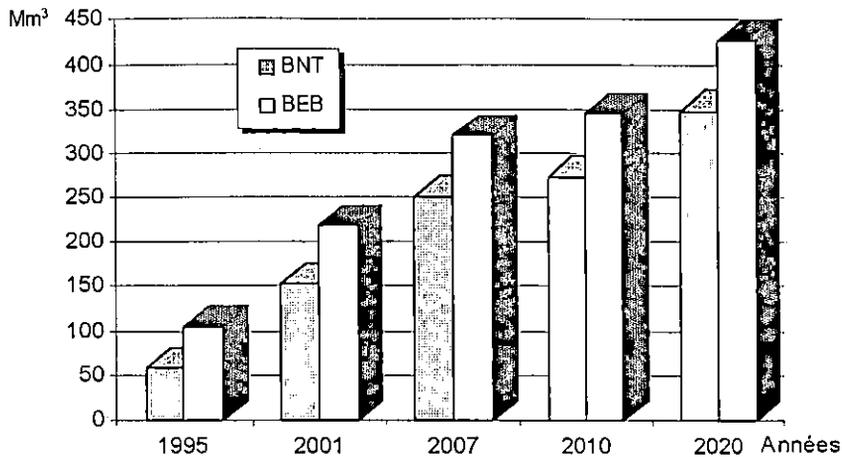


FIGURE 45. — Evolution des besoins nets totaux à satisfaire par le canal du Cayor (BNT) et des besoins en eau brute au niveau du chenal du Ferlo (BEB) en millions de m³ par an (source : MEACC, 1993)

-- La recharge de la nappe des calcaires-paléocènes de Pout, qui est la partie supérieure du système Maastrichtien-Paléocène, a deux objectifs majeurs. Il s'agit tout d'abord de sauvegarder les ressources constituées par le système aquifère et de permettre ensuite son utilisation comme réservoir saisonnier pour limiter les prélèvements au canal en période de pointe. La faisabilité de ce volet n'a pas encore été définitivement établie.

Sur le plan socio-économique, la construction du canal devrait alléger les charges du consommateur de l'eau potable par la baisse des coûts de production et améliorer les conditions d'hygiène des populations de la banlieue pour qui l'approvisionnement en eau représente un vrai casse-tête. En zone rurale, sur le parcours du canal de nombreux emplois devraient être créés et favoriser ainsi la fixation des populations sur leur terroir.

Dans le contexte actuel, la réalisation du canal du Cayor suscite cependant pas mal de polémiques, notamment en ce qui concerne les échéances de sa réalisation et les modalités de son financement. Un autre aspect et non des moindres est la « compétition » qui pourrait avoir lieu entre le canal du Cayor et le programme Vallées Fossiles sur au moins une partie du parcours. Le tracé du canal recoupe en partie celui de la vallée fossile du Car-Car, posant ainsi la question de l'opportunité d'un tel aménagement. La réalisation du canal devrait revenir très cher à l'Etat sénégalais, donc au contribuable et d'aucun se demandent comment et par qui va être financé un tel aménagement. L'autre question qui suscite l'intérêt du public est de savoir pourquoi dans un pays sous-développé, payer aussi cher une réalisation qui ne sera opérationnelle que pour trente années seulement.

Il est certain qu'à l'heure actuelle, le problème de l'alimentation en eau potable doit trouver des solutions rapides et adéquates. A ce titre, la réalisation du canal du Cayor constituerait une réelle opportunité pour Dakar et sa banlieue. Cependant, cette nécessité ne doit pas occulter les problèmes réels que posent sa réalisation, son alimentation et son entretien.

2.2. Le PRVF⁷ et la remise en eau du Ferlo

La Mission d'Etude et d'Aménagement des Vallées Fossiles (MEAVF) est créée en avril 1994 avec comme mission la réalisation du Programme de Revitalisation des Vallées Fossiles (PRVF) qui concerne environ 50 000 km², soit 25 % du territoire national. Dans le cadre du projet, les zones suivantes ont été recensées (Figure 46) : le Ferlo sur 1 200 km répartis entre les régions de Saint-Louis, Louga, et Tambacounda ; le Saloum sur 300 km ; le Sine sur environ 250 km ; le Baobolong sur 100 km ; le Car-Car sur 300 km ; le Sandougou sur 360 km.

Les besoins globaux en eau du PRVF sont estimés à environ 1,5 à 2 milliards de m³.an⁻¹ alors qu'au niveau du barrage de Diama ont été déversés, en moyenne, 8,9 milliards de m³.an⁻¹ entre 1986 et 1993. Cependant, ce volume d'eau ne doit pas être considéré comme définitif tant donné que le programme de l'OMVS n'en est encore qu'à ses débuts. De plus, ces déversements d'eau douce dans la mer procède d'un certain équilibre écologique et possède un fort impact sur le stock de poissons du plateau continental dans la région de Saint-Louis (apport d'éléments nutritifs notamment). Cet aspect de la question doit être étudié en profondeur avant toute action et dans le souci de maintenir le fragile équilibre de cette zone.

La basse vallée du Ferlo couvre une superficie totale de 33 344 km² ; elle entaille un bas plateau limité au nord par le fleuve Sénégal et à l'ouest par le lac de Guiers ; c'était un affluent de rive gauche du fleuve Sénégal (figure 46). La surface plane du bassin versant du Ferlo s'incline vers l'ouest et le nord-ouest avec une altitude qui passe de 80-90 m vers Bakel à 15-20 m près du lac de Guiers. Jusqu'en septembre 1956, date d'achèvement de la digue de Keur Momar Sarr, la vallée du Bounoum était reliée au Guiers qui assurait annuellement son remplissage lors de la crue du fleuve Sénégal. En hivernage, son lit était jalonné de mares temporaires éphémères (*vendou* en peul) qui s'asséchaient progressivement.

Entreprise dans le cadre du PRVF, la remise en eau de la vallée du Ferlo s'est fixé comme but l'irrigation de 18 à 20 000 ha de terres. Le projet est encore à l'étude avec deux scénarios : une remise en eau par la basse vallée du Ferlo via le lac de Guiers à l'aval ; une prise directe sur le fleuve Sénégal au niveau de Bakel, Matam ou Podor.

La remise en eau du Ferlo par l'aval consisterait en une alimentation gravitaire par la prise de Keur Momar Sarr réfectionnée et inaugurée le 18 janvier 1996 ; sa capacité d'évacuation a été renforcée par le doublement du nombre de vannes. Il est projeté d'y faire transiter environ 30 m³.s⁻¹ en provenance du lac de Guiers dont 20 m³.s⁻¹ pour le canal du Cayor et 10 m³.s⁻¹ pour l'alimentation du Ferlo. Cette remise en eau devrait mobiliser annuellement quelques 100 à 250 Mm³ d'eaux lacustres à partir de la digue de Keur Momar Sarr.

La remise en eau par l'amont tient compte de la proximité entre la haute vallée du Ferlo et le fleuve Sénégal. Elle se ferait par pompage direct dans le fleuve Sénégal entre Bakel et Thilogne ou au niveau de Podor. Cette opération achoppe cependant sur la topographie de l'interfluve entre le Ferlo et le fleuve Sénégal qui se situe à des cotes plus élevées que le niveau moyen du fleuve (50 à 100 m d'altitude alors que le fleuve se situe en contrebas entre 60 à 20 m). Cette contrainte impose le creusement de fossés de communication si l'option gravitaire est retenue soit le recours à un relèvement des eaux par pompage soit la combinaison des deux.

L'opération « l'eau à Linguère » constitue le premier volet du programme de revitalisation des Vallées Fossiles. La réouverture de la digue du Ferlo en septembre 1988 est les lâchers

⁷ Programme de Revitalisation des Vallées Fossiles

d'eau annuels entrepris depuis par le Ministère de l'Hydraulique vers cette vallée ouvrent de nouvelles perspectives pour toutes les régions traversées. La progression de l'eau dans le Ferlo a été la suivante : 30 km en 1988 et 1989 ; 50 km en 1990 ; 60 km en 1991 ; 65 km en 1992 (SNC-LAVALIN/BCEOM, 1996).

Il est également question d'une remise en état de la vallée du Car-Car, de Linguère à Thiès, sur 300 km. L'aménagement de cette vallée devrait théoriquement débiter en 1998. Le risque de compétition entre projets Vallées fossiles et canal de Cayor vu la similitude de tracé entre le Car-Car et le canal sur une partie de son parcours demeure entier, avec tout ce que cela implique comme charges pour les contribuables et pour l'Etat. Au delà de la question financière se pose aussi celle de la disponibilité en eau compte tenu du fait que le fleuve Sénégal est un fleuve international selon la convention des États de l'OMVS ; la réalisation d'aménagements semblables risquerait sans aucun doute de poser de graves problèmes de ressources dans les autres Etats riverains.

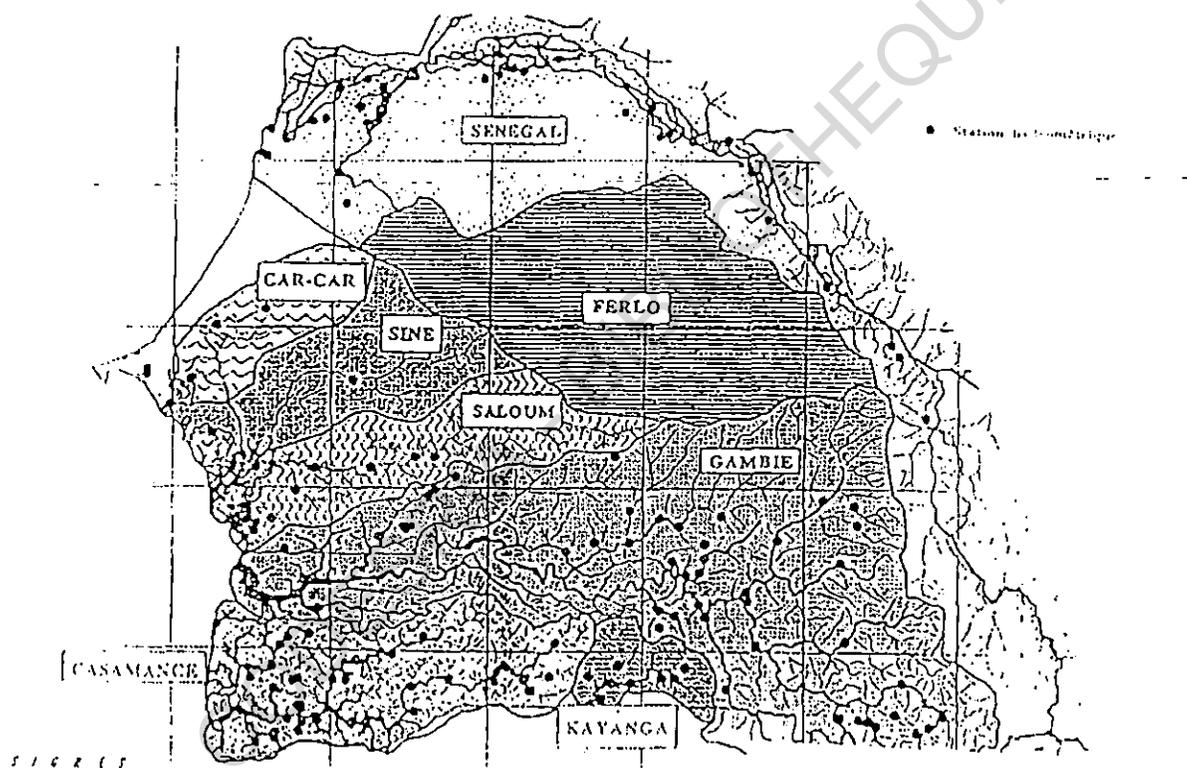


FIGURE 46. — Plan d'ensemble de l'aménagement des vallées fossiles (source : MEAVF, 1995)

2.3. L'Emissaire Delta

Avec une prévision de 61 470 ha en double culture de riz, le Delta est, sans aucun doute, un des futurs grands pôles de développement du pays. Son système naturel de drainage a été modifié au profit de l'installation de nouveaux périmètres irrigués et de l'adduction d'eau potable pour l'agglomération de Saint-Louis. Cette adduction se fait par l'intermédiaire du canal de Ronkh, du Gorom Amont, du Kassack et du Lampsar qui s'écoulent vers la réserve de Dakar-Bango où est installée une unité de production de la SDE. À l'heure actuelle, le Gorom Aval sert de collecteur des eaux salées provenant du casier de Boundoum.

L'étude LAHMEYER INTERNATIONAL - SOGREAH (1994) a identifié trois contraintes majeures à la gestion des eaux de surface dans le Delta :

- 1) des zones écologiques protégées (parc du Djoudj, dépressions de Noar de Pardiagne et de Krankaye, cuvette du Ndiel et lac de Guiers) utilisées comme zones de rejet des eaux de drainage⁸, salées et polluées par les résidus de produits chimiques utilisés dans la riziculture ;
- 2) des eaux de surface servant à la fois à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable des populations et du bétail ;
- 3) de nouveaux périmètres irrigués villageois sans réseau de drainage, et de ce fait confrontés à une salinisation rapide des parcelles du fait de taux de salinité élevée dans les sols et la nappe phréatique.

Pour faire face à cette situation, la réalisation de l'Emissaire Delta est devenue un impératif. Il était prévu pour desservir 10 500 ha en 1995, 13 500 ha en 2000 et 26 500 ha à l'horizon 2015. Cet aménagement est une des recommandations formulées par le PDRG (Plan Directeur de Développement intégré pour la Rive Gauche du fleuve Sénégal) et inscrit dans sa programmation pour la période 1994-2000 (GERSAR-CACG, 1990 a et b).

Le tracé de l'Emissaire retenu par le Plan Directeur de Développement intégré de la Rive Gauche suit le Djeuss avec comme objectifs : utiliser les axes hydrauliques existants de manière à diminuer les coûts ; adopter le tracé le plus court et le plus proche possible de l'ensemble des périmètres, de minimiser les coûts de liaison en évitant de brancher des périmètres trop éloignés ; utiliser les dépressions existantes pour décharger les gros débits et diminuer le gabarit de l'émissaire secondaire (figure 47). Trois alternatives ont été définies pour le tracé de ce canal :

- une décharge nord à 4,5 km en amont du barrage de Keur Samba Sow, avec un canal de 10 à 12 km à travers le Toundou Guinor et la forêt classée de Maka Diama et une station de refoulement proche de la route de Diama ; des terrassements profonds sont prévus dans les dunes de Maka Diama ;

⁸ Le casier de Boundoum draine vers le fleuve Sénégal, via le Gorom Aval en traversant le Djoudj ; la CSS rejette ses eaux de drainage dans le lac de Guiers ; les périmètres de Kassack nord et sud, Grande Digue Tellel rejettent leurs eaux de drainage vers la cuvette du Ndiel tandis que les périmètres du Lampsar drainent vers les dépressions fermées de Noar, Pardiagne et Krankaye.

- une décharge sud à la jonction du Djeuss avec le Lampsar ; une digue de bouchure sans vannes serait mise en place de même qu'un canal d'environ 4 km de long pour acheminer les eaux vers une station de pompage située à 4 km au nord-est de la réserve de Dakar-Bango ; l'inconvénient majeur de cette alternative est la présence d'eaux salées dans le Djeuss aval qui risque de créer un déficit d'eau douce dans la réserve de Dakar-Bango ;
- une décharge au niveau de Dakar-Bango ; une telle décharge serait un danger pour la station de traitement des eaux de la SDE, d'une capacité de $12\ 000\ m^3.j^{-1}$ qui y est installée ; son extension était d'ailleurs prévue pour 1995.

L'alternative décharge nord (figure 48) a été préconisée car elle permettrait d'utiliser l'aval du marigot de Djeuss pour alimenter les futurs périmètres du bas Lampsar et du Ngalam.

Le drain principal comprendra quatre segments : la branche B entre le périmètre de Boundoum et sa confluence avec le Djeuss à la dépression de Krankaye ; la branche A entre la dépression du Ndiael et la confluence avec le Djeuss à Krankaye ; le Djeuss en amont du barrage de Keur Samba Sow et la décharge proprement dite.

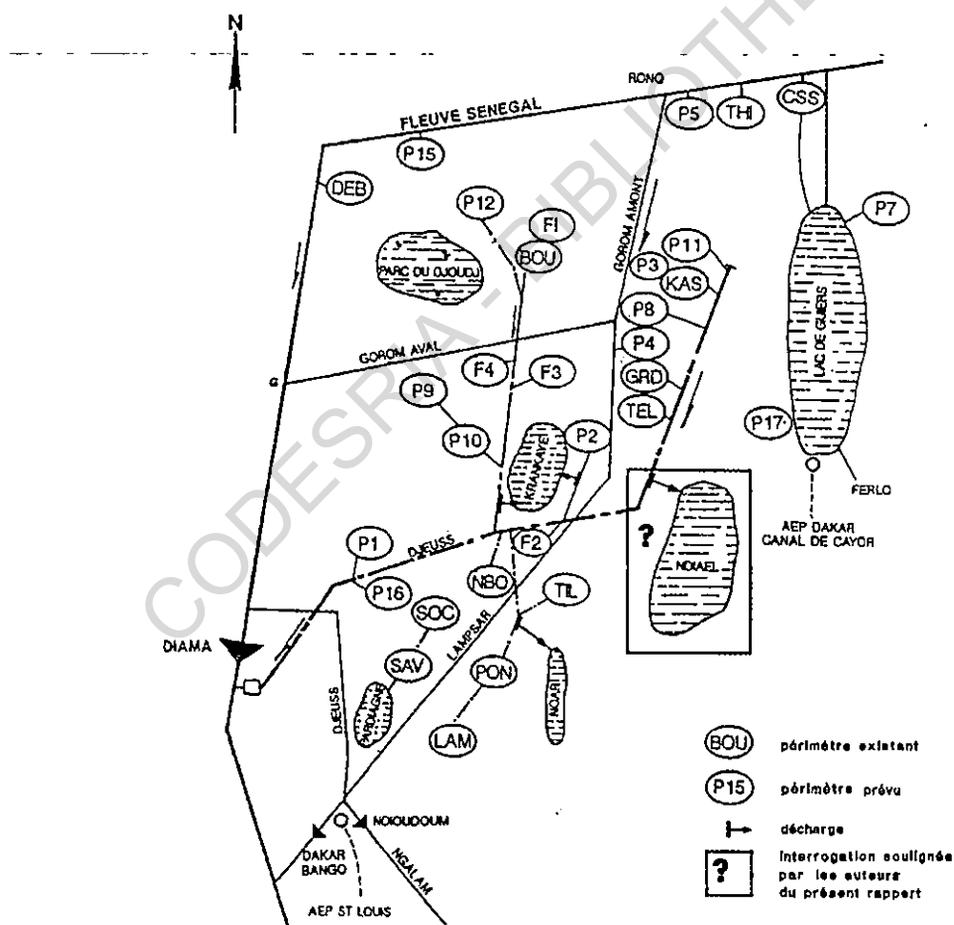


FIGURE 47. — Schéma du drainage du delta à l'horizon 2015 suivant le PDRG (source : GERSAR - CACG, 1990 b)

Les limites de l'Emissaire Delta seront les suivantes : au nord, le Gorom aval ; à l'est, le Lampsar et la route nationale (RN2), y compris le Ndiael ; à l'ouest, le fleuve Sénégal. Cependant, il prend en compte les débits du drainage des périmètres situés hors de ces limites. Les rejets de la CSS n'ont pas été inclus dans la conception de cet ouvrage, même si la possibilité a été évoquée.

Un Emissaire Delta qui ne prendrait pas en compte le drainage des périmètres du lac de Guiers et de la Taoué, tout au moins des parcelles CSS, ne serait pas totalement réussi. Sa vocation doit être avant tout de mettre les zones telles que le Ndiael, le lac de Guiers, les dépressions de Noar, Kränkaye et Pardiagne, le Parc des oiseaux du Djoudj, hors d'atteinte de tout drainage, donc hors d'atteinte de la contamination par les résidus de produits chimiques. Son objectif premier serait d'éviter des accidents tels que le Delta en a connu dans le passé.

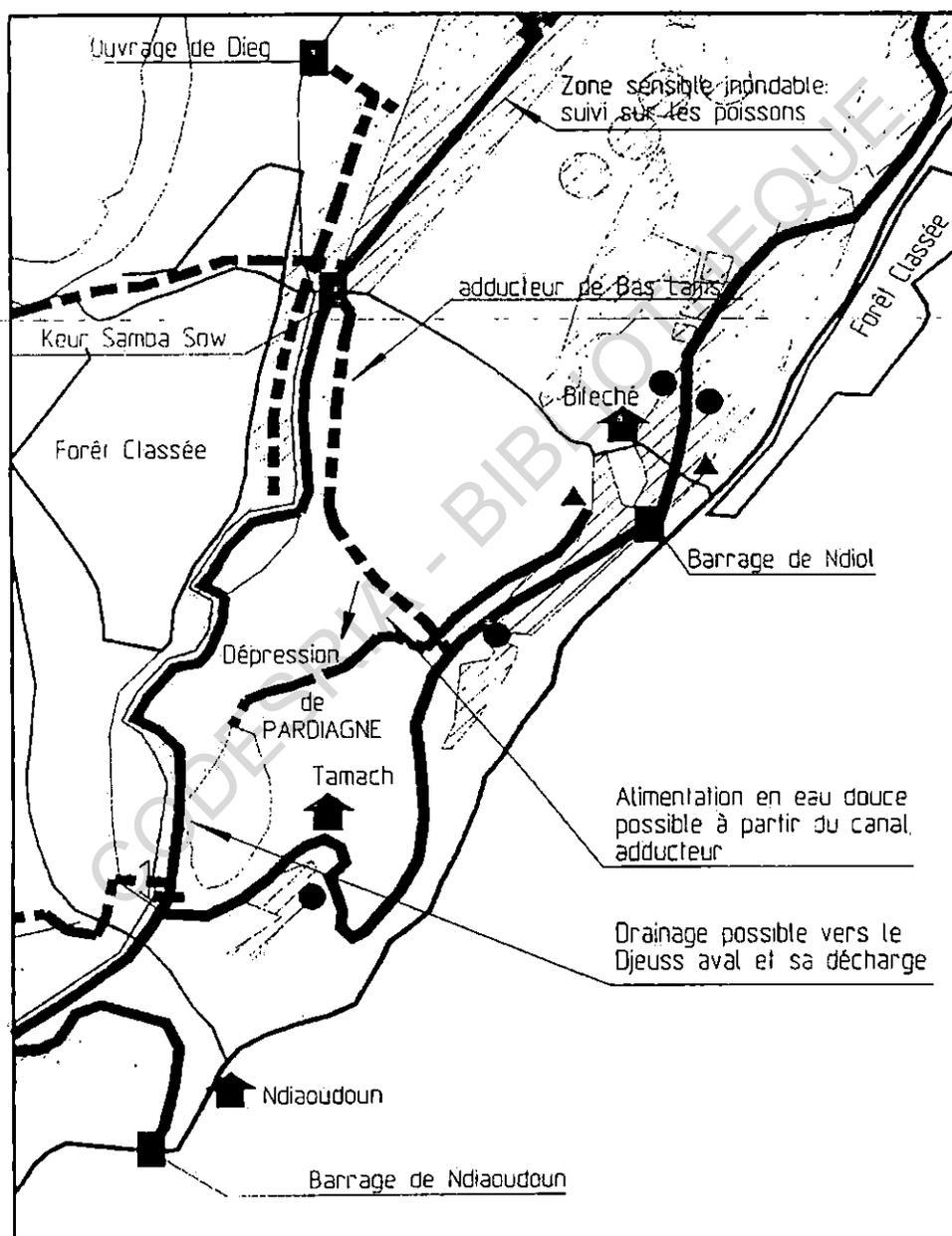


FIGURE 48. — *Emissaire Delta : alternative décharge nord*
(source : LAHMEYER INTERNATIONAL - SOGREAH, 1994)

2.4. Le projet de remise en eau du Ndiael

La cuvette du Ndiael (figure 5) est située à l'est de Ross-Béthio, entre 16° 10' et 16° 18' de latitude nord et entre 16° 00' et 16° 07' de longitude ouest. Orientée NE-SW, elle est formée en réalité d'une succession de dépressions et de marais aux sols salés ; ses dimensions moyennes sont de 15 km de long et 9 km de largeur (MIETTON *et al.*, 1991).

Jusqu'au début des années 1950, le Ndiael est rempli saisonnièrement, soit en amont par le marigot de Nieti Yone, défluent naturel du lac de Guiers, soit en aval par le marigot de Menguèye. Les volumes d'eau stockés dans la cuvette sont alors fonction de la crue du fleuve Sénégal. Les eaux se déversaient dans les trois marigots situés au sud-ouest de la cuvette.

Envisagée consécutivement à la rupture de la digue nord-ouest, à proximité du chenal de Nieti-Yone, la remise en eau du Ndiael a été effective en 1994 et s'est faite par le sud de la cuvette via les Trois Marigots. Le Ndiael semble retrouver sa fonction d'exutoire naturel du lac de Guiers, susceptible d'influencer son évolution quantitative et qualitative. La réalisation du programme de grands aménagements de l'OMVS a permis, en effet, une disponibilité croissante de l'eau dans tout le bassin du fleuve Sénégal, de même que l'amélioration des conditions de qualité de l'eau dans le Delta.

Le but de la remise en eau du Ndiael est principalement de développer l'agriculture irriguée et de créer une réserve ornithologique. La cuvette est d'ailleurs une réserve spéciale de faune de 46 550 ha protégée par la Convention de RAMSAR en tant que zone humide d'importance internationale. Mais le Ndiael c'est également des zones pionnières et des zones de terroirs ; d'où une relative complexité de la gestion du milieu et des impacts éventuels de la remise en eau de la cuvette. L'agriculture irriguée représente la principale activité dans la région ; la riziculture y occupe en effet 30 000 ha terres en 1991 contre 2 750 en 1987 ; durant la même période, la production est passée de 31 000 tonnes à 100 000 tonnes. C'est dire donc l'importance de la pérennité de l'eau dans cette zone. La salinité des sols constitue cependant une contrainte majeure à l'exploitation agricole des terres ; elle pourrait compromettre la mise en valeur de la cuvette.

L'étude de pré-faisabilité hydraulique, du bilan hydrologique et des impacts de cet aménagement réalisée par MIETTON *et al.* (1991) a fixé les modalités pratiques de cette remise en eau. Il découle de cette étude que la remise en eau du Ndiael est techniquement réalisable, suivant deux scénarios de gestion hydrologique et deux options d'alimentation : une remise en eau soit permanente, soit temporaire par le chenal naturel du Nieti Yone ou par le nord de la cuvette du Ndiael.

La remise en eau périodique sera limitée à la période de hautes eaux du fleuve Sénégal pour faire bénéficier la cuvette de la gratuité de l'eau prévue par l'OMVS, soit du 15 août au 15 octobre. Cette option de gestion permettra de s'affranchir d'éventuels impacts sanitaires (bilharziose) et écologiques (prolifération de plantes aquatiques nuisibles) et surtout d'assurer aux oiseaux migrateurs gîte et nourriture. La submersion permanente de la cuvette va entraîner la création d'une réserve d'eau d'une centaine de km² de superficie répondant aux exigences de la réserve spéciale de faune.

Suivant le scénario de gestion hydrologique et la cote maximale retenus, la remise en eau du Ndiael va mobiliser annuellement entre 100 et 200 Mm³ d'eaux fluviales (DIOP *et al.*, 1993). Pour exemple, en année moyenne, situation de mise en eau permanente (figure 49), un volume d'eaux fluviales de 202 Mm³ est mobilisé pour une cote maximale de la cuvette en octobre de 0,92 m IGN et un volume moyen de 78 Mm³. En situation de remise en eau périodique, l'alimentation annuelle du Ndiael est de 102 Mm³, la cote maximale de

0,42 m IGN et le volume moyen annuel de 27 Mm³ environ (figure 50). En année sèche, un volume d'eaux fluviales de 244 Mm³ est nécessaire pour assurer l'alimentation en eau du Ndiael. Cependant, ces chiffres nous paraissent quelque peu exagérés si l'on tient compte de la taille de la cuvette d'une part et de la capacité de stockage du lac de Guiers d'autre part.

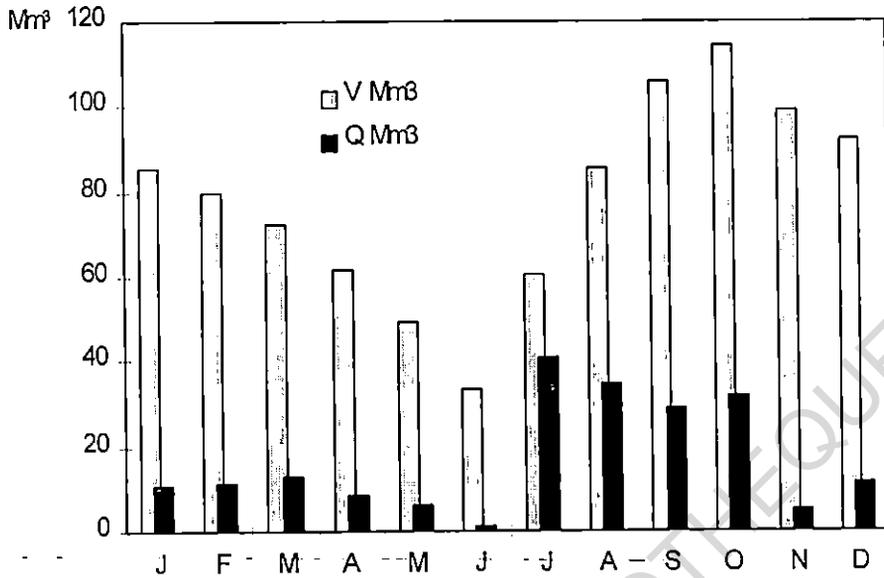


FIGURE 49. — Volumes moyens mensuels ($V \text{ Mm}^3$) et apports fluviaux ($Q \text{ Mm}^3$) dans la cuvette du Ndiael en année moyenne, scénario de remise en eau permanente (source données : MIETTON *et al.*, 1991)

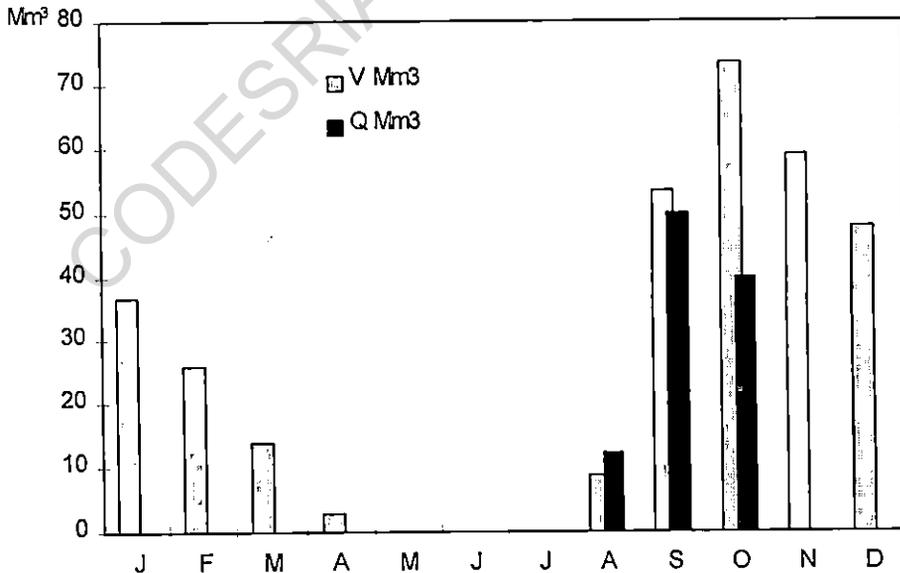


FIGURE 50. — Volumes moyens mensuels ($V \text{ Mm}^3$) et apports fluviaux ($Q \text{ Mm}^3$) dans la cuvette du Ndiael en année moyenne, scénario de remise en eau périodique (source données : MIETTON *et al.*, 1991)

La réalimentation via le chenal du Nieti Yone nécessite la construction d'un ouvrage vanné de prise sur le lac de Guiers ainsi que d'un canal d'acheminement des eaux (figure 51). Ce dispositif permettra de protéger les aménagements hydro-agricoles situés en rive ouest du Guiers. La remise en eau par le nord de la cuvette se fera soit par le marigot de Bombol, soit par le marigot du Ndiael (ou drain du Ndiael) avec une alimentation provenant du Lampsar ou du Kassack. L'option marigot de Bombol nécessite l'aménagement d'un ouvrage de prise dans le Lampsar et d'un canal d'acheminement. L'option drain du Ndiael reste cependant la plus simple à mettre en œuvre mais présente plus de risques d'un point de vue écologique. Les eaux du marigot du Ndiael présentent en effet une qualité impropre tant à l'activité hydro-agricole qu'à l'aménagement d'une réserve d'avifaune. C'est l'une des raisons qui avaient d'ailleurs fait envisager l'utilisation de la cuvette du Ndiael comme décharge de l'Emissaire Delta.

Le choix définitif du mode d'alimentation de la cuvette du Ndiael est cependant assujéti d'une part au mode de gestion hydraulique régional défini ou à définir par l'OMVS et d'autre part aux solutions techniques adoptées dans le cadre de la réalisation d'autres aménagements programmés par le PDRG dans la région (Emissaire Delta par exemple).

Mais quelque soit le scénario de gestion et d'alimentation retenu, la cuvette devra être fermée pour éviter les déversements vers le sud, dans la zone de Trois Marigots et aussi pour la couper du drain du Ndiael où débouchent les eaux usées des périmètres irrigués du Kassack et de la cuvette de Grande Digue Tellé.

La remise en eau du Ndiael, même si elle est souhaitée par les populations locales, va néanmoins soulever beaucoup de conflits : conflits entre agriculteurs et éleveurs, entre les populations et les gestionnaires de la réserve ornithologique. Le sentiment des populations à l'égard de cette réserve est qu'elle est en contradiction avec l'objectif de mise en valeur agricole. De ce fait, elles se sentent lésées en faveur de la faune ornithologique dont ils bénéficient très peu des retombées. Une gestion optimale du Ndiael remis en eau consisterait à mettre sur pied un type de gestion multiforme pour satisfaire aux exigences des différents groupes socio-professionnels et de la réserve ornithologique. Cette gestion pourrait être prise en charge par un « Conseil du Ndiael » selon les recommandations de DIOP *et al.* (1993). Selon ces auteurs, le fait que la cuvette du Ndiael soit inscrite à la fois dans le schéma d'adduction d'eau et de drainage du delta en fait une zone écologiquement sensible, en particulier si une réserve de faune doit y cohabiter avec des aménagements hydro-agricoles utilisant des pesticides et des populations usant des ressources pour leur survie.

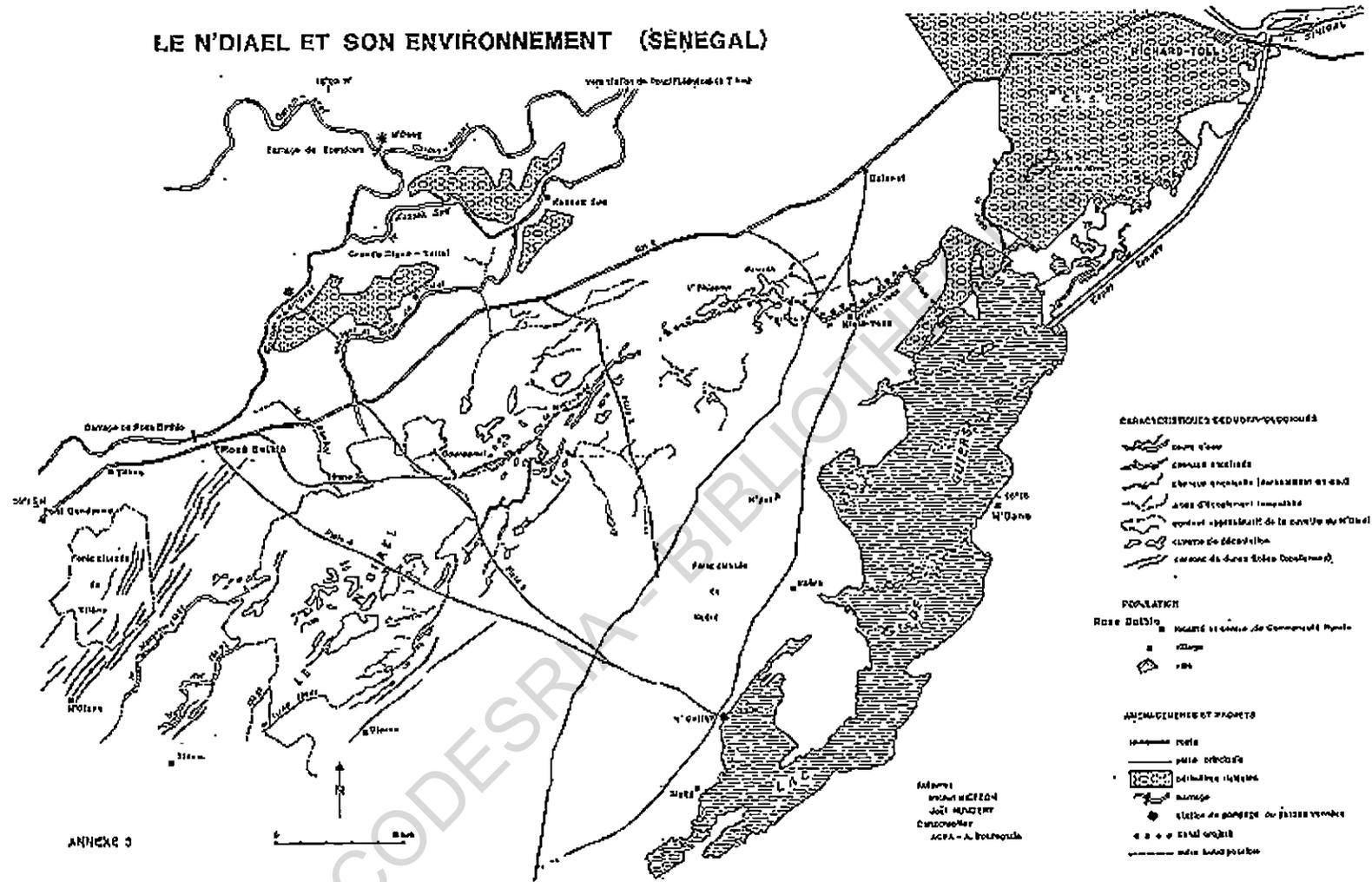


FIGURE 51. — Schéma d'aménagement de la cuvette du Ndiel.

3. IMPACTS DES AMENAGEMENTS SUR LE MILIEU ET LES HOMMES

Les incidences des aménagements hydrauliques sur l'homme et son milieu sont variés. Cette analyse de PERROUX (1981), citée par DIAKHATE (1988), est pertinente à plus d'un titre : *« L'implantation des techniques avancées ne va jamais seule, elle s'accompagne de changements locaux dans le style de vie et de mimétisme inconsidéré, d'imitation quasi réflexe des pays riches par les producteurs et consommateurs des pays en développement. Ce mimétisme [...] rompt les solidarités traditionnelles et fait perdre de vue les besoins et les aspirations de l'ensemble de la population. Pour faire aussi bien que l'étranger, pour rattraper le retard technologique, on sacrifie des hommes et on perpétue leur statut de dépendance. »*

Dans le Delta du Sénégal, on peut certes noter des effets bénéfiques tirés de la mise en place des aménagements hydro-agricoles. Ces bénéfices ne doivent pas occulter les importantes modifications intervenues dans ce milieu dont certaines constituent de réelles préoccupations, tant pour les gestionnaires que pour les populations locales. Les plus marquantes sont l'impact sur la qualité physico-chimique des eaux, la réapparition puis la prolifération de la végétation aquatique et ses corollaires (développement de la faune aviaire et de la faune malacologique).

Les choix d'aménagement opérés dans ce milieu n'ont pas toujours été judicieux, au vu des résultats obtenus quelques dix années après tant sur le milieu que sur les hommes. Ils dénotent souvent une inadéquation entre les politiques de gestion des ressources, les réalités socio-économiques et le comportement de la ressource elle-même.

3.1. Aspects positifs

L'une des réussites du programme des grands aménagements du fleuve Sénégal a été l'augmentation des ressources en eau. Celui-ci s'accompagne d'une totale disparition de la remontée de la langue salée en amont du barrage de Diama. Ces deux effets combinés ont entraîné une augmentation des potentialités agricoles dans tout le bassin.

Dès 1986, l'accroissement des ressources en eau est devenu une réalité, du moins pour le lac de Guiers (figures 33 et 34). Pour le reste du bassin, il a fallu attendre 1988 et la mise en fonction du barrage régulateur de Manantali pour constater une amélioration des ressources en eau. A la station de Bakel qui sert de référence pour la vallée, on constate une amélioration du bilan hydrologique.

La présence des barrages et de leurs retenues d'eau permet désormais de réguler les apports saisonniers dans le bassin ; l'eau est disponible à la demande et même en surplus. Cependant, cette augmentation des ressources en eau a un inconvénient ; elle n'est pas encore bien maîtrisée dans le temps et dans l'espace. Cela a conduit certaines années à des « catastrophes locales ».

Du point de vue écologique, les retombées sont positives. Le lac de Diama est une vaste zone humide, très diversifiée, d'une grande importance pour l'avifaune. Des milliers d'oiseaux (anatidés, flamants, pélicans, cormorans, hérons, sternes...) y trouvent des sites de repos, de nourriture et de reproduction. Le Delta occupe en effet la troisième place mondiale pour les oiseaux d'eau et explique en partie l'importance de l'industrie touristique qui occupe une frange importante de la population de Saint-Louis.

Le parc du Djoudj est l'une des plus importantes attractions touristiques du pays ; la Cigogne noire (*Ciconia nigra*), espèce très rare, y a été récemment observée de manière

régulière. La remise en eau du Ndiavel fera revivre la réserve ornithologique qu'elle abritait à la fin des années Soixante.

Le lac de Guiers est redevenu une réserve d'eau douce utilisable toute l'année ; il fournit désormais une eau de bonne qualité pour l'irrigation des terres riveraines. L'augmentation de la ressource en eau a en effet accentué les phénomènes de dilution ; la salinité des eaux est en baisse partout dans le Delta (Cf. deuxième partie). Les changements intervenus dans la qualité des eaux du Delta ont cependant modifié les conditions de vie et entraîné des changements profonds dans la structure et la répartition de la faune et de la flore.

L'augmentation des potentialités agricoles dans la région du Delta et au lac de Guiers est liée à l'accroissement des terres irrigables par amélioration de la disponibilité annuelle en eau. La pérennité de l'eau entraîne la possibilité d'irriguer de plus en plus de terres, même celles situées dans le *dieri*.

3.2. Aspects négatifs

La réalisation de grands ouvrages hydrauliques s'accompagne toujours d'effets plus ou moins néfastes liés à l'utilisation des ressources en eau et à la mise en valeur des terres agricoles. Ces effets négatifs ont comme toile de fond le mode de gestion du milieu, qui à notre sens, est sujet à de nombreuses failles. Ceci est à la base de nombreux conflits d'utilisation des ressources dans toute la région du Delta. Et les nombreux juridictions mises en place ne facilitent la gestion d'ensemble.

Les forts taux de prévalence de bilharziose dans la région du lac de Guiers procèdent également de ces effets néfastes ; cet aspect sera traité en détail dans la deuxième partie de l'étude.

3.2.1. Les conflits d'utilisation des ressources dans le Delta

Les conflits d'utilisation des ressources dans le Delta sont de deux ordres : les problèmes fonciers et les problèmes liés à l'eau. La compréhension de ces conflits découle de l'examen des différentes juridictions définissant les modes de tenure foncière et les modalités d'accès aux ressources en eau.

3.2.1.1. Les problèmes fonciers

Dans la gestion de la mise en valeur des terres du bassin du fleuve Sénégal, la question foncière occupe une place prépondérante ; elle est en effet source de bien des conflits dans le Delta. La vivacité des formes traditionnelles de gestion de l'espace se heurte désormais à une volonté affirmée du paysan de s'approprier la terre qui, avec le développement de l'irrigation, constitue un enjeu important.

A un autre niveau, la cohabitation entre des aires protégées (Parc du Djoudj classé site du Patrimoine Mondial, forêts classées de Naéré, de Tilène, de Maka-Diama et de Massara-Foulane) et des aménagements hydro-agricoles pose un problème de limites entre les territoires des uns et des autres .

Les nombreux textes qui régissent la gestion foncière des terres ne contribuent pas à clarifier cette situation. Il y a d'une part la Loi sur le Domaine National et d'autre part celle relative aux Communautés Rurales. Les prérogatives de ces deux textes étant en réalité assez imprécises, il en résulte que leur application sur le terrain achoppe sur de nombreuses difficultés. COLY (1996) s'est particulièrement penché sur la question foncière dans la région du lac de Guiers. Il semblerait qu'une certaine forme de spéculation foncière soit née en même temps que la politique dite de « l'Après Barrages ».

La loi sur le Domaine National (Loi 64-46 du 17 juin 1964) regroupe toutes les terres n'ayant pas fait l'objet d'immatriculation au profit de privés ou d'un classement dans le domaine de l'Etat ; ses domaines d'application sont fixés par le décret 64-573 du 30 juillet 1964. Cette loi reconnaît le droit d'occupation et d'exploitation de la terre à toute personne qui la met en valeur, sans en faire sa propriété. L'esprit de la loi sur le Domaine National était de préserver le paysan sénégalais d'un système de taxes et redevances alors assez contraignantes. Elle était également censée contribuer à un développement rural intégré. La nature de l'homme faisant qu'il n'est pas enclin à sauvegarder ce qu'il ne possède pas en propre, cela a provoqué des effets négatifs au plan écologique, notamment par l'absence de jachères prolongées.

Le décret 65-443 du 25 juin 1965 met toutes les terres cultivables du delta sous la juridiction de la SAED chargée alors de leur mise en valeur. Le décret 87-720 reverse toute la zone pionnière dans les zones de terroirs, suite à la réforme dans la région de Saint-Louis et au désengagement de la SAED.

La gestion des terres des zones de terroirs relève des Communautés Rurales (décret 72-1288 du 27 octobre 1972 modifié par les décrets 80-1051 du 14 octobre 1980 et 86-445 du 10 avril 1986). Elles ont un pouvoir décisionnel sur les affectations et désaffectations de terres, l'installation d'habitations et de campements en zone de terroir.

Les terres sont affectées en fonction du critère de territorialité et de la capacité de mise en valeur de l'affectataire qui doit être membre de la Communauté Rurale. Les terres ne peuvent faire l'objet d'aucune transaction commerciale comme la vente ou la location. Mais l'Etat aussi peut de son côté immatriculer des terres et les affecter à des tiers pour cause d'utilité publique (Exemple du Projet OSBI, projet de transplantation d'embryons pour améliorer l'élevage dans le delta qui a reçu 8 000 ha).

La Communauté Rurale peut en principe prononcer des désaffectations pour défaut de mise en valeur, utilisation non conforme à la loi ou pour procéder à une révision générale des affectations. Mais dans la réalité, les désaffectations de terres sont quasi inexistantes. Le cas le plus fréquent est plutôt l'affectation dite de complaisance ou au profit de non résidents, en totale violation de cette loi.

Ces deux lois ont contribué à accentuer les divergences déjà assez vivaces entre agriculteurs et éleveurs. La notion de mise en valeur évoquée dans ces textes se réfère essentiellement aux activités culturales. Elargir la notion de mise en valeur au pastoralisme et à la foresterie permettrait de résoudre un bon nombre de conflits d'utilisation des terres dans le delta. Par ailleurs, la législation actuelle ne favorise pas les investissements sur les terres, du moment que l'affectataire n'a qu'un droit d'usage, ce qui ne lui confère pas de garantie bancaire suffisante pour l'accès au crédit.

Les dissensions au sein des Conseils Ruraux sont également des facteurs de blocage au détriment des attributaires ou demandeurs de terres. Quelque part, les travaux d'aménagement hydro-agricole ont entraîné la dégradation de l'économie pastorale traditionnellement bien installée dans la région du Delta.

La situation est aggravée par le découpage très flou des Communautés Rurales et des terroirs villageois qui les composent. Ce qui fait qu'au-delà de ces conflits entre utilisateurs, il y a aussi les conflits entre villages ou entre communes. L'intervention des autorités administratives reste également très forte.

3.2.1.2. Les problèmes liés à l'eau

Les conflits liés à l'eau existent dans la vallée non pas à une échelle individuelle mais entre structures de gestion et utilisateurs. C'est le cas par exemple entre la CSS et l'OMVS et dans une moindre mesure entre la SAED et certains privés. La facturation du coût de l'eau est en effet un vrai casse-tête pour les gestionnaires.

Il y a deux niveaux dans la gestion de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal : le niveau sous-régional, à travers les structures dirigeantes de l'OMVS, et le niveau national, avec le code de l'eau.

Au niveau sous-régional, l'OMVS est dotée de pouvoirs juridiques qui lui permettent de gérer et d'exécuter les travaux communs des Etats membres. Elle est chargée de la gestion et de planification de la mise en valeur du bassin. Ses priorités sont l'irrigation, l'alimentation en eau potable, l'électricité et la navigation. Celles-ci doivent faire l'objet d'une tarification qui est la source de nombreux conflits entre l'OMVS et la CSS au niveau sénégalais. Il est évident que la réussite du programme de l'OMVS dépend en grande partie de sa capacité à gérer rationnellement l'eau de manière à la garantir aux usagers mais aussi de rentabiliser les ouvrages réalisés. Mais l'OMVS n'a pas les outils adéquats pour exercer une telle gestion.

Au niveau national, la gestion des eaux est régie par un Code de l'eau dont le principe est de soumettre à une autorisation préalable toute exploitation des ressources en eau. Le Code de l'eau s'applique aux eaux continentales ; les agents chargés de la police de l'eau sont théoriquement chargés de réprimer toute utilisation non conforme au code, tout gaspillage et tout acte entraînant la pollution des eaux. La création d'un Bureau de l'Administration des Eaux au sein du Ministère de l'Hydraulique est à l'étude (OMVS, 1995). Ce bureau serait chargé de réglementer l'usage des eaux conformément au Code, de délivrer des autorisations et concessions pour l'utilisation de l'eau et de recouvrer les redevances sur l'eau.

3.2.2. Bonne ou mauvaise gestion des ressources?

La pratique d'une gestion éclatée des différentes composantes de l'environnement ne contribue pas à simplifier l'application des différents textes de loi en vigueur. Car, outre les lois portant sur la gestion foncière et le Code de l'eau, il y a également le Code forestier, un décret portant sur la gestion des parcours du bétail et le Code de la chasse et de la faune. Le Sénégal est par ailleurs signataire de beaucoup de conventions internationales : Convention de RAMSAR (Iran, 2 février 1971), Convention de l'UNESCO (Paris, 16 novembre 1972) ; Convention de Bonn (23 juin 1979), Convention d'Alger (Convention Africaine pour la Conservation de la Nature et des Ressources naturelles).

A travers ce foisonnement de textes, il n'est pas toujours aisé pour un utilisateur non averti de se retrouver. Et en général, ces textes s'adressent à un public qui n'a pas le niveau requis pour leur compréhension. Ceci fait que toutes ces lois font l'objet d'inadéquations lors de leur application.

Sur le terrain, les entretiens avec les paysans révèlent une totale incompréhension de la politique de mise en valeur pratiquée par l'Etat, du rôle et des prérogatives de certains organismes ou institutions tels que l'OMVS, le Ministère de l'Hydraulique, la MEACC, la MEAVF, les Parcs Nationaux et les Eaux et Forêts. L'action de ces derniers est souvent perçue comme totalement néfaste et surtout uniquement répressive et/ou "prédatrice" du patrimoine paysan.

Il est donc clair qu'il existe une inadéquation entre le mode de gestion pratiqué par l'Etat, l'environnement socio-économique du paysan, les ressources disponibles et les objectifs à atteindre en matière de développement. Par exemple, au lac de Guiers, la gestion des ressources en eau est souvent laissée aux mains de certains utilisateurs comme la CSS qui contrôle toute la partie nord tandis que la partie sud est aux mains du PRVF. Alors que théoriquement, cette gestion est l'apanage du Ministère de l'Hydraulique qui n'a pas les moyens opérationnels de son exercice.

Face à cette situation, force est de se questionner sur la gestion des ressources naturelles dans le Delta. Est-ce une bonne ou une mauvaise gestion ?

L'efficacité et la réussite des aménagements réalisés ou en cours de réalisation repose désormais sur une meilleure coordination des opérations de gestion et sur la concertation entre acteurs et décideurs d'une part et entre les différents décideurs d'autre part. Elle passe aussi par la prise en compte de tous les utilisateurs de l'environnement lacustre mais aussi de leurs impacts potentiels sur le milieu, qu'ils soient d'ordre hydrologique ou qualitatif. Cette nouvelle gestion ne devra en aucun cas se faire sans l'implication et l'intéressement des populations riveraines. C'est à ce prix que l'on aboutira à un développement rural harmonieux dans le Delta et par-delà, dans tout le bassin du fleuve Sénégal.

CONCLUSION A LA PREMIERE PARTIE

La région du système fluvio-lacustre du Guiers, de par sa position géographique dans le bassin du fleuve Sénégal, son évolution au cours des temps géologiques, présente un intérêt particulier. Sa configuration spéciale fait qu'elle a particulièrement souffert du contexte de sécheresse qui sévit au Sahel rendant inévitable la mise en place des grands aménagements sur le fleuve Sénégal, le barrage anti-sel de Diama à l'aval et le barrage régulateur de crues de Manantali à l'amont.

Ces grands barrages désormais opérationnels, les ressources en eau du bassin ont doublé voire triplé. L'eau n'est désormais plus un problème crucial ; de nombreux projets aussi ambitieux les uns que les autres ont vu le jour. Du point de vue hydrologique, les grands aménagements du fleuve Sénégal ont eu un effet bénéfique dans toutes les régions concernées. L'abondance de l'eau dans le Delta a cependant mis à jour de nombreux problèmes : conflits d'utilisations des ressources, problèmes de gestion des ressources, problèmes environnementaux.

A l'horizon 2000, lorsque les grands travaux préconisés par le PDRG seront réalisés, la situation risque d'être assez chaotique. Le schéma d'aménagement du lac de Guiers assez simple (figure 52), en apparence, va nécessiter, du point de vue hydrologique, une gestion stricte et surtout concertée des approvisionnements du lac à partir du fleuve. D'importants volumes d'eau seront mobilisés annuellement ; théoriquement entre 700 et 1 000 Mm³ d'eau d'ici l'horizon 2030 (tabl. XXI). Les impacts sur le milieu-environnant et les populations seront plus ou moins positifs suivant les modes de gestion pratiqués et la compréhension des mécanismes régulant ces impacts.

L'approvisionnement en eau, eau potable, eau pour l'irrigation et le bétail, ne devrait donc plus poser de problèmes majeurs, du moins jusqu'aux alentours de 2030.

Après avoir satisfait au critère de quantité, celui de la qualité des eaux doit être soigneusement observé et analysé pour éviter les désastres qu'ont connu d'autres régions aménagées hydro-agricolement dans le monde (exemple du barrage d'Assouan en Egypte).

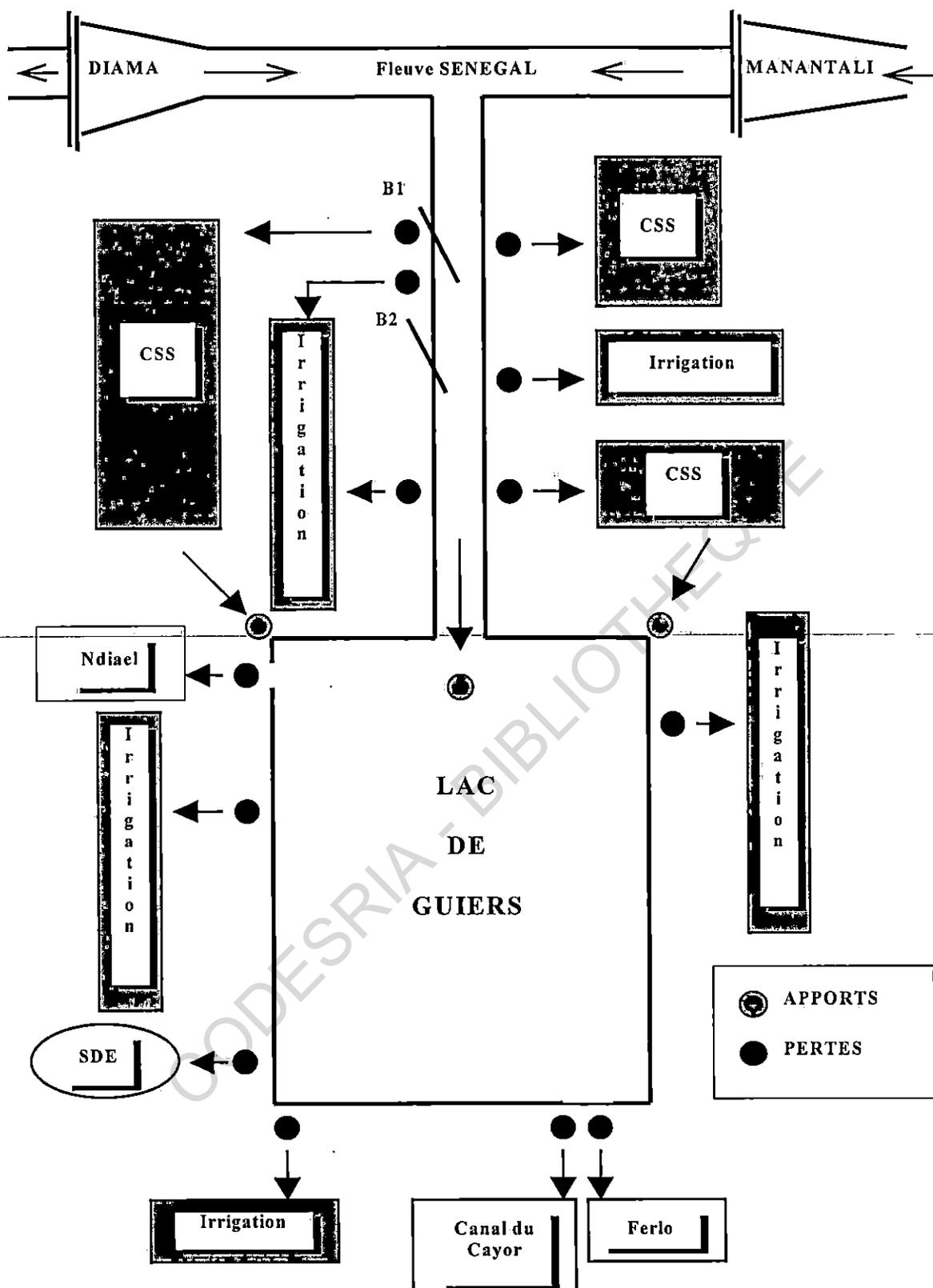


FIGURE 52. — Schéma d'aménagement du lac de Guiers à l'horizon 2000
 (source : COGELS *et al.* (1994) complété par NIANG (1998))

TABLEAU XXI
Synthèse des aménagements autour du lac de Guiers à l'horizon 2000 - 2030

Aménagements	Besoins annuels en eau (M m ³)	Enjeux	Impacts sur le milieu et les hommes	Acteurs	Décideurs
Canal du Cayor	250 à 500	Eau potable	+++	MEACC Org. paysannes	OMVS Min. Hydraulique MEACC SDE
		Irrigation 8 500 ha	+		
		Objectifs secondaires	?		
Vallée du Ferlo	100 à 250	Irrigation 20 000 ha	+	MEAVF Org. Paysannes Privés Eleveurs	OMVS Min. Hydraulique MEAVF Comm. Rurales
		Revitalisation Ferlo	++		
		Zone humide	+		
Cuvette du Ndiael	100 à 200	Irrigation	+	Org. paysannes Privés Parcs Nationaux Eaux et Forêts	OMVS Min. Hydraulique MEPN Comm. Rurales
		Zone Humide	+		
SDE	16	Eau potable	+++	SDE	OMVS Min. Hydraulique SDE
Aménagements hydro-agricoles	238 Taoué	Canne à sucre	+	CSS SAED Org. Paysannes Privés	OMVS Min. Hydraulique CSS, SAED Comm. Rurales
	100 lac	Riziculture Maraîchage	+		
Demande totale en eau (M m ³)	700 à 1000	<u>Source données</u> : MEACC (1993 et 1996), COGELS <i>et al.</i> (1994), MIETTON <i>et al.</i> (1991), DIOP <i>et al.</i> (1993)			
+++ : très positif ; ++ positif mais nécessite suivi régulier et gestion intégrée + : potentiellement néfaste si la gestion est inadaptée ; ? : mise en œuvre à préciser					
OMVS : Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal ; MEACC : Mission d'étude et d'aménagement du canal du Cayor ; MEAVF : Mission d'étude et d'aménagement des vallées fossiles ; Min. Hydraulique : Ministère de l'Hydraulique ; MEPN : Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature ; Org. paysannes : organisations paysannes ; SDE : Sénégalaise des Eaux ; CSS : Compagnie Sucrière Sénégalaise ; SAED : Société d'Aménagement et Exploitation de terres du Delta et de la Falémé ; Comm. Rurales : Communautés Rurales					

Deuxième partie

QUALITE GENERALE DES EAUX DU LAC DE GUIERS

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

Chapitre I

SYNTHESE DE LA QUALITE GENERALE DES EAUX LES EFFETS DU BARRAGE DE DIAMA

La construction du barrage de Diama, rendue nécessaire par le contexte de « sécheresse » et ses corollaires qui sévissaient dans la vallée du fleuve Sénégal a apporté de nombreuses modifications à l'environnement du lac de Guiers.

L'une des manifestations les plus évidentes et des plus marquantes a été le changement intervenu dans le bilan qualitatif des eaux du lac. La mise en service du barrage de Manantali complique davantage le système, notamment par la multiplication des apports d'eau douce, en dehors des périodes classiques de remplissage du lac. La gestion des barrages au niveau de la Taoué ne contribue évidemment pas à atténuer cette situation.

L'objectif de cette étude est non seulement de dresser le bilan des connaissances sur la qualité des eaux du lac de Guiers et de sa région mais aussi de procéder à une synthèse des impacts majeurs des aménagements sur l'environnement. Bien entendu, il ne s'agit pas de réétudier le bilan qualitatif des eaux du lac. Des données de télédétection satellitaire sont utilisées pour apprécier le développement de certains aspects liés à la gestion qualitative des eaux.

Quelques analyses ont été effectuées sur les eaux des nappes du Ndiael¹ et sur la lame de submersion du Ferlo en 1989 ainsi que sur le fleuve Sénégal à la station de Richard-Toll entre 1989 et 1992. Ces données ne seront pas traitées dans le cadre de ce travail.

1. QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE GENERALE

Le barrage anti-sel de Diama a été réalisé dans un contexte de sécheresse, la faiblesse de la crue du fleuve Sénégal n'arrivant plus à compenser les remontées d'eau marine lors des périodes d'étiage. Dans le lac de Guiers, on a abouti à un état d'extrême minéralisation des eaux, même si la remontée de la langue salée très loin à l'intérieur des terres est attestée depuis longtemps (Cf. première partie). L'envahissement des eaux du fleuve par celles de la mer n'est donc pas un phénomène nouveau dans l'histoire de la région. Déjà en 1754, ADANSON faisait état d'une remontée de la langue salée jusqu'à Podor, à 300 km de l'embouchure du fleuve Sénégal.

Une série d'années sèches, à très basse pluviométrie, depuis 1969 pratiquement, a pesé très lourd sur les potentialités du fleuve Sénégal avec les conséquences qu'on a connu sur le lac de Guiers et ses défluent.

Dix ans après la mise en fonction des grands barrages, une première estimation des conséquences de ces ouvrages sur la qualité physico-chimique des eaux peut être dégagée. La qualité des eaux du lac de Guiers est déterminée par la qualité et le volume des différents termes du bilan hydrologique. L'existence de deux séries de données à dix années d'intervalle permet une comparaison entre les situations d'avant et d'après barrage (COGELS *et al.*, 1993).

¹ Voir annexes

D'une manière générale, la concentration en éléments dissous diminue lorsque le volume du lac augmente et vice versa. L'évolution de la qualité des eaux du lac de Guiers est donc étroitement liée à celle de son bilan hydrologique général et de son fonctionnement. La connaissance de ce dernier est une condition préalable à l'établissement du bilan qualitatif.

1.1. Protocole de suivi de la physico-chimie des eaux

Depuis 1973, la SDE analyse régulièrement les eaux du lac de Guiers à la station de Ngnith qui correspond à la station n° 12 sur la carte. La fréquence de ses analyses dépend du type de paramètre mesuré ; les chlorures et la conductivité sont analysés quotidiennement.

Le suivi de la qualité physico-chimique générale des eaux a fait l'objet de deux campagnes d'échantillonnage à dix années d'intervalle aux treize stations du lac (figure 53).

La première campagne qui couvre la période 1979-1982 comporte 28 séries d'échantillonnages (COGELS, 1984) ; la seconde qui s'étend de 1989 à 1992 compte 25 séries d'échantillonnages (COGELS *et al.*, 1993) et a été réalisée dans le cadre du programme EQUENSEN². L'étude était axée sur les éléments chimiques majeurs. Tous les éléments majeurs dissous ont été analysés lors de ces deux séries d'échantillonnage, en plus de la conductivité, du pH et de la température. Une étude sur des éléments tels que phosphore et azote, très liés au développement de l'agriculture irriguée, a aussi été entreprise.

1.1.1. Calcul de la qualité moyenne des eaux

A chacune des treize stations du lac est attribuée une zone d'influence théorique dans laquelle les eaux sont considérées comme étant de même qualité. Cette délimitation s'est faite par la méthode des polygones de THIESSEN. Le volume de chaque zone est calculé suivant le niveau du plan d'eau mesuré quotidiennement à l'échelle limnimétrique de la station de Ngnith.

La mesure de la concentration en un élément dissous et le calcul du poids total de cet élément à chacune des treize zones du lac et pour chaque série d'échantillonnage permet de connaître le poids total de cet élément dans le lac et d'en déduire une concentration moyenne générale.

La concentration moyenne en élément dissous dans les eaux des trois régions du Guiers est obtenue par addition des teneurs aux différentes stations : les valeurs des stations 3 à 9 pour la région nord, 10 à 12 pour la région centrale et 13 à 15 pour la région sud.

² Le projet EQUENSEN (Environnement et Qualité des Eaux du Sénégal) était un projet d'étude et de coopération entre l'ORSTOM, l'UCAD, et l'ISRA financé par la CEE

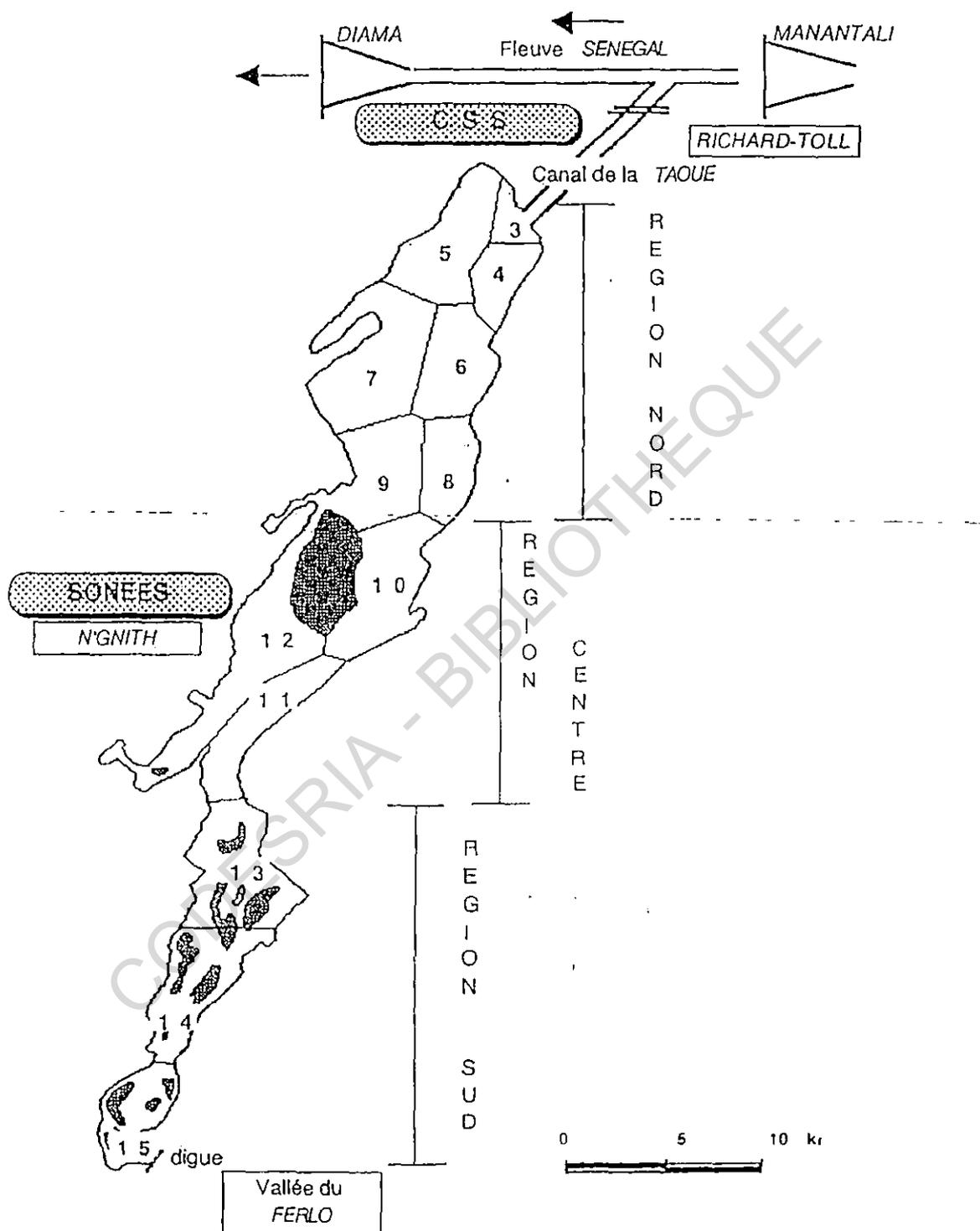


FIGURE 53. — Situation géographique des stations d'échantillonnage dans le lac de Guiers.

1.1.2. Calcul de la salinité moyenne des eaux

La salinité (S) est définie comme le volume de composés solides séchés à 480° C dans un litre d'eau. Elle renvoie à la notion de minéralisation globale des eaux (Min. Glob.), c'est-à-dire la somme des concentrations en éléments minéraux.

La salinité peut être calculée à partir de la chlorinité³ (Cl) selon la formule de KNUDSEN (RODIER, 1980) :

$$S (\text{mg.l}^{-1}) = 0.030 + 1.8050 \text{ Cl} (\text{mg.l}^{-1}) \text{ ou } S (\text{mg.l}^{-1}) = 1.80655 \text{ Cl} (\text{mg.l}^{-1})$$

DUSSART (1966) distingue : les eaux monotypiques, dont la variabilité reste dans la même classe d'halinité ; les eaux ditypiques, dont la variabilité déborde sur une seule autre classe d'halinité ; les eaux polytypiques, dont la composition est variée, les deux extrêmes débordant sur deux ou trois classes d'halinité.

LECLERCQ (1991) à la suite de VAN DER WERFF et HULLS (1957-1974) a donné une méthode de classification des eaux naturelles en fonction de la concentration en chlorures et de la salinité globale, depuis l'eau douce jusqu'à l'eau de mer (tabl. XXII).

TABLEAU XXII
Classification de eaux suivant la méthode de VAN DER WERFF et HULLS (1957-1974)

Classe	Type d'eau	[Cl] en mg.l ⁻¹	Salinité totale en mg.l ⁻¹
Z	eau douce	< 100	< 1800
ZB	eau douce	100 - 500	180 - 900
BZ	eau légèrement saumâtre	500 - 1000	900 - 1800
B	eau saumâtre	1000 - 5000	1800 - 9000
BM	eau fortement saumâtre	5000 - 10000	9000 - 18000
MB	eau salée	10000 - 17000	18000 - 30000
M	eau de mer	> 17000	> 30000

La minéralisation globale se calcule soit à partir de la conductivité électrique, soit par la pesée de l'extrait sec ou poids total des éléments dissous. Le calcul à partir de la conductivité électrique se fait à l'aide des formules suivantes :

$$\text{Min. Glob} (\text{mg.l}^{-1}) = 688\ 000 * \text{conductivité à } 20^{\circ} \text{ C} (\text{ms.cm}^{-1})$$

ou

$$\text{Somme des anions ou des cations (még/l)} = 10 * \text{conductivité à } 20^{\circ} \text{ C} (\text{ms.cm}^{-1})$$

D'après la réglementation française et ses normes de potabilité des eaux, elle ne doit pas dépasser 2 g.l⁻¹ (2000 mg.l⁻¹), 500 mg.l⁻¹ selon les normes américaines et internationales alors que les normes de l'OMS ne fixent comme limite une concentration de 1000 mg.l⁻¹. Selon SCHOELLER cité par RODIER (1980), la limite de potabilité d'une eau est de 8000 mg.l⁻¹ de minéralisation globale (tabl. XXIII), indépendamment des régions, du climat et de la physiologie humaine.

³ Poids d'halogénures par litre d'eau.

TABLEAU XXIII
Potabilité de l'eau en fonction du taux de minéralisation globale

Potabilité	Bonne	Passable	Médiocre	Mauvaise	Momentanée
Min. Glob. (mg.l ⁻¹)	0-500	500-1000	1000-2000	2000-4000	4000-8000

Calcul de la salinité ou de la minéralisation globale donnent approximativement les mêmes résultats, de sorte que l'on utilise soit l'un, soit l'autre.

La salinité a été corrélée à la conductivité électrique (C), donnant la formule suivante :

$$S \text{ (mg.l}^{-1}\text{)} = 0.708 C \text{ (}\mu\text{mhos à } 25^{\circ} \text{C)} - 9.60$$

Inversement, on peut aussi calculer la conductivité électrique à partir de la salinité avec :

$$C \text{ (}\mu\text{mhos à } 25^{\circ} \text{C)} = 1.41 S \text{ (mg.l}^{-1}\text{)} + 13.60$$

Pour le calcul de la minéralisation globale, la pesée de l'extrait sec a été appliquée aux eaux du lac de Guiers.

1.1.3. Calcul du bilan qualitatif des eaux

Le calcul du bilan qualitatif reprend les mêmes termes que celui du bilan hydrologique avec cependant trois termes clés :

- 1) les apports fluviaux : avant l'entrée en fonction du barrage, ils apportaient beaucoup d'éléments dissous dans le lac en période d'étiage, essentiellement des bicarbonates et du potassium ; depuis 1985, leurs apports en éléments minéraux au lac sont minimes ;
- 2) les rejets d'eaux de drainage de la CSS, très chargés en chlorures, sulfates, magnésium et sodium, dus à l'emploi de gypse pour le dessalement des champs de canne à sucre ;
- 3) les lâchers d'eau vers la vallée fossile du Ferlo ont permis une importante baisse de la minéralisation des eaux du sud qui, de tout temps, étaient très chargées du fait d'une part des phénomènes de concentration qui intervenaient en période de saison sèche et d'autre part de la présence de sel résiduel (époque Holocène).

La qualité des eaux du lac en un jour déterminé, résulte du bilan des apports et pertes pour chaque paramètre. L'évaporation participe naturellement aux phénomènes de concentration.

1.2. Caractères physiques

La qualité physico-chimique d'une eau est déterminée par différents éléments que sont : la densité, la température, le pH, la conductivité et les éléments chimiques dissous. Dans l'étude qualitative réalisée dans le cadre du programme EQUESSEN, seuls la température et le pH ont été étudiés.

1.2.1. La température des eaux

La température des eaux du Guiers est régulièrement mesurée à la station de Ngnith par le laboratoire de l'usine de la SDE. Ses variations mensuelles sont très faibles. La courbe d'évolution annuelle de la température du lac est unimodale avec un maximum en septembre et un minimum en janvier. L'évolution est bien marquée dans le temps, les écarts types très faibles indiquant d'assez basses variations interannuelles, ce qui est confirmé par les faibles coefficients de variation.

La moyenne interannuelle entre 1976 et 1992 est de 24,6 °C (figure 54) avec un maximum de 29,5 °C et un minimum de 19,3 °C, soit un intervalle de variation de 10 °C. Le coefficient de variation, très faible, est de 0,030 seulement.

Avant le barrage de Diama, c'est-à-dire lors de la période 1976 à 1985, la température moyenne annuelle de la température est de 24,2 °C; elle passe à 25,4 °C entre 1986 et 1992. Cette augmentation, peut être mise sur le compte des nouvelles conditions hydrologiques et écologiques issues de la construction des grands barrages : notamment la stabilisation et le rehaussement du niveau du plan d'eau du lac découlant de l'augmentation des ressources en eau dans le fleuve Sénégal.

L'augmentation de la température pourrait induire des effets bénéfiques au niveau de la production primaire. Cependant, une très grande attention doit être portée au fait que 25 °C est aussi une température idéale pour la croissance des mollusques et de leurs supports, constitués par les plantes aquatiques. Il serait intéressant de faire d'autres mesures pour confirmer l'évolution constatée.

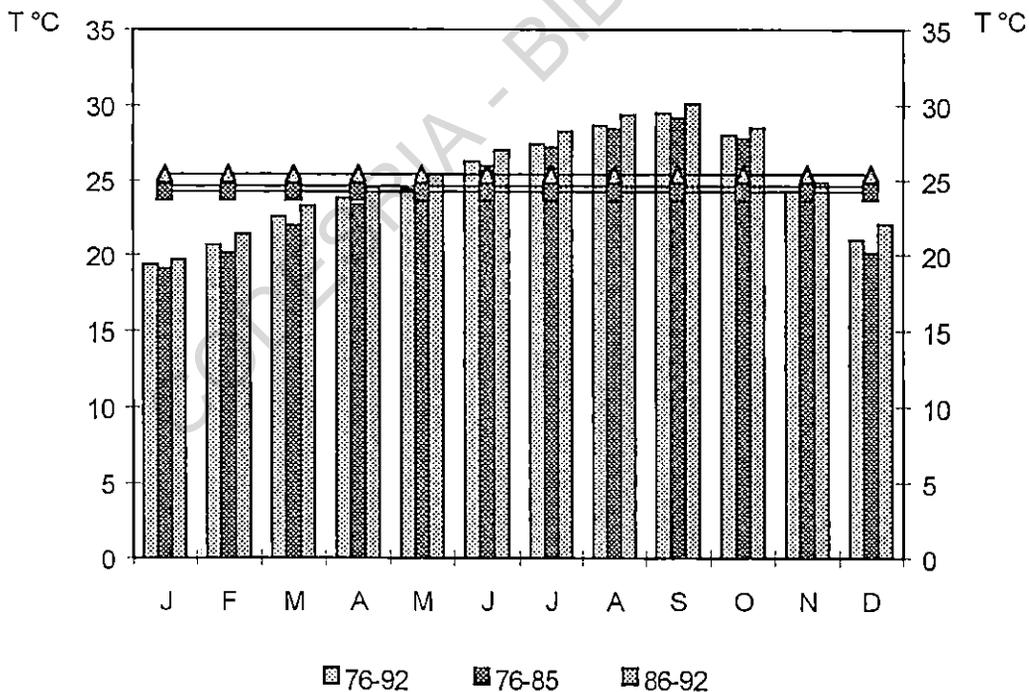


FIGURE 54. — Moyennes mensuelles des températures aquatiques du lac de Guiers (Source données : EQUÉSEN).

1.2.2. Le pH

Le pH du lac de Guiers est mesuré hebdomadairement au Laboratoire de la SDE à Ngnith. On observe un léger gradient nord - sud correspondant à celui de la minéralisation des eaux (Tableau XXIV). Le calcul du pH moyen du lac est basé sur celui de la salinité globale des eaux.

TABLEAU XXIV
Le pH moyen au trois régions du lac de Guiers

	Région nord	Région Centre	Région sud
Moyenne	7.62	7.76	7.96
Écart type	0.28	0.31	0.28
Maximum	8.45	8.73	8.87
Minimum	6.86	7.14	7.26

En 1977, le pH moyen du lac était de 7,35 puis passe à 8,20 en 1992, soit une augmentation de 12 % en 15 ans. Depuis 1992, le pH tend à se stabiliser. Fin 1992, il tendait même à régresser du fait de l'apport d'eau fluviale de pH 7 à 7,2. Cette évolution décroissante est appelée à se prolonger dans temps du fait de la jonction permanente entre le fleuve et le lac et des apports d'eau de drainage parfois très acides (eaux de pH 3.0), en provenance des casiers de la CSS via la station R2.

Pour la période 1989-1992, considérant un niveau moyen de 1,00 m IGN, le pH moyen de 7,71. L'évolution du pH des eaux du Guiers semble liée au régime hydrologique du lac comme l'indique la courbe de tendance (figure 55). Certains phénomènes biologiques tels que le phytoplancton.

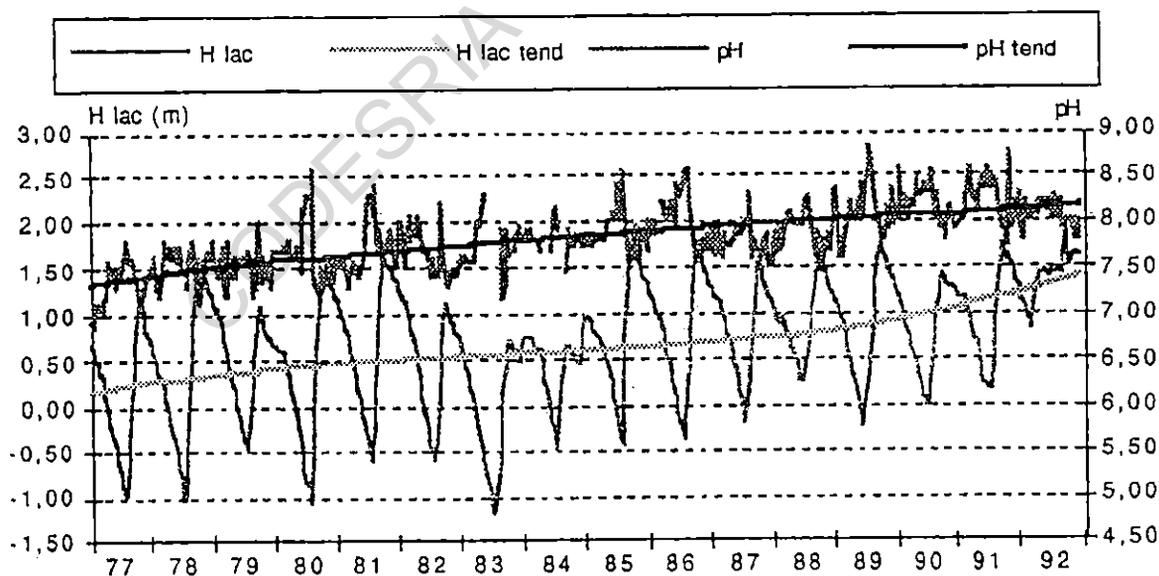


FIGURE 55. — Évolution du pH et de la hauteur d'eau et courbes de tendance de 1977 à 1992
(Source : GAC et al., 1993)

1.3. Composition chimique des eaux

Les deux campagnes d'échantillonnage effectuées sur les eaux du lac ont permis de mesurer les éléments chimiques majeurs suivants : les chlorures (Cl), les sulfates (SO₄), l'alcalinité (CO₃ + HCO₃), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le sodium (Na) et le potassium (K).

La première série d'échantillonnage entre 1979 et 1982, effectuée par COGELS (1984), permet d'apprécier la qualité des eaux avant la mise en service du barrage de Diama. La deuxième campagne (1989-1992), effectuée dans le cadre du projet EQUÉSEN, donne un aperçu de l'évolution hydrogéochimique des eaux après Diama.

Le tableau XXV et la figure 56 indiquent l'évolution des concentrations moyennes des divers éléments dans les eaux du Guiers aux deux séries d'échantillonnage. La projection effectuée pour la période 1992-1995 est basée sur la hauteur et le volume d'eau moyen pour cette période et sur les équations établies par corrélation entre le volume d'eau du lac et la concentration moyenne pour chaque élément (NIANG, 1992 ; COGELS *et al.*, 1993). Elle donne une idée de la qualité moyenne actuelle des eaux du lac.

TABLEAU XXV
Concentrations moyennes des éléments majeurs (mg.l⁻¹) dans les eaux
du lac de Guiers à différentes périodes

Période	H. m IGN	V. M m ³	Cl	SO ₄	Alcalinité	Ca	Mg	Na	K	Salinité
1979-1982	0.38	252	77.5	11.0	124.2	20.8	14.5	51.5	7.4	307.0
1989-1992	0.94	376	54.7	19.2	98.4	15.6	12.1	38.5	6.4	245.0
Projection 1992-1995	1.45	508	31.4	11.2	71.2	10.2	7.9	22.1	4.8	211.5

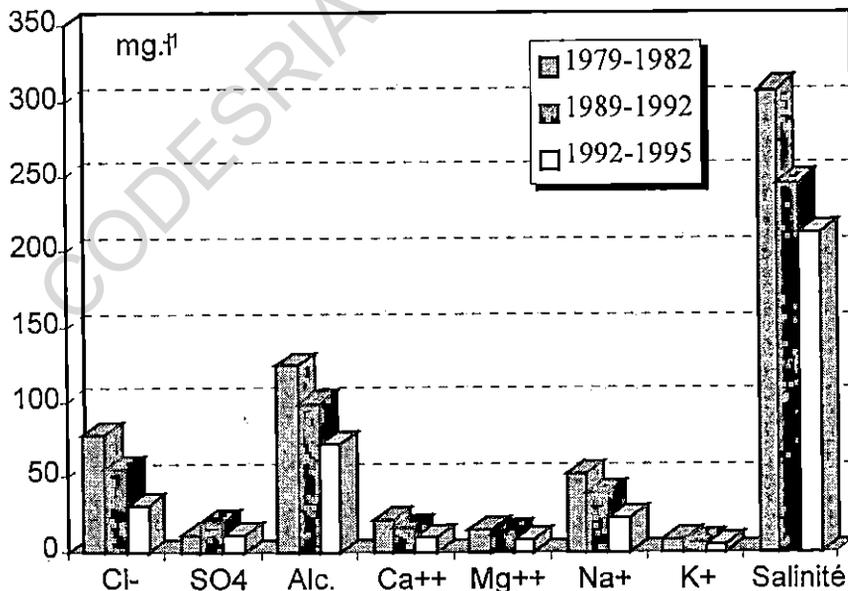


FIGURE 56. — Evolution des concentrations en éléments majeurs dans les eaux du lac de Guiers à différentes périodes (Source : données EQUÉSEN)

1.3.1. Les chlorures (Cl⁻) et le sodium (Na⁺)

Les chlorures et le sodium sont des paramètres conservatifs dont l'évolution est uniquement fonction des cycles de dilution et de minéralisation des eaux naturelles. Ceci leur confère un rôle particulier dans la compréhension du comportement qualitatif du Guiers.

L'origine du sodium dans les eaux naturelles est diverse ; il peut provenir de formations géologiques contenant du chlorure de sodium, de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, de sédiments marins, d'eaux salées contenues dans les aquifères ou d'un usage industriel à proximité des réservoirs naturels.

D'une manière générale la concentration en chlorures et en sodium diminue lorsque le volume du lac augmente et vice versa (figure 57). Le taux de chlorures moyen du lac de Guiers est passé de 77.5 à 51 mg.l⁻¹ entre 1979-82 et 1989-1992. Pour la période 1992 à 1995, nous estimons ce taux à 31.4 mg.l⁻¹ soit une baisse de plus de 15 %. Pour le sodium, de 51.5 mg.l⁻¹ durant la période 1979-1982, la concentration moyenne de cet élément dans le lac est passée à 38.5 mg.l⁻¹ entre 1989-1992 ; la projection effectuée pour la période 1992-1995 nous donne une valeur de 22.1 mg.l⁻¹.

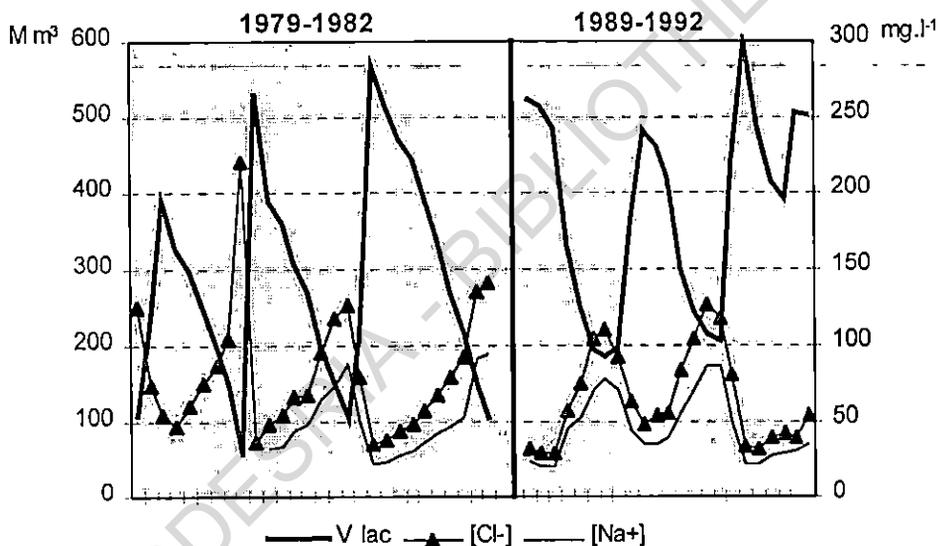


FIGURE 57.— Evolution comparée du volume et des taux de chlorures et de sodium des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

Les lâchers d'eaux de la zone sud du lac vers la vallée du Ferlo, intervenus annuellement depuis 1988, compliquent évidemment la compréhension de l'évolution de ces deux paramètres. Ils ont été entrepris dans un premier temps à la demande de la SONEES confrontée alors à une trop mauvaise qualité de l'eau au niveau de sa station d'exhaure. Cette opération a en quelque sorte servi de test au projet canal du Cayor et plus tard les Vallées Fossiles. C'est aujourd'hui un des éléments clé du bilan hydrologique du lac. Cependant, le caractère conservatif des chlorures, de même que celui du sodium.

1.3.2. Autres éléments

Tous les autres éléments majeurs mesurés dans le lac de Guiers interviennent dans les processus de régulation biogéochimique. En d'autres termes, indépendamment du cycle de dilution - minéralisation, l'évolution de ces éléments est également liée à leur intervention dans les cycles géochimiques à l'interface eau-sédiment et au niveau de la biologie aquatique.

C'est ainsi par exemple que ces éléments interviennent dans la sulfato-réduction dans les sédiments du Guiers, les néoformations argileuses, les précipitations de la calcite et les incorporations dans les coquilles de mollusques et la végétation (COGELS *et al.*, 1985 ; COGELS et GAC, 1987).

La relation entre ces éléments et le volume du lac est donc moins étroite que dans le cas des chlorures et du sodium. Leur évolution dans le lac connaît un gradient nord - sud moins élevé que ce qu'on observe pour le sodium et le chlorures.

1.3.2.1. Les sulfates (SO_4)

Pour la période 1989-1992, la concentration moyenne des eaux du Guiers en sulfates est de 17 mg.l^{-1} , soit une augmentation d'environ 8 mg.l^{-1} par rapport à la période 1979-1982. ; aujourd'hui, nous estimons cette concentration à environ 11.2 mg.l^{-1} (figure 58).

Pour l'heure, la teneur en sulfates dans les eaux du lac de Guiers n'est pas inquiétante, car on se situe encore très loin des normes de l'OMS qui préconisent une limite de 250 mg.l^{-1} tandis que les normes américaines ne tolèrent pas plus de 200 mg.l^{-1} .

Les sulfates joueraient un rôle important dans le métabolisme de certaines plantes aquatiques et seraient susceptibles d'entraîner des troubles gastro-intestinaux (en particulier chez l'enfant) notamment en présence de magnésium, en cas de concentrations élevées.

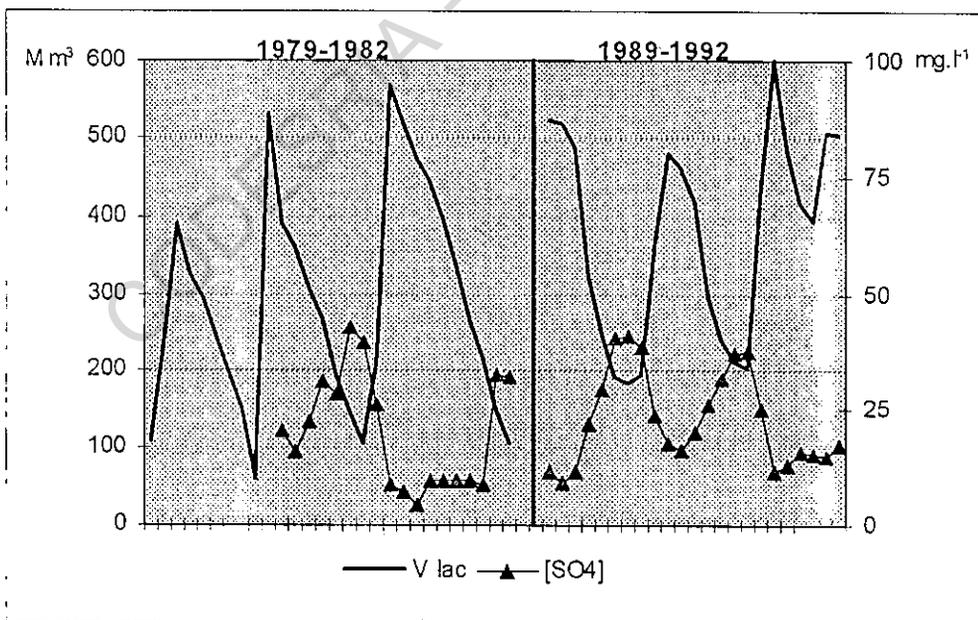


FIGURE 58. — Evolution du volume et du taux de sulfates des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

1.3.2.2. Alcalinité (HCO_3 et CO_3)

L'alcalinité représente la somme des concentrations en carbonates (CO_3) et bicarbonates (HCO_3) dans une eau. Le pH exerce une grande influence sur la teneur en CO_3 et en HCO_3 ; compte tenu de la faible corrélation entre ce paramètre et la hauteur d'eau du lac, il serait aléatoire d'estimer la concentration de ces deux éléments sur la base d'une cote donnée.

D'une manière générale, l'alcalinité a tendance à baisser depuis le barrage de Diama (figure 59); la concentration moyenne pour le lac est passée de 124.2 mg.l^{-1} entre 1979-82 à 94 mg.l^{-1} en 1989-92; aujourd'hui, elle tournerait autour de 71 mg.l^{-1} d'après nos propres estimations.

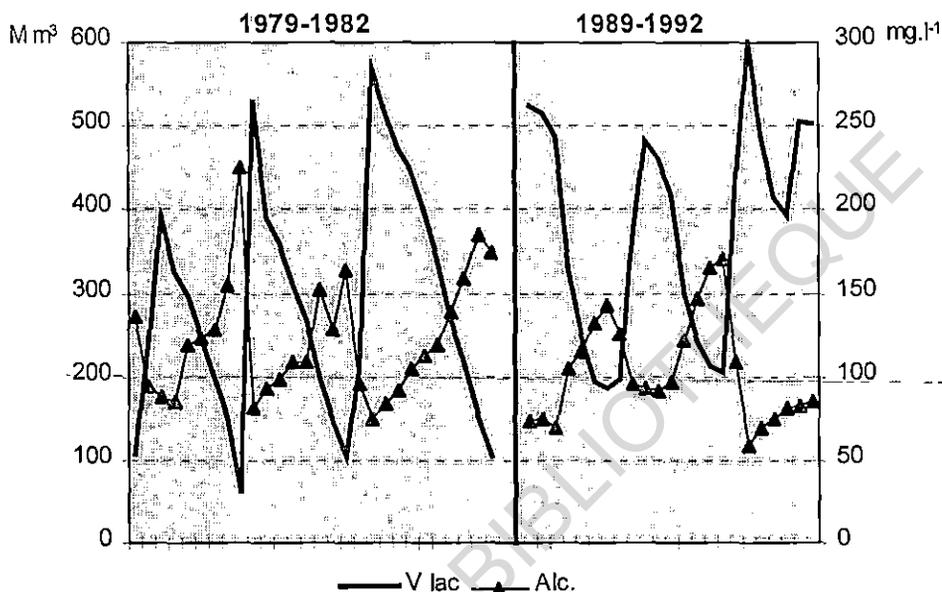


FIGURE 59. — Evolution du volume et de l'alcalinité des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

1.3.2.3. Calcium (Ca)

La concentration en calcium à l'instant T dans les eaux du lac de Guiers est fonction des conditions chimiques qui y prévalent au même moment. Son intervention dans les cycles de régulation géochimiques et biologiques rend difficile la connaissance précise de son évolution dans la réserve lacustre. Le calcium intervient également dans les formations néo-argileuses et contribue à l'élaboration des coquilles de mollusques⁴.

Entre les deux campagnes d'échantillonnage, la teneur en calcium a fortement baissé, passant de 20.8 mg.l^{-1} à 15.6 mg.l^{-1} (figure 60). Cette baisse est à relier avec les changements intervenus au niveau biologique mais surtout hydrologique.

Le calcium est généralement l'élément dominant dans les eaux potables; les besoins journaliers de l'homme sont évalués entre 0.7 et 1.0 g.l^{-1} .

⁴ Ces coquilles sont rapidement dissolues dans les eaux du fait de leur forte teneur en CO_2 , surtout en région nord et centre.

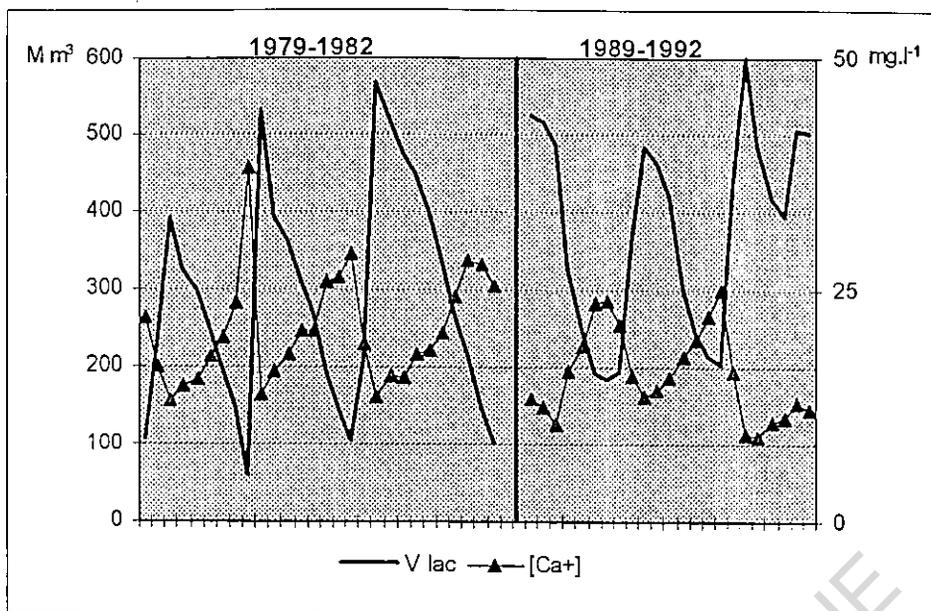


FIGURE 60. — Evolution du volume et du taux de calcium des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

1.3.2.4. Magnésium (Mg)

Le magnésium intervient très peu dans les cycles géochimiques et biologiques lacustres ; son intervention se limiterait en région Centre et sud à quelques formations néo-argileuses comme celles de la chlorite à partir de la kaolinite (COGELS et GAC, 1985). En fait, le magnésium connaît ici la même évolution que la plupart des éléments mesurés dans le lac : à savoir une baisse assez sensible dès la mise en service du barrage de Diama.

La teneur moyenne en magnésium dans les eaux du Guiers est ainsi passée de 14.5 mg.l⁻¹ à 11.5 mg.l⁻¹ entre 1979-82 et 1989-92 (figure 61). Pour la période 1992-95, nous estimons sa concentration à environ 8 mg.l⁻¹.

Le magnésium est indispensable à la croissance des êtres humains. Son intervention comme élément plastique dans l'os et comme élément dynamique dans les systèmes enzymatiques et hormonaux a été mise en évidence. Les besoins journaliers de l'homme en magnésium sont compris entre 200 et 300 mg couverts en grande partie par son alimentation.

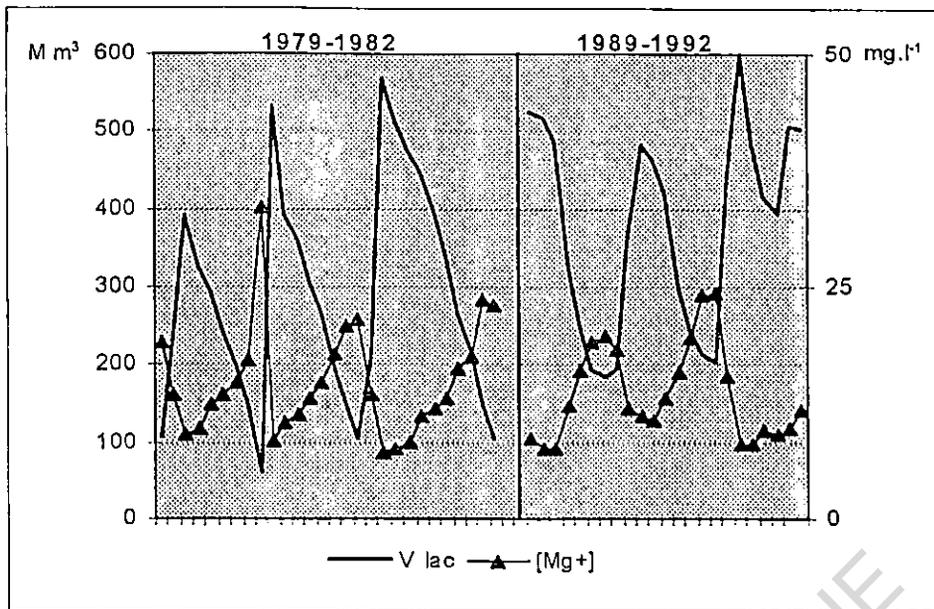


FIGURE 61. — Évolution du volume et du taux de magnésium des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

1.3.2.5. Potassium (K)

La présence de potassium dans les eaux naturelles est à peu près constante ; généralement, on trouve des teneurs, comprises entre 10 et 15 mg.l⁻¹, qui n'ont aucune incidence sur la santé des populations.

Dans les eaux du lac de Guiers, la concentration moyenne en potassium connaît une baisse assez légère si l'on considère l'évolution des autres paramètres. Lors de la première campagne de mesure, la teneur enregistrée était de 7.4 mg.l⁻¹ qui passe à 6.4 pendant la seconde campagne (figure 62) ; l'estimation pour 1992-95 donne une concentration moyenne au lac de 4.8 mg.l⁻¹.

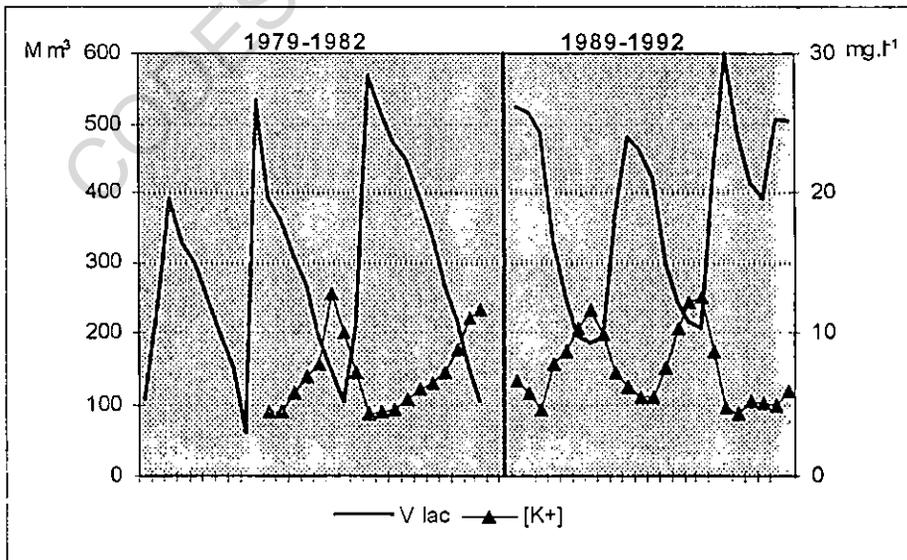


FIGURE 62. — Évolution du volume et du taux de potassium des eaux du lac de Guiers aux deux campagnes d'échantillonnage

1.3.3. Synthèse de la qualité physico-chimique des eaux : impact du barrage de Diama

L'objectif des deux campagnes d'analyse était d'abord de dresser le bilan global de la minéralisation des eaux pour ensuite la modéliser. Des informations telles que la hauteur des eaux, la surface du lac, les phases hydrologiques (remplissage ou non) sont par conséquent prises en compte.

Ces deux séries de données, à dix années d'intervalle, permettent notamment d'avoir une base de comparaison de la qualité des eaux avant et après la mise en fonction du barrage de Diama ; d'autant plus que ces deux séries d'échantillonnage ont été réalisées dans des conditions similaires.

L'étude comparative est ici envisagée du point de vue de la répartition régionale des différents paramètres mesurés qui nous paraît plus appropriée pour montrer les changements intervenus depuis la mise en fonction du barrage anti sel de Diama. Elle est établie sur la base de la hauteur d'eau réelle à chacune des campagnes d'échantillonnage de sorte que l'on puisse se replacer dans le contexte de l'époque et ainsi mieux comprendre les impacts sur l'environnement.

1.3.3.1. Avant la construction du barrage de Diama

-- Avant la construction du barrage de Diama, période de référence 1979-1982, on distingue deux phases dans l'évolution chimique du milieu lacustre :

- minéralisation sous l'effet de l'évaporation en phase d'isolement du lac ;
- dilution par les apports fluviaux en phase de remplissage du lac.

Cette évolution est répétée chaque année, de façon plus ou moins marquée selon le niveau du lac en fin de phase d'isolement et de remplissage. La minéralisation des eaux du lac de Guiers se caractérise aussi par un important gradient nord - sud (tabl. XXVI et figure 63) qui s'explique par la répartition régionale des masses d'eau dans le lac. En effet, la région nord, qui contient 85 % des eaux du lac présente le taux de salinité le plus bas (202 mg.l^{-1}) du fait de la dilution très importante tandis que la région sud, avec seulement 15 % des eaux, présente une très forte concentration (921 mg.l^{-1}), surtout en phase d'isolement des eaux⁵. La région centrale, soumise aux pompages de la SDE bénéficie cependant de la proximité avec la région nord, d'où une salinité de 257 mg.l^{-1} .

⁵ A la cote -1.50 m IGN, des seuils apparaissent dans cette région sud, individualisant plusieurs bassins où les eaux sont soumis à une très forte évaporation.

TABLEAU XXVI

Répartition régionale des éléments chimiques (en mg.l^{-1}) mesurés lors des deux campagnes d'échantillonnage (Source : EQUÉSEN, 1993)

Élément	1979-1982			1989-1992		
	H lac : 0,38 m IGN ; V. Lac : 252 M m ³			H lac : 0,94 m IGN ; V. lac : 376 M m ³		
	nord	Centre	sud	nord	Centre	sud
Cl	48,0	60,6	247,9	38,7	48,1	118,8
SO ₄	11,0	6,6	72,1	17,6	16,5	30,7
Alc.	86,5	116	317,9	75,6	93,1	184,3
Ca	17,5	19,1	41,3	13,7	14,5	23,3
Mg	5,9	12,0	45,1	9,1	11,0	24,7
Na	30,8	36,7	172,5	26,9	33,3	84,9
K	2,7	6,1	24,2	5,3	6,4	12,9
Salinité	202,0	257,0	921,0	186,9	222,9	479,5

En régions nord et Centre, on note peu de différences de concentration en minéraux dissous ; en région sud par contre, la grande hétérogénéité de la qualité des eaux se traduit par un coefficient de corrélation avec le niveau du plan d'eau moins élevé qu'aux deux autres régions. A la cote de référence 1,00 m IGN, on note les salinités régionales suivantes pour la période-1989-1992 :

- région nord : 36,2 mg.l^{-1} ;
- région centrale : 45,4 mg.l^{-1} ;
- région sud : 125,6 mg.l^{-1} soit 3,5 fois la concentration en région nord.

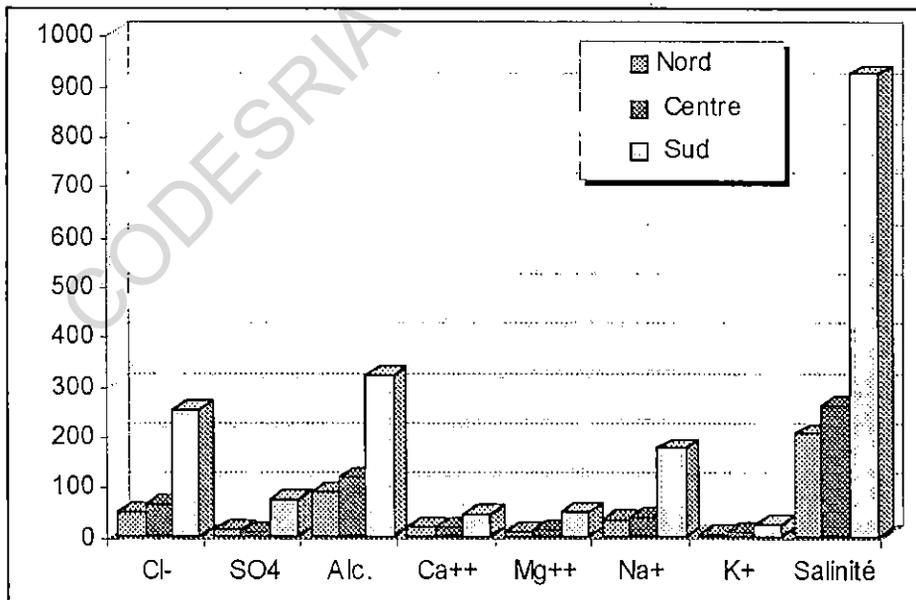


FIGURE 63. — Distribution régionale des différents paramètres chimiques en 1979-82.

1.3.3.2. Après la construction du barrage de Diama

Dès la mise en service du barrage de Diama, il a été constaté une évolution positive des hauteurs et volumes d'eau du lac de Guiers. La première conséquence au niveau physico-chimique a été une baisse des taux de minéralisation globale des eaux ; en effet, la salinité est passée de 921 à 480 mg.l^{-1} en région sud (tableau XXVII et figure 64), soit une baisse de moitié. De ce point de vue, on peut dire que les retombées du barrage de Diama sur la qualité des eaux du lac de Guiers sont positives (figure 65). Les lâchers d'eau vers la basse vallée du Ferlo ont aussi dans une large mesure contribué au dessalement des eaux du lac de Guiers.

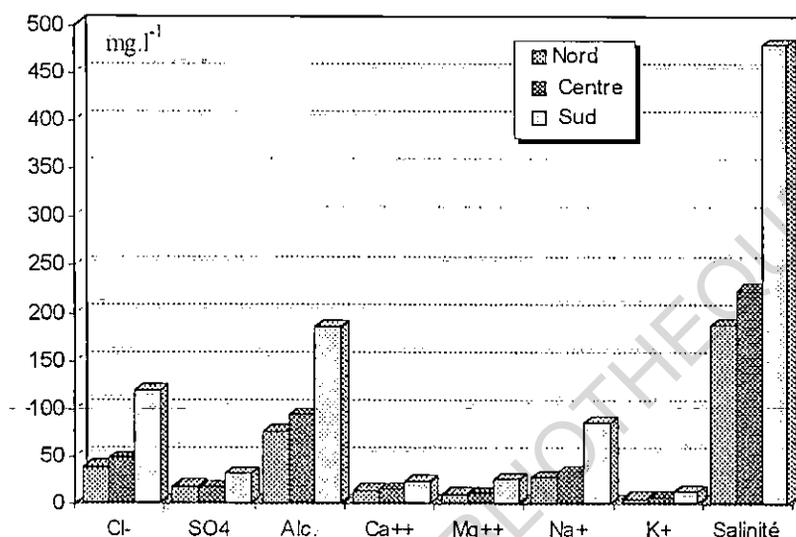


FIGURE 64. — *Distribution régionale des différents paramètres chimiques en 1989-92*

Entre la première et la dernière campagne, presque tous les éléments majeurs mesurés connaissent une baisse avec cependant deux cas particuliers au nord et au centre du lac :

- en région nord, on note une augmentation des sulfates, du magnésium et du potassium ;
- en région centrale, ce sont les sulfates et le potassium qui augmentent.

La baisse de la minéralisation cache une augmentation sensible du stock de minéraux dissous. L'augmentation des volumes d'entrée et de sortie d'eau stabilise le stock de substances dissoutes, malgré les baisses de concentration en éléments. Si l'on considère une même hauteur d'eau de 1,00 m IGN, on remarque que la salinité des eaux du Guiers a en fait très peu varié (tableau VI) entre les deux séries ; on constate d'ailleurs une augmentation des concentrations en région nord et Centre, respectivement 25 et 19 % et par contre une diminution de 20 à 25 % en région sud. Cette évolution s'explique d'une part par l'importance et la charge en matières dissoutes des rejets CSS au nord et l'impact des lâchers d'eau vers le Ferlo en région sud.

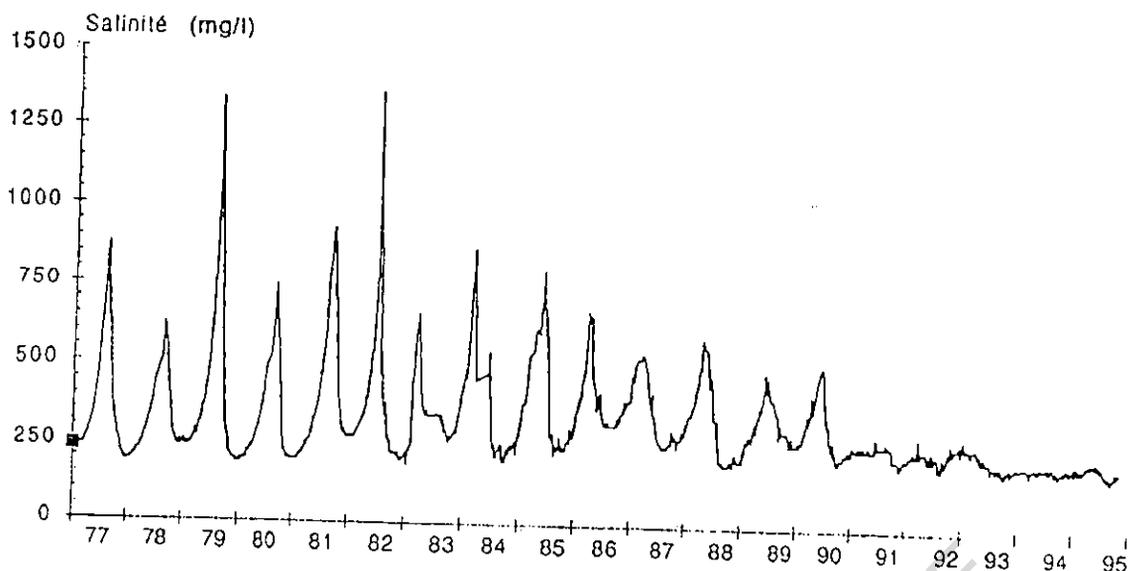


FIGURE 65. — Évolution de la salinité moyenne du lac de Guiers de 1977 à 1995

TABLEAU XXVII

Salinité moyenne (en mg.l^{-1}) du lac et de ses régions aux deux séries d'échantillonnage et pour une même hauteur d'eau de 1.00 m IGN (Source : COGELS et al., 1994)

Élément	1979-1982				1989-1992			
	Lac	nord	Centre	sud	Lac	nord	Centre	sud
Salinité	229.1	141.1	180	678.0	231.8	176.4	214.1	509.8

La comparaison entre les stocks de minéraux dissous avant et après la mise en service du barrage de Diama attestent de ce phénomène (tabl. XXVIII). Le stock de sels dissous du Guiers a en effet augmenté de 50% entre 1990 et 1994 (COGELS, 1995) ; durant la même période, la salinité moyenne est passée de 325 mg.l^{-1} à 230 mg.l^{-1} , soit une baisse de 30%. Cette baisse est due uniquement à l'effet de dilution des eaux lacustres par celles du fleuve Sénégal.

En région sud, ce stock aurait tendance à baisser, du fait de la réouverture de la digue de Keur Momar Sarr, qui a permis d'évacuer une bonne partie du sel présent à l'état résiduel dans cette partie de la réserve lacustre. La poursuite des rejets de la CSS qui, en moyenne apportent 20 à 25 tonnes de matières dissoutes par jour dans le lac, ne contribue évidemment pas à baisser ce stock. Le danger vient du fait que ces rejets sont essentiellement composés de chlorures et de sodium, qui n'entrent pas dans les cycles de régulation hydrogéochimique et que la CSS, ne pompant plus ses eaux d'irrigation dans le lac ne contribue plus à le soulager de son excès de sels dissous. La part de sels dissous en provenance de la CSS représente plus qu'il n'est nécessaire pour assurer cette régulation. La part restante, après pompage de la SDE, est stockée dans les eaux du lac.

Le branchement de la CSS sur le réseau de drainage de l'Émissaire Delta permettrait de réduire sensiblement ce stock de substances dissoutes.

TABLEAU XXVIII
Évolution du stock de sels dissous dans les eaux du lac de Guiers avant et
après la mise en fonction du barrage de Diama (en tonnes)

Période	Cl	SO ₄	Alc.	Ca	Mg	Na	K	Salinité
1979-1982	19530.0	2772.0	31298.4	5241.6	3654.0	12978.0	1864.8	77364.0
1989-1992	20567.2	7219.2	36998.4	5865.6	4549.6	14476.0	2406.4	92120.0
1992-1995	15951.2	5689.6	36169.6	5181.6	4013.2	11226.8	2438.4	107442.0

(Source : données EQUÉSEN)

2. QUALITE BIOLOGIQUE DES EAUX

L'accroissement des potentialités hydrauliques du fleuve Sénégal, la relative stabilité limnimétrique du plan d'eau et l'amélioration des conditions qualitatives ont entraîné d'importantes modifications hydrobiologiques.

A partir de 1989 et surtout en 1992, on a noté un développement fulgurant de *Typha australis* et de *Pistia stratiotes* qui sont aujourd'hui les marqueurs des nouvelles conditions écologiques du lac. *Pistia stratiotes* a presque disparu aujourd'hui sous l'effet de la lutte biologique.

La faune malacologique du lac, en net recul avant la construction du barrage de Diama, retrouve là les conditions idéales d'un important développement. Cette situation est favorisée également par la multiplication des aménagements hydro-agricoles qui contribuent à l'enrichissement des eaux.

Les impacts du développement de certains phénomènes biologiques au plan économique et sanitaire sont considérables. Ce sont là des signaux classiques apparus dans presque tous les systèmes hydrauliques artificialisés.

2.1. La végétation aquatique

Depuis quelques années, d'importants problèmes qualitatifs se posent à la gestion des eaux du lac. La baisse du taux de salinité, la stabilité et l'élévation du plan d'eau, ont entraîné l'apparition ou la réapparition de plantes aquatiques qui, en certaines zones atteignent des proportions inquiétantes.

A ce nouveau contexte hydrobiologique, s'ajoute la multiplication des exploitations hydro-agricoles dont les effets sur l'évolution du plan d'eau ne sont pas encore clairement définis. Aucune étude détaillée n'a encore été entreprise sur l'impact des fertilisants agricoles utilisés dans l'agriculture irriguée. Si tous les projets en cours se réalisent, le lac de Guiers sera l'un des pôles de développement les plus importants, sinon le plus important, du Sénégal.

Depuis les premières observations de LEUDELLOT et LELIEVRE en 1828, celles de PERROTET en 1833, LEMMET et SCORDEL et HENRY en 1918, GROSMARE en 1957, ADAM en 1964 et de REIZER en 1974, la végétation aquatique de la région du lac de Guiers a subi une très longue évolution liée, sans aucun doute, aux conditions hydrologiques et physico-chimiques du fleuve Sénégal. Les dernières observations effectuées par THIAM en 1984, 1993 et 1994 confirment cette tendance.

Cette évolution est marquée surtout par une succession de cycles de prolifération et de recul si l'on en croit les textes de GROSMAIRE (1957), ADAM (1964) et THIAM (1984), par ailleurs très peu abondante. Le nouveau cycle observé pour cette flore aquatique, depuis l'entrée en fonction du barrage de Diama, accéléré depuis 1990, ne peut donc être considéré comme un fait nouveau.

La présence d'eau douce en permanence a favorisé l'émergence d'une multitude de périmètres irrigués villageois qui sont venus s'ajouter à l'exploitation de canne à sucre de la CSS et participent ainsi à l'enrichissement des eaux à une échelle non encore définie, faute de données fiables.

2.1.1. Inventaire et description de la végétation aquatique du lac de Guiers

La végétation aquatique du lac de Guiers est composée essentiellement d'angiospermes ; on y note parfois la présence d'algues bleues. Ces plantes sont une des composantes essentielles de l'écosystème du lac de Guiers. Dans les paragraphes suivants sont décrites les principales espèces rencontrées, leurs caractéristiques et leurs impacts respectifs sur l'écosystème.

Au plan systématique, les plantes aquatiques ne forment pas un ensemble homogène ; elles se répartissent en deux grands groupes : les fougères et les plantes à fleurs, qui constituent le groupe dominant au lac de Guiers. Ces différents groupements aquatiques ou semi-aquatiques semblent indifférents à la qualité des sols en place, hormis quelques rares cas. Seuls les facteurs hydrologiques et physico-chimiques semblent être déterminants dans la répartition des espèces.

COGELS (1984) a identifié les espèces suivantes qu'il considérait comme majeures et caractéristiques des eaux du lac de Guiers à cette époque. Il s'agissait de *Nymphaea lotus*, *Ludwigia ascendens* subsp. diffusa, *Æchynomene elaphroxylon*, *Nymphoides ezannoi* Berth., *Pistia stratiotes*, *Typha australis* (Schum et Thonn), *Echinochloa stagnina* (Retz) Pal. Beauv., *Paspalidium geminatum* (Forsk) Stapf., *Phragmites australis*, *Vetivera nigrifolia* (Benth.) Stapf., *Vossia cuspidata* (Roxb) Griff., *Tamarix senegalensis* et *Parkinsonia aculeata*⁶ L.

Avec les nouvelles conditions écologiques qui prévalent depuis 1985, certaines de ces espèces ont disparu, d'autres ont vu leur nombre amoindri et enfin, de nouvelles espèces sont venues occuper le lac en association avec celles déjà en place.

2.1.1.1. Les espèces majeures

Les études réalisées par COGELS et al. (1993) et THIAM et al. (1994) nous permettent de déterminer la composition spécifique majeure de la flore aquatique du lac de Guiers. Les principales espèces sont : *Typha australis*, *Pistia stratiotes*, *Potamogeton* sp. et *Ceratophyllum demersum*.

⁶ C'est une espèce introduite au Sénégal ; elle peuplait généralement les îlots du sud du lac en association avec *Tamarix senegalensis*.

Typha australis de la famille des typhacées se développe sur des sols légers, exondés une partie de l'année ; elle forme des radeaux flottants librement à la surface de l'eau.

La typhaie est soit en contact avec l'eau libre, soit derrière le Bourgou⁷, mélangé ou non avec la zone à *Brachiara mutica*. Elle précède toujours les zones à *Sporobulus robustus* ou *Vetivera nigrifolia*.

Pistia stratiotes ou laitue d'eau est une plante de petite taille à croissance relativement rapide : des temps de doublement de surface de onze jours ont été observés dans le lac de Cabora Bassa (bassin du Zambèze). Sa présence est attestée dans de nombreux autres lacs africains dont le lac Kariba (bassin du Zambèze), le lac Volta (sur la Volta blanche au Ghana), le lac Kossou (sur le Bandama en Côte d'Ivoire centrale... (DEJOUX, 1988). *Pistia stratiotes* se développe dans des eaux calmes, permanentes ou non et de profondeur variable. Sa prolifération entrave la mise en œuvre des engins de pêche et colmate les canaux d'irrigation, les voies d'eau en général. Elle occulte également toute activité chlorophyllienne sous son tapis. En fait, c'est l'une des espèces caractéristiques des milieux eutrophes.

Deux espèces de Potamogetonaceae sont présents dans le lac de Guiers : *Potamogeton schweinfurthii* et *Potamogeton octandrus* ; leur aire de répartition est géographiquement limitée à l'Afrique tropicale. En Afrique centrale et australe, *Potamogeton* constitue souvent une entrave à la navigation et représente une étape vers la disparition de certains cours d'eau (DEJOUX, 1988).

Potamogeton schweinfurthii présente des tiges feuillues submergées, elle se développe dans des eaux calmes et profondes. Leur apparition dans le lac de Guiers date de 1991, lorsqu'il ont commencé à coloniser les canaux d'irrigation de la CSS ; on les retrouve également dans le fleuve Sénégal entre Dagana et la réserve du Djoudj.

Ceratophyllum demersum est une herbe cassante, flottant librement au dessus de l'eau. Son milieu de prédilection se situe à la limite extrême des eaux libres, calmes, profondes et permanentes ; c'est une espèce caractéristique des milieux eutrophes. Elle se développe souvent en association avec *Pistia stratiotes* et connaît des variations interannuelles de développement.

Cette plante peut représenter une entrave à la pêche lacustre mais rarement à la navigation. C'est en outre un habitat privilégié pour de nombreux mollusques pulmonés, vecteurs de schistosomiasis. *Ceratophyllum* peut être aussi une source de pollution des eaux : il dégage une odeur dès que sa concentration en géosmine, son métabolite naturel, atteint 5 nanogrammes par litre. A Richard-Toll, cette teneur avait atteint la proportion de 47 nanogrammes par litre en avril 1994 (DIENG, 1994). Selon DEJOUX (1988), citant KLUMP et CHU (1980), il existerait une relation directe entre la densité de *Ceratophyllum demersum* du lac Volta au Ghana et la prévalence ainsi que la densité d'infection par *Schistosoma haematobium* des populations riveraines, parasite transmis au Ghana par *Bulinus rohlfsi*.

⁷ Le Bourgou est une sorte de « prairie aquatique » flottant librement et composée principalement de *Echinochloa stagnina* et de *Vosicia cuspidata*

2.1.1.2. Les autres espèces

Nymphaea lotus est une herbe à souche charnue enracinée et à fleurs spectaculaires ; elle se développe de préférence dans des eaux calmes, de profondeur moyenne, parfois supérieure à 2 m, ensoleillées connaissant éventuellement de brefs assèchements. C'est une espèce caractéristique des mares boueuses, eutrophes et des eaux acides. Elle peut localement représenter une nuisance ; elle est parfois une entrave à la navigation et elle réduit la pénétration de la lumière par l'étalement en surface de ses larges feuilles. L'intérêt piscicole de cette espèce n'est pas négligeable : elle sert de lieu de reproduction à certaines espèces de poissons.

Aechynomene elaphroxylon est un arbuste à tiges gonflées, évoluant dans des zones inondées une grande partie de l'année ; en général, des eaux profondes, boueuses, encombrées d'herbes. Son bois est utilisé pour la fabrication de flotteurs de filets de pêche.

Un important groupement d'*Aechynomene elaphroxylon* se retrouve à l'entrée de la Taoué dans le lac où elle constitue encore l'espèce caractéristique, avec *Sphenochlea zeylanica*. Elle évolue en radeaux flottants, ce qui en facilite la dissémination vers le sud du lac, dans le sens de l'écoulement des eaux, où toutes les conditions sont désormais réunies pour son expansion.

Nymphoides ezanmoi est une herbe à longues tiges flottantes et feuilles semblables à celles de *Nymphaea lotus*, flottant en eaux libres connaissant un assèchement temporaire et dans des profondeurs moyennes de plus de 1,50 m. C'est aussi une espèce caractéristique des mares eutrophes. Aujourd'hui, cette espèce a presque entièrement disparu des eaux du Guiers, supplantée par *Sphenochlea zeylanica*. Cette disparition pourrait s'expliquer par la présence et la qualité des rejets de la CSS, susceptibles d'avoir contenu des résidus de pesticides par intermittence (COGELS *et al.*, 1993).

Echinochloa stagnina est une grande herbe à souche plus ou moins rampante évoluant souvent en radeaux flottants. Sa présence dans les rizières et les canaux d'irrigation constitue une gêne. C'est l'espèce type du « Bourgou ». C'est en outre un excellent pâturage et un très bon producteur de foin. En 1974, la Bourgouttière couvrait environ 1 000 ha aux alentours du lac et plusieurs centaines d'hectares au confluent de la Taoué (REIZER, 1974).

Le Bourgou constitue un groupement très riche d'un point de vue halieutique en constituant un lieu de reproduction de certaines espèces de poisson et d'alimentation à d'autres.

Les phragmites sont des herbes à tiges dures, creuses, dressées jusqu'à 4 m en bordure des eaux calmes, jusqu'à environ 1 m de profondeur. L'espèce peut édifier des radeaux flottants. Ce sont des végétaux semi-aquatiques fixes à faible profondeur, peuplement caractéristique des lacs plats. Sa prolifération entraîne la réduction des plans d'eau. Elle est utilisée dans la fabrication de nattes et de clôtures.

Vetivera nigriflora se présente en fortes touffes à tiges dressées, atteignant jusqu'à 3 m de hauteur dans les zones inondables. L'espèce présente une très grande utilité artisanale ; les feuilles servent à la fabrication de nattes, toits et vanneries et les racines qui entrent dans la préparation de l'encens sont prisées pour leur parfum.

Les Cyanophycées ou Cyanophytes (ou algues bleues ou encore Schizophytes ou Mixophytes) sont des algues procaryotes, en général très abondantes dans les eaux douces africaines. La population algale du lac de Guiers est très pauvre ; elle se caractérise par l'apparition épisodique de deux espèces de fleurs d'eau caractéristiques des milieux eutrophes :

Microcystis aeruginosa et *Anabaena spiroides*. Ces algues bleues, identifiées par DIA et REYNAUD en 1980 et par COMPÈRE en 1984, quoique d'apparition épisodique, gênent quelque peu la production d'eau potable à la SDE par l'accroissement des coûts de traitement des eaux. Leur évolution est à surveiller de très près.

2.1.2. Dynamique de la végétation aquatique

Procéder à une étude comparative sur la dynamique de la végétation aquatique avant et après la mise en fonction du barrage de Diama n'est pas chose aisée ; peu d'études détaillées ont en effet été réalisées sur les macrophytes aquatiques du Guiers (Cf. 2.1 La végétation aquatique). Cependant, quelques transects ont été réalisés par ADAM (1964) puis par THIAM (1983, 1993) ; leur comparaison permet d'analyser les modifications quantitatives et qualitatives survenues dans leur évolution au cours des trente dernières années (THIAM et COGELS, 1995).

D'une manière générale, avant 1985, la végétation aquatique et semi aquatique du lac de Guiers connaissait un cycle moyen annuel qui était le suivant (REIZER, 1974) :

- en fin de saison sèche : disparition des prairies aquatiques et graines en dormance ;
- aux premières pluies : germination ;
- à la crue et inondation : croissance des plantes ;
- à la décrue et exondation : floraison et dissémination des graines.

Jusqu'en 1972, les premières pluies marquaient l'apparition des prairies aquatiques dont la croissance se poursuivait jusqu'à l'exondation partielle ou complète du plan d'eau. En pleine saison sèche, ces plantes disparaissaient, pour l'essentiel à cause du pâturage. Au total, on notait la présence d'une végétation aquatique semi-immersée neuf à dix mois par an. La séquence de végétation la plus fréquente était *Ceratophyllum demersum*, *Pistia stratiotes*, *Nymphaea sp.*, *Echinochloa stagnina*, *Typha australis* et *Chrysopogon sp.* En fait, les fluctuations annuelles du plan d'eau servaient de régulateur à l'évolution de la végétation.

Le relèvement du plan d'eau lacustre, sa stabilité, l'élimination de la décrue et les nouvelles conditions qualitatives issues de la construction du barrage de Diama, ont fait de la présence de la végétation aquatique un état quasi permanent. Ces nouvelles conditions de milieu ont favorisé un développement de la végétation aquatique dès la mise en service de Diama ; la situation atteint son paroxysme à partir de 1991-1992 avec deux faits majeurs : le surdéveloppement de *Pistia stratiotes* et de *Typha australis*. *Ceratophyllum demersum* connaît aussi un développement très rapide dans la partie nord du Guiers, à proximité du canal de la Taoué et dans les canaux d'irrigation de la CSS, où elle prolifère depuis 1990.

À noter également, l'apparition d'une espèce, inconnue auparavant au lac : *Potamogeton schweinfurthii* qui s'est rapidement développée en région nord et Centre.

Aujourd'hui, on retrouve des séquences de végétation aquatique du genre : *Ceratophyllum demersum*, *Æchynomene elaphroxylon*, *Pistia stratiotes*, *Nymphaea sp.*, *Echinochloa stagnina*, *Typha australis* et *Phragmites sp.*

2.1.2.1. Transects dans le lac

THIAM (1993) a repris, dans un but de comparaison, trois transects effectués par ADAM en 1964 sur le lac de Guiers (figure 66).

Le premier transect effectué entre Mbane et l'embouchure de la Taoué, au nord du Guiers (figure 67) montre la séquence suivante : *Potamogeton schweinfurthii*, *Æchynomene elaphroxylon*, *Typha australis*, *Cyperus alopecuroides*, *Pistia stratiotes*, *Ceratophyllum demersum*, *Utricularia sp.*, *Nymphaea lotus*, *Echinochloa stagnina*, et *Vossia cuspidata*. Comparé aux observations de ADAM trente ans plus tôt, on remarque un recul de *Typha australis* qui était alors le groupement dominant et l'apparition de nouvelles espèces, qui laissent supposer un enrichissement des eaux. A noter également la disparition de la plaine à *Vetivera sp.*, sans doute, du fait des endiguements réalisés au nord du lac.

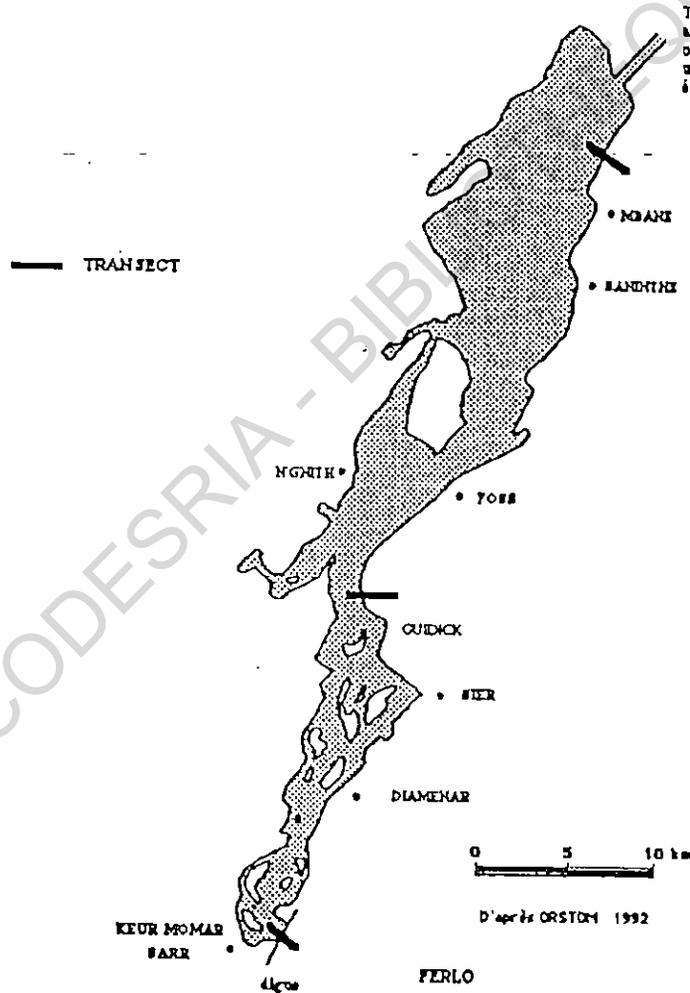
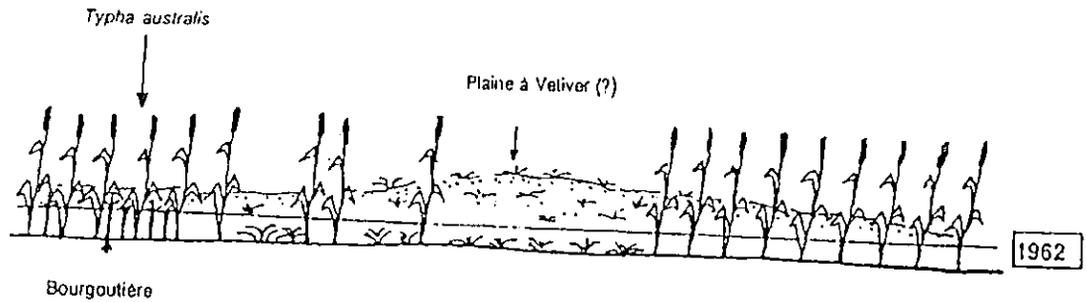
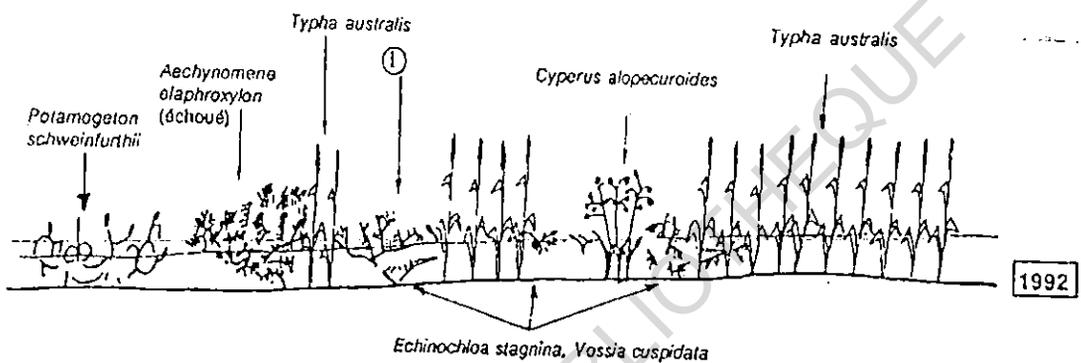


FIGURE 66. - Situation géographique des transects effectués par Thiam (1993)



D'après Adam J.G., 1964



① *Potamogeton schweinfurthii* en association avec
Pistia stratiotes, *Ceratophyllum demersum*, *Utricularia* sp., *Nymphaea lotus*,...

Thiam A, 1993

FIGURE 67. — Transect entre Mbane et l'embouchure de la Taoué dans le lac de Guiers.

Le deuxième transect est localisé au nord du village de Guidick, en région centrale (figure 68). On y observe les espèces suivantes : *Typha australis* en mélange avec *Phragmites australis*, *Ludwigia* sp., *Pistia stratiotes*, dans les eaux permanentes, *Echinochloa stagnina*, *Typha australis*, *Cyperus alopecuroides* dans la zone de décrue et *Balanites aegyptiaca* et *Acacia nilotica* dans la zone non inondable. On remarque l'extension de la bourgouttière à *Echinochloa stagnina* et également l'apparition de nouvelles espèces de végétaux aquatiques comme *Ludwigia* sp., *Cyperus alopecuroides*, tandis que d'autres comme *Ipomaea* sp, *Oryza* sp., *Cynodon dacylon*, *Vetivera* et *Borreria* sp., *Cenchrus biflorus*, *Maytenus* et *Hyparrhenia dissoluta* ont disparu du transect.

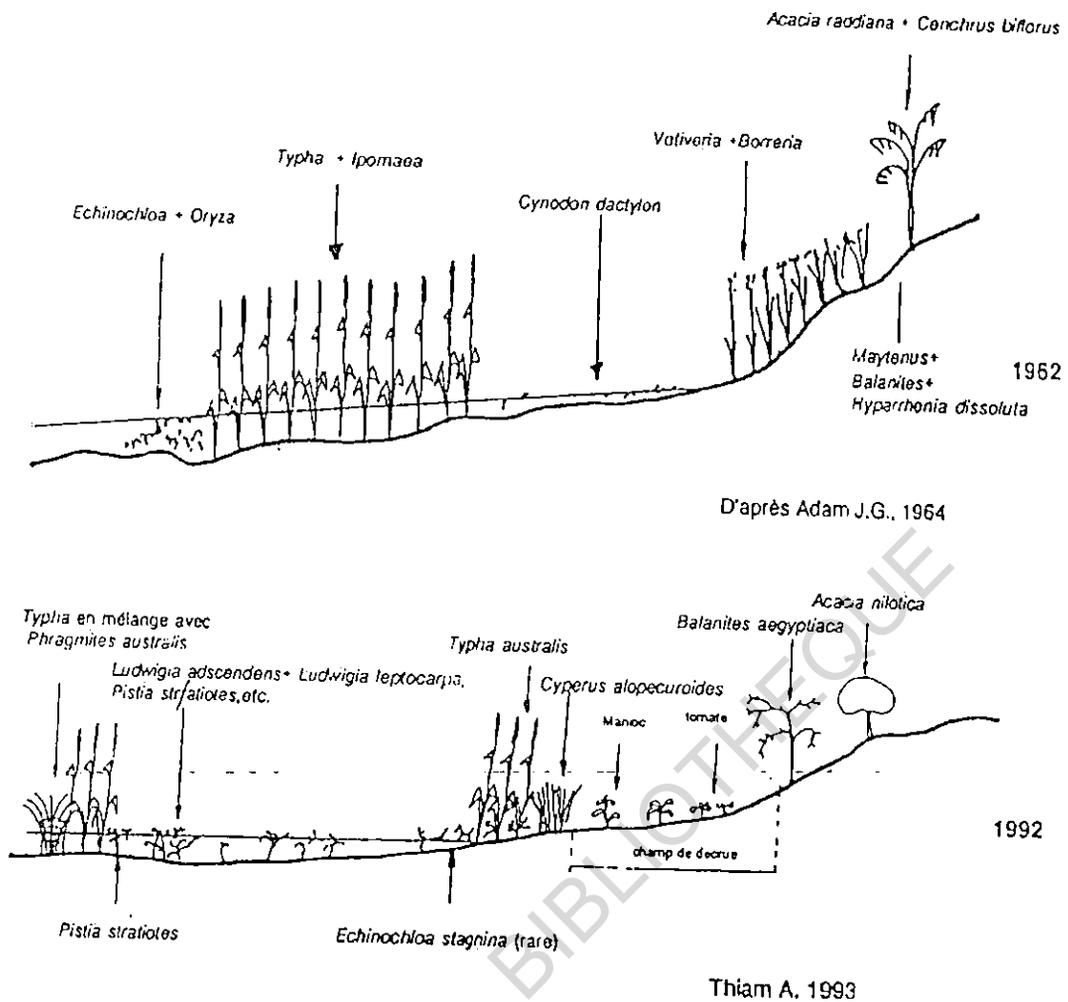


FIGURE 68. — Transect au nord du village de Guidick.

Le troisième transect a été réalisé devant la digue de Keur Momar Sarr (figure 69) ; il montre une prépondérance de *Pistia stratiotes* qui est ici l'espèce dominante ; elle est quelque fois en association avec *Axycaryum cubense* et *Ludwigia ascendens*. *Pistia stratiotes*, du fait de son développement rapide constitue une menace pour la digue du Ferlo dont elle tend à obstruer les vannes. On note également la présence de quelques peuplements de *Typha australis*, en faible densité, et quelques individus de *Tamarix senegalensis*. *Impomoea lilacina* qu'évoquait ADAM n'est plus présent dans le transect.

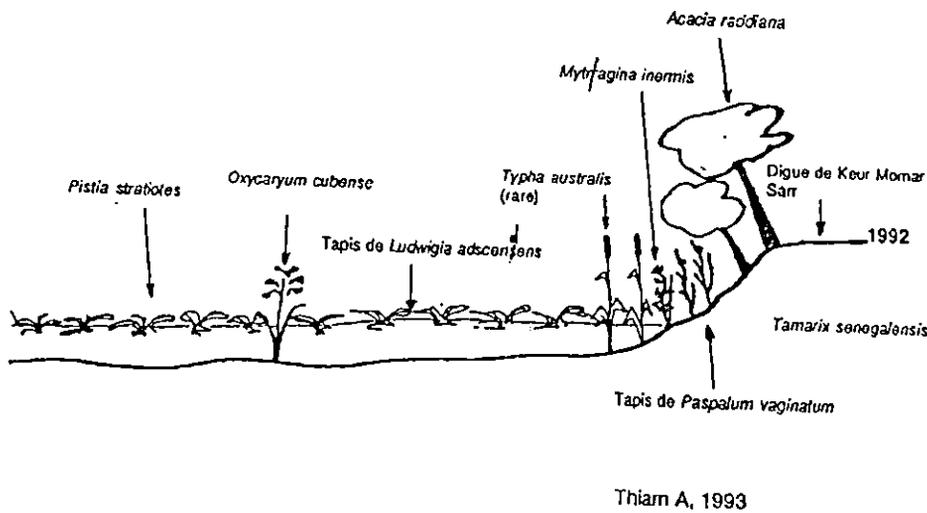


FIGURE 69. — *Transect digue de Keur Momar Sarr.*

Ces trois séquences observées au nord, au centre et au sud du lac peuvent être considérées comme caractéristiques des trois régions hydro-géographiques de la réserve lacustre, aux deux périodes d'observations. On remarque que la composition spécifique du lac de Guiers s'est enrichie entre 1962 et 1992. Il aurait été intéressant de disposer d'observations réalisées entre les deux périodes pour mieux cerner l'impact des nouvelles conditions du milieu sur le développement de la végétation aquatique du lac de Guiers.

Dans tous les cas, on voit clairement, à travers ces deux séries d'observations la place de *Pistia stratiotes* et de *Typha australis* qui nous paraissent être les nouveaux témoins de l'évolution de l'écosystème du Guiers.

2.1.2.2. Le cas de *Pistia Stratiotes* et de *Typha australis*

Pistia stratiotes qui, jusqu'en 1985, est représentée par quelques groupements isolés flottant à la surface des eaux, s'étend sur quelques hectares en 1990, puis a envahi et progressivement obstrué la région sud du lac en 1991 et 1992 sur une centaine d'hectares environ. Cette évolution est favorisée par les vents de direction nord-sud très présents dans cette région.

Au même moment, l'espèce connaissait une évolution similaire dans la réserve du Djoudj. Ce phénomène a déclenché une vive inquiétude au lac de Guiers et dans le Delta principalement, où elle est un frein au développement de l'éco-tourisme notamment dans le parc aux oiseaux du Djoudj. Des actions ont été entreprises pour lutter contre le développement fulgurant de cette espèce. Au lac de Guiers, la Direction de la Protection des Végétaux a entrepris des lâchers de *Neohydronomus affinis*⁸ dans la région sud en septembre 1994 (THIAM et COGELS, 1995) tandis que dans le Djoudj, c'est surtout le ramassage manuel qui a été appliqué même si d'autres méthodes avaient été envisagées (épandages d'herbicides, lutte par le feu, etc.).

⁸ Insecte originaire d'Amérique du sud

La progression fulgurante de l'espèce a été suivie, en début d'année 1993, d'un ralentissement puis d'une colonisation par d'autres espèces typiques du Bourgo. En début 1995, *Pistia stratiotes* a presque entièrement disparu du sud du lac ; elle ne subsiste plus qu'en faibles peuplement disséminés entre les groupements de *Typha australis* et de *Phragmites australis*.

Après avoir connu une forte expansion au sud du lac dans les années quarante et cinquante (TROCHAIN, 1956), *Typha australis*, signalée dans le lac depuis les observations de LEUDELLOT et LELIEVRE en 1828, a connu une période de recul entre 1970 et 1985 (THIAM, 1984). En 1952, la surface des typhaies est estimée à environ 1 000 hectares dans le lac et la basse vallée du Ferlo, thèse confirmée par des pêcheurs de l'époque et les photographies aériennes de 1953 (région sud) et plus tard par les observations de ADAM (1965). Ce dernier estimait la production de matières sèches par les typhaies à environ 4 000 à 5 000 tonnes par an. Les causes de la prolifération de la typhaie ont été attribuées d'une part à la construction du barrage de Richard-Toll, en 1947 qui empêchait la pénétration de la langue salée dans le lac en période d'étiage et d'autre part aux conditions hydrologiques de l'époque. L'espèce évoluait en radeaux flottants entraînés par le vent qui favorisait leur dissémination vers les rives du lac.

La disparition quasi totale de la typhaie dans les années Soixante-dix s'explique par une série d'étiages prononcés avec des périodes d'assèchement total ou partiel du lac entre 1969 et 1973. Une évaluation quantitative des typhaies avait été réalisée par COGELS dans les années 1980, sur la base d'un survol et de photographies aériens à une altitude constante de 200 m. La densité de la typhaie était maximale au sud du lac où elle occupait les hauts-fonds et les rives. La surface occupée par *Typha australis* dans cette région était estimée à 120 ha sur l'eau libre et 40 ha le long des îlots temporaires. En région nord et Centre, la population de typhaies était évaluée à environ 60 ha dont la majorité vers Guidick, Ndiakhaye et aux alentours de Ngnith et de Nieti Yone. La typhaie couvrait donc, selon les estimations de cet auteur environ 220 ha, soit 1 % de la surface du lac de Guiers à la cote 0,50 m IGN.

Dès la construction du barrage de Diama, le retour à des conditions hydrologiques et chimiques semblables à celles des années 1940 et 1950 a marqué un retour progressif de la plante. En 1995, THIAM. estime la couverture de *Typha australis* à environ 3 000 hectares. Aujourd'hui, elle forme de véritables jungles aquatiques, atteignant jusqu'à quatre mètres de hauteur sur les pourtours du lac, surtout dans la région centrale et méridionale.

L'actuel développement de *Typha australis* est favorisé par la stabilité des conditions limnimétriques et l'adoucissement des eaux du lac. En effet, cette plante se développe de préférence dans des eaux d'un niveau stable, permanentes, d'une profondeur d'environ un mètre, conditions qui sont actuellement celles du lac de Guiers.

Si les tendances de l'évolution actuelle se confirmait, la végétation aquatique risquerait de devenir une importante gêne aux activités économiques autour du lac. Dans années à venir, l'utilisation accrue d'engrais, de pesticides et de produits chimiques divers, liée à l'extension récente des cultures irriguées, pourrait davantage favoriser le développement de ces plantes aquatiques.

Ce phénomène observé au lac de Guiers ne lui est cependant pas spécifique. Dans d'autres régions d'Afrique, aménagées avec présence de lacs de retenue, la prolifération des plantes aquatiques dans ces régions est un schéma classique.

- 1) Kariba est un lac de retenue établi sur le cours moyen du Zambèze, réalisé en 1958. Les quatre premières années, on a noté un développement spectaculaire de *Salvinia molesta* qui couvrait 1 000 km² ; colonisation favorisée par une montée régulière des eaux, sans retour à un niveau très bas. Deux ans après la mise en eau, *Ceratophyllum demersum* est apparu puis *Potamogeton schweinfurthii*.
- 2) Le lac de Kabora Bassa est également situé dans le bassin du Zambèze ; différentes plantes nuisibles y ont été recensées dont *Salvinia molesta*, *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes*. Après neuf semaines de fermeture du lac, une bande de végétation continue sur environ 8 km s'était accumulée dans les arbres semi-immergés.
- 3) Le lac Volta est un lac de barrage établi au Ghana, sur la Volta blanche mis en eau en 1964. On y a noté une apparition massive de *Pistia stratiotes* au début du remplissage, sans nuisance réelle cependant. *Ceratophyllum demersum* y a joué un rôle important dans la diffusion des bilharzioses.

La présence ou la prolifération des plantes aquatiques, du moins certaines plantes, ne doit pas toujours être perçue comme une nuisance. Selon THIAM (1983), citant ADAM (1965) :

« [...] la destruction des typhaies n'est pas souhaitable. Il faut plutôt chercher à utiliser cette énorme production végétale. Cette source de matière première est une réserve précieuse pour les cultures de l'avenir ».

Le tout est d'arriver à garder un certain équilibre, qui soit bénéfique pour tous les utilisateurs des eaux, tant le monde humain que le monde animal. Il faut donc éviter que les plantes aquatiques ne deviennent un frein aux activités économiques.

2.2. La faune aquatique

La faune du lac de Guiers est composée essentiellement de poissons et de mollusques qui ont tous, à des degrés divers, des impacts sur l'évolution du plan d'eau. C'est en fait une faune très peu variée. Les poissons, en tant que source de protéines, ont un intérêt économique certain (Cf première partie, la pêche). L'impact des mollusques est ici perçu comme négatif, vu le rôle qu'ils jouent dans la transmission de certaines parasitoses.

2.2.1. Faune ichtyologique

Très peu d'études ont été réalisées sur la faune ichtyologique du lac de Guiers. Citons les travaux de REIZER en 1972 et 1974, sur le fleuve Sénégal, qui constituent encore la référence puis ceux de COGELS (1984). Le peuplement est alors dominé par quelques espèces qui sont les plus capturées : *Tilapia sp.*, *Bagrus bayad*, *Labeo senegalensis*, *Clarias anguillaris*, *Heterotis niloticus*, etc.

Dans le cadre des pêches organisées au lac en 1981 et 1982, trente cinq espèces de poissons ont été identifiées (tabl. XXIX) et considérées comme les plus fréquentes en situation hydrologique défavorable. Trois espèces euryhalines n'avait pas été identifiées auparavant par REIZER. Leur apparition pourrait être imputée à l'importante minéralisation des eaux durant les années 1980.

Le stock halieutique du lac de Guiers était en effet conditionné par ses relations saisonnières avec le fleuve Sénégal. Le jeu des ouvertures et fermetures des ponts-barrages de la Taoué permettaient les migrations du fleuve vers le lac et vice versa.

Avant l'entrée en fonction du barrage de Diama, la population de poissons du lac de Guiers vit au rythme des crues et décrues du fleuve Sénégal et de l'intrusion des eaux salées dans le lac. Ce qui implique l'existence de mouvements migratoires orientés en fonction des conditions limnimétriques et qualitatives. Le sens de cette migration se faisait du centre vers le littoral, en phase de montée des eaux et l'inverse au cours de la descente. La distribution des espèces suit aussi un gradient nord-sud, en fonction du retrait des eaux de la partie sud. Les poissons colonisent les différentes zones géographiques du lac dès le début de la montée des eaux.

REIZER dans une étude menée sur quelques 25 000 individus capturés entre 1968 et 1972, durant les périodes d'ouverture et de fermeture des ponts-barrages de la Taoué, a pu distinguer deux phases dans les transferts de poisson entre le fleuve et le lac :

Phase 1 : De l'ouverture du pont-barrage de Richard-Toll jusqu'aux alentours du 15 septembre, c'est-à-dire au moment où la puissance du courant fluvio-lacustre empêche les transferts piscicoles du lac vers le fleuve. Il s'agit surtout de transferts d'adultes de toutes espèces sauf *Sarotherodon sp.* et *Tilapia sp.*

Phase 2 : Du 15 juillet à la fermeture du pont-barrage; c'est-à-dire au moment où l'on enregistre les débits maximaux transitant par la Taoué. Un important charriage d'alevins et de quelques adultes du fleuve vers le lac a lieu à ce moment. L'amplitude de la crue jouait un rôle important dans la dévalaison des alevins.

En période d'ouverture des pont-barrages, la Taoué était le siège d'importante activité de pêche ; la production y est de quelques centaines de tonnes par an. Les déplacements de poissons de la Taoué vers le lac interféraient avec les migrations entre la Taoué, le lac et le fleuve Sénégal. A l'intérieur du lac, des déplacements du poisson avaient également lieu entre les différentes régions au cours de trois phases :

Phase 1 : Elle correspondait à la phase de remplissage du lac au cours de laquelle le stock de poissons migrait vers le sud du lac. COGELS (1984) pense que ce phénomène était dû à l'inertie du poisson vis à vis du mouvement des eaux. La présence d'une végétation aquatique nettement plus abondante qu'en région nord et propice à la reproduction pourrait également expliquer cette migration.

Phase 2 : Elle s'étalait entre février et avril, c'est-à-dire entre la fin de la saison froide et le retrait des eaux de la région sud correspondant au maximum de la salinité saisonnière des eaux. On note alors un important transit poisson sud-nord ; les rendements de la pêche très importants jusqu'alors dans le sud s'accroissent au nord, aux environs de Mbrar et de Ngnith.

Phase 3 : En fin de saison sèche, les déplacements se font vers l'extrême nord du lac, traversant toute la région centrale. Le maximum de rendement est atteint à Mbane et Saninthe en mai et juin.

TABLEAU XXIX
Espèces ichthyologiques pêchées dans le lac de Guiers en 1981 et 1982
(Source : COGELS, 1984)

ESPECES DULCICOLES	
<i>Heterotis niloticus</i>	EHRENBERG 1829
<i>Hyperopisus bebe occidentalis</i>	GUNTHER 1866
<i>Gnathonemus senegalensis</i>	STEINDACHNER 1870
<i>Gymnarchus niloticus</i>	CUVIER 1829
<i>Tetraodon fahada</i>	LINNE 1762
<i>Hydrocyon brevis</i>	GUNTHER 1864
<i>Hydrocyon forskalii</i>	CUVIER 1819
<i>Alestes dentex</i>	CUVIER ET VALENCIENNES 1849
<i>Alestes nurse</i>	RUPPEL 1832
<i>Citharinus citharus</i>	GEOFFROY SAINT-HILAIRE 1809
<i>Distichodus brevipinnis</i>	GUNTHER 1864
<i>Distichodus rostratus</i>	GUNTHER 1864
<i>Labeo senegalensis</i>	VALENCIENNES 1842
<i>Labeo coubie</i>	RUPPEL 1832
<i>Chrysichtys nigrodigitatus</i>	LACEPEDE 1803
<i>Auchenoglanis occidentalis</i>	VALENCIENNES 1840
<i>Schilbe mystus</i>	LINNE 1762
<i>Eutropius niloticus</i>	RUPPEL 1869
<i>Bagrus bayad macropterus</i>	PFAFF 1933
<i>Synodontis filamentosus</i>	BOULENGER 1901
<i>Malopterus electricius</i>	GMELIN 1789
<i>Clarias senegalensis</i>	VALENCIENNES 1840
<i>Clarias lazera</i>	VALENCIENNES 1840
<i>Lates niloticus</i>	LINNE 1762
<i>Hemichromis bimaculatus</i>	GILL 1862
<i>Sarotherodon galilaeus</i>	ARTEDI 1757
<i>Sarotherodon niloticus</i>	LINNE 1758
<i>Sarotherodon aureus</i>	STEINDACHNER 1864
<i>Tilapia zillii</i>	GERVAIS 1848
<i>Paraophiocephalus obscurus</i>	GUNTHER 1861
<i>Polypterus senegalus</i>	CUVIER 1829
<i>Protopterus annectens</i>	OWEN 1839
ESPECES EURYHALINES	
<i>Ethmalosa fimbriata</i>	BOWDICH 1825
<i>Mugil cephalus</i>	LINNE 1766
<i>Cynoglossus senegalensis</i>	KAUP 1858

La production totale du lac de Guiers était estimée à 2 250 tonnes par an vers le début des années quatre vingt, soit 100 kg à l'hectare, destinés surtout à la consommation locale. Les prévisions de l'OMVS dans le cadre des études d'impacts des grands barrages tournent autour de 2 750 tonnes par an.

L'établissement de statistiques au triage forestier de Ngnith permet d'apprécier quantitativement et qualitativement les prises (tabl. XXX) moyennes mensuelles. Le même type de données est collecté au centre de pêche de Guidick qui est resté fermé longtemps.

TABLEAU XXX

Nombre d'individus recensés au triage forestier de Ngnith de janvier à août 1995

(Source : Service régional des eaux et forêts de Richard-Toll)

Espèces	Janvier	Février	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
<i>Tilapia sp.</i>	543	2100	3932	4220	1077	545	717
<i>Bagrus sp.</i>	372	150					
<i>Labeo sp.</i>	255	2400	245	353	211	620	556
<i>Clarias sp.</i>	54	200					
<i>Heterotis sp.</i>	44	50		8			
<i>Chrysichthys sp.</i>		100	21	40		96	119
<i>Hydrocyon sp.</i>			60	54			
<i>Lates sp.</i>			20	19			02
<i>Tetodon sp.</i>			18	40			
<i>Synodontis sp.</i>					334	565	

L'accroissement de la surface du lac, suite à la fermeture des barrages, serait une source potentielle de multiplication des habitats aquatiques. Les nouvelles conditions écologiques favorisent un accroissement de la biomasse ichtycole et une augmentation des captures. Dans la région de Keur Momar Sarr, en amont de la digue, nous avons observé une renaissance de l'activité de pêche qui semble y donner de bons résultats, surtout au niveau des captures de *Tilapia sp.*

L'indice morphoédaphique (IME) permet une estimation rapide mais grossière de la production piscicole potentielle annuelle d'un milieu donné en fonction de la composition chimique des eaux et de la profondeur moyenne du milieu. Il s'applique surtout aux milieux lacustres. L'IME se calcule selon la formule suivante :

$$\text{IME} = \text{Min. Glo. (mg.l}^{-1}\text{)} / \text{Profondeur moyenne (pieds)}$$

WELCOME (1972), constatant que la conductivité était un paramètre plus facilement mesurable, a calculé l'IME pour plusieurs lacs africains puis a transformé cet indice qui est devenu :

$$\text{IME} = \text{Conductivité } (\mu\text{mhos}) / \text{Profondeur moyenne (m)}$$

Mis en relation avec les captures annuelles, on obtient une relation de type puissance :

$$\text{Captures annuelles (kg.ha}^{-1}\text{)} = 8,75 \text{ IME}^{0,38} \quad R = 0,51 \text{ (WELCOME, 1972)}$$

L'application de cette dernière relation suppose quelques précautions préalables : un milieu où la production est équivalente à la productivité ; un effort de pêche équitablement réparti sur la surface du plan d'eau ; un bassin versant restreint.

COGELS (1984) a donné les estimations suivantes pour le lac de Guiers : à la cote 1,00 m IGN, la profondeur moyenne du lac est de 1,62 m, la concentration moyenne des aux en chlorures de 52,0 mg.l⁻¹ et la minéralisation globale de 250 mg.l⁻¹ soit une conductivité de 325 μmhos. L'IME calculé est ainsi de 220 environ pour le lac de Guiers. Dans ce cas, la production annuelle piscicole du Guiers serait de 65,5 kg.ha⁻¹, soit un total de 1 600 tonnes par an pour l'ensemble du lac.

D'après nos calculs, l'IME du lac serait passée à 236 pour la période 1989-92 et 133 pour 1992-95 entraînant une baisse de la productivité qui passe ainsi de 70 à 56 kg.ha⁻¹. Ce qui tendrait à confirmer les hypothèses émises sur l'impact des barrages de Diama et de Manantali sur l'évolution de la productivité des eaux du Delta.

Cependant, par rapport à ces résultats, plusieurs réserves sont cependant émises :

- la variabilité du niveau d'eau d'un point de vue spatio-temporel avec toutes les conséquences que cela implique sur l'estimation de la surface et de la profondeur moyennes annuelles du lac ;
- la variabilité spatio-temporelle de la salinité et de la conductivité ;
- les transferts de poisson du fleuve au lac en phase de remplissage ;
- la migration du poisson dans le lac.

2.2.2. Faune malacologique

La faune malacologique du lac de Guiers a très peu été étudiée, à part les Pulmonés, du fait de leur rôle dans la transmission des schistosomiasés.

Déjà, WATSON (1969) signalait la présence de *Biomphalaria pfeifferi* au lac de Guiers ; des enquêtes effectuées plus tard, en 1977 n'avaient pas retrouvé ce mollusque.

En 1981, la présence de *Bulinus guernei*, vecteur de *Schistosoma haematobium*, agent pathogène de la bilharziose urinaire et de nouveau *Biomphalaria pfeifferi* vecteur de *Schistosoma mansoni* parasite de la bilharziose intestinale est attestée (VINCKE et CISSÉ, 1983). De nouvelles enquêtes malacologiques effectuées dans le haut delta et le lac en 1990 et 1991 montrent une prolifération des *Bulinus sp.*, de *Biomphalaria sp.* mais aussi de *Lymnea sp.* tous de la famille des Pulmonés, aussi bien dans les zones irriguées que dans les canaux d'irrigation.

La coquille des mollusques est composée de carbonate de calcium (calcite et aragonite) sécrétée par le manteau au fur et mesure de la croissance. Ce sont des hermaphrodites : leurs œufs sont pondus dans des capsules gélatineuses et tubulaires, transparentes chez *Lymnea sp.*, aplaties, circulaires et légèrement jaunâtres chez *Bulinus sp.* et *Biomphalaria sp.* Le nombre d'œufs pondus varie en fonction des espèces et de la taille des individus au sein d'une même espèce.

En eau stagnante, les pulmonés sont généralement dominants ; cependant, ils se retrouvent parfois en eau courante, soit dans des zones calmes près du bord ou dans des vasques en période d'étiage. Ils sont souvent abondants dans la végétation aquatique. Au lac Tchad, les herbiers à *Ceratophyllum* abritent une riche faune de *Bulinus sp.*, *Biomphalaria sp.* et de *Lymnea sp.* ; une faune du même type a été retrouvée au lac Volta et au lac Kossou également (DEJOUX, 1988). Les herbiers à *Ceratophyllum demersum* paraissent particulièrement bien convenir au pulmonés. Ces espèces de pulmonés sont capables d'estiver ; ils s'enfouissent sous terre pour résister à la dessiccation.

Ces mollusques sont tous susceptibles de transmettre une ou plusieurs parasitoses. Ils sont en effet le lieu de multiplication des larves de trématodes⁹ dont les schistosomes : *Schistosoma haematobium* et *Schistosoma mansoni* dans le cas du lac de Guiers et de la vallée du fleuve Sénégal.

Biomphalaria pfeifferi est actuellement l'espèce la plus répandue au lac de Guiers, en particulier dans les canaux d'irrigation de la CSS ; il représenterait 69 % des mollusques récoltés à Richard Toll entre 1990 et 1991, contre 11 % pour les bulins (*Bulinus senegalensis*, *B. globosus*, *B. truncatus*). Plus de 63 % de ces récoltes ont eu lieu dans les canaux

⁹ Vers plats

d'irrigation contre 10 à 23 % dans la Taoué. Signalé au lac en 1978, *Biomphalaria* paraît avoir trouvé les conditions favorables à une prolifération rapide (HERVÉ *et al.*, 1992).

A noter aussi la présence de *Lymnaea natalensis*, vecteur de *Fasciola gigantica* (Grande Douve) et qui connaît une large distribution spatiale. Leur présence ne pose a priori pas de problèmes à l'environnement lacustre, mais ils ne sont pas pour autant à négliger.

Les conditions écologiques actuelles (pH, température, salinité, turbidité, végétation) des eaux dans le Guiers en font aujourd'hui un milieu de prédilection pour les mollusques et parasites divers. La construction du barrage de Diama a favorisé une croissance effrénée des mollusques pulmonés dans toute la région du Delta du Sénégal (figure 70) par l'adoucissement des eaux et leur stabilité. Ce phénomène explique les épidémies de bilharziose survenues dans la zone ces dernières années.

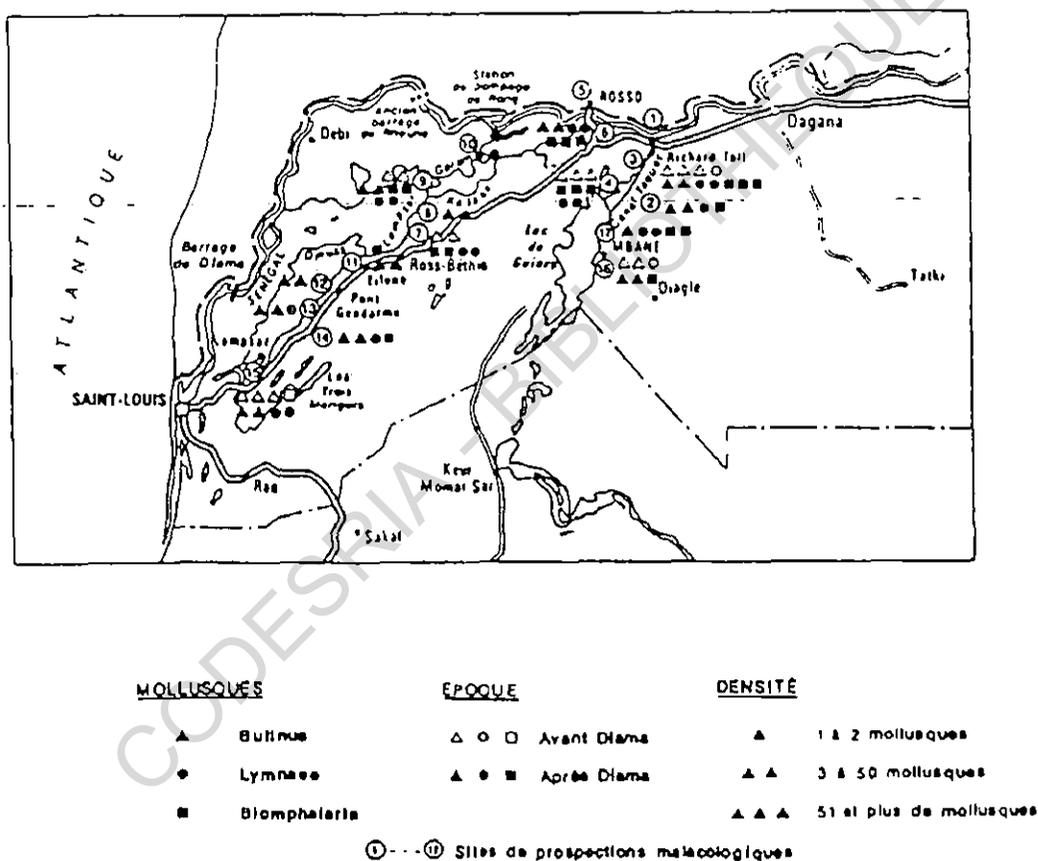


FIGURE 70. — Carte de la densité et de la répartition des mollusques dans la région du Delta avant et après la mise en fonction du barrage de Diama (Source : OMVS, 1995)

3. CONSEQUENCES DES MODIFICATIONS DE LA QUALITE DES EAUX SUR L'ÉCOLOGIE LACUSTRE

La dynamique d'un écosystème est directement liée à l'action biologique des plantes supérieures. La présence ou l'absence de certaines espèces peut en effet orienter un milieu vers différents équilibres écologiques et biologiques dont le maintien est encore le fait de plantes qui assurent la constance de certaines caractéristiques du milieu (ex : pH, teneur en oxygène). Les plantes aquatiques constituent souvent des abris, supports, nourriture de base de la vie en eau douce.

La qualité des eaux est un des facteurs majeurs qui conditionnent le développement de ces plantes qui elles mêmes peuvent influencer sur le comportement physico-chimique des eaux. C'est dire donc la somme des interactions que l'on peut noter dans un même système. A ce titre, l'étude des conséquences de l'évolution physico-chimique et hydrobiologique récentes sur l'écosystème du lac de Guiers est intéressante à plusieurs égards.

3.1. Les effets sur la physico-chimie des eaux

L'adoucissement des eaux du lac de Guiers a nettement amélioré les conditions de vie des populations riveraines, surtout celles du sud du lac où les conditions de qualité de l'eau ont toujours été très mauvaises. En fin de phase d'isolement du lac, la qualité des eaux y était en effet si mauvaise qu'elle devenait même impropre à la consommation du bétail. L'eau des puits adjacents, de même que celle des forages devenait très salée en fin de saison sèche, posant alors de graves problèmes d'approvisionnement en eau potable pour les populations.

L'adoucissement des eaux du Guiers a eu également comme effet une multiplication des petites exploitations agricoles villageoises au-delà de la zone d'extension des périmètres sous gestion SAED ; en effet, la pratique de l'irrigation s'est rapidement étendue dans la région centrale et tend à s'intensifier dans la région sud du lac.

Ces exploitations sont surtout marquées par une inefficacité du système d'irrigation, par l'absence de réseau de drainage et l'utilisation anarchique de divers produits chimiques (pesticides, fongicides, engrais). La manipulation de ces produits étant rarement conforme aux normes d'utilisation, les risques sont grands pour le milieu aquatique de se charger à long terme de produits potentiellement dangereux pour l'homme. L'impact négatif du déversement des eaux de drainage de la CSS en région nord est connu, à raison d'une moyenne de 6 000 à 9 000 tonnes de minéraux dissous en moyenne par an. Cependant, ces eaux nous paraissent moins dangereuses parce que plus facilement maîtrisables. Le risque est grand, de voir augmenter le stock d'éléments chimiques dissous dans les eaux du Guiers, en liaison avec l'extension des cultures irriguées sur son pourtour.

Le problème se pose avec d'autant plus d'acuité que la plupart des villages riverains du lac de Guiers ne possèdent pas de système d'adduction d'eau et s'approvisionnent, de même que le cheptel, directement au lac.

L'amélioration constatée actuellement au niveau de la qualité de l'eau du Guiers ne doit nullement être considérée comme définitive. Un danger beaucoup plus lourd de conséquences pourrait venir de ceux là même qui aujourd'hui en sont les principaux bénéficiaires : les populations riveraines et les différents opérateurs économiques de la zone. L'utilisation des eaux à des fins domestiques (ménage, toilette, baignades, ...) pourrait, au même titre que les fertilisants agricoles, être un facteur de pollution des eaux.

Une réelle politique de protection des eaux doit être adoptée et appliquée pour éviter une évolution vers la pollution. Des normes doivent être édictées en ce qui concerne la qualité des rejets et résidus d'origine agricole, en particulier celles en provenance de la CSS. C'est à ce prix seulement que le fragile équilibre du milieu pourra être préservé.

3.2. Les impacts sur la flore et la faune du Guiers

Le comportement hydrobiologique d'une eau et son impact sur le milieu est la résultante d'une chaîne d'interactions entre quantité et qualité de l'eau d'une part et entre les composantes biologiques, la physico-chimie et le comportement humain d'autre part. La somme de toutes ces interactions détermine un stade précis d'évolution pour un milieu donné.

3.2.1. La flore

Les plantes aquatiques sont une des composantes des milieux équilibrés. Leur présence et leur prolifération sont des indicateurs du stade d'évolution d'un plan d'eau. Associée aux peuplements ichthyologiques et malacologiques, l'abondance de la végétation aquatique peut produire de multiples effets, dont certains très négatifs au plan économique. On peut citer :

- la réduction de l'exploitation des potentialités économiques par limitation des possibilités de pêche et ennoyage des terres traditionnellement vouées aux cultures de décrue ;
- la prolifération des plantes aux dépens du poisson et des cultures ;
- la limitation de la production primaire, par perturbation de la croissance du phytoplancton et donc réduction des possibilités de pêche ;
- la diminution de la capacité de stockage des lacs ;
- l'obstruction des voies navigables, canaux d'irrigation ;
- l'hébergement de parasites, adventeurs des récoltes (faune aviaire) ;
- le développement d'animaux nuisibles (mollusques, larves de moustique), vecteurs de maladies.

Il existe une très forte interaction entre la physico-chimie d'une eau et les espèces aquatiques végétales qu'on y rencontre. Ces dernières peuvent exercer différentes actions sur le milieu notamment : l'oxygénation de l'eau, grâce à la photosynthèse ; la purification du milieu, par l'absorption et la fixation de certains minéraux dissous ; le dessalement des eaux saumâtres.

Certaines plantes peuvent acidifier le milieu. Leur prolifération accélère la sédimentation, source potentielle d'un accroissement de la surface des terres émergées et surtout de comblement progressif du plan d'eau.

Ce sont aussi des biotopes de reproduction très appréciés des espèces phytophiles. C'est le cas du Bourgou et du riz sauvage qui conviennent particulièrement bien à la confection des nids de *Heterotis* tandis que *Nymphaea* est un poste de chasse préférentiel pour certaines espèces de poissons. La plus grande nuisance pour la pêche provient cependant des typhaies qui sont des milieux totalement inaccessibles aux engins. Il faut noter cependant que la pêche lacustre obtient ses meilleurs résultats à proximité des herbiers et prairies aquatiques qui favorisent la présence du poisson. Les espèces végétales qui présentent la plus grande valeur piscicole sont, par ordre d'importance *Echinochloa sp.*, *Nymphaea sp.* et *Typha sp.* (DEJOUX, 1988).

Les nouvelles conditions qualitatives, en particulier dans la région sud, ont également favorisé un surdéveloppement de certaines plantes aquatiques, comme *Pistia stratiotes*, *Typha australis* et *Ceratophyllum demersum*, caractéristiques entre autres de milieux eutrophes.

La présence de certaines espèces végétales a souvent une incidence sanitaire indirecte sur les populations riveraines. A titre d'exemple, il existe une relation directe entre la densité de *Ceratophyllum demersum* du lac Volta et la prévalence ainsi que la densité d'infection par *Schistosoma haematobium* des populations locales.

Potamogeton sp. constitue souvent une entrave à la navigation en Afrique centrale et australe et de plus, représente une première étape vers la disparition de certains cours d'eau. *Nymphaea sp.* peut induire localement une forte baisse de la production primaire par réduction de la pénétration de la lumière.

La végétation aquatique constitue un bon témoin de l'évolution des milieux aquatiques ; elle enregistre presque toutes les variations du milieu. Elle permet de classer un cours d'eau dans un type particulier et d'en définir les caractéristiques physico-chimiques majeures. Là où les moyens sont déficients, elle peut suppléer aux analyses chimiques qui elles ne fournissent qu'une estimation instantanée de la qualité de l'eau.

3.2.2. La faune

- Les impacts des modifications de la qualité des eaux lacustres liés à la faune sont étudiés à travers ses deux composantes majeures : les mollusques comme agents de transmission possibles pour les schistosomiasis et les poissons comme source de protéines pour les populations riveraines. Les composantes comme le zooplancton ne sont pas pris en compte faute de données récentes pouvant servir de base de comparaison.

3.2.2.1. Les mollusques

La prolifération des mollusques au lac de Guiers pose avant tout un problème sanitaire ; les mollusques pulmonés présents ici ne présentent aucun intérêt alimentaire. Leur surdéveloppement depuis 1988, en relation avec les nouvelles conditions écologiques, est enrayé. L'infestation de *bulinus sp.* et de *Biomphalaria sp.* par les germes de *schistosoma sp.* a causé de la naissance de foyers de bilharziose intestinale et urinaire autour du lac de Guiers. On estime qu'aujourd'hui, près de 80 % de la population riveraine du Guiers est infestée par la bilharziose.

Pourtant, la présence de mollusques pulmonés a été attestée au lac antérieurement à la mise en service du barrage anti-sel de Diama. Déjà en 1983, VINCKE dans les actes du colloque de l'ISE écrivait : « Des aménagements rizicoles situés le long d'une branche du fleuve Sénégal en amont du lac de Guiers, s'avèrent déjà être des points de départ très efficaces d'endémo-épidémies de bilharziose urinaire [...] liées aux aménagements hydro-agricoles prévus dans la région du lac avec la constructions de deux barrages géants ».

Dès les premières années du fonctionnement du barrage de Diama, on a noté l'extension des sites à *Biomphalaria pfeifferi* et une augmentation de sa densité, notamment à Richard-Toll et au niveau du lac de Guiers. La population de mollusques est beaucoup plus dense dans les canaux d'irrigation et de drainage. La faune malacologique semble avoir trouvé les conditions idéales à sa prolifération. Les eaux sont douces et stables et la végétation aquatique est abondante.

L'apparition de la bilharziose intestinale à partir de 1988 a été une des conséquences des nouvelles conditions du milieu lacustre, même si dans les années 1980 quelques cas de bilharziose urinaire avaient été signalés autour du lac par VINCKE et Cissé (1983) et VINCKE (1983).

L'utilisation des eaux dans le cadre des activités domestiques contribue dans une large mesure à la réinfestation des mollusques par les schistosomes et autres parasites présents dans les eaux. Rien ne semble devoir stopper cette évolution. A moins qu'une lutte chimique ou bactériologique ne soit menée, avec toutes les incidences que cela pourrait avoir sur les autres composantes de l'écosystème.

3.2.2.2. La faune ichthyologique

Les études effectuées avant la mise en fonction de ce barrage font l'unanimité en ce qui concerne l'impact négatif de cet aménagement sur les ressources halieutiques dans la vallée et le bas Delta (OMVS, 1995). En effet, la disparition des plaines d'inondation se répercute sur la reproduction et la croissance des stades juvéniles de nombreuses espèces. Depuis les travaux de REIZER (1974), on connaît l'importance des plaines d'inondation du lit majeur dans la productivité des eaux du Sénégal ; en effet, c'est sur ces plaines que se retrouvent en grande partie les sources d'enrichissement et de nourriture. C'est dire donc tout l'impact au niveau ichthyologique.

Or dans le cadre de la gestion des ouvrages communs de l'OMVS, la priorité est accordée à l'irrigation qui est pour ainsi dire l'objectif principal dans le cadre de la mise en valeur du bassin du fleuve. D'après LAZARD (1981), 400 000 ha sur les 500 000 que compte le lit majeur de la vallée seront à terme soustraits aux possibilités d'épandage de la crue.

En aval du barrage de Diama, l'augmentation de la salinité en saison sèche devrait se traduire par une limitation de l'aire d'habitat des espèces euryhalines et des difficultés à remonter en amont du fleuve comme cela se faisait chaque année. Dans cette partie du bief, les espèces marines risquent d'être prépondérantes à l'avenir car supportant mieux les nouvelles conditions du milieu. En saison sèche, les peuplements seront de type estuarien (mulets, ethmaloses, elops, et carpes blanches) et deviendront progressivement dulçaquicoles le reste de l'année.

En ce qui concerne la partie amont de la retenue de Diama, les avis divergent. Certains auteurs, comme REIZER (1974) préoyaient une augmentation nette de la production, de l'ordre de 1 500 tonnes par an, alors que l'OMVS (1980) annonçait une diminution d'environ 3 000 tonnes de poisson par an par rapport à la période d'avant Diama. Il est à prévoir également des changements au niveau de la structure des peuplements ichthyologiques.

Le barrage de Manantali en amont a également une incidence négative sur le rendement halieutique dans la vallée et le haut Delta. L'accélération de la décrue se traduit par une importante mortalité au niveau des alevins.

La jonction quasi permanente entre le lac de Guiers et le fleuve Sénégal depuis 1992 a pu bouleverser les peuplements ichthyologiques. En effet, l'ouverture des pont-barrages de la Taoué permettait chaque année aux poissons de se déplacer vers le fleuve alors que le lac s'alimentait en alevins. Le lac était en fait un biotope de croissance et moins de reproduction du poisson. Cependant, l'impact au niveau de la production ne devrait pas être trop accusé car certaines cotes critiques pour la survie du poisson ne devraient plus être atteintes à l'avenir ; de plus l'abondance de la végétation aquatique laisse augurer d'une multiplication des aires de repos.

La production devrait atteindre 2 600 à 2 800 tonnes par an dans le complexe Guiers - Taoué. Cependant, l'alimentation en alevins pourrait dans les années à venir être réduite et entraîner une baisse de la production (OMVS, 1995).

Les tonnages actuels de *Tilapia sp.* capturés au lac doivent être mis en rapport avec l'accroissement de la production primaire dont les plantes aquatiques sont un des facteurs favorisants. Cette espèce semble avoir trouvé ici les conditions d'un développement optimal.

Certaines espèces, en particulier les espèces euryhalines, ne trouveront plus à l'avenir les conditions favorables à leur croissance. En somme, on assiste à un phénomène de sélection naturelle des espèces de poissons, les uns se surdéveloppant au détriment des autres. Le Delta est un milieu en pleine mutation ; l'équilibre ne sera atteint qu'après de nombreuses années de fonctionnement de ces ouvrages. L'heure du bilan n'a pas encore sonné car des ajustements doivent encore être opérés entre les différentes utilisations de ces ressources en eau.

3.3. Les conséquences sur la santé des populations

La mise en fonction du barrage de Diama et les nouvelles conditions écologiques et socio-économiques qui en ont découlé pour le lac de Guiers et ses populations riveraines ont créé les conditions d'une recrudescence des maladies hydriques, en particulier le paludisme et les schistosomiasés.

Avant 1985, la bilharziose est totalement absente des rives du Guïer̄s, hormis quelques cas signalés dans les années Quatre-vingt par VINCKE et CISSÉ (1983). La nouvelle dynamique agro-économique issue de la construction des grands barrages s'est accompagnée d'une augmentation des taux de prévalence de la maladie. C'est ainsi que plusieurs cas d'infestation par *Schistosoma mansoni* ont été signalés autour du lac depuis 1990, en particulier au nord à proximité des casiers sucriers ; Richard-Toll est aujourd'hui un des foyers importants de la maladie.

Le paludisme est également un des risques liés au milieu qui offre aux moustiques un lieu idéal de reproduction. Cependant, sa progression est difficilement mesurable, faute de statistiques précises.

D'autres maladies liées au milieu hydrique et aux aménagements hydro-agricoles, telles les amibiases, les filariosés, l'onchocercose, les arbovirosés pourraient apparaître. Malgré leur absence actuelle, la plus grande attention doit leur être portée notamment par le biais de la prévention et de la sensibilisation des populations locales.

Dans cette étude, nous traiterons exclusivement des développements récents de la bilharziose au lac de Guiers. Elle est l'une des conséquences les plus alarmantes des conditions hydrobiologiques récentes dans le Delta du Sénégal.

3.3.1. Transmission et symptômes de la bilharziose

La bilharziose est l'une des affections parasitaires les plus fréquentes en Afrique tropicale ; c'est la plus grande endémie du monde tropical, après le paludisme. Environ 300 millions de personnes à travers le monde en souffrent. Dans les années soixante, ce chiffre était de 180 à 200 millions selon l'OMS. En 1975, pas moins de 90 millions de personnes en sont atteintes rien qu'en Afrique (LAROUSSE MÉDICAL, 1986).

En zone sahélienne, parmi les populations riveraines des eaux stagnantes, les degrés d'infestation dépassent souvent 80 % ; les pêcheurs et riziculteurs de même que les enfants sont les plus exposés.

L'origine de la bilharziose a été découverte il y a environ un siècle par le biologiste allemand Theodor BILHARZ (1825-1862). Son existence est attestée depuis très longtemps, par l'intermédiaire du « Papyrus Ebers »¹⁰ qui en donne une description (DEJOUX, 1988). Elle est transmise par des trématodes du genre *Schistosoma sp.*, vers parasites qui affectent le système veineux de l'homme et de certains animaux.

Quatre types de schistosomes ont été identifiés à travers le monde : *Schistosoma haematobium*, agent de la bilharziose uro-génitale, strictement africaine ; *Schistosoma mansoni* qui transmet la bilharziose intestinale et hépato-splénique répandue en Afrique et en Amérique tropicale ; *Schistosoma intercalum*, agent de la bilharziose rectale de l'Afrique et *Schistosoma japonicum*, agent de la bilharziose artéro-veineuse, très répandue en Extrême-Orient.

En Afrique, la bilharziose à *Schistosoma haematobium* est la forme la plus répandue ; elle y atteint quelques 100 millions d'individus. Son aire de répartition s'étend de la vallée du Nil à l'Afrique de l'Ouest et du Sud avec quelques foyers résiduels au Maghreb, à l'île Maurice et à Madagascar. La bilharziose à *Schistosoma mansoni* est répartie dans toute l'Afrique de l'Ouest, de l'Est et du Sud ; quelques foyers discontinus existent en Égypte et à Madagascar.

La propagation de la bilharziose est favorisée par les projets de développement des ressources en eau pour l'agriculture irriguée, l'exploitation hydro-électrique ou l'approvisionnement en eau potable. Au Caire, il y a une vingtaine d'années, environ 25 % des décès enregistrés avaient pour causes directes ou indirectes la bilharziose ; cette dernière était tenue pour responsable d'une perte de productivité, de l'ordre de 30 %, pour l'ensemble de l'Égypte (DEJOUX, 1988).

La transmission de la bilharziose se fait en plusieurs étapes (figure 71) nécessitant l'intervention d'un hôte intermédiaire, en l'occurrence les mollusques pulmonés, qui servent de lieu de reproduction des larves infestantes de schistosomes.

Les schistosomes se présentent sous la forme de vers plats de 10 à 15 mm de long. Ils sont hématophages ; selon l'espèce, ils vivent dans les veines desservant le foie, la vessie ou le rectum du sujet contaminé. Au moment de la ponte, la femelle quitte le mâle et émet des œufs contenant un embryon cilié mobile : le miracidium. Les œufs sont éliminés avec les urines pour *Schistosoma haematobium* ou pondus dans la paroi intestinale et rejetés avec les selles dans le cas de *Schistosoma mansoni*.

Les œufs embryonnés de *Schistosoma* sont d'abord excrétés par l'homme parasité. Au contact de l'eau, ils éclosent et libèrent le miracidium qui nage à la recherche de son hôte intermédiaire, un mollusque, pour y poursuivre son développement.

Dans ce mollusque, le miracidium se multiplie pour donner des milliers de larves infestantes ou furcocercaires qui à leur tour quittent le mollusque et se répandent dans l'eau. Dans les 24 à 48 heures, ces larves meurent s'ils ne trouvent pas l'hôte définitif où ils doivent terminer leur développement. Dès la rencontre avec l'hôte définitif, les larves pénètrent à travers la peau et gagnent le poumon puis les veinules hépatiques par l'intermédiaire d'un vaisseau lymphatique ou d'une veinule puis commencent leur maturation sexuelle. Les premiers œufs apparaissent dans les selles ou les urines environ trois mois après l'infestation.

¹⁰ C'est l'un des plus anciens documents égyptiens traitant des questions médicales ; il est daté de 1550 Avant J. C.

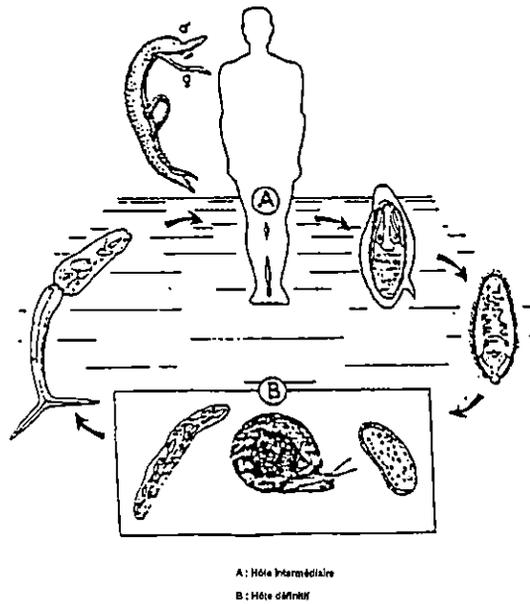


FIGURE 71 — Cycle de la bilharziose intestinale et de la bilharziose urinaire
(Source : HANDSCHUMACHER *et al.*, 1994)

La réinfestation des mollusques pulmonés intervient lorsque les œufs atteignent à nouveau le milieu aquatique après avoir transité dans les excréments humains.

Les symptômes de la bilharziose varient selon l'espèce du schistosome concernée et la phase de croissance des larves infestantes dans l'organisme humain.

Les premiers signes de la bilharziose à *Schistosoma haematobium* n'apparaissent qu'à la phase d'état, c'est-à-dire lorsque les larves ont atteint la pleine maturation sexuelle. Ils se caractérisent par une hématurie¹¹. La maladie peut ensuite évoluer pendant plusieurs années de manière insidieuse et peut à terme entraîner des complications ; notamment : atteinte vésicale par cystites chroniques, douloureuses et rebelles ; atteinte urétrale et rénale entraînant une insuffisance rénale grave ; atteinte génitale avec des symptômes variés et pouvant déboucher sur l'impuissance sexuelle et la stérilité de la femme.

Dans le cas de *Schistosoma mansoni*, la phase de pénétration du furcocercaire, se traduit par un prurit¹² et un urticaire. La phase d'invasion s'accompagne de signes d'intoxication dus à la migration et à la transformation des larves. Ces signes se caractérisent par une fièvre à laquelle se joint des sueurs, des maux de tête, diarrhées et douleurs articulaires, musculaires ou thoraciques. On note également des manifestations allergiques comme les urticaires et œdèmes fugaces et une hépatomégalie¹³. C'est ainsi qu'on a des diarrhées avec selles glaireuses et sanguinolentes et un ténésme¹⁴. La présence des œufs dans la rate et le foie aboutit à une fibrose qui à long terme entraîne un dysfonctionnement grave de ces organes.

¹¹ Présence de sang dans les urines

¹² Démangeaisons cutanées

¹³ Gros foie

¹⁴ Fausses envies

Le développement des hôtes intermédiaire comme celui des parasites est soumis à des conditions écologiques précises telles que la température de l'eau, le pH, la salinité, la turbidité, le courant et la végétation des berges. L'éclosion des œufs de *Schistosoma sp.* n'a lieu que dans des eaux douces, non stagnantes, bien ensoleillées, avec un pH neutre et une température comprise entre 25 et 30 °C. Conditions qui sont actuellement celles du lac de Guiers ; ce qui en a fait dans une période récente un important foyer de bilharziose urinaire et intestinale.

3.3.2. Etat de la maladie au lac de Guiers

Depuis les premiers cas trouvés en 1988, Richard-Toll est devenu le plus gros foyer de bilharziose intestinale d'Afrique de l'Ouest (HANDSCHUMCHER et al., 1992). Ce développement de la maladie, hors de sa zone d'extension habituelle¹⁵, pose avec plus d'acuité le problème de l'impact des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles sur les mutations du milieu bioclimatique, la santé et le bien-être des populations riveraines.

La bilharziose urinaire était connue autour du lac de Guiers, dans le Delta et la vallée du fleuve Sénégal, sans que l'on ait jamais atteint le stade épidémique. Avant la réalisation des barrages sur le fleuve Sénégal, le réservoir de mollusques existait mais ne trouvait pas encore ses conditions optimales de développement.

3.3.2.1.1. Avant la construction du barrage de Diama

Avant la mise en fonction du barrage de Diama, la présence de foyers de bilharziose urinaire est attestée dans toute la vallée, notamment dans le département de Matam et au niveau de l'axe Gorom Lampsar, où les taux de prévalence sont de l'ordre de 25 % selon VERCRUYSSSE (1985). A Bakel, l'hématurie est tellement fréquente qu'elle est considérée comme une manifestation pré-pubertaire normale et de ce fait n'est pas perçue comme un phénomène dangereux par les populations. Cette fréquence de la maladie en particulier dans la vallée est favorisée par les contacts fréquents avec l'eau dans le cadre d'activités domestiques ou lucratives (lessive, bain, baignade, pêche, cultures de décrue ou irriguées, ...).

VINCKE et CISSÉ (1983) signalent la présence de quelques cas de bilharziose urinaire autour du lac de Guiers, notamment 50 cas observés entre 1976 et 1982 au sein du personnel de la CSS. Les enquêtes ont montré que ces cas ont été importés par des travailleurs étrangers à la zone.

Lors d'enquêtes parasitologiques réalisées en septembre 1981¹⁶ dans les villages du lac de Guiers, sur 1572 personnes examinées réparties dans 25 villages, seules deux présentaient des larves de *Schistosoma haematobium* ; le pourcentage d'infestation bilharzienne n'est que de 0,1 %. Ce qui permet d'affirmer une absence de la bilharziose urinaire au lac avant la mise en fonction des grands barrages. Par contre, l'enquête malacologique effectuée en janvier 1981¹⁷ avait montré la présence de *Bulinus guernei* et de *Biomphalaria pfeifferi* qui ne trouvaient sans doute pas les conditions écologiques et le foyer humain favorisant leur développement.

¹⁵ Le 12^e parallèle Nord a toujours été considéré comme la limite nord de la bilharziose intestinale.

¹⁶ Enquêtes réalisées par le Service de Parasitologie de la Faculté de Médecine de l'Université de Dakar en collaboration avec l'Institut des Sciences de l'Environnement

¹⁷ Enquêtes réalisées par l'Institut des Sciences de l'Environnement avec le concours du Laboratoire National de l'Élevage et de Recherche Vétérinaire

Pour VINCKE (1983), les aménagements rizicoles situés sur une branche du fleuve Sénégal en amont du lac de Guiers constituent déjà des points de départ potentiels du développement de la maladie.

La bilharziose urinaire est donc connue dans la région avant la l'entrée en fonction des grands barrages mais ne constitue pas à proprement parler un problème car ayant la réputation d'être bien tolérée. Le point de vue l'OMVS (1980) est alors que « ... *ni actuellement, ni à l'avenir ces maladies ne représentent un danger sérieux pour la santé des habitants du Delta* ». D'où l'absence de politiques de prévention. L'épidémie de Richard-Toll aurait pu être prévue, si seulement des mesures avaient été adoptées contre la prolifération des mollusques dès la première année de fonctionnement du barrage anti-sel de Diama.

3.3.2.1.2. Après le barrage de Diama

Les premiers cas de bilharziose intestinale sont apparus à Richard-Toll en 1988 ; l'épidémie s'est déclarée l'année suivante, liée sans doute à la prolifération des mollusques de type *Biomphalaria sp.* Le taux de prévalence est de 43 à 95 % par quartier. La situation est aggravée par les mauvaises conditions d'hygiène dans certains quartiers. Les autres foyers de la maladie sont Mbane, Senda, Ross-Béthio et Ngnith, de plus en plus.

On a pas encore atteint la situation décrite par GROSMAIRE (1957) qui note que « *l'apparition de l'eau douce dans le lac a entraîné du fait de ces herbes, la ruine de toute la région, dans une décadence si rapide qu'il ne reste plus le long de ces rives que les vestiges d'un passé prospère* ». Cependant, la situation n'en est pas moins alarmante.

L'apparition de la bilharziose intestinale à Richard-Toll est en complète discordance avec la répartition habituelle de *Biomphalaria pfeifferi* en Afrique de l'Ouest qui a comme limite le 12^{ème} parallèle Nord ; en fait, les gîtes de *Biomphalaria sp.* sont rares au delà du 14^{ème} parallèle. Ce fait peut cependant se comprendre par les changements intervenus au niveau de l'écologie lacustre du Guiers et aussi par le fait que ces mollusques sont susceptibles de se retrouver très loin de leurs lieux de prédilection (LEVEQUE, 1980).

L'actuelle endémicité de la bilharziose au lac de Guiers est à mettre également en rapport avec sa non prise en compte dans les études impacts effectuées avant la construction des grands barrages. Le résultat est l'absence de politique de prévention et d'éducation sanitaire à la base. Malgré les risques très élevés, les populations riveraines du lac et du fleuve continuent à s'adonner à certaines pratiques, mettant continuellement leur santé en péril.

La bilharziose est devenue un problème de santé publique dans la région du lac, elle mobilise de nombreuses équipes de recherche dont les programmes Espoir et Eaux et Santé de l'ORSTOM (tabl. XXXI, tabl. XXXII). La rive est du lac qui est depuis longtemps le siège d'une tradition de culture irriguée bien établie est particulièrement touchée par la bilharziose et intestinale. On y a enregistré un taux de prévalence global de 81 % et de 89 % chez les jeunes de 7 à 14 ans. La rive ouest bien que moins touchée connaît cependant des taux de prévalence de 26 % pour la bilharziose urinaire et de 50 % pour la bilharziose intestinale. Les jeunes de 7 à 14 constituent la population la plus exposée, sans doute du fait de leurs activités (jeux, baignades...).

On remarque la place importante de la bilharziose intestinale autour du lac de Guiers et dans le *walo* (figure 72) ; Les populations du *dieri* semblent pour l'instant moins concernées par la maladie. Cependant, la survivance d'une certaine tradition de nomadisme pourrait

TABLEAU XXXI

Taux de prévalence de la bilharziose urinaire et intestinale dans quelques villages du lac de Guiers
Enquêtes réalisées par le Programme ESPOIR (1994)

Village	Population			<i>S. haematobium</i>		<i>S. mansoni</i>	
	Nbre Hbts	Ech. étude	7 à 14 ans	% SH+ éch.	% SH+ 7 à 14	% SM+ éch.	% SM+ 7 à 14
Médina	389	36	13			90	100
Thiago	968	139	47			96	100
Témèye	333	61	15			95	86
Lewah Témèye Salane	265	51	15			94	100
Témèye Peuhl	129	34	7			97	100
Ndouboulène	66	51	16			69	67
Mbane	823	67	16			66	88
Saninthe Tacque	349	87	23			70	90
Pomma	526	32	8			45	25
Ndiakhaye	573	84	25			72	92
<i>Rive est</i>	4421	642	185			81	89
Nieti Yone	126	80	17			64	57
Roumatine	139	38	10			83	86
Nder	307	71	22	28	26	79	88
Malle	257	74	16			98	100
Diokhor	138	77	18			58	71
Thiarène	121	34	9			52	50
Dialbanabé	107	40	7			23	33
Yamane	327	83	23			10	11
<i>Rive ouest</i>	1522	497	122	28	26	50	61
Lac	5943	1139	307	28	26	72	79

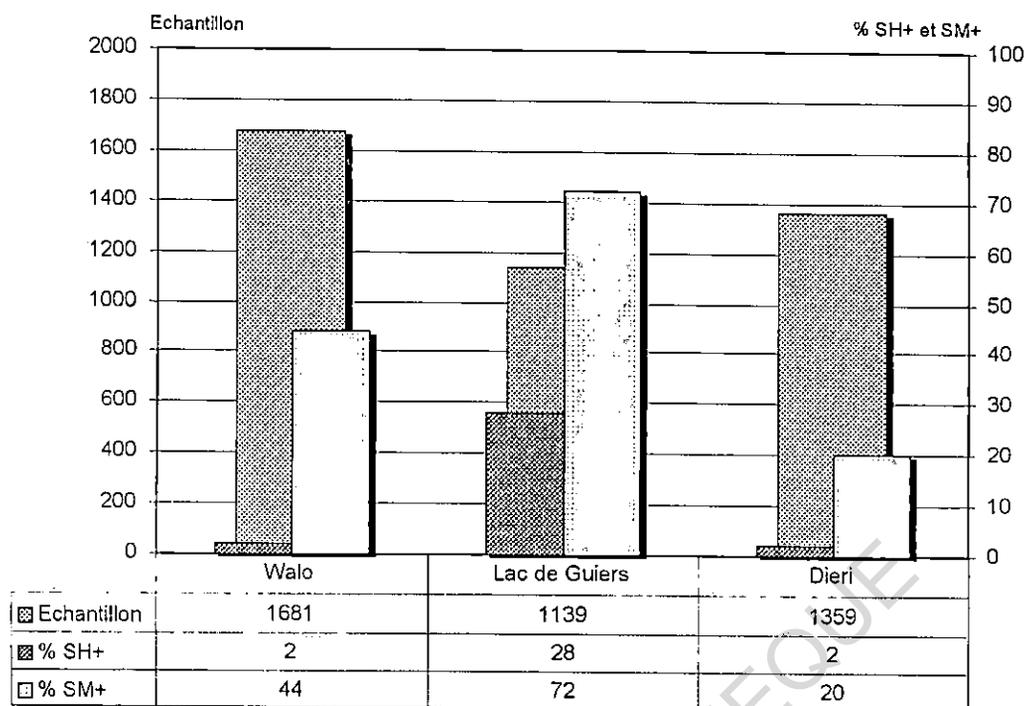


FIGURE 72. — Prévalence de la bilharziose urinaire et intestinale dans la zone de Richard-Toll et au lac de Guiers (source données : Programme ESPOIR, 1994)

TABLEAU XXXII

Nombre de cas de bilharziose dans quelques localités du lac de Guiers
Enquête effectuée par la Case de santé de Ngnith du 27 mars au 21 septembre

Village	Nombre de cas de bilharziose
Ngnith	68
Teuss	10
Naéré	7
Pokhotane (Roumbatime)	11
Diagane et hameaux peuls	15
Ndieumeul Ile	11
Diokhor Ile	23
Malla	7
Nder	7
Total	159
Nombre de personnes ayant donné des échantillons de selles : 196 Taux de prévalence calculé : 81 %	
N.B. : Les personnes ayant le plus participé à l'enquête étaient celles qui souffraient de syndrome dysentérique. Les autres, se présentant pour d'autres affections (plaies, otites, maux de tête) étaient plus ou moins réticentes. Ce qui laisse un doute sur la représentativité du taux de prévalence calculé.	

Des moyens de lutte doivent être rapidement mis en œuvre pour éviter les déboires observés dans d'autres régions aménagées hydro-agricolement (ex du barrage d'Assouan sur le Nil et des grandes épidémies de bilharziose dans la région ; lac Volta au Ghana).

L'extension de la surface des eaux stagnantes et surtout la présence d'une importante végétation aquatique tout au long de l'année pourrait induire dans la région un accroissement du paludisme par l'augmentation de la population d'anophèles. Des chiffres peuvent difficilement être avancés, faute de statistiques précises sur cette maladie. Cependant, si l'on considère les conditions écologiques actuelles et compte tenu de la très forte interaction entre l'homme et le milieu lacustre

La fièvre de la vallée du Rift, dite aussi hépatite nécrosante infectieuse, est une « arbovirose anthropozoonose ». Elle occasionne des pertes autant humaines qu'animales, l'homme étant apparemment contaminé par le contact avec les animaux. Elle est transmise par les piqûres d'arthropodes aquatiques.

Elle est apparue dans la vallée du fleuve Sénégal dès 1987 sous forme d'épizo-épidémie, dans la zone de Rosso, près du réservoir de Diama et du barrage de Fom Gleita. Elle aurait fait quelques 300 victimes humaines et provoqué 100 et 30 % des avortement, respectivement chez les brebis et les vaches, 20 à 30 % de mortalité chez les petits ruminants adultes, 90 à 100 % de mortalité chez les jeunes, 10 à 70 % chez les veaux et 10 % chez les bovins adultes (Sud Quotidien n° 727 du 09 Septembre 1995). Les signes de la maladie seraient encore aujourd'hui présents dans la vallée ; d'où la nécessité d'études épidémiologiques et d'un suivi vétérinaire des troupeaux. Cette maladie virale est surtout redoutable du fait de ses impacts sociaux et économiques, si l'on considère tout l'attachement qui existe entre le berger peul et son troupeau ; sa décimation correspond à une double perte.

3.4. Y-a-t-il l'eutrophisation des eaux du lac de Guiers ?

L'eutrophisation, du grec eu (bien) trophein (nourrir) est définie par le dictionnaire HACHETTE (1994) comme un « accroissement anarchique de la quantité de sels nutritifs d'un milieu, ou d'une partie, d'une eau stagnante polluée par les résidus d'engrais ou par les rejets d'eau chaude (centrales électriques, etc.) et qui permet la pullulation maximale d'êtres vivants. Au-delà de certaines limites, l'équilibre entre les espèces, végétales ou animales, peut être rompu au profit de certaines d'entre elles ».

RYDING et WAST (1994) ont adopté la définition proposée par l'OCDE qui définit l'eutrophisation comme « l'enrichissement des eaux en matières nutritives qui entraîne une série de changements symptomatiques tels que l'accroissement de la production d'algues et de macrophytes, la dégradation de la qualité de l'eau et autres changements symptomatiques considérés comme indésirables et néfastes aux divers usages de l'eau ».

On parle d'un milieu eutrophe dans le cas d'un lac, d'une mare, où par suite d'un apport excessif de matières organiques, la pullulation des êtres vivants crée une carence en oxygène, une production de vase et une opacification des eaux.

L'eutrophisation est d'origine anthropique ; à l'origine le terme d'eutrophisation désignait le processus de vieillissement d'un lac. Il représente donc une somme d'interactions diverses définissant le niveau trophique d'un lac depuis l'oligotrophie jusqu'à l'eutrophie. Un plan d'eau eutrophe est généralement caractérisé par des productivités et biomasses élevées, un surdéveloppement algal, une déficience en oxygène et une réduction de la diversité biologique (RYDING et WAST, 1994). L'eutrophisation entraîne la détérioration de la qualité de l'eau qui

devient impropre à différentes utilisations comme l'alimentation en eau potable, les activités de loisirs (baignade par exemple) l'irrigation et l'usage industriel.

En milieu lacustre, la prolifération de la végétation peut être un phénomène naturel ; elle est l'une des conséquences de l'eutrophisation accélérée. Dans un milieu équilibré, cette prolifération est lente mais lorsque survient un déséquilibre (apports artificiels de sels nutritifs, réalisation d'un barrage créant des accumulations locales), le processus s'accélère et aboutit généralement à un état de pollution notamment par la végétation aquatique.

La question d'une possible eutrophisation des eaux du lac de Guiers s'est posée à partir de 1991 avec l'apparition puis la prolifération de végétaux aquatiques, telles que *Pistia stratiotes* et *Ceratophyllum demersum*, identifiées comme étant caractéristiques des mares et lacs eutrophes. La situation s'est détériorée en 1992 et 1993 avec le recouvrement quasi total de l'extrême sud du lac par les salades d'eau. Les causes de cette situation n'ont pas encore été clairement définies.

Au delà du problème de l'équilibre écologique du milieu, se pose également des questions d'ordre socio-économiques liées à l'exploitation des eaux par les populations. Un phénomène similaire a été observé dans la réserve du Djoudj. Une évolution semblable à celle du lac de Guiers y a été notée, à savoir une poussée rapide et importante suivie d'une phase de recul. La situation semble s'être stabilisée depuis et l'évolution des plantes aquatiques paraît moins rapide.

Cette fulgurante poussée des plantes aquatiques dans la plupart des réserves d'eau du Delta doit susciter l'intérêt de tous les utilisateurs de ces réserves. A l'heure actuelle, rien n'autorise à conclure à une eutrophisation des eaux du lac de Guiers. La prolifération des plantes aquatiques observée au début des années 1990 doit être perçue comme un phénomène naturel, témoin de l'évolution du milieu lacustre. Si l'heure n'est plus à l'inquiétude, il n'en demeure pas moins que des mesures protectrices doivent être prises pour éviter de tels événements à l'avenir.

Les grands ouvrages hydrauliques du fleuve Sénégal ont certes permis une amélioration nette des conditions quantitatives et qualitatives des eaux dans le Delta. Au lac de Guiers, l'amélioration des remplissages et la baisse de la minéralisation globale en est l'une des manifestations. Cependant, l'hydrobiologie lacustre est encore en pleine mutation. Les effets des aménagements du fleuve Sénégal ne sont pas entièrement positifs. Les projets en cours (Canal du Cayor, remise en eau du Ferlo...) risquent à terme de compliquer le fonctionnement, du système et sa gestion. Face à ces échéances, de nouveaux outils doivent être développés pour pouvoir gérer au mieux l'évolution future du plan d'eau en fonction de telle ou telle alternative de gestion. La gestion future du lac devrait être une gestion intégrée car l'étude qualitative a montré les effets de la disponibilité de l'eau sur le comportement physico-chimique des eaux.

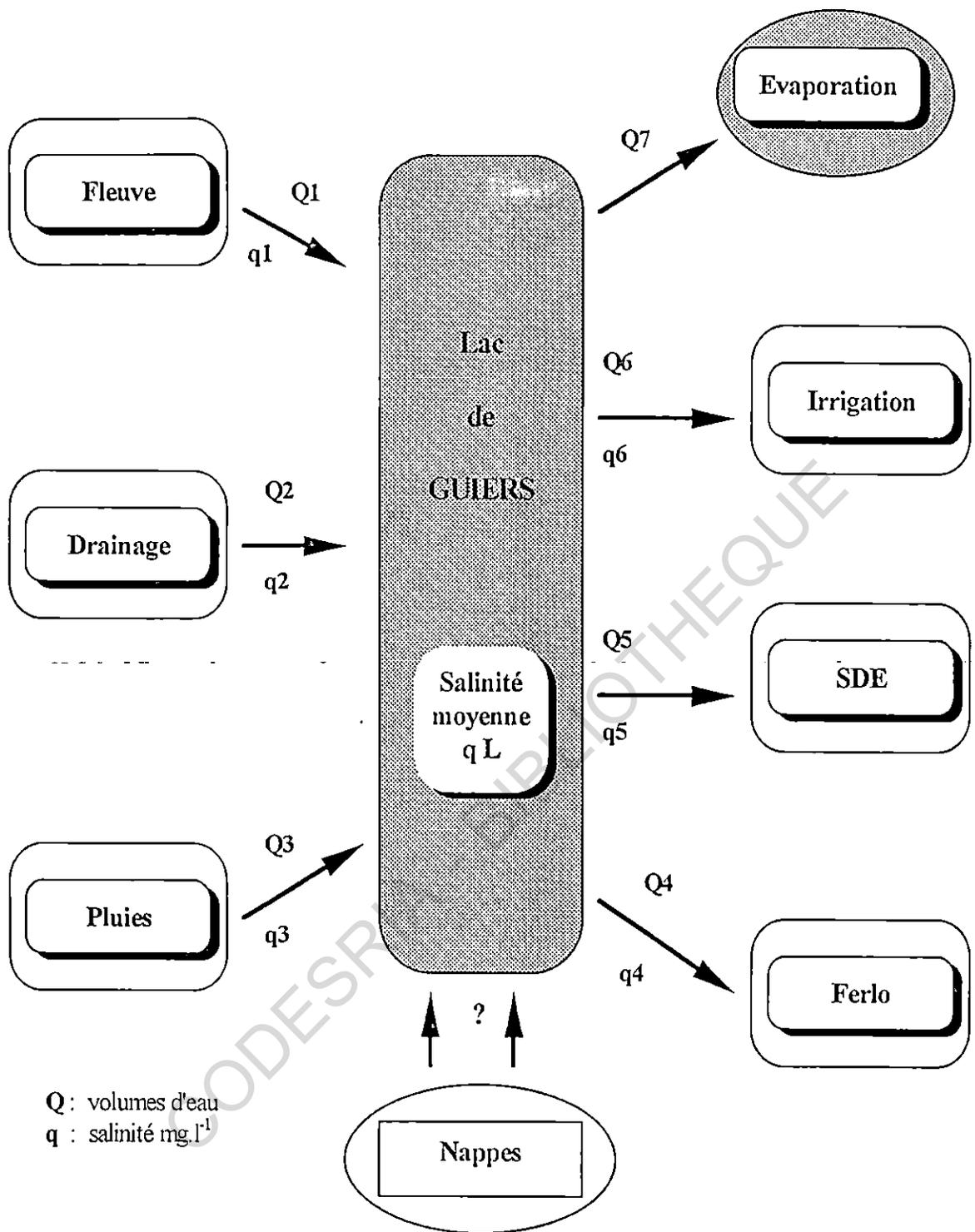


FIGURE 73.— Les paramètres du bilan hydrologique et leur intervention dans l'évolution qualitative des eaux du lac de Guiers.

Au total, cinq alternatives de gestion quantitative sont proposées par le modèle :

- 1) jonction fleuve - lac interrompue et évolution des hauteurs d'eau du Guiers calculé par le modèle en fonction du bilan apports - pertes ;
- 2) gestion du lac à un niveau croissant (variations des hauteurs d'eau en cours d'année) ou constant et calcul des apports fluviaux nécessaires ; évolution limnimétrique imposée en cas de gestion à un niveau constant ;
- 3) volume des apports fluviaux imposé et calcul de l'évolution limnimétrique du Guiers en fonction du bilan apports - pertes ;
- 4) jonction fleuve - lac permanente et apports fluviaux évoluant en fonction des hauteurs respectives dans le fleuve et dans le lac ;
- 5) évolution limnimétrique imposée et calcul des transferts d'eau du fleuve au lac nécessaires pour assurer cette évolution.

Lorsque la jonction fleuve - lac est interrompue, le modèle GIL calcule le niveau moyen du Guiers comme une résultante des différents pompages sur son pourtour et de l'évaporation. La réserve lacustre peut également être soumise à des fluctuations annuelles de niveau tenant compte aussi bien du calendrier cultural que des exigences d'assèchement de la végétation aquatique. Les apports d'eau fluviale au lac peuvent également être planifiés en cours d'année en tenant compte des besoins des différents utilisateurs des eaux lacustres et de la disponibilité de l'eau dans le fleuve.

Ces différentes options de gestion sont dès à présent imposables en cours d'année. Leur mise en œuvre est assujettie à deux types de contraintes liées aux niveaux minimum et maximum des eaux et à la durée maximale du remplissage. Diverses combinaisons peuvent être envisagées en cours d'année.

Après avoir défini tous les paramètres, le modèle calcule, à un pas de temps journalier, l'évolution quantitative et qualitative du lac en fonction des différents paramètres entrées - sorties et de l'option de gestion choisie au préalable.

1.2. Validation du modèle GIL

Le modèle GIL, utilisable actuellement sur cinq années hydrologiques et sur des paramètres tels que les chlorures et la salinité moyenne des eaux, calcule jour par jour la teneur moyenne dans le lac de l'élément dissous, sur la base des entrées et sorties du stock de ce même élément.

Le modèle a d'abord été testé sur la période 1990-1994 (figure 74). L'évolution théorique de la salinité moyenne du lac calculée par le modèle est comparée avec les données hebdomadaires de la salinité mesurées au Laboratoire de la SDE à la station de Ngnith.

Entre 1990 et 1991, les phases de remplissage et d'isolement du lac sont bien marquées. En période de remplissage, on remarque un léger décalage entre la salinité mesurée et celle calculée à l'aide du modèle. Ce décalage serait lié aux délais d'homogénéisation des eaux alors que le modèle la considère comme instantanée.

A partir de 1992, la jonction entre le lac et le fleuve est devenue presque permanente. L'augmentation et la constance des apports d'eau douce au lac réduit considérablement le cycle annuel de la minéralisation.

La corrélation entre la salinité mesurée sur le terrain et celle calculée à l'aide du modèle est de 0,85 ; il démontre l'applicabilité du modèle dans le cadre de la prévision de l'évolution qualitative future des eaux. Cependant, malgré sa fiabilité, le modèle en est encore au stade expérimental. Son champ d'application devra être étendu à tous les éléments dissous mesurables dans les eaux du lac de Guiers, notamment certaines formes du phosphore et de l'azote dissous mises en cause dans l'évolution du niveau trophique en milieu lacustre.

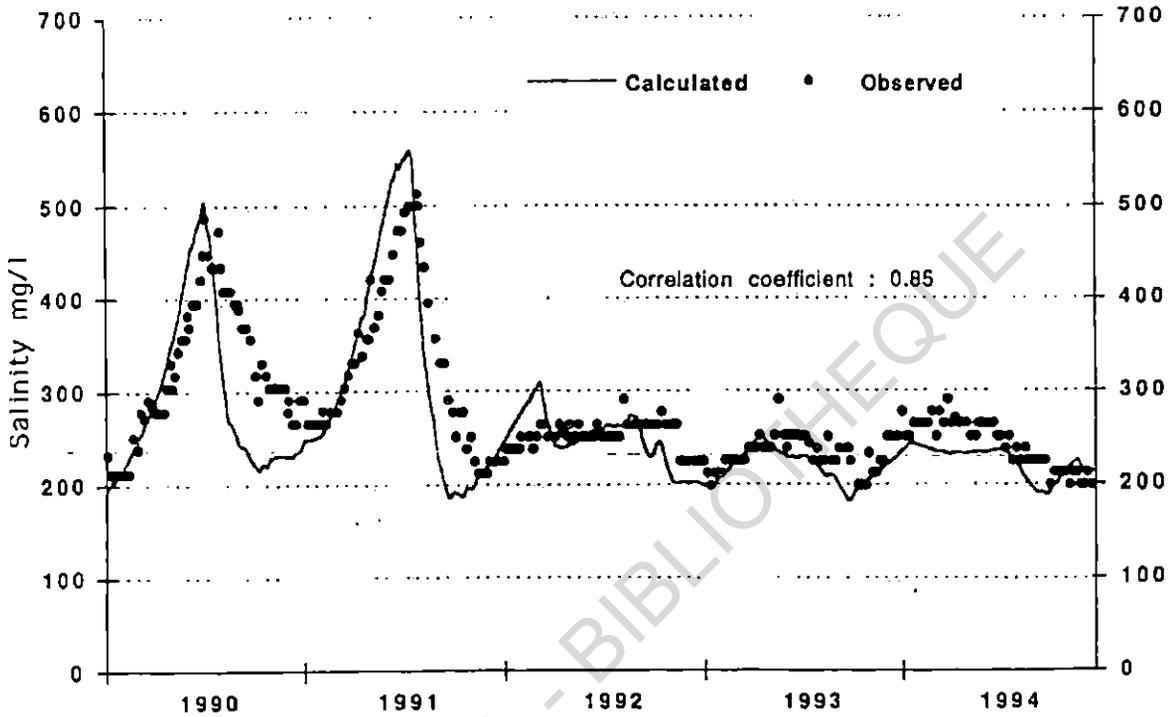


FIGURE 74. — Évolution de la salinité moyenne des eaux du lac de Guiers : comparaison des mesures de terrain aux données issues du modèle GIL (1990-1994)

Le modèle GIL permet également d'établir le bilan quantitatif et qualitatif des paramètres entrées et sorties du bilan hydrologique du Guiers. L'exemple ci-après présente le bilan moyen des entrées et sorties d'eau et de sels dissous pour la période 1990-1994 (figure 75).

Le constat majeur à ce niveau est que le stock de sels dissous dans le lac est régulé pour l'essentiel par les rejets d'eau de drainage des casiers CSS au nord, avec 58% des apports et les lâchers vers la vallée du Ferlo à l'extrême sud, avec 67 % des pertes. En effet, les apports des rejets CSS et les pertes via le Ferlo sont approximativement équilibrés, à raison de 35 000 tonnes par an en moyenne. Mais le fait que la salinité soit plus élevée en région sud explique clairement l'impact de ce paramètre sur la qualité moyenne du plan d'eau du Guiers.

Avec 89 % du total du bilan des entrées d'eau et 40 % des apports de sels dissous, les apports du fleuve Sénégal sont aussi un paramètre clé dans la compréhension de l'évolution qualitative des eaux.

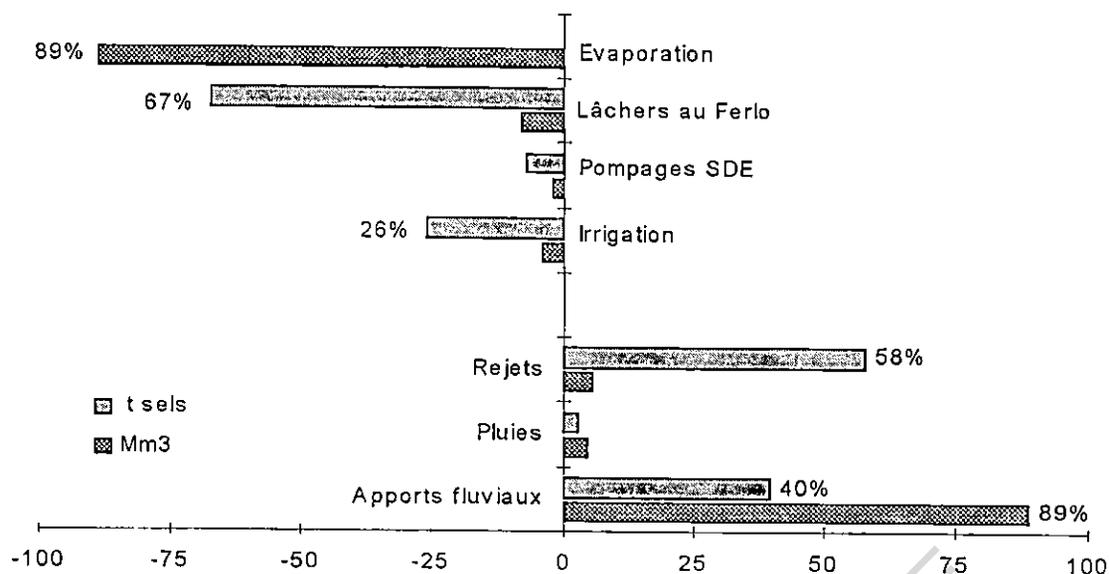


FIGURE 75. — Bilans quantitatif et qualitatif moyens annuels (période 1990-1994) des différents paramètres du bilan hydrologique (%)

Dans sa configuration actuelle, le modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers permet de décrire et d'expliquer l'évolution récente des eaux du lac, de déterminer l'impact de telle ou telle option de gestion des eaux dans le cadre des interventions futures susceptibles de perturber l'écosystème.

Le modèle GIL permet également de déterminer le rôle de paramètres tels que les rejets de la CSS ou les lâchers d'eau vers le Ferlo sur l'évolution présente et future de la salinité des eaux dans le Guiers. Il devra être amélioré et testé sur d'autres éléments chimiques dissous pour mieux s'adapter aux conditions hydrologiques futures du lac de Guiers, particulièrement si les projets canal du Cayor et remise en eau du Ferlo se réalisaient.

2. FACTEURS DETERMINANTS DE LA QUALITE DES EAUX DU LAC DE GUIERS

Le stock des éléments minéraux dissous dans les eaux du lac de Guiers n'a fondamentalement pas baissé depuis la mise en fonction du barrage de Diama. C'est en tout cas ce qui ressort de l'une des premières applications du modèle GIL (figure 75). La poursuite des apports de sels via le fleuve Sénégal et le drainage des parcelles de la CSS explique en grande partie ce phénomène. Les lâchers au Ferlo intervenus saisonnièrement depuis 1988, puis en permanence à partir de 1992, permettent l'évacuation d'environ 35 000 tonnes de sels dissous par an et d'équilibrer le bilan.

L'étude de l'évolution qualitative des eaux du Guiers par le modèle GIL prouve que ces trois éléments sont déterminants dans le cadre de la gestion des eaux. A eux seuls, ils expliquent environ 90 à 95 % de la salinité des eaux à un moment donné. La prise en compte de ces facteurs dans le cadre de la modélisation des eaux se révèle donc primordiale, pour quantifier et pour simuler les impacts de telle ou telle option de gestion de la réserve lacustre.

2.1. Les apports du fleuve Sénégal

Le fleuve Sénégal apporte annuellement 90 % environ des ressources en eau du lac de Guiers. A ce titre, il joue un rôle qualitatif certain, notamment par le biais des phénomènes saisonniers de dilution et de concentration des eaux dans la réserve lacustre. Le rôle du fleuve était certes beaucoup plus important avant la construction du barrage de Diama, à cause du jeu des ouvertures et fermetures des pont-barrages au niveau de la Taoué, mais aussi à cause de l'invasion marine annuelle. Le fleuve apportait en moyenne 7 mg.l^{-1} de chlorures dissous pour un volume moyen annuel de 500 millions de m^3 .

Après la mise en service du barrage de Diama, les eaux du fleuve Sénégal, parce que isolées de l'influence maritime, restent douces toute l'année. Depuis 1992, la jonction permanente entre le fleuve et le lac de Guiers au niveau de la Taoué complique bien évidemment la compréhension du poids de ce paramètre sur l'évolution qualitative des eaux.

Les apports fluviaux sont difficiles à quantifier, du fait de l'absence d'équipements limnimétriques automatisés au niveau de la Taoué ; ils sont estimés à partir des équations du bilan hydrologique. La moyenne des apports fluviaux entre 1976 et 1994 est de 523 millions de m^3 . Dans les années à venir, les apports fluviaux verront sûrement leur volume doubler, sinon tripler, pour permettre à la réserve de faire face aux demandes de ses utilisateurs. Pour l'instant, leur impact semble minime par rapport à ce qu'il a été dans le passé et à ce qu'il risqué de devenir dans un futur très proche.

2.2. Les rejets d'eaux de drainage de la CSS

La CSS rejette directement ses eaux usées dans le lac aux deux stations de drainage situées aux deux extrémités nord (stations X6 et Thiago). Ces eaux, en général très chargées en minéraux dissous (en moyenne 300 mg.l^{-1} de chlorures, soit 8 500 tonnes environ par an), contribuent à la détérioration de la qualité des eaux et à l'augmentation du stock des éléments dissous dans le lac.

Avant la mise en fonction du barrage de Diama, l'évolution de la concentration en chlorures dissous dans le lac ne dépendait que des pompages pour l'irrigation, des rejets de la CSS (figure 76) et de l'évaporation (plus de 80 % des pertes du bilan hydrologique). Les pompages de la CSS contribuaient à réguler le stock de cet élément dans le lac ; situation qui ne prévaut plus de nos jours.

Le stock de chlorures dans le lac lors de la période 1979-1982 reste inférieur à celui que l'on enregistre en 1989-1992 ; ce phénomène s'explique essentiellement par la poursuite des rejets de la CSS dans le lac alors que les pompages pour l'irrigation de la canne à sucre se font désormais exclusivement dans le fleuve Sénégal. Cependant, on note qu'à partir de 1992, ce stock tend à se stabiliser et même à baisser du fait de la jonction permanente entre le lac et le Ferlo.

Les nouvelles conditions hydrologiques depuis la mise en service du barrage de Diama ont donc entraîné une évolution nouvelle du stock d'éléments dissous. Les fortes baisses périodiques observées sur le stock correspondent aux périodes des lâchers d'eau vers le Ferlo ; en dehors de ces périodes, son augmentation est rapide. Il est ainsi passé de 76 000 tonnes entre 1979 et 1982 à 84 000 tonnes environ aujourd'hui. Les lâchers au Ferlo ont donc repris le rôle de régulateur qualitatif, auparavant tenu par les rejets CSS.

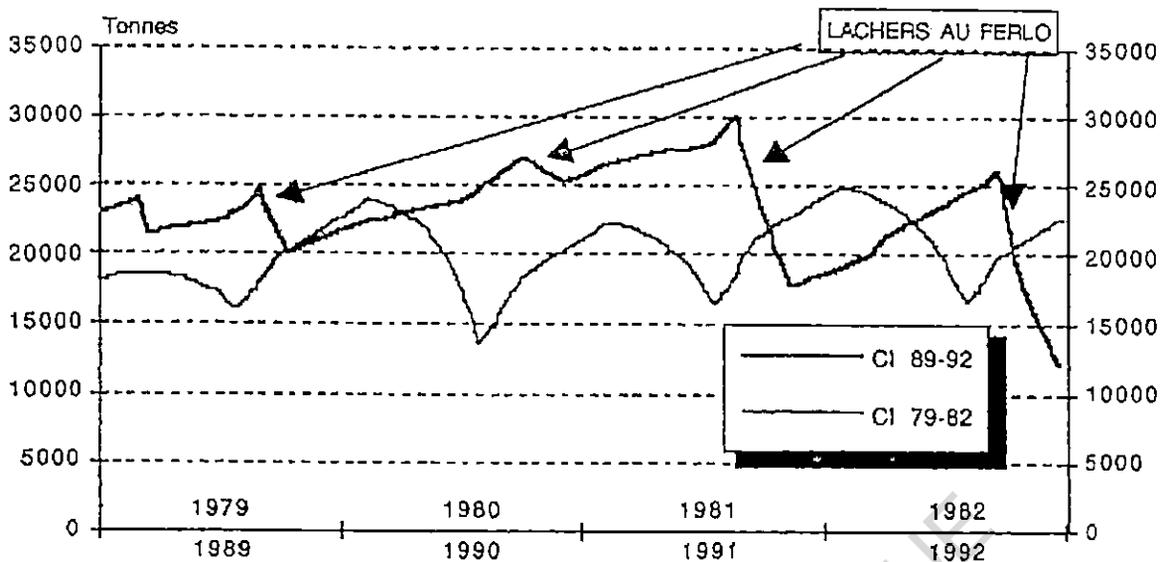


FIGURE 76. — Évolution simulée du stock des chlorures dans le lac de Guiers avant et après la mise en fonction du barrage de Diama. (source : COGELS et al., 1994).

2.3. Les lâchers d'eaux vers le Ferlo

Les lâchers d'eaux vers la vallée fossile du Ferlo avaient été entrepris pour la première fois en septembre 1988, à la demande de la SONEES, confrontée alors à une trop mauvaise qualité de l'eau au niveau de la station d'exhaure de Ngnith. Ils avaient pour but de dessaler les eaux de la partie sud du lac et permettre ainsi un meilleur usage des eaux. Suite aux bons résultats obtenus, ils se sont poursuivis les années suivantes, jusqu'en 1992 où la jonction entre le lac et le Ferlo a été maintenue en permanence.

Pour démontrer le rôle de ces lâchers au Ferlo, quatre simulations ont été effectuées ; celles-ci sont basées sur l'évolution du taux de chlorures des eaux entre 1989 et 1992. La relation existant entre le taux de chlorures et la salinité (Cf. Chapitre I) permet d'extrapoler les résultats de ces simulations à la salinité globale du lac.

Ces quatre options de gestion sont définies comme suit (figure 77) :

- option 1 : situation réelle 1989-1992 avec rejets CSS (V3) et lâchers au Ferlo (V4) ;
- option 2 : simulation sans lâchers au Ferlo mais avec rejets CSS ;
- option 3 : simulation sans lâchers au Ferlo ni rejets CSS ;
- option 4 : simulation avec lâchers au Ferlo mais sans rejets CSS.

Entre 1989 et 1992 (option 1), le stock de chlorures a diminué de près de 50 % ; on constate donc un effet bénéfique des lâchers au Ferlo.

Pour la même période, la suppression des lâchers au Ferlo (option 2) induirait un doublement du stock de chlorures dissous en quatre ans, sous l'effet des rejets de la CSS.

Un arrêt simultané des rejets CSS et des lâchers au Ferlo (option 3) ne permettrait qu'une baisse de 8 % du taux de chlorures dissous sur quatre ans ; baisse qui ne serait due qu'aux divers pompages autour du lac.

La suppression des rejets CSS et le maintien des lâchers au Ferlo (option 4) entraînerait une diminution du stock de l'ordre de 70 %. Cette dernière option de gestion nous paraît la mieux indiquée dans le contexte actuel du lac de Guiers ; elle présente l'avantage de pouvoir agir de manière positive sur la minéralisation globale des eaux.

Ces quatre simulations permettent de comprendre les effets potentiels du canal du Cayor et de la remise en eau du Ferlo. Ces deux aménagements sont prévus pour être alimentés à partir du sud du lac, zone la plus minéralisée ; ils vont mobiliser annuellement plusieurs millions de m³ d'eau et auront de ce fait un énorme impact sur la réserve lacustre. Leur effet sur la minéralisation des eaux du lac sera sans conteste positif.

Si l'on considère que le stock moyen actuel de sels dissous dans le lac est d'environ 110 000 tonnes, il est clair que la gestion hydrologique a une incidence majeure sur l'évolution qualitative des eaux. Un scénario de gestion basé sur une suppression des lâchers au Ferlo pourrait entraîner un doublement de la salinité du lac en quatre à cinq années. Une gestion intégrée du réservoir lacustre se justifie pleinement.

Dans la compréhension du comportement des éléments dissous dans le lac de Guiers, les éléments fondamentaux sont les rejets des eaux de drainage et les lâchers d'eau saisonniers vers le Ferlo. Le modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers permet aujourd'hui d'en évaluer les effets sur la gestion de la réserve et même d'en simuler les conséquences potentielles dans un futur plus ou moins proche. La priorité sera désormais de caler le modèle sur d'autres éléments dissous supposés avoir plus d'impacts sur le comportement hydrobiologique des eaux (notamment certaines formes de l'azote et du phosphore).

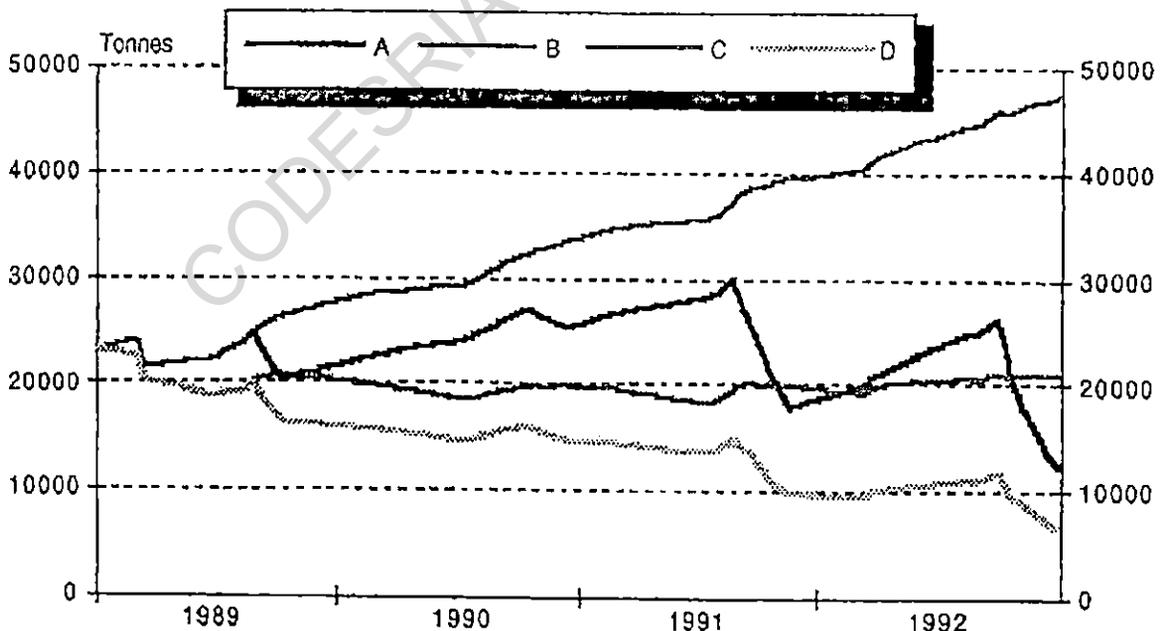


FIGURE 77. — Evolution simulée du stock de chlorures suivant quatre options de gestion du lac de Guiers.

3. QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DU MODELE GIL

Le modèle GIL désormais opérationnel peut être utilisé dans le cadre de la gestion intégrée des eaux du lac. La prise en compte de l'alimentation du Ferlo et des besoins théoriques du futur canal du Cayor est une de ses forces.

Quatre simulations seront présentées pour donner une idée des possibilités qu'offre cet outil. Il s'agit à chaque fois, à partir de données de base précises, de calculer pour le lac une évolution limnimétrique déterminée et de suivre en même temps l'évolution de la salinité. Ces simulations reposent sur deux types de gestion annuelle du lac : soit imposer des variations de niveau en cours d'année, soit le maintenir à un niveau constant. La présentation des critères de gestion de la réserve lacustre permet de comprendre la pertinence de ces simulations.

3.1. Critères de gestion de eaux du lac de Guiers

La gestion des eaux de la réserve lacustre du Guiers doit obéir à des critères liés à la prise en compte des exigences de différentes activités se déroulant sur son pourtour (COGELS *et al.*, 1997). Il s'agit essentiellement des cultures irriguées, de cultures de décrue, de la production d'eau potable, de l'alimentation en eau du Ferlo, des besoins prévisionnels du futur canal du Cayor et de la flore et faune aquatique. Dans la gestion de la réserve lacustre, il faudrait aussi tenir compte de critères de rentabilité des ouvrages hydrauliques.

Les cultures irriguées

Il s'agit essentiellement des casiers de canne à sucre de la CSS au nord du lac. Avant la mise en fonction du barrage de Diama, ces cultures étaient alimentées en eau à partir du Guiers, en période d'isolement du lac. Ceci permettait à la CSS de soustraire ses cultures de l'influence de la langue salée. Depuis 1985, la remontée de la langue salée étant définitivement éliminée, les pompages de la CSS se font presque exclusivement à partir du fleuve. Le bilan hydrologique du lac s'en est trouvé amélioré.

Actuellement, 700 ha de canne à sucre (sur un total de 8 000 ha) sont irrigués à partir du lac. Par contre le rejet des eaux de drainage des parcelles de canne se poursuit aux deux stations situées aux extrémités nord du lac.

Des périmètres sous gestion SAED sont également alimentés en eau à partir du lac. Il s'agit de 1 000 ha de riz cultivés en hivernage et en contre-saison.

Les besoins des cultures irriguées sont autant quantitatives que qualitatives, de manière à obtenir un rendement optimal des investissements consentis : une salinité trop élevée n'est pas souhaitable, de même que des déficits d'alimentation en eau en cours d'année peuvent compromettre les rendements. Une bonne connaissance des besoins des cultures irriguées s'avère donc nécessaire.

Les cultures de décrue

Les cultures de décrue étaient pratiquées sur le pourtour du lac dès le retrait de l'onde de crue. Elles permettaient à quelques populations riveraines de disposer de ressources vivrières complémentaires, les rendements de l'agriculture pluviale étant très faibles. L'élévation progressive du niveau du plan d'eau du Guiers depuis la mise en service du barrage de Diama a entraîné l'abandon progressif de ce type de mise en valeur. Cet abandon tient surtout à l'augmentation de la surface du plan d'eau et à la stabilisation des niveaux limnimétriques.

□ La rentabilisation des aménagements hydrauliques

Si l'on considère le rapport entre les apports fluviaux et le taux d'utilisation des eaux du Guiers, il est évident que la réserve lacustre est remplie à des niveaux plus élevés que ce qui est strictement nécessaire à la bonne marche des installations présentes le long de ses rives. Le taux d'utilisation des eaux tourne généralement autour de 15 - 18 %, y compris l'alimentation du Ferlo (COGELS *et al.*, 1997). Les 85 à 82 % restants sont évaporés soit directement dans le lac, soit dans la basse vallée du Ferlo.

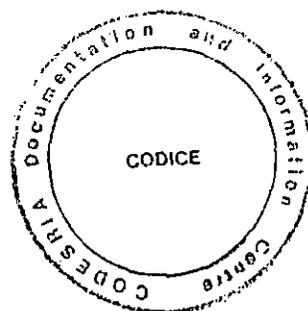
Imposer au lac des variations annuelles de niveau est chose aisée. L'eau du fleuve est en effet disponible toute l'année pour l'alimentation du lac ; une gestion stricte des ponts-barrages de la Taoué peut être appliquée pour réguler les apports. Cependant, il s'avère nécessaire d'installer des stations de mesure du débit aux deux extrémités du canal de la Taoué. Ceci permettrait d'établir le lien entre le niveau d'eau du lac et le volume des apports fluviaux et de calculer donc le volume précis des eaux transitant par la Taoué.

A titre d'exemple, avant l'entrée en fonction du barrage de Diama en 1985, le niveau du lac pouvait varier de 2,00 m en fin de phase de remplissage (début octobre) à 0,50 m dix mois plus tard, avant le remplissage suivant. Les eaux se retiraient en moyenne de 400 à 500 m ; chaque année, c'était quelque 70 km² de rives qui étaient exondées permettant ainsi la pratique des cultures de décrue et l'assèchement d'une bonne frange de la végétation aquatique.

Depuis 1991, la jonction est permanente entre le lac et le fleuve qui lui même a vu ses niveaux se stabiliser depuis la mise en fonction du barrage de Diama. La gestion actuelle contribue à l'accélération d'effets néfastes comme la croissance rapide de la végétation aquatique, le développement des mollusques et l'abandon de la culture de décrue.

Ceci pose le problème d'une gestion stricte et rationnelle des eaux du lac de Guiers et impose comme mesure urgente la définition d'objectifs précis en matière de rentabilisation des aménagements hydrauliques.

Les variations du niveau d'eau en cours d'année dans la réserve du Guiers paraissent être le meilleur moyen pour concilier les différentes activités qui sont menées sur son pourtour avec l'environnement lacustre.



3.2. Données de base des simulations

Les simulations effectuées dans le cadre de cette étude sont basées sur des paramètres quantitatifs et qualitatifs soit constants, soit variables en cours d'année (tabl. XXXIII).

TABLEAU XXXIII
Simulations GIL : données de base

GESTION DES BARRAGES	
Jonction fleuve – lac	oui
Jonction lac – Ferlo	oui
NIVEAU LIMNIMETRIQUE	
H lac j1	1,75 m
H lac maximum	2,00 m
H lac minimum	0,75 m
Débit maximal à l'entrée de la Taoué	10,00 Mm ³ .j ⁻¹
Nombre de jours de remplissage	45 jours
CULTURES IRRIGUEES	
cultures CSS	700 ha
Riz d'hivernage	1 000 ha
Riz de contre saison	1 000 ha
PARAMETRES CONSTANTS	
Volumes rejets	0,11 Mm ³ .j ⁻¹
Pompages SDE	0,04 Mm ³ .j ⁻¹
Pompages canal du Cayor	0,50 Mm ³ .j ⁻¹
APPORTS EN SELS DISSOUS	
Tonnage de sel au 1 ^{er} janvier	100 000 tonnes
q V1	55 mg.l ⁻¹
q V2	800 mg.l ⁻¹
q V3	3 mg.l ⁻¹

Gestion des barrages

La gestion des ouvrages hydrauliques dans le cadre des quatre simulations effectuées est basée sur l'existence d'une jonction permanente et/ou temporaire entre le fleuve et le lac d'une part et entre le lac et le Ferlo d'autre part.

La régulation des apports fluviaux se fait par un jeu d'ouvertures et de fermetures des ponts barrages de Richard-Toll et de Ndombo sur la Taoué, au nord du lac. Les lâchers au Ferlo sont contrôlés à partir de la digue de Keur Momar Sarr à l'extrême sud.

□ Niveau limnimétrique

Le modèle est conçu pour des hauteurs d'eau dans le lac et le Ferlo de -1,00 m IGN à 3,00 m IGN. Une cote maximale de 2,00 m IGN est imposée pour respecter la contenance des endiguements actuels tandis que la cote minimale de 0,75 m IGN répond aux exigences des autres utilisateurs des eaux. Toutes les simulations partent d'un niveau de 1,75 m IGN au premier janvier.

Une durée maximale de remplissage de 45 jours est imposée pour rester conforme au temps de remplissage que l'on notait au lac avant l'entrée en fonction du barrage de Diama.

□ Données volumétriques

Le modèle GIL prend en compte les apports et pompages de différents utilisateurs de eaux du lac.

- Le débit journalier maximal transitant par le Taoué est calé à 10 Mm^3 ; il est basé sur la formule générale du débit dans le canal de la Taoué qui elle-même est fonction de la différence de niveau entre le fleuve et le lac, les transferts fleuve - lac étant considérés comme impossibles.
- Le volume des apports pluviométriques entrant dans le lac tient compte de l'apport direct et du ruissellement (coefficient de ruissellement de 10%) sur le bassin versant exondé limité à la cote 4 m. Les apports pluviométriques sont considérés comme nuls dans le cadre de ces quatre simulations.
- Les rejets d'eaux de drainage en provenance des casiers sucriers de la CSS se font à un rythme quotidien de $0,11 \text{ Mm}^3$; leur volume est obtenu par lecture des compteurs aux deux stations de rejet situées aux deux extrémités nord du lac ;
- Les volumes quotidiens pompés pour l'irrigation concernent les surfaces exploitées en riz d'hivernage (1 000 ha), riz de contre saison (1 000 ha) et en canne à sucre (700 ha) ; ils sont calculés à partir des besoins en eau des cultures.
- Les volumes journaliers des pompages de la SDE ($0,04 \text{ Mm}^3$) et du canal du Cayor ($0,50 \text{ Mm}^3$) sont considérés comme constants. Le canal est approvisionné au départ de la digue de Keur Momar Sarr, indépendamment des lâchers au Ferlo.
- Les débits quotidiens des lâchers d'eau du lac vers le Ferlo sont calculés directement par le modèle ; les transferts au Ferlo permettent les variations de volume du lac et compensent les pertes par évaporation. En phase d'isolement du Ferlo, le niveau d'eau dans le Ferlo est calculé sur la base d'un bilan limnimétrique quotidien ne prenant en compte que les hauteurs d'eau évaporées et le volume des apports pluviométrique. Les données d'évaporation standard quotidiennes sont identiques à celles du lac. La même pluviométrie est également prise en compte. Le Ferlo est considéré comme asséché lorsqu'il atteint une cote de -0,30 m IGN.
- Les volumes quotidiens évaporés sont calculés par le modèle sur la base des évaporations quotidiennes type et de la surface du lac au jour correspondant.

□ Apports en sels dissous

Les paramètres qualitatifs sont calés d'après les données issues de l'étude physico-chimique des eaux (Cf. Chapitre I) et les mesures effectuées sur le terrain.

Le stock de sels dissous est fixé à 100 000 tonnes au 1^{er} janvier. La salinité moyenne des apports fluviaux est de 55 mg.l⁻¹ ; celle des rejets CSS de 800 mg.l⁻¹ ; les eaux de pluies ont une concentration moyenne en sels dissous de 3 mg.l⁻¹. La salinité des eaux d'irrigation est considérée comme équivalente à la moyenne du lac

3.3. Gestion du lac avec variations de niveau en cours d'année

L'objectif des simulations est de tester une gestion du lac de Guiers avec des variations du niveau de l'eau en cours d'année. Il s'agit en quelque sorte de recréer les conditions limnimétriques qui prévalaient avant la mise en fonction du barrage de Diama et d'en déduire l'impact sur la salinité des eaux.

Deux options sont présentées ; la première prend en compte les lâchers au Ferlo et les pompages du canal du Cayor tandis que la deuxième ignore les besoins de ce dernier. Ces deux alternatives de gestion permettent de mesurer les effets respectifs de ces deux paramètres sur le bilan qualitatif des eaux de la réserve lacustre. Les données de base utilisées dans ces deux simulations sont présentées au tableau XXXIII.

3.3.1. Option 1

Cette première simulation couvre une année civile complète, soit du 1^{er} janvier au 31 décembre, avec deux phases hydrologiques distinctes et imposées en cours d'année : une phase d'isolement du 1^{er} janvier au 30 avril et du 1^{er} octobre au 31 décembre ; une phase de remplissage du 1^{er} mai au 30 septembre.

L'évolution hydrochimique suivante est calculée (figure 78) :

- partant d'un niveau imposé de 1,75 m IGN au 1^{er} janvier, la cote lacustre est décroissante jusqu'au 30 avril où elle atteint 1,00 m ; les apports fluviaux sont nuls durant cette période ; la salinité passe de 170 (taux de salinité au 1^{er} janvier) à 225 mg.l⁻¹ au même moment ;
- à partir du 1^{er} mai, l'intervention des apports fluviaux, à raison de 2,5 Mm³.j⁻¹ environ, maintient le niveau lacustre à la cote 1,00 m jusqu'aux environs du 15 juillet ; la salinité atteint 175 mg.l⁻¹ ;
- entre le 15 juillet et le 30 septembre, les apports fluviaux atteignent leur débit maximal, soit 10 Mm³.j⁻¹ permettant une remontée de niveau du plan d'eau qui atteint la cote maximale de 1,98 m IGN en fin de phase de remplissage ; la baisse de la salinité est alors très forte, elle est 100 mg.l⁻¹ en fin septembre ;
- dès le 1^{er} octobre et jusqu'à 31 décembre, la jonction fleuve - lac est fermée ; le niveau baisse sous l'effet des divers pompages et de l'évaporation, la cote lacustre est de 1,21 m IGN au 31 décembre ; la salinité augmente de nouveau pour atteindre 131 mg.l⁻¹.

Durant l'année hydrologique, la cote moyenne du lac calculée est de 1,21 m pour une salinité moyenne de 132 mg.l⁻¹.

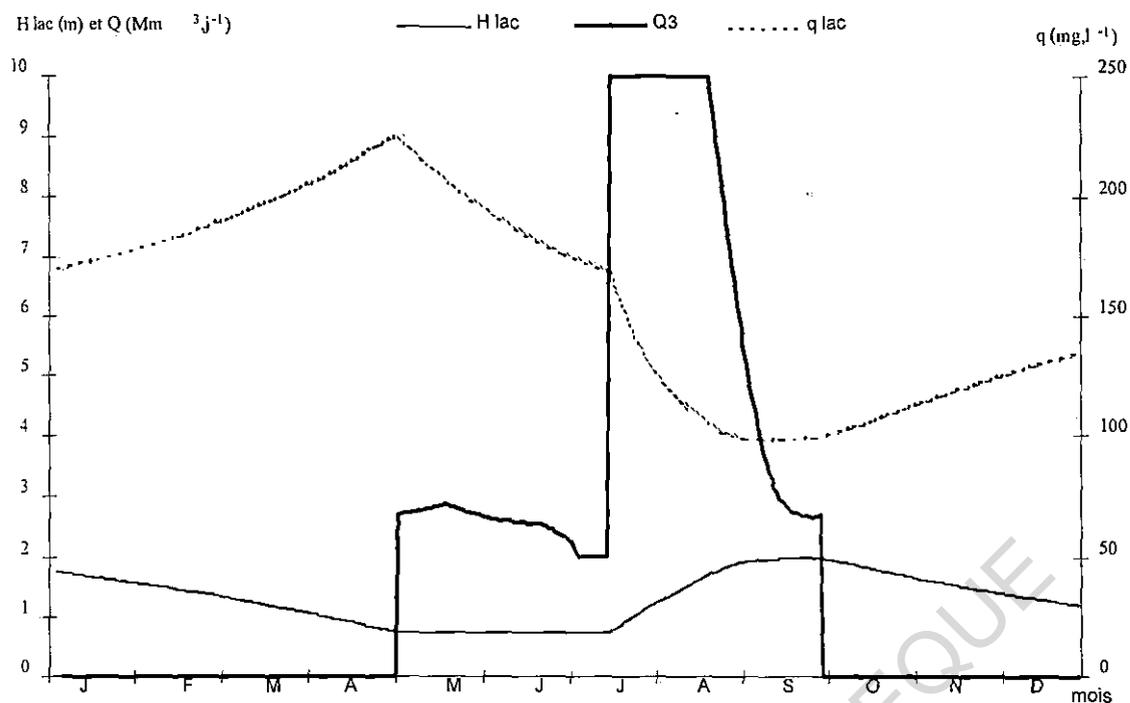


FIGURE 78. — *Gestion du lac avec variations de niveau (option 1). Evolution du niveau lacustre, des volumes fluviaux et de la salinité*

Le tableau XXXIV et la figure 79 présentent les bilans hydrologique et chimique issus de la simulation. Les volumes d'eaux fluviales nécessaires pour assurer l'évolution limnimétrique imposée en cours d'année est $743 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$. Les pertes en eau se chiffrent à un total de $932 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ dont 62 % (582 Mm^3) sont évaporés. Les 38 % restants sont répartis entre les pompages pour l'irrigation (88 Mm^3), les pompages de la SDE (16 Mm^3), les lâchers au Ferlo (64 Mm^3) et l'alimentation du canal du Cayor (183 Mm^3). Le bilan hydrologique présente un déficit de -149 Mm^3 en fin d'année.

Le bilan qualitatif montre une forte baisse du stock de sels dissous qui, calé à 100 00 tonnes au 1^{er} janvier, enregistre au 31 décembre un déficit de 41 545 tonnes. Les apports en sels dissous sont de 72 979 tonnes dont 56% proviennent du fleuve Sénégal et 44 % des rejets de la CSS. L'évacuation totale de sels dissous se chiffre 114 523 tonnes répartis entre les lâchers au Ferlo (17 %) et les pompages du canal du Cayor (68 %). Le rôle bénéfique des lâchers au Ferlo et du canal du Cayor dans l'amélioration des conditions qualitatives du lac de Guiers est ainsi confirmé.

TABLEAU XXXIV

Gestion du lac avec variations de niveau : bilans hydrologique et chimique

Bilans hydrologique et qualitatif		Volume d'eau (Mm3)		Tonnage de sels dissous (tonnes)	
		Option 1	Option 2	Option 1	Option 2
APPORTS	Fleuve Sénégal	743	616	40 859	33 888
	Rejets CSS	40	40	32 120	32 120
	Pluies	0	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>783</i>	<i>656</i>	<i>72 979</i>	<i>66 008</i>
PERTES	Irrigation	88	88	13 687	18 781
	SDE	16	16	2 418	3 150
	Ferlo	64	72	20 027	45 813
	Canal du Cayor	183	0	78 391	0
	Evaporation	582	589	0	0
	<i>Total</i>	<i>932</i>	<i>764</i>	<i>114 523</i>	<i>67 744</i>
BILAN		-149	-108	-41 545	-1 735

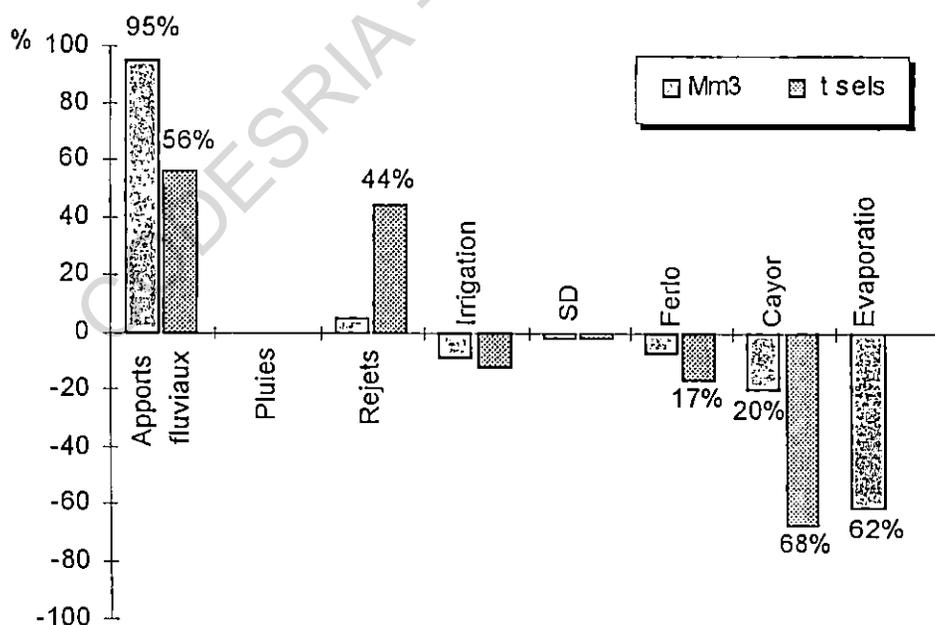


FIGURE 79 — Gestion du lac avec variations de niveau (option 1) : bilans hydrologique et chimique

3.3.2. Option 2

Cette deuxième simulation présente les mêmes caractéristiques que la précédente, à la différence que l'alimentation du canal du Cayor est supprimée. L'année hydrologique se divise également en deux phases : phase de remplissage et phase d'isolement. Le début de la phase de remplissage est cependant décalé de 20 jours par rapport à la première option. L'évolution hydrochimique suivante est calculée (figure 80) :

- du 1^{er} janvier au 20 mai, le lac ne reçoit aucun apport, hormis les rejets d'eaux de drainage de la CSS ; la cote lacustre passe de 1,75 m IGN à 1,00 m IGN environ, la salinité augmente de 170 mg.l⁻¹ à plus de 300 mg.l⁻¹ ;
- du 20 mai au 15 juillet, des apports fluviaux journaliers de l'ordre de 2 Mm³ permettent le maintien de la cote du lac à 1,00 m IGN ; la salinité se stabilise à 300 mg.l⁻¹ ;
- du 16 juillet au 30 septembre, l'augmentation des apports fluviaux permet une baisse de la salinité moyenne du lac qui passe de 300 à 150 mg.l⁻¹, le niveau lacustre remonte : il est de 1,98 m IGN en septembre ;
- entre le 1^{er} octobre et le 31 décembre, la réserve lacustre est de nouveau isolée de l'influence fluviale, la décrue s'amorce, la cote est de 1,36 m IGN au 31 décembre tandis que la salinité moyenne remonte et atteint 200 mg.l⁻¹.

Le niveau moyen annuel du lac de Guiers est de 1,38 m pour un taux de salinité de 213 mg.l⁻¹ respectivement 0,15 m et 57 mg.l⁻¹ de plus que pour l'option précédente.

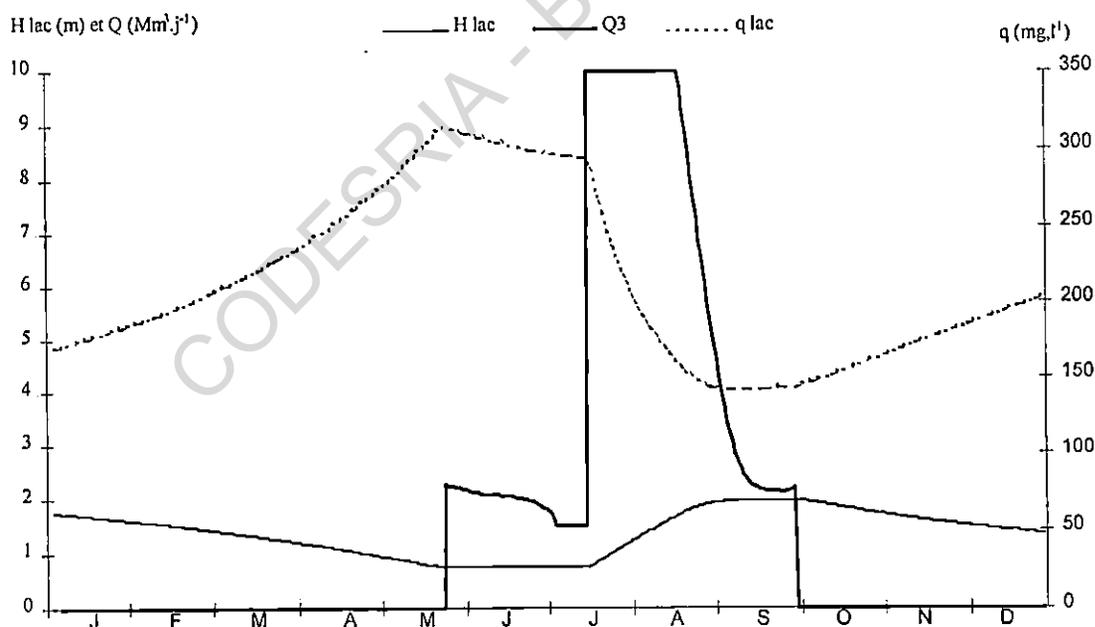


FIGURE 80. — *Gestion du lac avec variations de niveau (option 2)*
Evolution du niveau d'eau, des volumes fluviaux et de la salinité

Le bilan hydrologique (tabl. XXXIV et figure 81) présente un déficit de 108 Mm³. Un volume annuel de 616 Mm³ d'eaux fluviales est nécessaire pour assurer l'évolution limnimétrique imposée au cours de l'année hydrologique. Le total annuel des pertes en eau est de 764 Mm³. A noter la légère augmentation des volumes d'eau évaporés (589 Mm³) en cours d'année et des lâchers au Ferlo (72 Mm³). Cette augmentation s'explique par la suppression de l'alimentation du canal du Cayor.

Les apports en sels dissous au lac de Guiers s'élèvent à 66 008 tonnes dont 51 % en provenance du fleuve Sénégal et 49 % des rejets d'eaux de drainage. L'évacuation annuelle totale de sels dissous se chiffre à 67 744 tonnes, soit environ 10 000 tonnes de moins que pour la première option. La part des lâchers au Ferlo (45 813 tonnes) dans le bilan hydrochimique annuel est renforcée.

Cette alternative de gestion du réservoir lacustre, en dehors du fait qu'elle ne prend pas en compte les besoins du canal du Cayor, se caractérise par une augmentation l'évaporation et de la minéralisation globale des eaux. Le décalage de la date de début du remplissage n'a pas d'effet positif sur l'évolution hydrochimique des eaux. Néanmoins, les impératifs d'une régulation hydrobiologique des eaux sont respectés du fait des variations du niveau de l'eau et de la salinité en cours d'année.

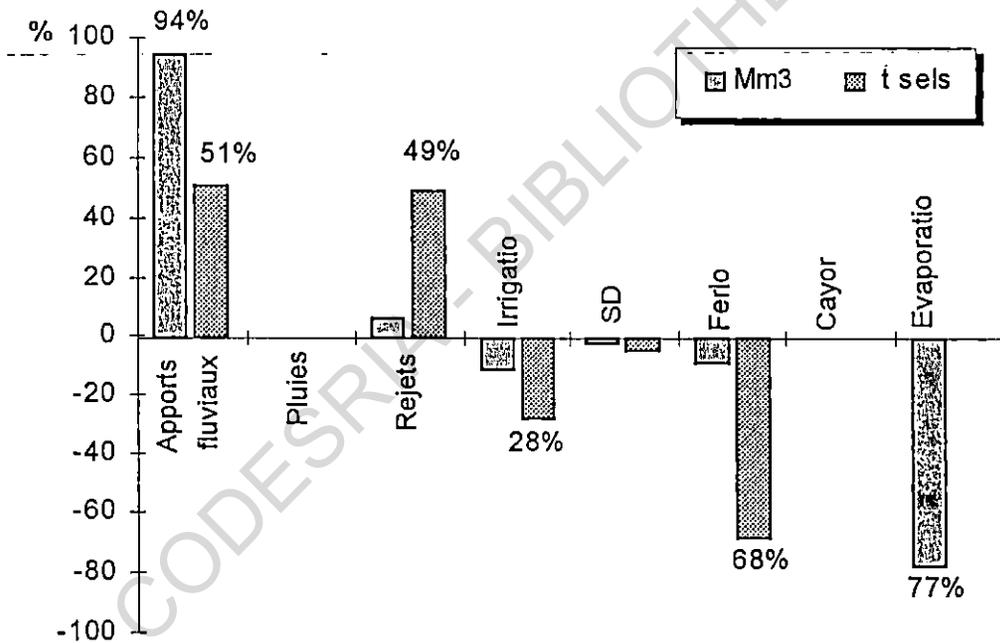


FIGURE 81. — Gestion du lac avec variation de niveau (option 2) : bilan hydrologique et chimique

Les variations de la hauteur et de la salinité de l'eau en cours d'année nous paraît être une bonne option de gestion du plan d'eau. Elle permet de satisfaire les sollicitations actuelles de la réserve lacustre tout en évitant les contraintes qui y prévalaient en fin d'année hydrologique avant 1985. Cette forme de gestion du réservoir lacustre présente également l'avantage d'éviter les remplissages abusifs qui ne servent qu'à accroître sa surface évaporante.

Un autre avantage de ce type de gestion est de permettre la poursuite des cultures de décrue, sans pour autant léser les autres utilisateurs qui à longueur d'année doivent disposer d'une eau en quantité et en qualité suffisante. Elle pourrait être aussi une solution pour lutter contre l'envahissement du plan d'eau par la végétation aquatique et les mollusques pulmonés.

Mais cette option doit être affinée en fonction du comportement des espèces majeures de plantes aquatiques et de mollusques. Par exemple, l'élimination de *Pistia stratiotes* expérimentée au lac par une équipe de chercheurs de l'Institut des Sciences de l'Environnement nécessite six semaines.

L'élimination des mollusques par contre se fait en limitant les pontes qui, elles sont très sensibles à la dessiccation ; la nécessité d'une baisse de 1 cm.j^{-1} a été démontrée à cet effet (LEVEQUE, 1980).

La comparaison entre les deux options de gestion simulée aboutit à un constat majeur : la conjugaison des lâchers au Ferlo avec les pompages pour l'alimentation en eau du canal du Cayor a un effet bénéfique immédiat sur la qualité de l'eau du lac de Guiers.

La suppression de l'alimentation en eau du canal entraîne une augmentation de la salinité moyenne dans la réserve lacustre qui, de 156 mg.l^{-1} dans la première option passe à 213 mg.l^{-1} dans la deuxième.

Du point de vu hydrologique, l'abandon des pompages du canal du Cayor n'a pour effet qu'une augmentation des volumes d'eau évaporés mais aussi un renforcement des lâchers vers la vallée du Ferlo.

3.4. Gestion du lac à un niveau constant

La jonction quasi permanente entre le lac et le fleuve depuis 1991 permet d'envisager une gestion de la réserve lacustre à un niveau constant toute l'année, compte non tenu de l'indice de satisfaction des besoins en eau des différents utilisateurs. Cette forme de gestion présente l'avantage de la simplicité. Maintenir une cote lacustre à 1,75 m suppose uniquement de faire varier les apports fluviaux pour compenser les pompages et l'évaporation en cours d'année. Deux options sont étudiées : la première prend en compte les pompages du canal du Cayor tandis que la deuxième les ignore.

3.4.1. Option 1

Cette première option de gestion du niveau du lac de Guiers à un niveau constant prend en compte les besoins en eau du canal du Cayor estimés en moyenne à 183 Mm^3 par an. Les apports en eaux fluviales connaissent d'importantes variations en cours d'année ; ils permettent de compenser les différents pompages sur le pourtour du variant pour compenser les pertes.

L'évolution annuelle calculée est la suivante (figure 82) :

- du 1^{er} janvier au 15 mai, V1 varie entre 2 et 3,5 Mm³.j⁻¹ ;
- du 15 mai au 30 septembre, moins de sollicitations pour l'eau d'irrigation permet de maintenir la cote imposée avec en moyenne 2 à 2,5 Mm³.j⁻¹ d'eaux fluviales ;
- entre le 1^{er} et le 15 octobre, les apports fluviaux augmentent légèrement et atteignent de nouveau 3,5 Mm³.j⁻¹ ;
- du 16 octobre au 31 décembre, les apports fluviaux décroissent.

La baisse de la salinité est constante du 1^{er} janvier au 31 décembre ; elle passe de 170 mg.l⁻¹ à 123 mg.l⁻¹ pour une moyenne annuelle de 140 mg.l⁻¹.

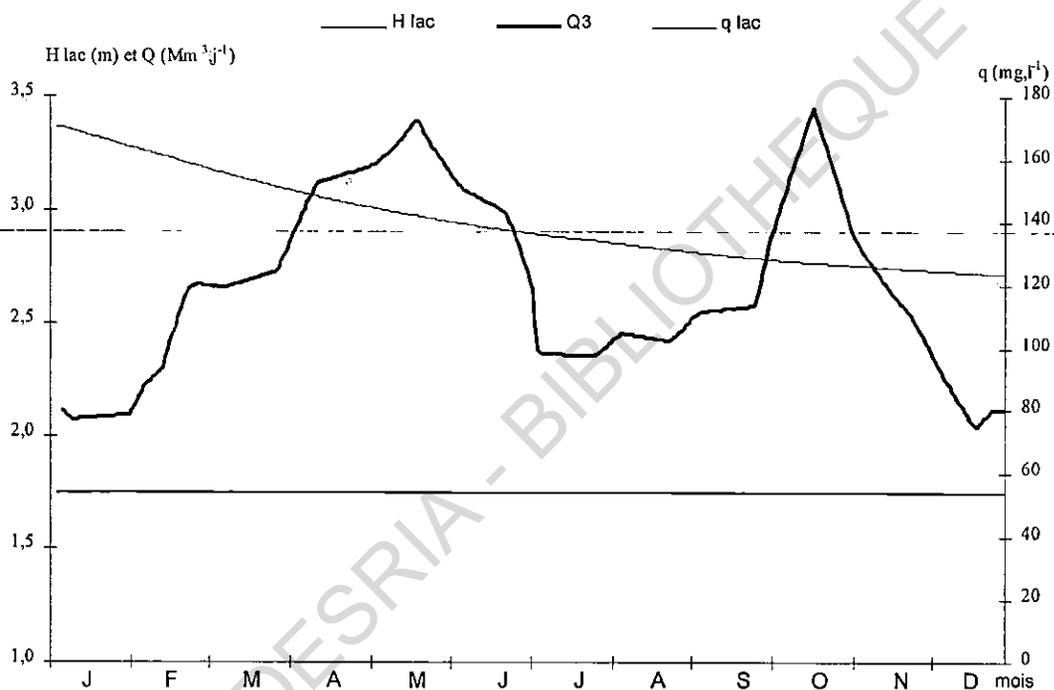


FIGURE 82. — *Gestion du lac à un niveau constant (option 1)*
Evolution du niveau lacustre, des volumes fluviaux et de la salinité

Le bilan hydrologique (tabl. XXXV et figure 83) calculé pour cette option est équilibré ; le total des apports est de 1 016 Mm³ provenant à 96% du fleuve Sénégal. Les pertes totales en eau sont de 1017 Mm³ dont 62% sont évaporés ; l'alimentation du Ferlo (97 Mm³) et celle du canal du Cayor (183 Mm³) représentent respectivement 10 % et 18 % de ces pertes. La part importante de l'évaporation (633 Mm³) est à noter.

Du point de vue qualitatif, on remarque une augmentation des apports de sels dissous en provenance du fleuve Sénégal par rapport aux deux simulations précédentes ; ils s'élèvent à 53 694 tonnes. L'évacuation des sels à la fois vers le Ferlo (30 %) et le canal du Cayor (57 %) porte les pertes annuelles à 113 341 tonnes. Dans une situation pareille, on noterait en fin d'année hydrologique un déficit global de 27 527 tonnes de sels dissous et donc une amélioration de la qualité de l'eau l'année suivante.

TABLEAU XXXV
Gestion du lac à un niveau constant : bilans hydrologique et qualitatif

Bilans hydrologique et qualitatif		Volume d'eau (Mm3)		Tonnage de sels dissous (tonnes)	
		Option 1	Option 2	Option 1	Option 2
APPORTS	Fleuve Sénégal	976	794	53 694	45 657
	Rejets CSS	40	40	32 120	32 120
	Pluies	0	0	0	0
	<i>Total</i>	<i>1 016</i>	<i>834</i>	<i>85 814</i>	<i>75 777</i>
PERTES	Irrigation	88	88	12 118	15 622
	SDE	16	16	2 207	2 701
	Ferlo	97	97	34 402	49 586
	Canal du Cayor	183	0	64 613	0
	Evaporation	633	633	0	0
	<i>Total</i>	<i>1 017</i>	<i>834</i>	<i>113 341</i>	<i>67 909</i>
BILAN		-	-	-27 527	7 868

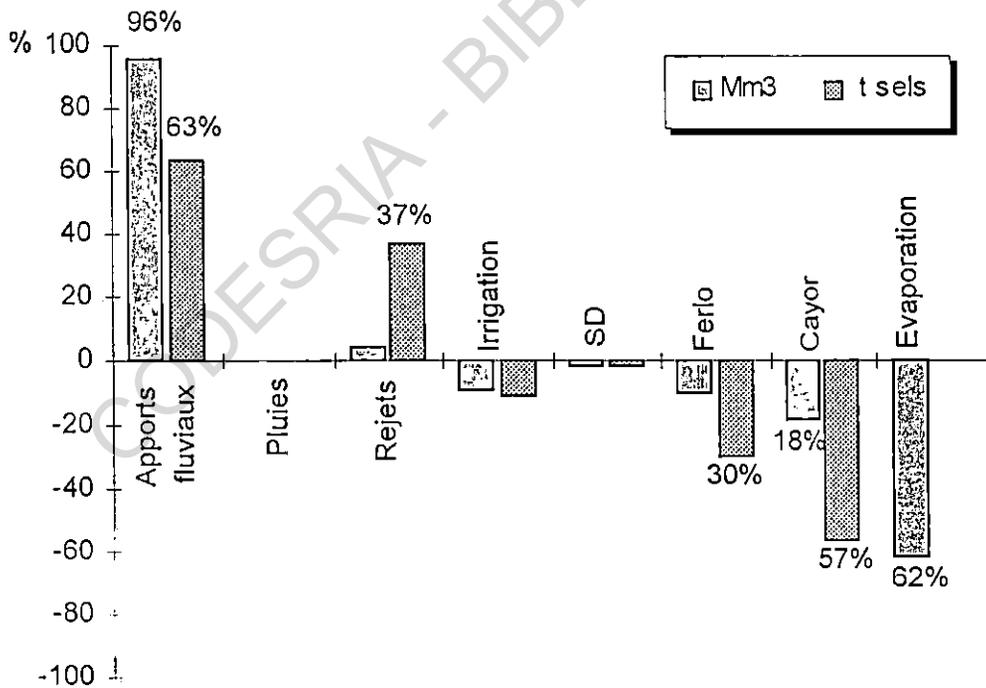


FIGURE 83. — Gestion du lac à un niveau constant (option 1) : bilan hydrologique et chimique.

Cette option de gestion du réservoir lacustre présente l'avantage de permettre une couverture adéquate de tous les besoins en eau sur le pourtour du lac. Elle est envisageable tant que les aménagements hydro-agricoles du bassin du fleuve Sénégal, 200 000 à 250 000 ha de cultures, irriguées ne sont pas opérationnels à 100%. Après cela, les remplissages du lac seront peut-être revus à la baisse. Cette forme de gestion empêche également la mise en œuvre des cultures de décrue, du fait de la stabilité du niveau de l'eau. Elle pourrait aussi entraîner un développement des plantes aquatiques et une prolifération des mollusques qui trouveraient leurs conditions de croissance idéales.

3.4.2. Option 2

Dans cette deuxième option de gestion du réservoir lacustre, la non prise en compte des besoins du canal du Cayor permet de faire baisser les apports fluviaux dont la moyenne journalière est d'environ $2,2 \text{ Mm}^3$. La forme de la courbe d'évolution des apports fluviaux est quasiment identique similaire à ce qu'elle était pour l'option précédente.

L'évolution calculée en cours d'année est la suivante (figure 84) :

- du 1^{er} janvier au 15 mai, les apports fluviaux sont en augmentation, ils croissent de $1,50$ à $3,0 \text{ Mm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$;
- entre le 15 mai et le 31 juillet, les apports fluviaux baissent ; ils atteignent une moyenne de $1,75 \text{ Mm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$;
- du 1^{er} août au 15 octobre, les apports fluviaux croissent ; ils sont de $3 \text{ Mm}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ vers le 15 octobre ;
- du 15 octobre au 31 décembre, le volume des eaux fluviales chute brutalement pour se stabiliser à environ $1,5 \text{ Mm}^3$ en fin d'année hydrologique.

L'augmentation de la salinité est constante en cours d'année. La concentration en sels dissous varie entre $170 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ au 1^{er} janvier et $184 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ au 31 décembre pour une moyenne annuelle de $178 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Cette augmentation de la salinité est due vraisemblablement à la suppression des pompages pour l'alimentation en eau du canal du Cayor.

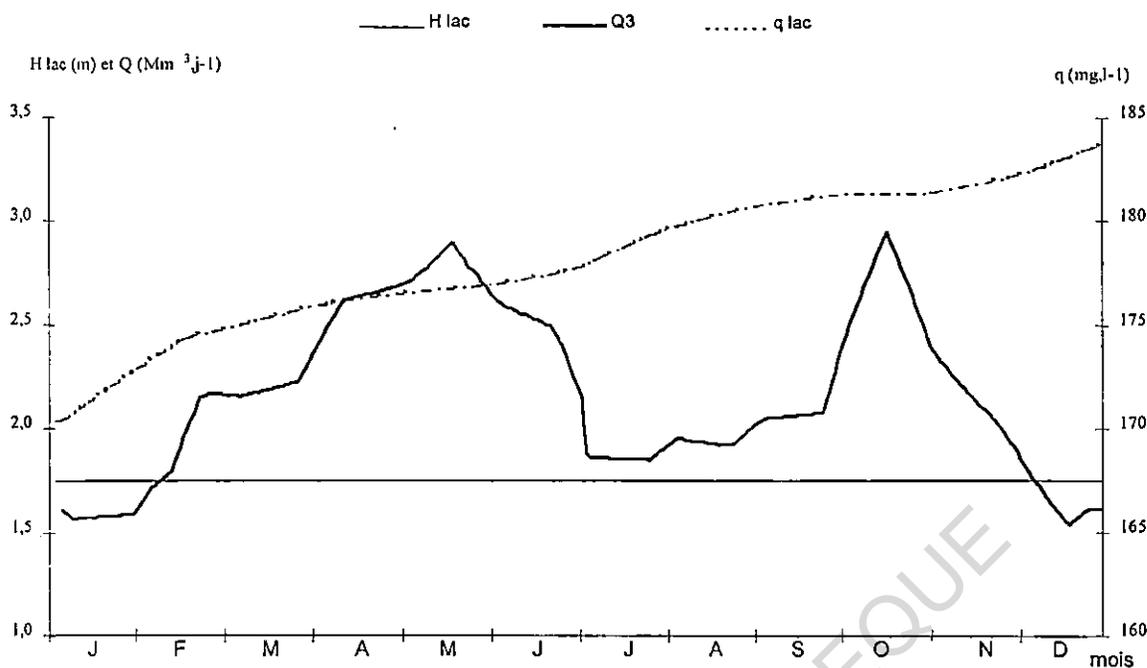


FIGURE 84. — *Gestion du lac à un niveau constant (option 2)*
Evolution du niveau lacustre, des volumes fluviaux et de la salinité

Le bilan hydrologique issu de cette simulation (tabl. XXXV et figure 85) est aussi équilibré. Le volume des eaux fluviales a baissé, il n'est plus que de 794 Mm³ tandis que les volumes évaporés (633 Mm³) et ceux lâchés vers le Ferlo (97 Mm³) sont stables par rapport à la première option.

Le bilan qualitatif indique une nette augmentation des sels dissous dans le lac, de l'ordre de 7 868 tonnes en fin d'année hydrologique. Les apports totaux en sels dissous sont de 75 777 tonnes dont 63 % proviennent du fleuve Sénégal. Le tonnage de sels perdu en cours d'année se chiffre à 67 909 tonnes dont 73 % sont évacués vers le Ferlo. Les prélèvements du canal du Cayor pourrait dans l'avenir contribuer à équilibrer le bilan qualitatif annuel du lac ; ce rôle est actuellement assumé par les lâchers au Ferlo dont a par ailleurs noté l'effet déterminant sur l'évolution de la composition chimique des eaux.

En comparant les résultats des deux options de gestion simulée, on constate à nouveau le rôle joué par les paramètres tels que les lâchers au Ferlo et les pompes pour l'alimentation en eau du canal du Cayor.

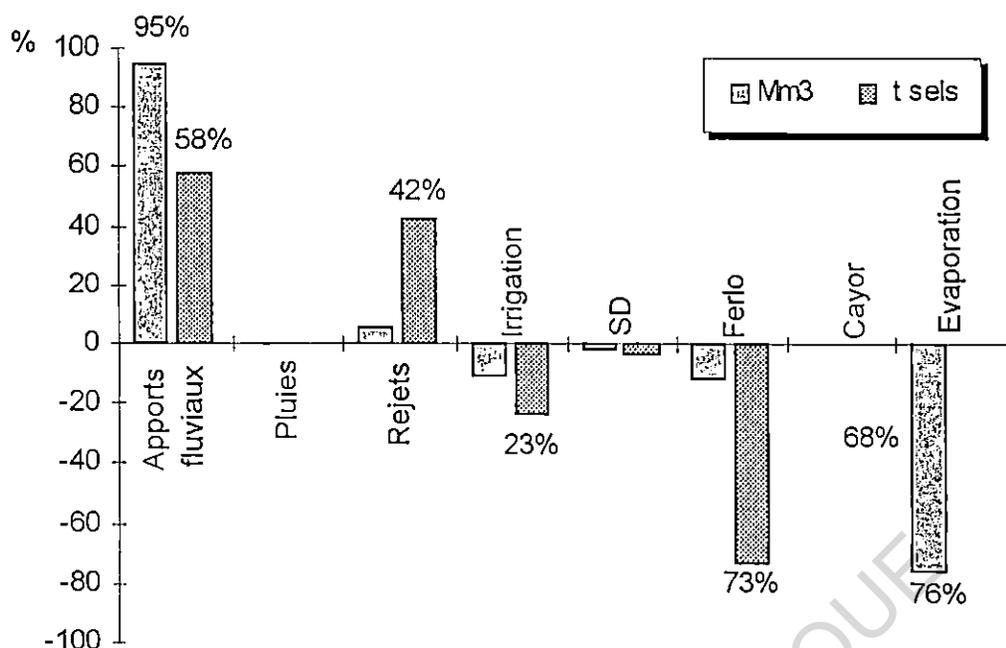


FIGURE 85. — Gestion du lac à un niveau constant (option 2) : bilan hydrologique et chimique . . .

La comparaison des deux formes de gestion simulée (gestion avec variation de niveau et gestion à un niveau constant) montre qu'il est préférable de reproduire le fonctionnement naturel du lac. Imposer au Guiers des variations de niveau bien marquées en cours d'année permet d'une part l'assèchement d'une frange importante de la végétation aquatique et d'autre part la limitation de son développement. Au-delà de la revalorisation des cultures de décrue, on pourrait également éradiquer sinon limiter les aires d'infestation de *Schistosoma sp.*, donc la propagation des maladies hydriques telles que la bilharziose.

Pour l'avenir, et dans le souci prendre en compte les besoins de l'ensemble des utilisateurs de la réserve lacustre (CSS, SDE, SAED, privés), il est nécessaire de procéder à un suivi régulier et surtout à une gestion globale du lac en relation avec l'OMVS, notamment l'AGOC. C'est le prix à payer pour parvenir à une gestion intégrée opérationnelle du milieu et répondre aux objectifs et perspectives définis dans le cadre de la politique de gestion globale du bassin du Sénégal.

La nouvelle gestion du réservoir lacustre, pour être efficace, doit nécessairement prendre en compte les besoins du canal du Cayor, la production d'eau potable par la SDE, l'eau d'irrigation pour les périmètres privés et l'alimentation en eau de la vallée fossile du Ferlo. Cependant, les activités traditionnelles telles que les cultures de décrue et la pêche. Une grande attention doit être accordée aux rejets d'eaux de drainage, en provenance des casiers CSS, qui contribuent dans une large mesure à la détérioration de la qualité des eaux du lac et à l'augmentation du stock de sels dissous.

Le modèle GIL peut d'ores et déjà être utilisé dans le cadre de la recherche d'un mode de gestion optimal des eaux du lac de Guiers. Sa capacité à prévoir l'évolution de la qualité des eaux en fonction des entrées et sorties du bilan hydrologique est un atout non négligeable.

En effet, depuis la construction des grands barrages sur le fleuve Sénégal, la disponibilité de l'eau n'est plus un problème dans le bassin. Il se pose plutôt un problème d'adéquation de la gestion de cette eau, tant quantitativement que qualitativement, avec les différentes utilisations, qu'elles soient existantes ou à l'état de projet.

A ce titre, le modèle GIL peut être un outil efficace pour répondre à certaines interrogations que suscitent naturellement l'adoption de telle ou telle autre forme de gestion du plan d'eau. Une des limites du modèle est qu'il ne permet pas d'imposer une évolution qualitative précise de eaux en cours d'année. A l'avenir, la réflexion devra être plutôt axée sur le calage du modèle, du point de vue qualitatif, aux normes d'utilisation actuelle des eaux du lac de Guiers.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

Chapitre III

APPORTS DE LA TELEDETECTION A LA CARACTERISATION DE LA QUALITE GENERALE DES EAUX ET AU SUIVI DES PLANTES AQUATIQUES

Les mécanismes de fonctionnement hydrologique et chimique du lac de Guiers sont bien connus grâce aux études effectuées ces dernières années sur la réserve lacustre. Désormais, la recherche est plutôt orientée vers la recherche d'outils de gestion performants. Le modèle GIL décrit au chapitre précédent permet la prise en charge des aspects quantitatifs de la gestion du milieu lacustre et de leurs impacts au plan qualitatif.

Cependant, d'autres aspects tels que la bathymétrie ou la turbidité, par ailleurs très importants dans l'établissement de bilans hydrologiques et qualitatifs mais aussi dans la définition des critères de gestion en milieu sont jusqu'à maintenant très peu étudiés. Le développement des plantes aquatiques, en tant que conséquence du mode de gestion hydrologique et qualitative du lac de Guiers doit également être prise en compte tant en terme d'espèces que de couverture spatio-temporelle.

Il nous a paru intéressant de tester les possibilités offertes par les données de télédétection dans le cadre de la gestion des eaux du lac de Guiers d'une part et d'autre comme moyen d'optimiser les outils classiques. Cette approche tout à fait novatrice dans ce domaine, constitue aussi une première au lac de Guiers.

Avec l'imagerie satellitaire, nous tenterons d'abord de caractériser qualitativement et d'un point de vue spatial les eaux du lac de Guiers. Ensuite, l'utilisation d'une série d'images SPOT, à quelques années d'intervalles, permettra de donner une vision diachronique de l'évolution de certaines conséquences de la gestion lacustre comme la progression des plantes aquatiques ou l'évolution des surfaces irriguées à partir du lac. Les phénomènes étudiés sont, pour la plupart, liés à l'émergence de nouvelles conditions environnementales dans la région du Delta du fleuve Sénégal (Cf. première partie et deuxième partie, chapitre I).

Au préalable, il nous semble utile de rappeler quelques notions de télédétection satellitaire et d'explicitier la terminologie de base ainsi que la méthodologie couramment employée.

1. QUELQUES NOTIONS DE TELEDETECTION

La télédétection, selon la définition officielle qu'en donne le COMITAS¹ est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Elle regroupe l'ensemble des méthodes utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes terrestres, maritimes, aéroportées ou aérospatiales (BONN et ROCHON, 1992).

La télédétection est basée sur le comportement physique des objets et sur la notion de spectre électromagnétique.

¹ Commission Ministérielle de la terminologie de la Télédétection Aérospatiale en France

1.1. Bases physiques de la télédétection

Tout objet dont la température thermodynamique est supérieure à -273 C émet un rayonnement comme le Soleil, les étoiles et les planètes. Le Soleil, composé d'hydrogène et d'hélium, est le plus grand émetteur de rayonnement dans l'espace. La distribution de l'énergie émise dans les différentes régions du spectre électromagnétique dépend de la température du Soleil. Les surfaces blanches, comme la neige émettent un rayonnement entre 3 et $100\text{ }\mu\text{m}$. En moyenne 35% du flux de rayonnement incident est réfléchi, 17% est absorbé par l'atmosphère et 48% par les matériaux terrestres.

Les satellites mesurent la réflectance spectrale du rayonnement solaire sur la Terre à des longueurs d'onde généralement inférieures à $2,5\text{ }\mu\text{m}$ tandis que les instruments pour la détection du rayonnement émis par la Terre opèrent entre $1,5$ et $3\text{ }\mu\text{m}$ dans l'infrarouge thermique. Les bandes spectrales comprises entre 3 et $5\text{ }\mu\text{m}$ (détection des feux de brousse) et entre 8 et $14\text{ }\mu\text{m}$ sont généralement utilisées en télédétection du fait de la faible absorption atmosphérique par le dioxyde de carbone, l'ozone et la vapeur d'eau.

La télédétection s'appuie donc sur les propriétés physiques et optiques d'un objet pour connaître sa nature. En effet l'information sur un objet est transmise vers l'appareil de télédétection grâce à un rayonnement électromagnétique, comme la lumière qui en est la manifestation visible. La traduction de cette information par la télédétection découle de la connaissance du comportement spectral de l'objet en question.

1.1.1. Le spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique se décompose en différentes ondes élémentaires appelées aussi composantes spectrales réparties entre plusieurs domaines. Les parties du spectre électromagnétique les plus fréquemment utilisées en télédétection, leurs longueurs d'onde respectives ainsi que les types de capteurs utilisés sont présentés à la figure 86.

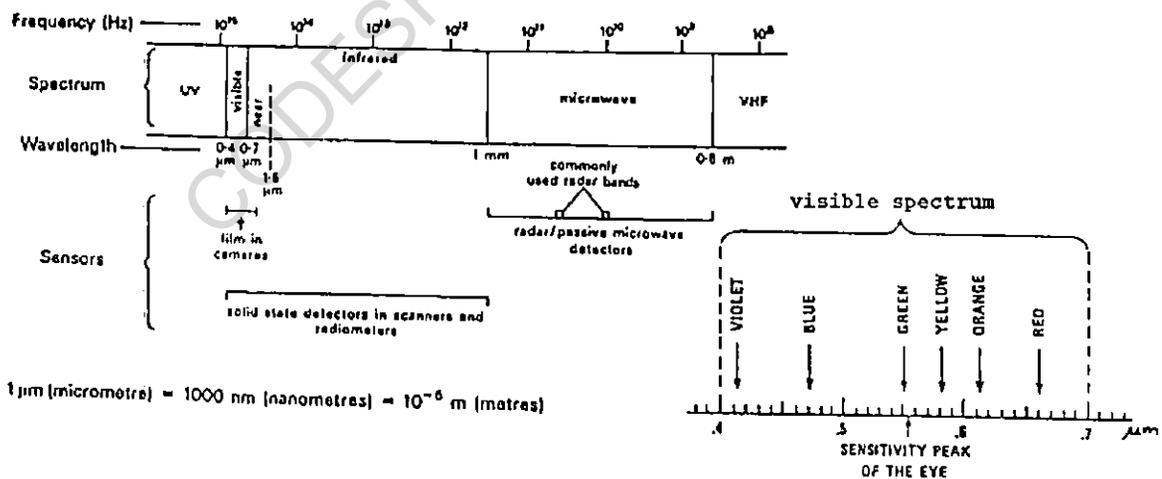


FIGURE 86. — Les différents domaines du spectre électromagnétique (source : LARSSON ET STRÖMQUIST, 1991)

L'ultraviolet est compris entre les longueurs d'onde 0,29 et 0,4 μm , il est rarement utilisé. La partie visible du spectre correspond aux longueurs d'onde situées entre 0,4 et 0,7 μm ; elle se décompose en étroites bandes spectrales : violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge dont les longueurs d'onde respectives sont données au tableau XXXVI. L'infrarouge se subdivise en proche infrarouge (0,7 à 1,5 μm) utilisé par presque tous les satellites d'observation de la terre et en infrarouge thermique utilisé surtout par les satellites météorologiques (10,5 à 12,5 μm pour METEOSAT et NOAA). Les hyper-fréquences ou micro ondes de 1 mm à 1 m sont utilisées par l'imagerie radar.

TABLEAU XXXVI
Décomposition des différentes bandes spectrales dans le visible

Bandes spectrales	Longueur d'onde en micromètres (μm)
<i>Violet</i>	0,390 - 0,455
<i>Bleu</i>	0,455 - 0,492
<i>vert</i>	0,492 - 0,577
<i>Jaune</i>	0,577 - 0,597
<i>Orange</i>	0,597 - 0,622
<i>Rouge</i>	0,622 - 0,78

1.1.2. Les comportements spectraux

La réflectance spectrale d'un objet est le rapport de l'énergie réfléchiée par rapport à l'énergie incidente en fonction de la longueur d'onde. Le comportement spectral d'un objet détermine donc sa représentation dans les différentes parties du spectre électromagnétique. La connaissance du comportement spectral d'un objet est déterminante dans le choix des canaux de travail et dans les processus d'analyse, de traitement et d'interprétation de l'imagerie satellitaire. La figure 28 donne les comportements spectraux de quelques objets dans la partie visible du spectre électromagnétique.

Le comportement spectral d'un sol dépend de sa teneur en argiles, en carbonates et en matières organiques, donc de sa composition minéralogique, de la rugosité de sa surface et de sa couleur. La couleur a d'ailleurs une forte signification dans presque tous les systèmes de classification des sols (ESCADAFAL, 1990). En présence d'humidité et ou de matières organiques, la réflectance du sol a fortement tendance à diminuer dans tous les canaux du visible. La présence de calcaires augmente la réponse spectrale du sol.

La végétation saine, c'est-à-dire chlorophyllienne, se révèle très réfléchante dans le canal proche infrarouge (canal XS3 de SPOT), moyennement réfléchante dans le moyen infrarouge et très peu dans l'ultraviolet et le visible (XS1 et XS2 de SPOT). Différents facteurs peuvent influencer sur la réflectance spectrale des végétaux (DEVINEAU, 1990). A l'échelle de la feuille, les différentes étapes de la croissance marquent chacune un type de réponse dans le spectre électromagnétique. A l'échelle de la plante et du peuplement interviennent des facteurs comme l'organisation spatiale du couvert, les classes d'âge des feuilles, l'effet de productivité, les ombres et la densité du couvert végétal. Dans le cas d'une végétation clairsemée, la réponse des plantes est atténuée par celle du sol.

Au delà d'une bonne connaissance des régions étudiées, la connaissance des comportements spectraux de certains objets se révèle obligatoire pour bien appréhender le contenu d'une image, donc la classification de ses comptes numériques en entités homogènes. Chaque satellite possède ses spécificités que lui confèrent ses instruments de mesure.

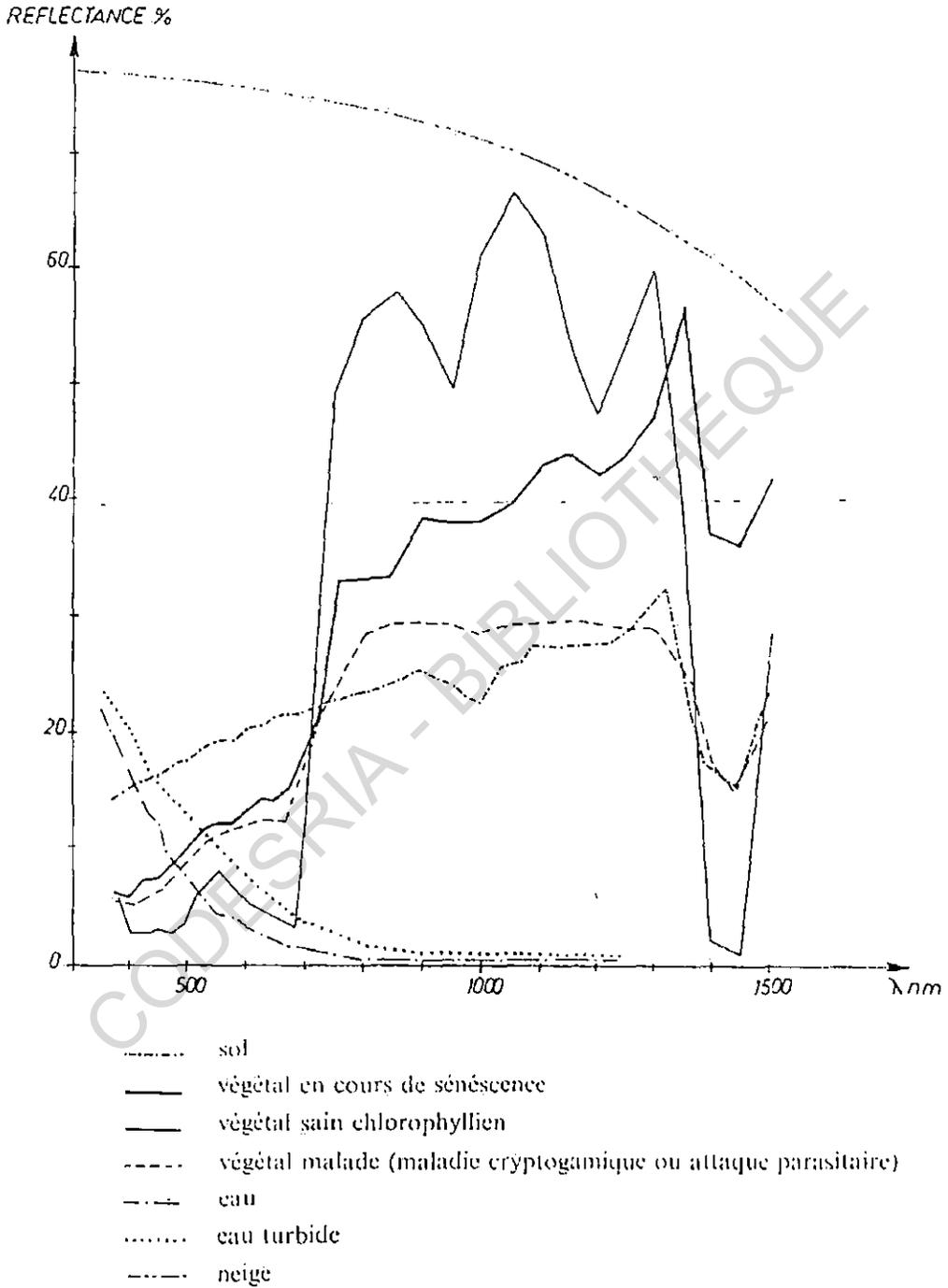


FIGURE 87. — Courbes de réflectance de quelques objets dans les canaux de LANDSAT et de SPOT (Source : GIRARD & GIRARD, 1989)

1.2. Le système SPOT

C'est au début des années 1960 que furent lancés les premiers satellites d'observation de la Terre avec la série des satellites TIROS (Television Infrared Observation Satellite). Mais c'est seulement en 1972, avec le lancement du premier satellite LANDSAT, que débute réellement l'ère de la télédétection spatiale pour l'environnement continental. Elle a ouvert de nombreuses perspectives à des disciplines aussi variées que la géographie, la météorologie, la topographie, la photogrammétrie, la cartographie, etc.

Depuis lors, c'est à une course effrénée que se livrent les pays ou organismes ayant des programmes de télédétection spatiale. Plus d'une cinquantaine de satellites ont été lancés depuis 1972 et d'ici l'horizon 2000, une autre dizaine devrait être lancée. C'est dire donc tout l'éventail de choix disponibles pour les utilisateurs de produits de télédétection. Les choix s'opèrent en fonction des objectifs de chacun mais aussi en fonction de la résolution et du coût des images.

Notre choix, dans le cadre de cette étude, s'est porté sur l'imagerie satellitaire SPOT. Quelques unes de ses caractéristiques sont brièvement présentées (tabl. XXXVII).

TABLEAU XXXVII
Les satellites SPOT HRV1 ET HRV2 : les canaux, les capteurs et les longueurs d'onde
(source : GIRARD et GIRARD, 1989)

<i>Bandes spectrales (en μm)</i>	<i>Tache au sol</i>	<i>Heure locale au noeud descendant</i>	<i>Largeur de balayage</i>	<i>Répétitivité</i>
0.50 à 0.59 XS1 0.61 à 0.69 XS2 0.79 à 0.90 XS3	20 m (XS)	10 h 30	2 x 60 km orientable dans ± 400 km	26 jours accessibilité en tout point du globe en 5 jours maximum
0.51 à 0.73 (P)	10 m (P)			

Le système SPOT est issu d'un programme français, mis en place en février 1978, en association avec la Suède et la Belgique. Il a été conçu et développé par le CNES². Le système SPOT comprend le satellite et les stations de réception au sol : Toulouse - Aussaguel en France et Kiruna en Suède.

SPOT est un satellite héliosynchrone, son altitude est de 818 km à l'Équateur et 833 km à l'apogée ; sa répétitivité est de 26 jours. Il effectue environ 14 révolutions en 24 heures, soit le tour de la Terre en 101 minutes.

Le premier des satellites SPOT a été lancé le 22 février 1986. Il était muni d'un capteur HRV (Haute Résolution Visible), de deux enregistreurs de données sur bandes magnétiques et d'un système de transmission vers la Terre de 50 Mégabits par seconde. Le capteur HRV à bord de SPOT a deux modes de fonctionnement : le mode panchromatique et le mode multispectral. Le satellite SPOT possède, en outre, deux caméras mobiles qui lui permettent de chercher des cibles précises qui lui sont assignées.

SPOT-2 et SPOT-3 ont été lancés respectivement en 1990 et 1993 ; SPOT-4 était prévu pour 1996 tandis que SPOT-5 est encore à l'étude.

² Centre National d'Études Spatiales

En mode panchromatique, c'est à dire en niveaux de gris, la bande spectrale est comprise entre 0,51 et 0,73 μm pour une résolution au sol de 10 m en visée verticale. En mode multispectral, on a trois bandes spectrales : le jaune vert (0,50 à 0,59 μm), le rouge (0,615 à 0,68 μm) et le proche infrarouge (0,79 à 0,89 μm) et une résolution au sol de 20 m.

La société SPOT-Image chargée de la commercialisation des images SPOT a fêté en 1993 son premier milliard FF (Francs Français) de chiffre d'affaires ; il devient ainsi leader mondial des ventes d'images de télédétection spatiale devant les USA qui l'ont précédée pourtant dans ce domaine. Ce chiffre d'affaires ne couvre cependant pas l'investissement initial de SPOT, soit quelques 8 milliards de Francs Français pour les quatre premiers satellites de la série. Le coût de cet investissement explique par ailleurs les prix élevés pratiqués par SPOT-Image. Cependant, l'imagerie SPOT est accessible à tarifs réduits sur projet ISIS par l'octroi de BRAIS³. Cette étude a d'ailleurs bénéficié de cette facilité grâce à une collaboration avec le laboratoire GSTS du CNRS.

Les images SPOT sont destinées à 35 % aux traitements cartographiques, 25 % à l'observation de la végétation et des couvertures forestières et seulement 18 % pour les études géologiques. Ces dernières années, les données de SPOT ont montré d'énormes potentialités dans l'inventaire des cultures, l'appréciation des rendements des récoltes, les prospections minières et pétrolières, le suivi des pollutions marines, l'aménagement urbain et rural, de même que les usages militaires. Avec SPOT-3 sont apparues de nouvelles applications, notamment en stéréoscopie, et SPOT-4 devrait aller plus loin dans l'infrarouge et donner une résolution au sol de 5 m.

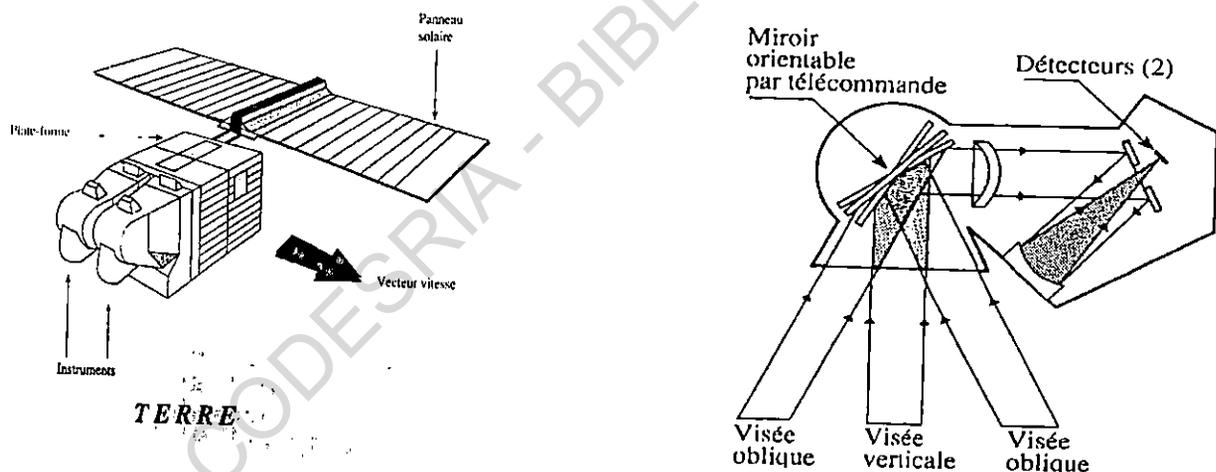


FIGURE 88. — Schéma du satellite SPOT : vue générale et coupe schématique

³ Bon de Réduction à l'Achat d'Images SPOT

1.3. Analyse et traitement d'images : matériel et méthodes

L'analyse et le traitement de l'imagerie satellitaire nécessite des ressources matérielles et logicielles performantes. Elle repose sur une méthodologie précise et rigoureuse qu'il faut respecter pour multiplier les chances d'aboutir à des résultats fiables et utilisables dans le cadre de la gestion des milieux naturels.

Nous présenterons tout d'abord, la méthodologie utilisée dans le cadre de ce travail puis nous donnerons une description sommaire des logiciels qui ont servi au traitement des images.

1.3.1. Méthodologie pour le traitement de l'imagerie satellitaire

La méthodologie utilisée pour le traitement de l'imagerie satellitaire dans le cadre de cette étude est classique. Toutes les étapes ont été respectées depuis le choix des images de travail jusqu'au résultat final, en passant par l'analyse spectrale, les calculs statistiques, le choix des parcelles d'entraînement et la classification supervisée proprement dite.

1.3.1.1. Choix et acquisition des images de travail

Cette étude a été réalisée à partir d'une série de scènes SPOT multispectrales (mode XS) de 1987, 1989 et 1993.

Le choix de cette série d'images SPOT-XS, niveau de pré-traitement 1B⁴ (tabl. XXXVIII) procède d'une volonté de faire un suivi diachronique de l'environnement du lac de Guiers, en relation avec les modifications hydrobiologiques qui y sont intervenues durant ces dernières années. L'image SPOT de 1987 est propriété d'UTIS, celles de 1989 avaient été commandées dans le cadre du projet EQUÉSEN tandis que celles de 1993 ont été acquises grâce à une subvention du CRDI.

TABLEAU XXXVIII
Identification des scènes SPOT

Scène	Date	Centre image	Azimut	Élévation sol	OR	Angle d'incidence
022-317	29/01/87	N16°31'-W15°56'	+146°55'	49°16'	009°22'	10°23'R
023-317	01/02/89	N16°31'-W15°33'	+142°0'	41°09'	008°06'	17°09'R
022-318	09/03/89	N16°01'-W16°05'	+130°0'	58°06'	008°09'	05°06'R
023-318	01/02/89	N16°01'-W15°40'	+141°6'	48°30'	008°60'	17°90'R
022-317	11/11/93	N16°31'-W15°58'	+154°6'	52°9'	009°10'	02°3'
022.318	11/11/93	N16°01'-W16°05'	+154°1'	53°3'	009°10'	02°3'

⁴ Le niveau 1B inclut des corrections radiométriques et géométriques ; c'est le produit de base de SPOT Image

1.3.1.2. Pré-traitement des images

Une fois acquises, les images sont archivées dans les stations de travail, après avoir été formatées à la taille voulue. A partir de ce moment commence le vrai travail d'analyse de l'image. Outre l'archivage, le pré-traitement de l'imagerie satellitaire comprend quatre autres niveaux : les corrections géographiques, l'analyse spectrale, les corrections radiométriques et les calculs statistiques.

Il est nécessaire de procéder d'abord à des corrections géographiques, c'est-à-dire replacer les images dans un système de projection cartographique vrai (Lambert, Mercator...). En général le redressement s'opère à partir de points de contrôle au sol dont les coordonnées géographiques dans la projection choisie sont connues. Ce type de pré-traitement est primordial, en particulier pour les études spatio-temporelles et l'intégration de données vectorielles ou d'autres types de données numériques.

Les images SPOT du lac de Guiers ont été redressées en entrant les coordonnées de quelques points de contrôle au sol fournies par SPOT-Image. Le résultat est une image référencée géographiquement avec comme point de référence YOFF 2000 dans une projection NUTM 28 (Nord Universal Transverse Mercator, fuseau n° 28).

Après le redressement, l'analyse spectrale permet de visualiser puis d'améliorer le rendu visuel des images par filtrage ou en jouant sur les tables de couleurs. C'est aussi une étape importante dans le processus du traitement car c'est elle qui permet de jauger la qualité de l'image et de prévoir les traitements complémentaires à lui appliquer pour une meilleure qualité du résultat final.

A la suite de cela, des corrections radiométriques peuvent être ou non envisagées, pour minimiser l'influence atmosphérique sur la réflectance mesurée depuis l'espace et trouver la vraie réponse des objets au sol.

Les calculs statistiques (minimum, maximum, moyenne, écart type matrices de covariance et de corrélation) se font sur les comptes numériques de l'image dans chacun des canaux. Ils donnent une idée du contenu de chaque canal et de chaque scène prise dans son intégralité. Ces calculs sont destinés à affiner le choix de canaux entrant dans la classification des images. Il faut noter que ces calculs peuvent également se faire après avoir effectué des combinaisons de canaux.

1.3.1.3. Les combinaisons de canaux

Les combinaisons de canaux aident à mettre en évidence certaines composantes du milieu par rapport à d'autres. Il existe plusieurs types de combinaison de canaux ; les plus utilisées sont : les combinaisons linéaires, l'indice de végétation, l'indice de brillance, l'indice de pigmentation et l'indice de transparence des eaux.

La combinaison linéaire a pour but de modifier le canal XS1 de telle sorte que l'on obtient une image en composition colorée la plus proche possible de celle observée à l'œil nu. À partir d'une scène SPOT-XS par exemple, il s'agit de faire la somme des trois canaux auxquels on affecte différents coefficients (K0 à K3) ; au canal XS1, on affecte la valeur suivante :

$$XS1 = K0 + (K1 * XS3) + (K2 * XS2) + (K3 * XS1)$$

Les coefficients K0, K1, K2, K3 sont inclus dans un intervalle compris entre -999 et 999 et leurs valeurs sont choisies par défaut ou laissées à l'appréciation de chaque opérateur.

L'indice de végétation exprime la densité du couvert végétal et l'activité chlorophyllienne ; il se calcule par la formule suivante :

$$IV = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2) \text{ (XS3 : canal proche infrarouge et XS2 : canal rouge)}$$

Une variante de cet indice consiste à lui ajouter la valeur 0,5 pour éviter les résultats négatifs et stabiliser la variance en prenant la racine carrée du résultat (JOLY, 1986). L'indice normalisé de végétation (NDVI) est égal au rapport :

$$128 * (1 * (XS3 - XS2) / ((XS3 + XS2)))$$

Toutes les valeurs de l'indice de végétation sont comprises entre 0 et 255, le zéro de l'index étant remplacé par le contenu 128 dans l'image destination.

L'indice de brillance est un rapport entre les canaux rouge et proche infrarouge (XS2 et XS3 de SPOT). Sa formule de calcul est la suivante :

$$(XS3)^2 + (XS2)^2 / M \text{ (M variant de 1 à 12)}$$

L'indice de brillance met en évidence les composantes du milieu les plus remarquables. C'est ainsi que la présence de massifs dunaires, très réfléchants, apparaît rapidement sur ce canal composite.

L'indice de pigmentation ($XS1 / XS2$) permet de discriminer la végétation chlorophyllienne de celle qui ne l'est pas. Dans un milieu comme le Delta du Sénégal où la végétation est surtout composée d'épineux, l'utilisation de ce indice est évidemment aléatoire. Sur la végétation aquatique, elle donne cependant d'assez bons résultats.

L'indice de transparence des eaux ($XS1^2 / XS2$) est valable jusqu'à une profondeur maximale de 12 m ; il a été développé en milieu côtier par BEN MOUSSA *et al.* (1987) qui l'a utilisé dans l'étude d'écosystèmes coralliens en Bretagne.

La composition colorée est également une combinaison de canaux , c'est une superposition des trois canaux proche infrarouge (XS3), rouge (XS2) et vert (XS1) de manière à donner une présentation en couleurs, la plus proche de la réalité observée sur le terrain. La composition colorée en elle-même est une carte exploitable comme repère sur le terrain et support pour la validation des traitements sur le terrain. L'exécution au préalable d'une combinaison linéaire permet d'améliorer les résultats obtenus.

1.3.1.4. Définition des classes et choix d'une méthode de classification

La définition des classes d'une image est l'œuvre du thématicien qui est censé avoir la meilleure connaissance possible du terrain d'étude. Dans le cas d'une classification non supervisée, le choix des classes se fait automatiquement par échantillonnage, par la machine qui procède statistiquement à un regroupement des différents pixels composant l'image. Pour une classification supervisée, des parcelles d'entraînement ou zones test doivent être définies. Une parcelle d'entraînement est une zone de l'image, dont la connaissance suffisante permet de l'affecter à une classe donnée. En général, ces parcelles sont définies sur la composition colorée qui présente une image très proche de ce que l'on observe à l'œil nu. Puis on procède à des calculs statistiques sur ces parcelles d'entraînement. La moyenne des pixels de ces parcelles est affectée à la classe ainsi définie.

Appliquer une méthode de classification à une image revient à lui appliquer un traitement mathématique, de manière à regrouper automatiquement et en un nombre réduit de classes l'ensemble des pixels. Le choix définitif d'une méthode de classification ne se fait généralement qu'après une première classification non supervisée.

L'intérêt de la classification non supervisée réside dans le fait que le thématicien n'intervient que pour l'interprétation. Dans le cas d'une région inconnue, une classification non supervisée offre l'avantage de la rapidité mais aussi celle de donner un aperçu des grandes unités du paysage. Pour déterminer le nombre maximal de classes, on applique la formule : $k = 5 \cdot \log(n)$ où k représente le nombre maximal de classes et n le nombre de pixels de l'image. Le nombre maximal de classes est généralement compris entre 2 et k .

Le principe de la classification non dirigée est que chaque classe est représentée par son centre ; un pixel est affecté à une classe parce qu'il est statistiquement plus proche de cette classe que d'une autre. L'interprétation du contenu des classes se fait à posteriori.

La classification supervisée fait intervenir le thématicien dans le processus d'élaboration des classes dès le début par la définition de zones test ou parcelles d'entraînement sur la composition colorée. Les parcelles d'entraînement délimitées sur l'image doivent être représentatives des différentes unités de paysage identifiées sur le terrain et les divers documents étudiés. Après cela, les caractéristiques de chaque parcelle sont analysées statistiquement, de manière à classer les pixels composant l'image en zones radiométriques homogènes.

Diverses méthodes de classification existent ; ici, c'est surtout le Minimum de Distance qui a été appliqué. Ce type de classification est basée sur la proximité des centres de gravité des classes les uns par rapport aux autres et la moyenne dans chaque classe. Son principe est qu'un pixel est affecté à une classe parce qu'il est plus proche de cette classe que d'une autre, dans le sens de la distance euclidienne. Le Maximum de Vraisemblance et la classification de Sebestyen, basée sur la moyenne et l'écart type dans chaque classe, ont donné de moins bons résultats sur le lac de Guiers.

Une classification doit toujours être validée avant de pouvoir être utilisée. Deux méthodes de validation des classifications existent ; elles peuvent être exécutées indépendamment l'une de l'autre.

La matrice de confusion des classes est une méthode statistique qui donne les pourcentages de recouvrement des classes les une par rapport aux autres. On estime qu'une classe est bien définie lorsque au moins 80% de ses pixels sont homogènes.

La vérité terrain, étape importante du processus de traitement d'analyse consiste à aller vérifier sur le terrain l'intégrité des classes définies ; elle permet éventuellement de rectifier les erreurs de classifications et d'affiner les classes déjà existantes. En réalité, la vérité terrain doit intervenir au début et à la fin du processus de classification car c'est elle qui permet la définition des classes sur l'image.

La phase ultime de la classification est la construction de la palette de couleurs et l'édition de la légende. A chaque classe on affecte une couleur relative à son contenu (par exemple : vert pour de la végétation chlorophyllienne et jaune pour un massif de dunes). Le coloriage des cartes donne lieu à la création de palettes de couleurs personnalisées permettant d'harmoniser un travail, en particulier lorsqu'il s'agit d'une étude diachronique. C'est une étape importante car c'est elle qui permet de faire de bonnes comparaisons entre les différentes entités d'une période à l'autre.

La légende explicite le contenu de chaque classe et ne doit par conséquent donner lieu à aucune confusion. Elle doit être claire et éviter les commentaires trop longs.

1.3.2. Les logiciels utilisés

Deux logiciels de traitement d'images ont été principalement utilisés dans le cadre de cette étude : PLANETE et ER-Mapper version 5.20.

PLANETE est un logiciel conçu par les chercheurs de l'ORSTOM. Il fonctionne sur station de travail UNIX et possède une large gamme de fonctions permettant le traitement et l'analyse de l'imagerie satellitaire. C'est un logiciel intéressant, surtout pour ceux qui maîtrisent les procédés de traitement d'images. Sa principale limite réside dans son manque de convivialité, ses menus assez difficiles d'accès et la déficience de sa documentation qui n'est pas très détaillée. Généralement l'utilisateur connaît moins de 50% des capacités du logiciel.

Le logiciel ER-Mapper (Earth Ressources Mapping) permet l'analyse et le traitement des données satellitaires et radar ; il peut fonctionner sur PC comme sur station de travail UNIX. ER-Mapper fonctionne sous forme d'algorithmes, c'est-à-dire des listes d'instructions permettant d'effectuer divers types de traitement sur les données brutes. Une des performances de ce logiciel, c'est qu'il traite aussi bien des données raster que des données vectorielles et facilite ainsi l'intégration des données de télédétection dans un système d'information géographique.

ER-Mapper permet d'effectuer simplement et rapidement des opérations qui sous d'autres interfaces se révèlent un vrai casse-tête. Tous les traitements relatifs aux corrections géographiques, radiométriques, les mosaïques d'images, etc. s'exécutent aisément sous ce logiciel. Il offre de nombreuses possibilités dans la production de spatio-cartes, divers formats de conversion graphique et d'images.

2. L'IMAGERIE SATELLITAIRE SPOT APPLIQUEE A LA GESTION DU LAC DE GUIERS ENTRE 1989 ET 1993

L'analyse et l'interprétation d'une série de compositions colorées permet de déduire différentes possibilités d'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la gestion de l'environnement du Guiers. Référencée géographiquement, la composition colorée en elle-même est une carte qui peut nous guider sur le terrain ou même donner lieu à des interprétations. Par exemple, sur la composition colorée de la mosaïque d'images SPOT de février 1989 on voit apparaître le lac de Guiers et le fleuve Sénégal en bleu, en rouge on reconnaît la végétation (plantes aquatiques et cultures de canne à sucre) et en taches sombres, la trace d'un feu.

D'une manière générale, l'imagerie satellitaire permet différentes applications : étude des potentialités agricoles ; prévision des récoltes ; inventaire et cartographie des plans d'eau ; modèles numériques de terrain ; cartes d'occupation du sol ; appui à la prospection géologique et minière, etc.

Au lac de Guiers, l'information satellitaire a été utilisée dans les deux cas suivants :

- l'estimation de la bathymétrie et de la turbidité des eaux à partir des données de 1989 et de 1993 comparées à des données anciennes et aux mesures effectuées sur le terrain ;
- l'étude de la couverture de plantes aquatiques et de son évolution récente après la réalisation des grands barrages sur le fleuve Sénégal (images de 1988, 1989 et 1993) ;
- l'étude des superficies irriguées à partir de la réserve lacustre ;
- la création de fichiers vectoriels (contours du lac à différentes périodes, extension des plantes aquatiques...) utilisables dans le cadre d'un système d'information géographique.

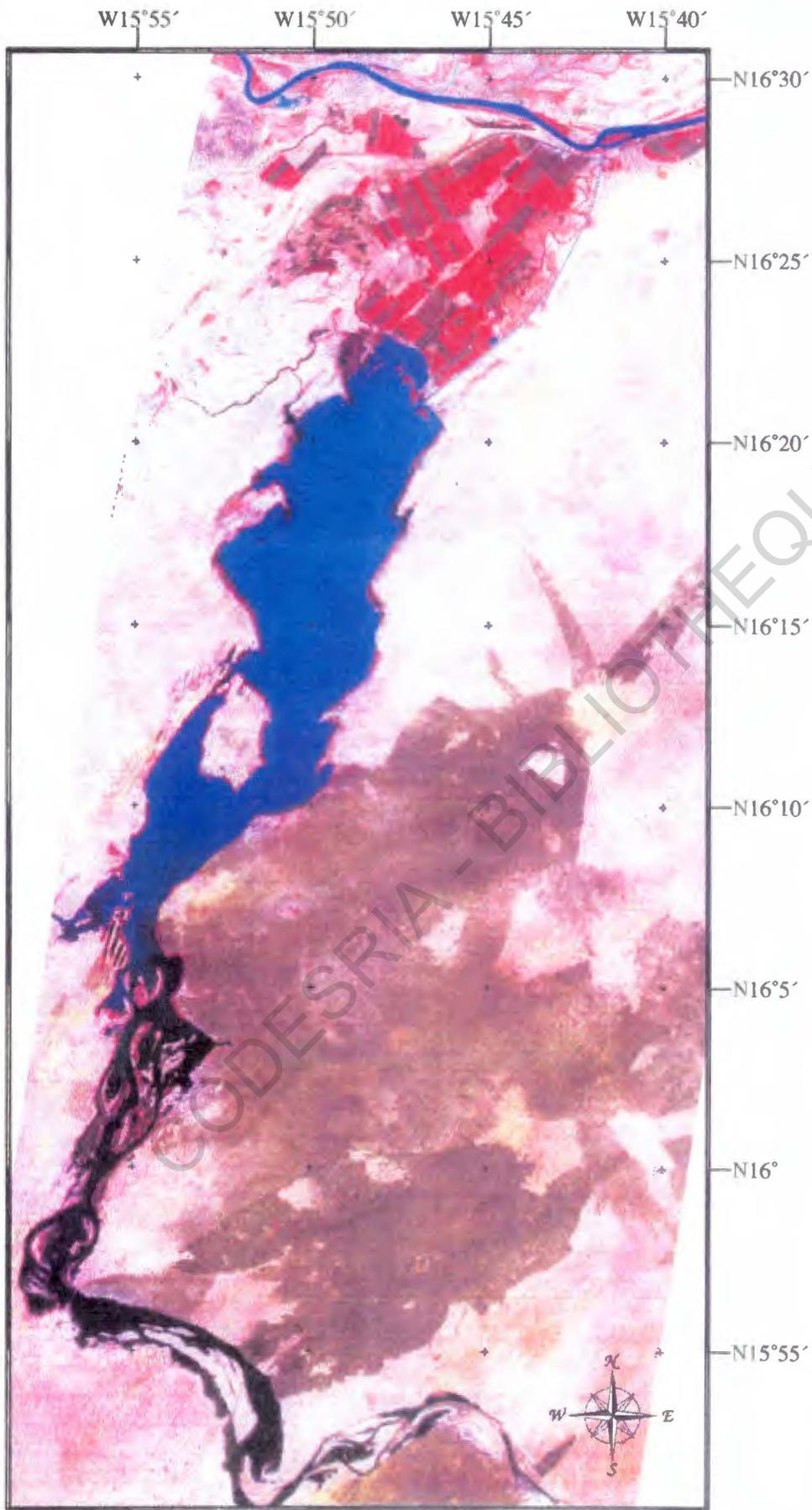


FIGURE 89. — Composition colorée de la mosaïque d'images SPOT-XS

2.1. Caractérisation de la bathymétrie et de la turbidité des eaux

Une bonne connaissance de la bathymétrie et de la turbidité moyennes nous paraît importante dans le cadre de la gestion qualitative des eaux du lac de Guiers. Ces deux paramètres ont en effet relation assez forte avec le comportement hydrobiologique des eaux. Jusqu'à maintenant, ils n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'études. Le projet EQUENSEN a, il est vrai, fait quelques estimations de la turbidité des eaux mais ces résultats n'ont pas été valorisés dans le rapport final de l'étude et n'ont fait l'objet d'aucune mise à jour. Un projet de la Direction des Etudes hydrauliques mis en place récemment a comme objectif de procéder à un nouveau levé bathymétrique du lac de Guiers.

Il ne s'agit ici nullement de recalculer la bathymétrie du lac de Guiers mais plutôt de vérifier la validité des données disponibles grâce à des méthodes simples et à l'aide de l'imagerie satellitaire SPOT. En même temps, une estimation de la turbidité moyenne du lac de Guiers est tentée. Les résultats obtenus ont à chaque fois été comparés à des données recueillies sur le terrain.

2.1.1. Vérification de la bathymétrie du lac

La bathymétrie du lac de Guiers a été très peu étudiée. En fait, depuis l'époque de la MAS et la carte topographique de l'IGN au 1/50 000^e de 1954, la bathymétrie du lac n'a connu aucune mise à jour. Une carte bathymétrique avait été dressée au début des années 1970 par la SOSETER⁵ mais elle n'est pas fiable, car non référencée et non calée par rapport au zéro IGN.

Une bonne connaissance de la bathymétrie du lac est importante dans le cadre de la modélisation des eaux et la mise au point d'un mode de gestion intégrée du milieu lacustre. Notre hypothèse de départ est que la bathymétrie du lac de Guiers est restée relativement stable au cours de cette période, même si cela reste à vérifier dans certains secteurs, notamment en région sud.

Les levés bathymétriques de la MAS reportés sur la carte de l'IGN au 1/50 000^e ont été complétés par les données de la carte topographique du Sénégal au 1/200 000^e. La carte topographique de la région du lac de Guiers (figure 91), représentée en coordonnées NUTM28 (Projection Mercator Transverse Universel, fuseau n° 28), est déduite de ces données. Par souci de cohérence, nous y intégrons la partie est du Ndiael et le rebord ouest du bas plateau du Ferlo.

L'étude de la bibliographie récente montre que le Guiers est un lac plat, de profondeur moyenne 1,60 m à la cote 1,00 m IGN. Ce qui est corroboré par la carte topographique qui révèle néanmoins la présence de petites zones de profondeur comprise entre -2,00 et -4,00 m au centre du lac.

⁵ Société sénégalaise de terrassement

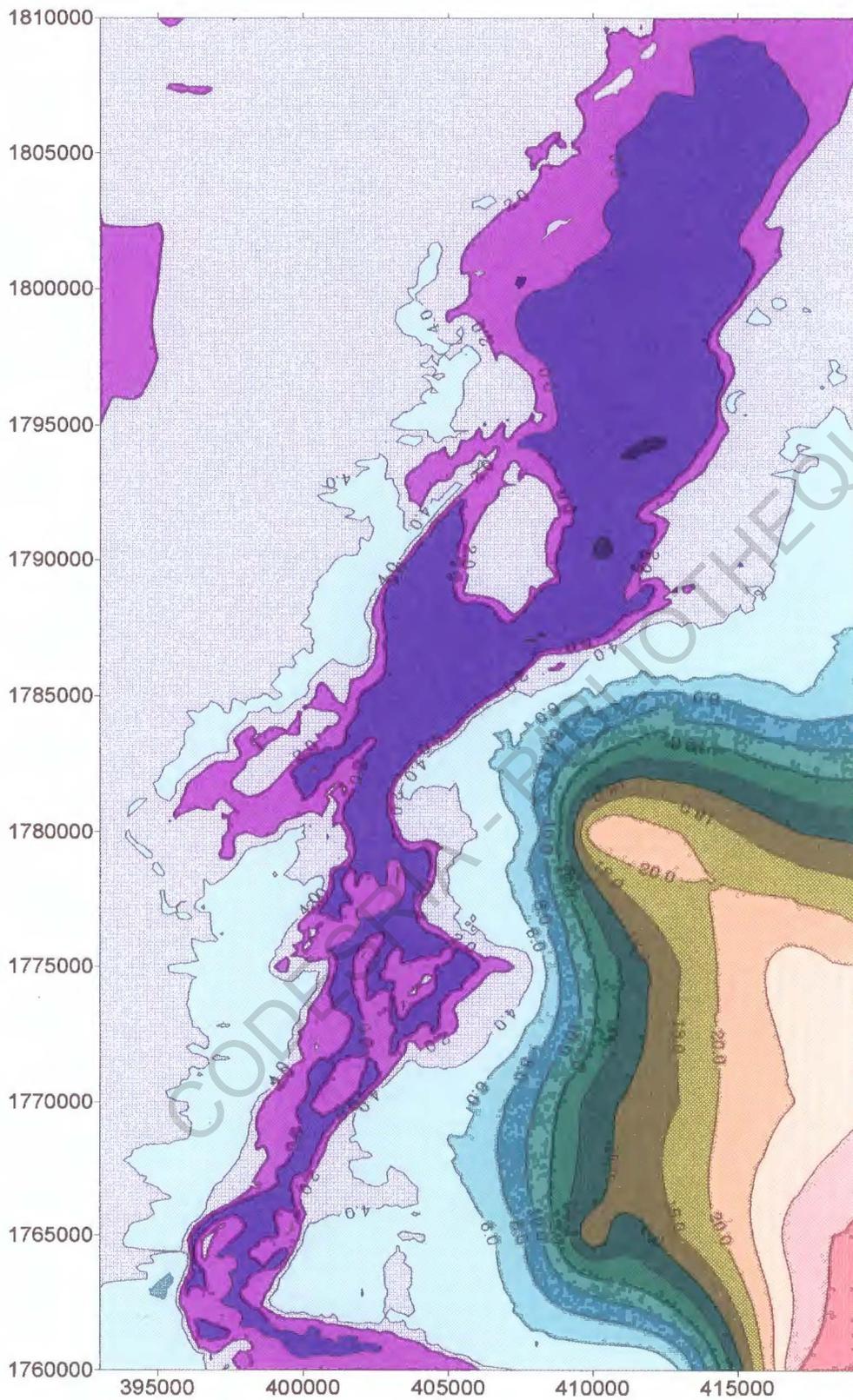


FIGURE 90. — Carte topographique du lac de Guiers d'après les données de l'IGN au 1/50 000^e et la carte topographique du Sénégal au 1/200 000^e.

Le traitement des données topographiques obtenues a permis de calculer un modèle numérique de terrain (MNT) très simple à l'aide du logiciel SURFER (figure 91). Il confirme la nécessité de rehausser les endiguements au nord du lac pour atteindre la cote +2,00 m IGN. Remplir le lac jusqu'à cette cote dans les conditions actuelles, représenterait un danger d'inondation certaine pour toute la partie nord de la réserve lacustre et pourrait mettre en péril autant les cultures que les populations elles-mêmes.

Une première version de ce MNT avait été calculée à partir des données de l'IGN au 1/50 000^e avec le logiciel SAVANE de l'ORSTOM. Cet essai s'était d'ailleurs révélé peu concluant du fait de l'absence de points d'amers topographiques autour du lac et de problèmes de configuration dans les modules de SAVANE.

Les données bathymétriques recueillies sur le terrain, notamment deux transects réalisés en mai 1994 (tabl. XXXIX) ont été reportées sur une carte (figure 92) afin de vérifier la validité des données de la MAS et celles de la SOSETER. L'appareillage utilisé pour la réalisation de ces transects comprenait :

- un GPS (Global Positioning System) qui donne les coordonnées géographiques⁶ du point de mesure en degrés, minutes et centièmes de minute ;
- un échosondeur SIMRAD SKIPPER 405 qui enregistre le signal des fonds et donne les profondeurs en continu sur un tracé défini au préalable ou directement sur le terrain ;
- une perche en bois, graduée de 4 m pour mesurer manuellement les profondeurs.

L'échosondeur a donné de mauvais transects, du fait du modelé du Guiers, qui est un lac plat, peu profond et aux fonds vaseux. Les mesures faites manuellement à la perche, nous paraissent plus adaptées au contexte bathymétrique du lac.

TABLEAU XXXIX
Quelques données bathymétriques du lac de Guiers
(d'après des données de terrain)

<i>Transect Ngnith - Malla</i>			
N° point	Latitude N	Longitude W	Profondeur (m)
1	16° 11' 02"	15° 54' 23"	2.4
2	16° 10' 24"	15° 54' 04"	2.6
3	16° 09' 57"	15° 53' 55"	2.6
4	16° 08' 57"	16° 53' 52"	2.8
5	16° 08' 07"	15° 53' 05"	2.8
<i>Transect Témèye - Teuss</i>			
1	16° 18' 53"	15° 47' 17"	1.0
2	16° 16' 33"	15° 48' 57"	3.2
3	16° 15' 20"	15° 40' 51"	3.4
4	16° 14' 26"	15° 51' 06"	2.8

⁶ Ne disposant que d'un seul GPS, ces coordonnées ne sont donc pas forcément très exactes

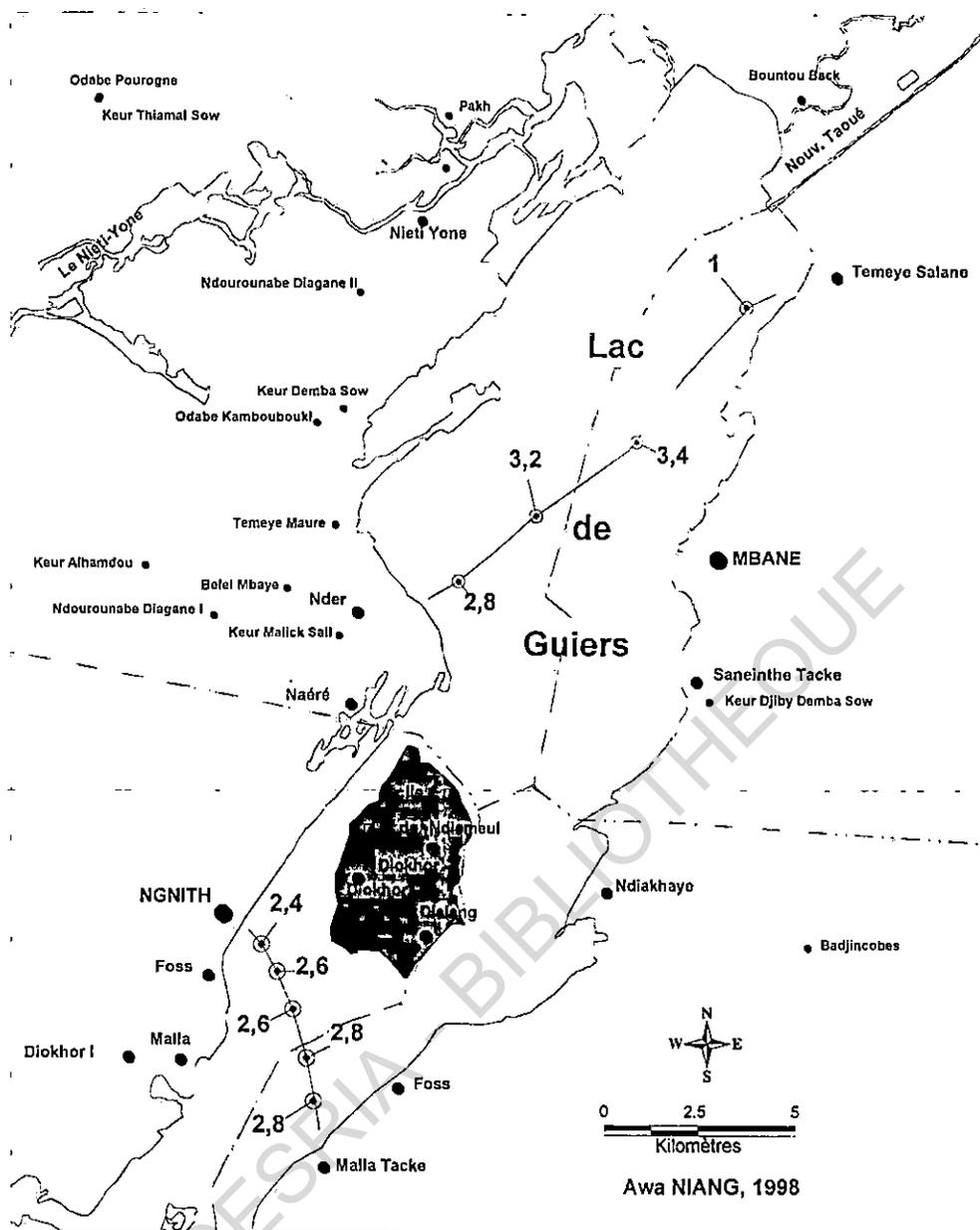


FIGURE 92. — Report cartographique des transects bathymétriques réalisés en mai 1994.

La faisabilité d'une étude de la bathymétrie à partir de données de télédétection est établie d'après les travaux de LEMOALLE (1978), de PAGES *et al.* (1988), de PUECH (1992) et de SEGUIS (1993). Elle se fait généralement à partir de couples de surface en eau mesurée sur l'image satellitaire et d'altitude du plan d'eau mesurée sur le terrain au moment de la prise de vue. Cette méthode suppose cependant la programmation des images, donc un coût assez élevé pour des résultats souvent basés sur un très petit nombre de couples de coordonnées.

SEGUIS (1993) a modélisé la relation entre la réflectance spectrale d'une eau et la nature de ses fonds dans deux mares de la cuvette de Nianga (Podor). L'étude est basée sur les hypothèses suivantes : les variations spatiales de réflectance renseignent sur la profondeur de l'eau ; le signal radiométrique résulte d'une intégration depuis la surface d'une certaine profondeur d'eau déterminée par la limite de pénétration de la lumière ; en cas de faible turbidité, le signal radiométrique renseigne sur la bathymétrie jusqu'à une profondeur maximale de 1,00 m. Dans les zones peu profondes et peu turbides, la profondeur de pénétration dépasse la profondeur du fond. Le signal radiométrique détient donc des

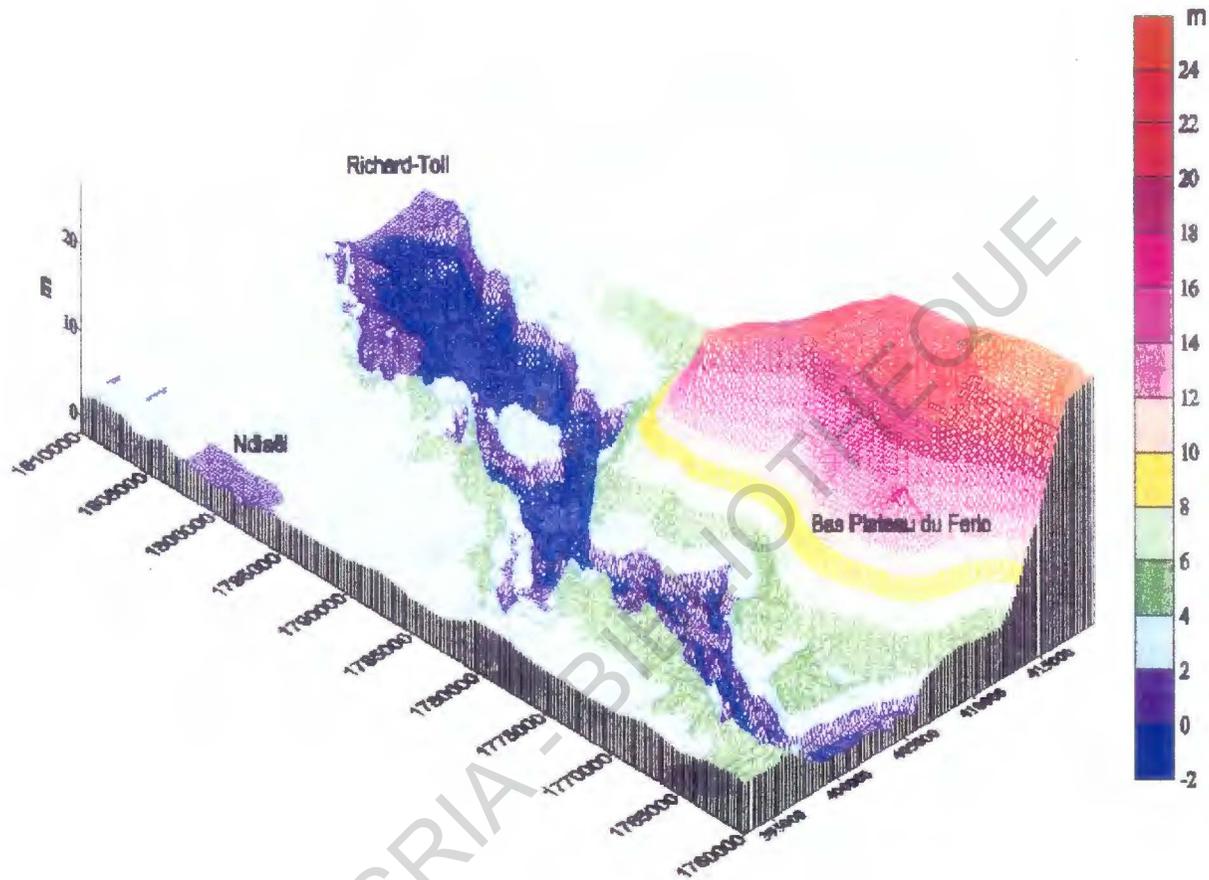


FIGURE 91. — *Modèle numérique de terrain du lac de Guiers calculé d'après les données de l'IGN au 1/50 000^e et la carte topographique du Sénégal au 1/200 000^e.*

informations sur la colonne d'eau traversée (épaisseur et concentration) et sur la nature du fond. La signature spectrale de ces eaux est très dépendante de la concentration en matières en suspension. La réflectance augmente avec la concentration en matières en suspension dans les trois canaux de SPOT. Pour les concentrations en matières en suspension rencontrées sur le fleuve Sénégal (50 à 500 mg.l⁻¹), le signal radiométrique sature à des profondeurs fréquemment inférieures à 0,75 m d'où une limite à l'utilisation bathymétrique de la radiométrie.

Dans le cas du lac de Guiers, plusieurs types de traitements ont été appliqués à l'imagerie satellitaire dans le but d'en extraire l'information sur la bathymétrie. Les conclusions de SEGUIS (1993) ont été utilisées comme référence pour l'étude de la distribution spatiale des signatures spectrales sur le lac. Par souci de commodité, la mosaïque des images SPOT (023-317 et 023-318) du 01 février 1989 (tabl. XL) est utilisée car elle prend en compte le Ndiel et la basse vallée du Ferlo et est de ce fait plus représentative de la région d'étude.

TABLEAU XL
Classification par le Minimum de distance : tableaux statistiques

<i>Mosaïque SPOT-XS (023-317 et 023-318 du 01 février 1989)</i>						
<i>Image échantillonnée : 1 pixel = 50 m</i>						
<i>Canal</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moy.</i>	<i>Ecart type</i>	<i>IV</i>	<i>CV</i>
XS1	32.0	116	67.517	7.061	84	0.10
XS2	31.0	105	65.351	10.876	74	0.17
XS3	19.0	110	68.942	17.165	91	0.25
<i>Surface image</i>	: 413 978 hectares					
<i>Effectif en pixels</i>	: 1 141 954 pixels dont 513 958 nuls					

L'indice XS3/XS2 (figure 93) permet de retrouver les grands traits de la bathymétrie du lac telle que décrite plus haut, en particulier toute la partie du lac située entre les cotes 0,00 et -2,00 m IGN. Il laisse apparaître les hauts fonds de la région sud, vers la digue de Keur Momar Sarr, de même que les zones plus profondes situées au centre du lac, généralement à la cote -2,50 m IGN. Ce même indice a été mesuré dans les mares de Pont Gari et de Figo (cuvette de Nianga, Podor) à partir d'un radiomètre de marque CIMEL CE 310 mesurant les canaux de SPOT par SEGUIS (1993).

Le comparaison du canal composite XS3/XS2 (DIOP et CHEVILLOTTE, 1993) avec les données bathymétriques existantes et celles recueillies sur le terrain nous amènent déjà à conclure, avec quelques réserves cependant, que la bathymétrie du lac de Guiers est restée assez stable depuis les levés effectués dans les années 1950. Déjà dans les années quatre vingt, l'étude de deux sondages effectués dans les sédiments du lac de Guiers avaient mis en évidence un taux de sédimentation très faible (SAOS *et al.*, 1981). En d'autres termes, les apports sédimentaires dans ce milieu n'ont pas atteints une importance de nature à entraîner un colmatage des fonds. Dans tous les cas, un nouveau levé bathymétrique du lac s'impose pour vérifier et éventuellement corriger les abaques surface - volume et être ainsi en adéquation avec les schémas d'aménagement hydrologiques définis dans le cadre des grands projets.

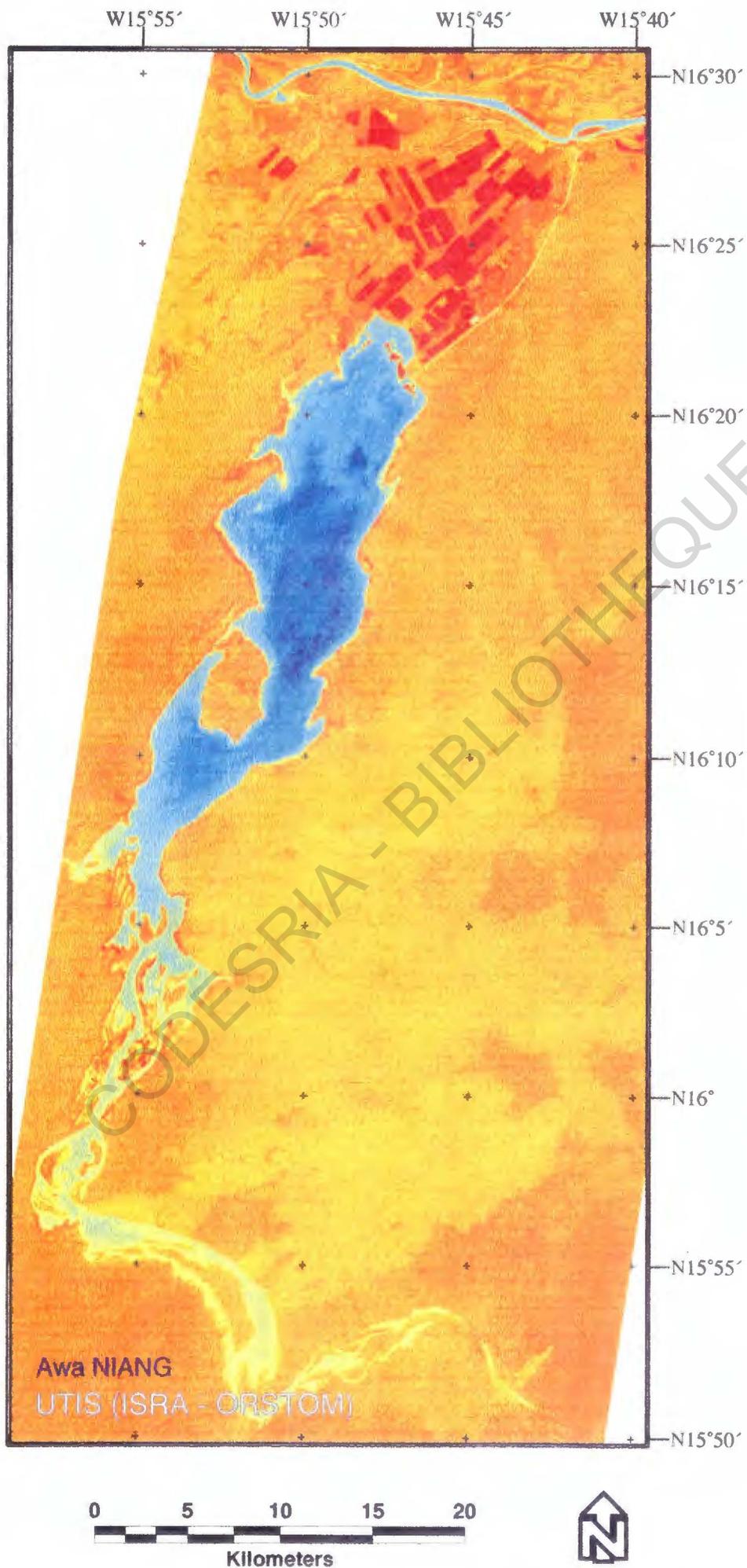


FIGURE 93. — Canal composite XS3/XS2 (mosaïque SPOT-XS 023-317 et 023-318 de février 1980

D'autres indices ont également été testés, notamment l'indice de transparence des eaux qui n'a pas donné de résultats spectaculaires, même en le confrontant aux données bathymétriques. Son échec sur le lac de Guiers est principalement lié à la nature de ses fonds vaseux qui ne permettent pas une bonne discrimination des différentes masses d'eau.

La classification supervisée effectuée suivant la méthode du Minimum de distance radiométrique tend à mettre en évidence les différentes classes d'eau (figure 94). Le tableau XLI précise le label de chaque classe et présente les statistiques liées à la classification. Celle-ci associe à la fois la bathymétrie, la turbidité des eaux et la végétation (cultures irriguées et plantes aquatiques) ; elle a aussi permis de discriminer les sols sains de ceux affectés par un feu de brousse⁸. La végétation aquatique n'a pu être différenciée de la canne à sucre et des autres types de végétation présents sur l'image.

La figure 94 révèle au total sept classes d'eau, fleuve Sénégal⁹ et basse vallée du Ferlo inclus. On remarque que le fleuve ne présente pas d'homogénéité au niveau radiométrique selon que l'on se trouve en amont ou en aval de Richard-Toll. En aval, les eaux se classent plutôt dans les eaux de type 2 qui sont les mêmes que celles présentes à l'entrée de la Taoué. Les images ont été prises en février, soit normalement en période de basses eaux ; les apports proviennent alors de la réserve de Diama. C'est là que réside peut-être l'explication à ce phénomène.

Les eaux du lac de Guiers sont réparties entre cinq classes libellées "eaux type 1 à 5". La classe "eaux type 3" se révèle assez hétérogène du point de vue de sa répartition ; elle recoupe deux régions que les levés de la MAS présentaient comme différentes du point de vue bathymétrique. La classe "eaux type 2" paraît conforme aux réalités actuelles du lac.

La partie sud de l'image est très bien classée, d'après nos investigations sur le terrain et la documentation existante ; elle est entièrement couverte par la classe "eaux type 4" avec des profondeurs de l'ordre de 0,50 m IGN. Du point de vue bathymétrique, c'est la région la moins profonde du lac ; elle recoupe d'ailleurs la basse vallée du Ferlo.

Cette classification nous paraît assez satisfaisante, notamment sur la composante eau, mais pourrait être affinée pour préciser les différentes régions bathymétriques du lac. Une classification supervisée par le Maximum de vraisemblance reprenant les mêmes classes que la précédente a également été testée mais a donné de moins bons résultats (voir annexes) ; son échec est lié au caractère hétérogène de la distribution des pixels sur l'image. Elle n'a donc pas été utilisée dans le cadre de cette étude.

⁸ Ces feux ont dû intervenir en 1988 car on voit leur trace sur l'image LANDSAT-TM de novembre 1988

⁹ Les eaux du fleuve sont classées uniquement en fonction de leur turbidité et non de leur profondeur



N16°30'

N16°20'

N16°10'

N16°



- | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Vegetation type 2 | BrBlis | Eaux type 4 | Eaux type 1 |
| Indetermines | Sols sains | Eaux type 5 | Eaux type 2 |
| Fleuve Senegal | Vegetation type 1 | Eaux type 6 | Eaux type 3 |



TABLEAU XLI
Mosaïque lac de Guiers (1989) : classification par le Minimum de Distance

Libellé des classes	Surface (ha)	Canal	Min.	Max.	Moy.	E. type	CV
Eaux type 1 Profondeur > 0 < 2 m IGN Turbidité très forte ; Eaux presque boueuses	1977.75	XS1	53	67	61.73	2.41	0.04
		XS2	44	61	49.67	2.46	0.05
		XS3	25	41	26.61	3.58	0.13
Eaux type 2 Profondeur < 0 > -2 m IGN Turbidité forte	7417.5	XS1	59	78	69.04	1.06	0.02
		XS2	57	70	57.99	1.16	0.02
		XS3	24	50	26.61	1.79	0.07
Eaux type 3 Profondeur > -2 < -4 m IGN Turbidité moyenne	4191	XS1	63	70	66.98	1.26	0.02
		XS2	50	57	54.48	1.40	0.03
		XS3	23	29	25.11	1.27	0.05
Eaux type 4 Profondeur < 1 > 0.5 m IGN Turbidité faible, eaux claires	6698.25	XS1	46	61	53.86	1.98	0.04
		XS2	35	50	41.56	1.94	0.05
		XS3	19	39	28.26	4.22	0.15
Eaux type 5 Profondeur ≈ 1 m IGN Turbidité moyenne à faible	1123.5	XS1	32	54	49.14	1.63	0.03
		XS2	31	40	36.89	1.27	0.03
		XS3	21	38	25.41	3.34	0.13
Eaux type 6 Profondeur ≈ 0.5 m IGN Forte turbulence	2934.75	XS1	59	67	63.88	1.38	0.02
		XS2	45	53	50.43	1.37	0.02
		XS3	21	26	23.49	0.73	0.03
Fleuve Sénégal	1602.5	XS1	63	116	69.00	1.94	0.05
		XS2	32	69	56.30	2.02	0.07
		XS3	25	51	30.46	4.01	0.13
Végétation type 1 végétation aquatique type <i>Pistia sp.</i> et <i>Typha sp.</i> et parfois riziculture	2196.25	XS1	45	61	52.35	2.38	0.05
		XS2	33	49	41.13	2.73	0.07
		XS3	39	71	52.94	8.80	0.17
Végétation type 2 Canne à sucre très chlorophyllienne et végétation aquatique parfois	4425.25	XS1	49	67	56.92	1.99	0.03
		XS2	36	60	45.07	3.19	0.07
		XS3	70	107	87.85	5.67	0.06
Soils sains Terrains à végétation clairsemée (épineux de type <i>Acacia</i> et <i>Balanites</i>) non atteints par le feu	152014.5	XS1	61	110	72.18	3.55	0.05
		XS2	58	105	73.93	4.44	0.06
		XS3	52	110	80.64	3.99	0.05
Brûlis niveau 1	45610.75	XS1	49	73	58.12	2.39	0.04
		XS2	41	70	52.74	3.61	0.07
		XS3	38	66	54.30	4.19	0.08
Brûlis niveau 2 se confondant avec des zones argileuses et/ou boueuses	55294	XS1	53	81	64.37	2.61	0.04
		XS2	44	76	61.60	3.87	0.06
		XS3	51	89	67.71	5.16	0.08
Total pixels classés	285488.50 hectares						

La superposition de la carte topographique du lac aux images SPOT classifiées de 1989 permet de vérifier la conformité des résultats obtenus (figure 95). Cette intégration faite à l'aide du logiciel ER-Mapper a nécessité de mettre les images et la carte dans un même système de projection. Nous avons utilisé le point de référence YOFF 2000 et la projection NUTM 28 (Nord Universal Transverse Mercator, fuseau n° 28) ; c'est d'ailleurs cette projection que nous avons utilisé pour toute l'imagerie satellitaire dans cette étude.

La superposition de la carte topographique du lac aux images SPOT classifiées de 1989 permet de vérifier la conformité des résultats obtenus (figure 95). Cette intégration faite à l'aide du logiciel ER-Mapper a nécessité de mettre les images et la carte dans un même système de projection. Nous avons utilisé le point de référence YOFF 2000 et la projection NUTM 28 (Nord Universal Transverse Mercator, fuseau n° 28); c'est d'ailleurs cette projection que nous avons utilisé pour toute l'imagerie satellitaire dans cette étude.

Le rehaussement du niveau du plan d'eau du lac de Guiers est très apparent. La configuration de l'île de Diokhor en est une preuve tangible. En effet, au 1^{er} février 1989, date de prise de vue des images, la cote du lac était de 1,00 m IGN. Mais ce qui attire le plus l'attention c'est l'emplacement actuel des cotes 2,00 et 0,00 m IGN par rapport au niveau moyen du plan d'eau. La cote 2,00 m qui est un des objectifs à atteindre dans le cadre des grands projets d'aménagement (canal du Cayor, vallées fossiles, Ndiel) ne peut l'être dans les conditions actuelles sans dégâts sur les marges du lac. Le rehaussement des endiguements surtout au nord-ouest du lac est une priorité. La mise à jour de la bathymétrie en est une autre.

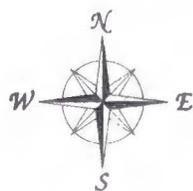
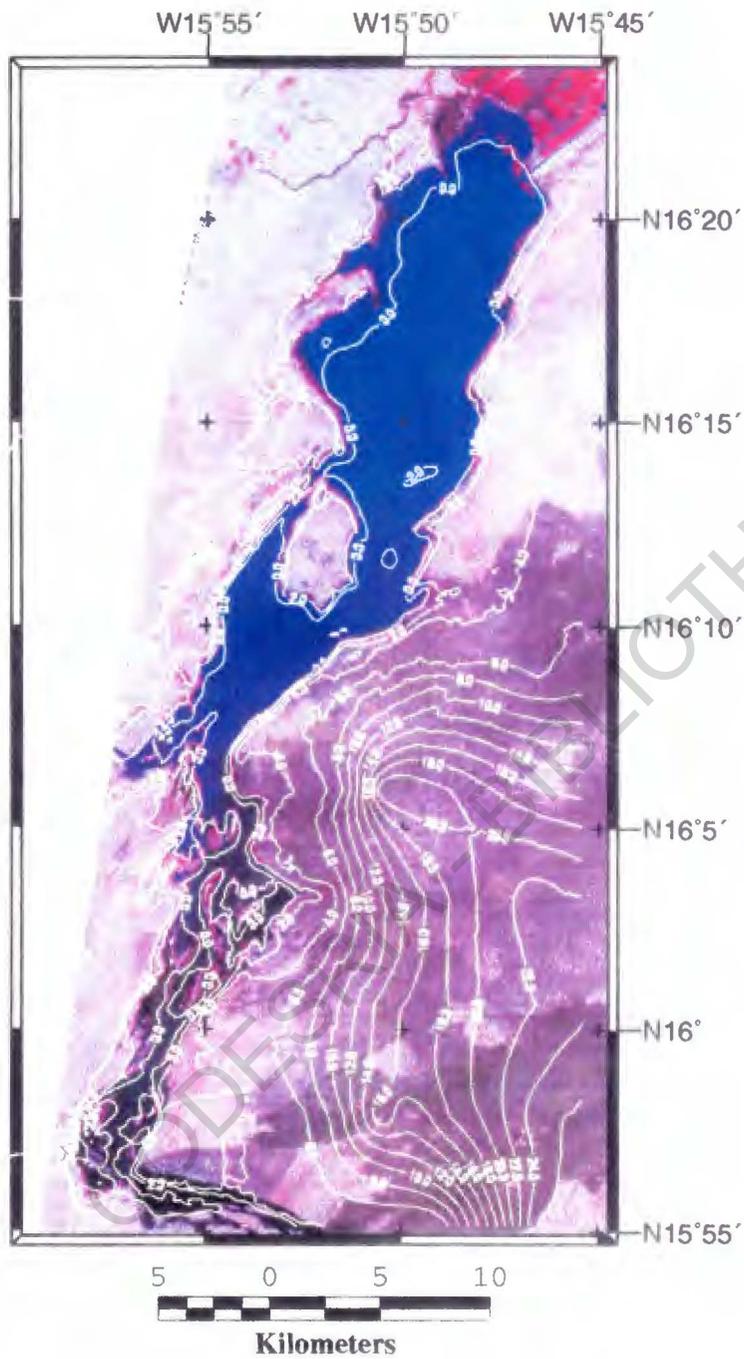
L'étude entreprise ici est estimative, ses résultats ne peuvent en aucun cas être utilisés comme base dans le cadre d'un quelconque projet d'aménagement ou de mise en valeur. Son objectif majeur qui était d'établir un bilan-diagnostic de la bathymétrie du Guiers est pleinement atteint.

Elle révèle une relative stabilité des profondeurs du lac depuis les premiers levés effectués dans les années Cinquante par la MAS. Des changements ont pu être apportés récemment en région nord et extrême sud par les modifications hydrologiques qui se sont opérés dans la région avec la construction des grands barrages. Ces changements doivent être nécessairement vérifiés et validés dans le cadre d'un nouveau levé bathymétrique. Une mesure urgente est la mise en place d'un réseau de points de contrôle au nord et au sud de la région lacustre.

2.1.2. Estimation de la turbidité des eaux

La turbidité d'une eau n'est pas une donnée stable ou figée ; elle connaît des variations interannuelles, saisonnières et même journalières. Pour le cas du lac de Guiers, nous nous sommes basé sur les données de mesure d'éléments en suspension acquises lors des campagnes de mesure du projet EQUÉSEN et celles issues de nos propres observations sur le terrain.

La distribution zonale de la turbidité des eaux du lac de Guiers recoupe pour l'essentiel les grandes divisions géographiques et le sens de la dilution des eaux en provenance du fleuve Sénégal. Des mesures effectuées en 1992 par le projet EQUÉSEN donne les valeurs moyennes de matières en suspension suivantes pour le lac : 0,06 mg.l⁻¹ en région nord ; 0,11 mg.l⁻¹ en région centrale et 0,085 mg.l⁻¹ en région sud. Bien entendu, aujourd'hui avec la jonction permanente entre le lac, la Taoué et le Fleuve, cette relation pourrait être partiellement faussée. La vraie référence pour cette étude repose donc sur les données acquises sur le terrain en 1994 et compilées au tableau XLII et reportées sur la figure 96.



08/1997
 Awa NIANG
 UTIS (ISRA/ORSTOM)
 SPOT (Guiers 1989)

FIGURE 95. — *Superposition de la carte topographique du lac à l'image SPOT de 1989.*

TABLEAU XLII

Mesure de la turbidité à quelques stations du lac de Guiers (réalisation : mai 1994)

Appareillage : disque de SECCH et GPS NAV 5000 D			
Stations	Latitude Nord	Longitude Ouest	Profondeur de disparition du disque de SECCHI (m)
Saninthe	16° 15'00"	15° 49'00"	0.25
Centre lac	16° 15'37"	15° 50'07"	0.25
Embouchure Taoué	16° 21'00"	15° 47'00"	1.20
Teuss	16° 13'08"	15° 50'07"	0.34
Station 15	15° 56'00"	15° 57'00"	0.45
Station 18	15° 58'46"	15° 56'22"	0.60
Keur Momar Sarr	15° 56'22"	15° 56'55"	0.50
Diamenar	16° 00'37"	15° 64'38"	0.42
Syer	16° 05'34"	15° 53'50"	0.38
Guidick	16° 06'44"	15° 54'42"	0.36

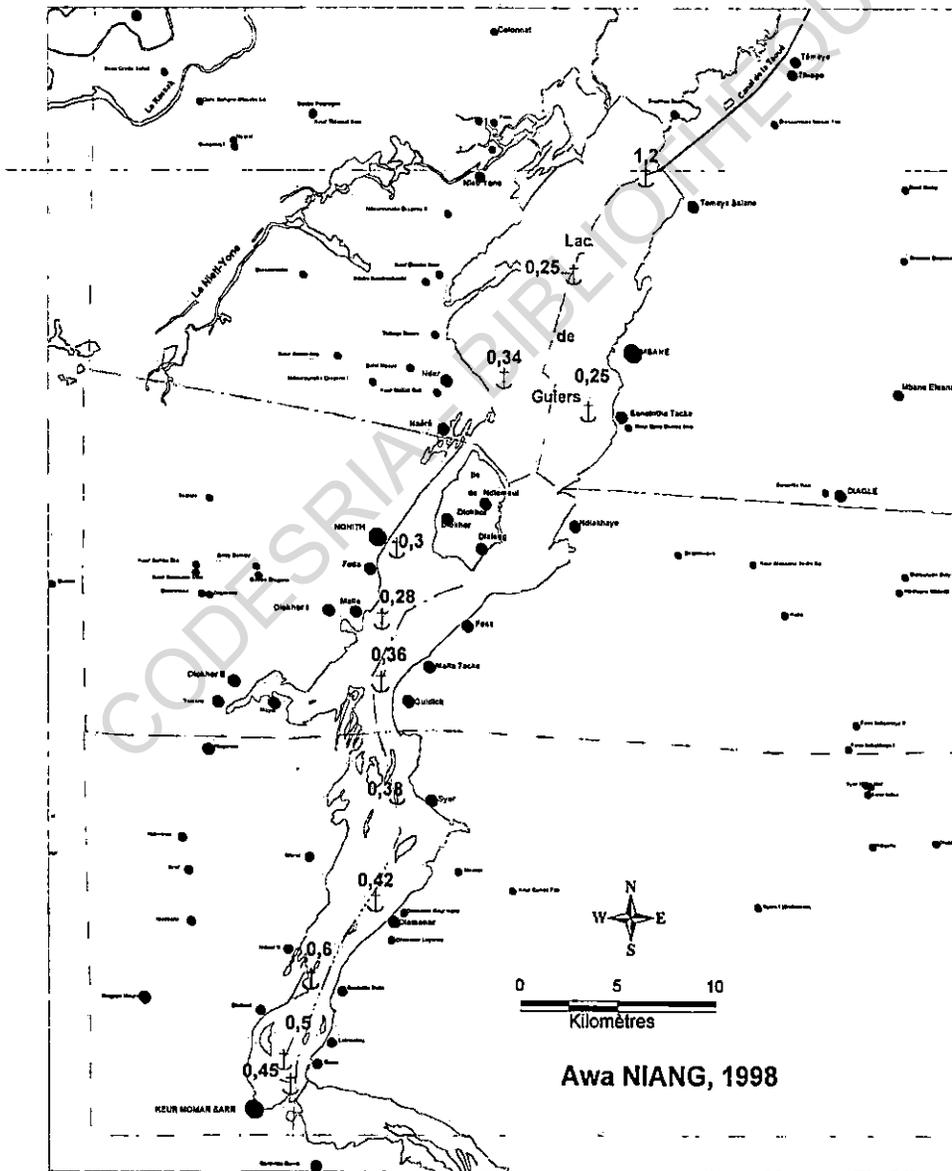


FIGURE 96. — Report cartographique des données de turbidité à quelques stations du lac de Guiers.

Les données de terrain montrent une décroissance des valeurs de turbidité moyenne du nord au sud du lac ; les maxima se retrouvent généralement à l'entrée de la Taoué et sur les marges du lac où la forte activité humaine contribue à rendre les eaux presque boueuses.

La classification supervisée des eaux du lac de Guiers (figure 94 et tabl. XLI) montre une certaine conformité avec les données de terrain. Les eaux se répartissent entre les classes "eaux type 1 à 6", soit de très turbides à claires. La classe "eaux type 1" est très représentative des situations rencontrées en bordure du lac du fait de la pression humaine ; les eaux y sont en effet très turbides. Les eaux de type 6 correspondent à celles présentes en aval de la digue de Keur Momar Sarr révèlent la forte turbulence des eaux à la sortie des vannes, en direction du Ferlo. Cette classe pourrait s'intituler "Panache turbide" ; elle se retrouve d'ailleurs en aval de presque tous les ouvrages vannés (exemple : Panache turbide devant l'embouchure du fleuve Sénégal, en aval du barrage de Diama).

La faible turbidité des eaux en région sud peut s'expliquer par la présence d'une abondante végétation aquatique qui joue le rôle de filtre et contribue à rendre les eaux très limpides.

Avec le mode de gestion hydraulique actuel des barrages au niveau de la Taoué et de la digue de Keur Momar Sarr, cette classification des eaux a pu être quelque peu modifiée. Si les régions définies restent encore les mêmes, leur extension spatiale doit nécessairement être revue en fonction des nouvelles réalités du terrain.

L'ouverture des pont-barrages de la Taoué et de la digue du Ferlo permet de recréer les conditions de libre circulation des eaux qui prévalaient antan. Ces conditions qui prévalent depuis pratiquement 1985 ont pu passablement perturber à la fois la bathymétrie et la turbidité des eaux. Comprendre leur évolution actuelle permettrait de mieux cerner la dynamique de certains facteurs hydrobiologiques tels que la végétation aquatique et la faune malacologique. De nouvelles études bathymétriques et de turbidité sont à placer dans le processus de mise au point d'une meilleure gestion des eaux du lac de Guiers.

2.2. Estimation de la couverture de plantes aquatiques du lac de Guiers

Dès la mise en fonction du barrage de Diama en novembre 1985, il a été noté sur le terrain une importante croissance des plantes aquatiques au lac de Guiers, de même que dans la réserve du Djoudj. Cette végétation composée essentiellement de *Typha australis* et de *Pistia stratiotes* auparavant présente dans le lac a connu au début des années 1990 un développement très rapide. De telles poussées ont été notées dans le passé, dans les années 1950. On a également noté l'apparition de quelques algues pouvant constituer un réel problème à l'exploitation des eaux par la SDE à l'usine de Ngnith.

C'est surtout *Pistia stratiotes* qui a attiré l'attention tant sa multiplication et son extension spatiale ont été spectaculaires. Entre 1991 et 1993, la situation a été telle que l'on évoquait une possible eutrophisation du lac. L'espèce avait durant cette période presque entièrement colonisé la partie sud de la réserve du Guiers ; la digue de Keur Momar Sarr était d'ailleurs trouvée partiellement colmatée. Mais, dès 1994, *Pistia sp.* est en net recul, progressivement colonisée par d'autres espèces, notamment *Echinochloa stagnina*. La menace n'est pourtant pas définitivement circonscrite (Cf. Chapitre I).

Le danger vient du fait que ces plantes sont potentiellement des vecteurs de maladies et peuvent gêner les activités économiques (colmatages des digues et canaux d'irrigation, frein à la pêche et à la circulation des eaux, refuge des adventeurs de récoltes, ...).

A travers l'imagerie satellitaire, nous procédons à une estimation de l'évolution de la couverture de plantes aquatiques entre 1989 et 1993. Une attention toute particulière est accordée à la région sud du lac depuis la boucle de Syer jusqu'à Keur Momar Sarr car il a été prouvé que c'est une région très sensible au développement de la végétation aquatique. Des extraits d'images couvrant cette partie de la réserve lacustre ont été traités (tabl. XLIII).

TABLEAU XLIII
Caractéristiques des images de la partie sud du lac en 1989 et 1993

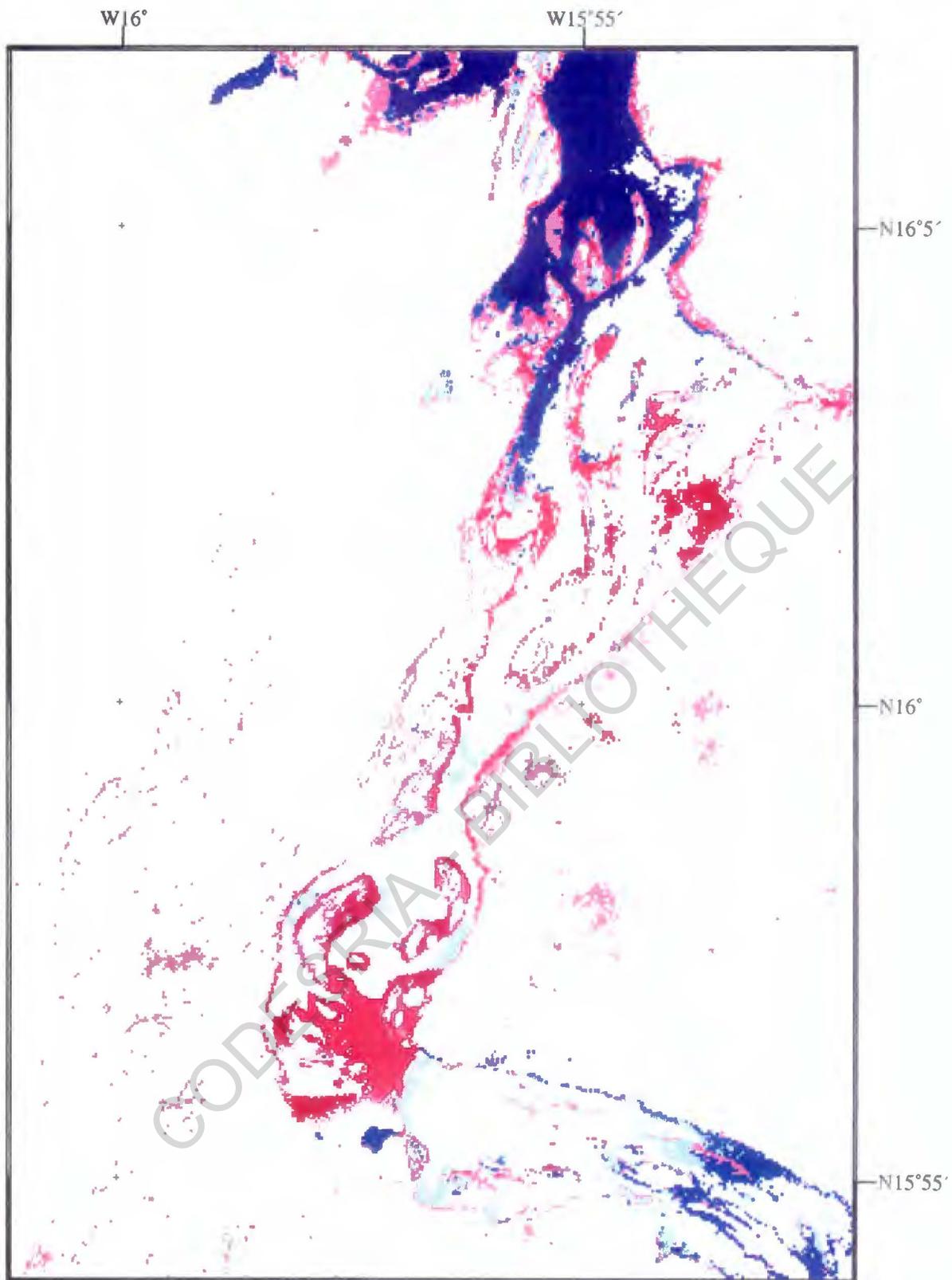
Sud du lac de Guiers (extrait 023-318 du 01 février 1989)						
Image échantillonnée : 1 pixel = 50 m						
Canal	Min.	Max.	Moy.	Ecart type	IV	CV
XS1	2.0	255.0	148.98	56.288	253	0.38
XS2	4.0	255.0	119.39	57.042	251	0.48
XS3	7.0	255.0	104.702	59.315	248	0.57
Surface imagerie : 68 464 hectares						
Effectif en pixels : 286 880 pixels dont 19 840 nuls						
Sud du lac de Guiers (extrait 022-318 du 11 novembre 1993)						
Image échantillonnée : 1 pixel = 50 m						
Canal	Min.	Max.	Moy.	Ecart type	IV	CV
XS1	1.0	255.0	143.56	44.352	254	0.31
XS2	2.0	255.0	103.701	37.252	253	0.36
XS3	1.0	255.0	82.701	33.053	254	0.40
Surface imagerie : 61 886 hectares						
Effectif en pixels : 253 890 pixels dont 15 822 nuls						

Les estimations sont basées sur une classification supervisée par le Minimum de Distance radiométrique des images SPOT de 1989 et de 1993. Les résultats des classifications pour la partie sud (figure 97 et figure 98) montrent une nette augmentation de la surface couverte par la végétation aquatique. Deux classes de plantes aquatiques sont mises en évidence : le type 1 qui comprend surtout *Pistia stratiotes* et le type 2 avec comme espèce majeure *Typha australis*. La surface occupée par cette végétation passe de 800 à environ 2000 hectares pour le type 1 et de 500 à 975 hectares pour le type 2 (tabl. XLIV). Ces chiffres estimés par analyse de l'imagerie satellitaire peuvent être partiellement faussés par certains types de végétation évoluant sur les marges du lac et ayant le même signal radiométrique que les plantes aquatiques. Il serait intéressant de développer des algorithmes parvenant à discriminer les différentes espèces végétales présentes dans la réserve lacustre. Ce travail ne pourrait se faire que par programmation d'acquisitions SPOT couplé à des mesures radiométriques au sol.

La cartographie de l'évolution des plantes aquatiques en 1989 et 1993 sur l'ensemble du lac (figure 99) permet quand même d'établir une comparaison valable avec d'autres données antérieures ou postérieures et mettre ainsi sur pied une base de connaissance pour l'étude de la végétation aquatique du lac de Guiers.



FIGURE 97. — Cartographie des plantes aquatiques au sud du lac de Guiers en 1989.



CODICINA BIBLIOTHEQUE

- Vegetation type 2
- Vegetation type 1

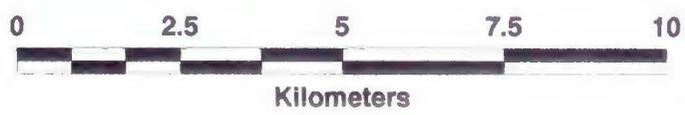
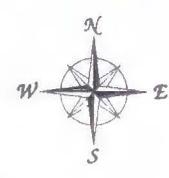


FIGURE 98. — Cartographie des plantes aquatiques au sud du lac de Guiers en 1993.

TABLEAU XLIV
Sud du lac de Guiers : classification par le minimum de distance radiométrique

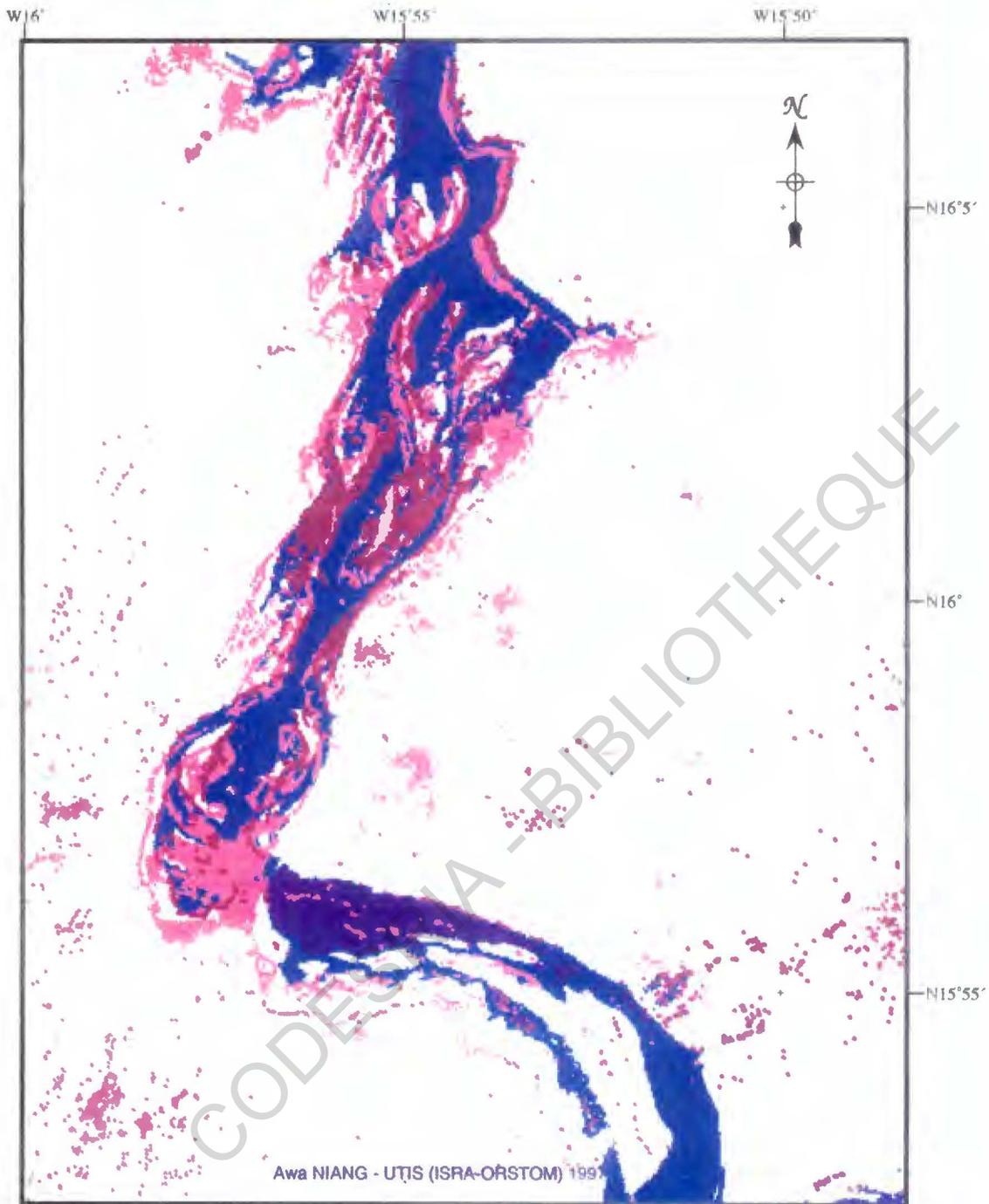
Libellé des classes	Surface (ha)	Canal	Min	Max	Moy	Ecart type
Extrait scène SPOT 023-318 du 1^{er} février 1989						
Végétation type 1	800	XS1	45	61	52.35	2.38
		XS2	33	49	41.13	2.73
		XS3	39	71	52.94	8.80
Végétation type 2	500	XS1	49	67	56.92	1.99
		XS2	36	60	45.07	3.19
		XS3	70	107	87.85	5.67
Extrait scène SPOT 022-318 du 10 novembre 1993						
Végétation type 1	2000	XS1	1	79	28.49	17.975
		XS2	2	76	34.34	11.678
		XS3	35	161	98.7	30.988
Végétation type 2	975	XS1	1	123	42.07	14.055
		XS2	2	79	15.84	22.6
		XS3	153	255	215.24	27.554

Mettre en évidence la couverture de plantes aquatiques au lac de Guiers est une entreprise facile à mener à l'aide de l'imagerie satellitaire. Par contre, nous ne sommes pas parvenus à discriminer les différentes espèces végétales présentes au même moment sur une zone. L'autre problème est que les plantes aquatiques se confondent aux différentes cultures, notamment la canne à sucre au nord et la riziculture au nord-ouest. La végétation d'une manière générale se répartit en deux classes suivant l'intensité de son activité chlorophyllienne.

Typha australis est généralement localisé sur les marges du lac et autour des îlots de la partie sud du lac. *Pistia stratiotes* et le Bourgou connaissent une distribution spatiale plus hétérogène ; ils évoluent surtout en radeaux flottants.

En 1989, la végétation aquatique était presque exclusivement circonscrite à la région sud, autour des îlots et au nord-ouest vers Bountou Bath ainsi qu'à l'entrée de la Taoué avec un remarquable banc d'*Æschynomene elaphroxylon*. Le long des rives on notait la présence de quelques bancs de *Typha sp.*

Les images de 1993 montrent une situation tout à fait différente. L'important amas de végétation aquatique que l'on note devant la digue de Keur Momar Sarr est attribuée pour bien des raisons à *Pistia stratiotes* et aux espèces qui l'ont progressivement colonisée. L'avancée de *Typha australis* sur les rives est également assez significative. Les îlots de la région sud disparaissent sous la végétation.



■ Plantes aquatiques 1989

■ Plantes aquatiques 1993



FIGURE 99. — Cartographie des plantes aquatiques du sud du lac de Guiers (1989-1993).

2.3. Evolution des surfaces irriguées à partir du lac entre 1989 et 1993

L'augmentation des surfaces irriguées à partir du lac de Guiers constitue l'un des phénomènes spectaculaires des impacts du barrage de Diama. La disponibilité croissante de l'eau et l'amélioration de sa qualité ont incité de plus en plus de paysans à s'installer autour du lac ; d'abord dans la zone traditionnelle de décrue puis de plus en plus vers le *dieri*. Toutes les conditions sont désormais réunies pour accroître les potentialités agricoles du lac de Guiers : la terre et le potentiel humain. Cependant, cette économie agricole en pleine expansion est difficile à évaluer du fait du manque d'encadrement et de la non identification de ses acteurs.

La région nord, notamment les cuvettes de Nder, Mbane, Ndombo, Thiago et Colonat se sont très tôt investies dans la riziculture irriguée, sous l'encadrement de la SAED et ce depuis le début des années 1970. La localité de Foss constitue la limite sud de l'intervention de la SAED dans le secteur du lac de Guiers. Mais, malgré l'absence d'encadrement technique, la pratique de l'irrigation s'est rapidement généralisée en région sud, dès les premières années de fonctionnement du barrage de Diama. Elle y connaît même une évolution très rapide.

L'expansion de l'agriculture irriguée pourrait apporter bien des bénéfices à l'économie de la région. Cependant, au delà des retombées économiques, une réflexion doit être amorcée sur les effets potentiellement néfastes de la pression humaine dans cette partie du système fluvio-lacustre. Les premières estimations de l'avancée des maladies hydriques, avec surtout l'épidémie de bilharziose à Richard-Toll en 1993 (HANDSCHUMACHER *et al.*, 1993) doivent pousser à un débat sur l'opportunité d'un développement hydro-agricole acharné. Une bonne connaissance de la pratique de l'irrigation, ses acteurs, ses outils et sa localisation s'impose pour une meilleure prise en compte dans le cadre des projets d'aménagement.

La cartographie de quelques points de pompage privés autour du lac de Guiers (figure 100) peut constituer déjà un premier inventaire de l'extension des cultures irriguées, en dehors de zones classiques. L'imagerie satellitaire est corrélée aux données issues des enquêtes de terrain (Cf. Première Partie, Chapitre II), en particulier la localisation des GMP⁹ et l'estimation des surfaces mises en valeur hors de la zone SAED. Ces données seront plus tard intégrées à la base de données du lac de Guiers.

⁹ Groupe Motopompe

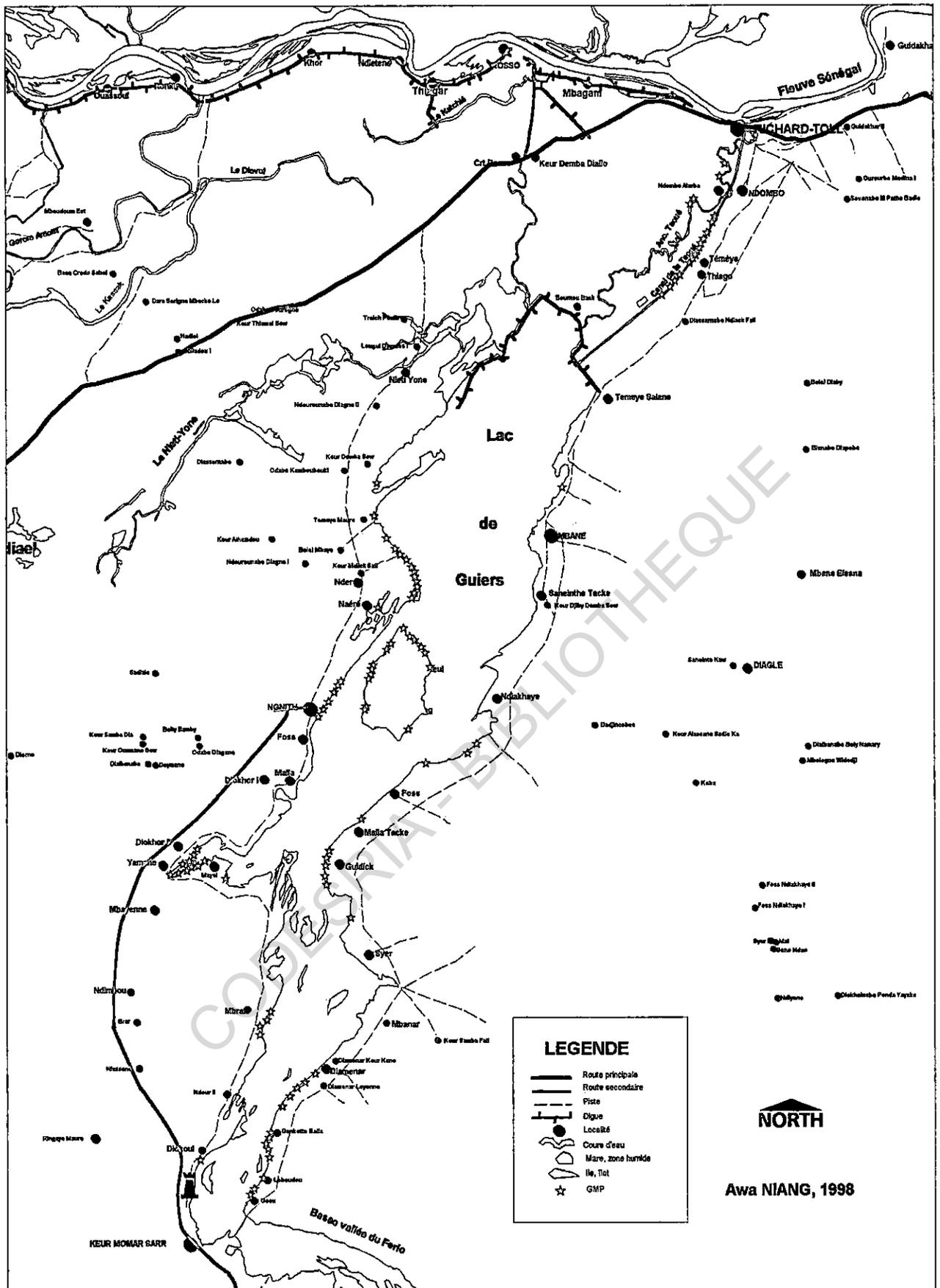


FIGURE 100. — Localisation de quelques points de pompages privés autour du lac de Guiers (Données de terrain de NIANG et COLY, 1995)

Les dates de prise de vue des images SPOT de 1989 et 1993 se situent en dehors des périodes de mise en culture et sont aussi antérieures aux enquêtes réalisées sur le terrain. Par ailleurs, la délimitation des périmètres au sud, du reste très irrégulière permet difficilement de retrouver leurs limites après la saison de culture. Ce n'est pas le cas par exemple pour les parcelles gérées par la SAED ou la CSS. Il est donc urgent de procéder à la prise en main des activités agro-économiques de la zone pour une meilleure gestion de ses impacts.

À partir des images SPOT utilisées dans cette étude, il serait hasardeux de vouloir donner une estimation des superficies irriguées à titre individuel autour du lac de Guiers, surtout dans la partie sud.

L'analyse de l'agriculture irriguée villageoise (Cf. Première partie, Chapitre III) avait d'ailleurs montré le caractère assez particulier de cette activité en région sud de Guiers. Les installations sont facilitées par le caractère rudimentaire des exploitations et la relative facilité d'acquisition du matériel de pompage, en location ou même en prêt. Au sud de Foss, les petits exploitants s'installent et s'organisent individuellement ou en GIE, sans aucun encadrement technique et sans aucune autre administration que la leur.

Ceci repose encore une fois le problème de la gestion de l'environnement lacustre. Quelle gestion doit être appliquée dans le futur ? Doit-on privilégier la fonction de réservoir d'eau douce ou celle de réserve d'eau pour les activités hydro-agricoles ? Ou alors doit-on laisser cohabiter et se développer anarchiquement des activités souvent antagonistes ? Le mode de gestion-actuel du milieu doit-il perdurer ?

Ne doit-on pas plutôt aller vers une "spécialisation" de la réserve du lac de Guiers ?

Les données de SPOT se révèlent particulièrement intéressantes pour la gestion du milieu lacustre. Si les paramètres physico-chimiques ne sont pas mesurables à partir de l'imagerie satellitaire, par contre elle peut être utilisée comme appui à une meilleure compréhension des mécanismes de fonctionnement du milieu lacustre. Les données satellitaires peuvent aussi être utilisées pour affiner les bilans hydrologiques et qualitatifs, notamment par une meilleure connaissance de la bathymétrie et de la turbidité des eaux.

Des états évolutifs de l'environnement lacustre peuvent être facilement dressés et assimilés dans le cadre d'un système d'information géographique. La vectorisation, qui est généralement basée la conversion des résultats de classification en fichiers polygones ou polygones, permet de réduire considérablement le volume des données qui est l'un des handicaps de l'imagerie satellitaire.

3. COMMENTAIRES ET PERSPECTIVES

Avec des produits et des traitements de plus en plus performants et de plus en plus sophistiqués, la télédétection présente des avantages certains dans le suivi et la gestion de l'environnement. Ces dernières années, l'apparition de nouveaux sous-produits et de nouvelles possibilités d'exploitation (spatiocartes, modèles numériques de terrain, prévision des récoltes, etc.) ont ouvert de nombreux champs pour la télédétection.

Cependant, pour les utilisateurs des pays en développement, le principal problème principal reste l'accessibilité des données, tant en termes de coûts que de délais d'acquisition. Le défi pour ces utilisateurs est de rentabiliser au maximum le peu de données disponibles mais surtout de développer une technicité, de manière à contourner les coûts élevés de mise en œuvre du traitement d'imagerie satellitaire.

3.1. Avantages de l'utilisation des données de télédétection dans le cadre de la gestion des milieux naturels

Le caractère multispectral et multitemporel des données de télédétection spatiale fait qu'elles sont très performantes dans le domaine du suivi et de la gestion des milieux naturels. La multiplication des capteurs, l'accroissement de leurs potentialités et la résolution de plus en plus fine des images augure d'un boom de l'utilisation des données satellitaires dans presque tous les domaines des sciences de la terre et de la mer.

Aujourd'hui, l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale donne lieu à de nombreuses applications et produits. On notera surtout les produits cartographiques, la mise en place de bases de données géographiques et la planification de la gestion des milieux naturels.

Les données de télédétection référencées géographiquement ou non peuvent fournir de nombreuses informations utilisables en cartographie. La composition colorée en elle-même est une carte qui peut servir de repère sur le terrain lors de la validation des classes définies par le thématicien. De plus, les superpositions avec des données vectorielles permettent de produire des spatiocartes d'une bonne qualité (exemples avec le logiciel ER-Mapper).

La plupart des logiciels de traitement d'images permettent de procéder à des corrections géométriques et géographiques. Ce qui facilite d'autant plus l'intégration dans des systèmes d'information géographique.

L'utilisation des données de télédétection satellitaire dans la constitution de bases de données géographiques est relativement récente. Elle nécessite d'importantes ressources matérielles et logicielles, vu la taille des données à manipuler. Les images satellites peuvent servir de fonds cartographique pour des bases de données, relationnelles ou non, dès lors qu'elles sont référencées géographiquement.

La résolution très fine des images SPOT (20 m SPOT XS, 10 m pour le Panchromatique et une résolution au sol de 5 m devrait être atteinte dès le lancement de SPOT-4) et LANDSAT (30 m pour LANDSAT-TM) donne des images très claires, assimilables à des photographies classiques. Au niveau de l'interprétation des formes, cela représenterait un avantage certain, en particulier pour un utilisateur qui ne connaît pas très bien le terrain. Le canal Panchromatique de SPOT et les prises de vue stéréoscopiques donnent lieu à de nombreuses applications, en particulier dans le domaine de la représentation tridimensionnelle, en topographie, mais aussi en urbanisme et en prospection géologique.

L'imagerie satellitaire est couramment utilisée au Sénégal pour l'estimation de la pluviométrie décadaire (Réseau EPSAT- μ avec les données METEOSAT), la prévision des récoltes (le CSE avec les données NOAA-AVHRR), l'estimation des surfaces emblavées dans le delta (la SAED avec les données SPOT-HRV), la propagation de la crue artificielle du fleuve Sénégal (théoriquement l'OMVS avec les données SPOT-HRV). Elles interviennent donc effectivement dans la gestion des ressources naturelles et la prise de décisions à une certaine échelle.

Dans l'état actuel de la mise en valeur des terres du Delta, une résolution de 30 à 20 m nous paraît plus que suffisante pour dresser des cartes d'occupation des sols. D'ici une décennie, la situation ne sera plus forcément la même, en particulier si le plan d'aménagement des terres conçu par l'OMVS tourne à plein régime.

Dans le cas du lac de Guiers, l'imagerie satellitaire nous paraît particulièrement intéressante dans le cadre de la gestion des eaux. Elle pourrait servir à une gestion quantitative plus fine des eaux du lac, entre autres en évitant de lui donner une surface évaporante trop grande. Mais dans un milieu aussi réduit que le lac de Guiers seules les données de télédétection à haute résolution s'avèrent bénéfiques ; des données comme celles de METEOSAT ou NOAA-AVHRR, du fait de leur résolution au sol, n'apportent que des informations d'ordre général.

Dans le suivi de la qualité des eaux, un des gros problèmes est posé par les rejets d'eaux de drainage provenant de la CSS et qui sont très minéralisées ; elles contiennent également des résidus d'engrais, de pesticides et produits chimiques divers. Dans ce cadre, l'étude du mouvement des masses d'eau et la dispersion du panache turbide, notamment en aval de la digue de Keur Momar Sarr est possible grâce à la télédétection.

Pour le volet hydrobiologie, le développement végétal constaté depuis 1990, dû à l'enrichissement des eaux par les rejets des cultures irriguées et à la stabilisation du niveau des masses d'eau, peut être aisément pris en compte ; un exemple en a été fourni dans ce travail.

Toute prise de décision implique une appréciation exacte des phénomènes concernés, l'utilisation des techniques de la télédétection est donc tout à fait indiquée pour étudier et suivre certains aspects environnementaux comme l'évaporation, la végétation aquatique, la dispersion du panache turbide, la bathymétrie, etc.

Le lac de Guiers est appelé à jouer un rôle économique de plus en plus important dans les années à venir. L'enjeu est de taille si l'on considère les importantes sommes mobilisées dans le cadre du financement de projets comme celui du canal du Cayor ou de l'opération « l'eau à Linguère ». Maîtriser la gestion de l'espace du lac est un challenge capital pour tout le pays. Un organisme centralisé de gestion du lac devra être mis sur pied pour gérer les diverses interactions entre un environnement aquatique, ses populations riveraines, leurs activités et des projets de développement à l'échelle nationale sur un espace de quelques milliers de km². Dans une telle optique, les méthodes classiques d'investigation et de gestion de l'environnement ne pourront pas toujours être mises en œuvre. L'utilisation des données de télédétection satellitaire nous paraît bien indiquée pour répondre à ces défis.

L'adéquation d'échelle entre l'imagerie SPOT et la région du lac de Guiers mérite d'être soulignée. Le lac de Guiers couvre en effet 50 km de long pour 7 km de large en moyenne ; une scène SPOT - XS couvre environ 60 km de long sur 60 km de large. Les données de SPOT permettent donc une vision synoptique de l'environnement lacustre complétée par les immenses possibilités d'études diachroniques.

3.2. Facteurs limitants dans la mise en œuvre de la télédétection : le coût des produits

Malgré des avantages certains liés pour l'essentiel à leur qualité et aux possibilités de manipulations, l'utilisation des données de télédétection présente quelques inconvénients. Ceux-ci sont principalement liés au coût des produits, tant les images que les stations de traitement.

Une des grandes limites de l'utilisation des données de télédétection à haute résolution dans les pays en développement réside dans le coût de sa mise œuvre. En effet, le traitement des images nécessite de grandes capacités de disque et des stations de travail très puissantes donc très onéreuses, en particulier pour le milieu universitaire aux budgets limités. La coopération règle quelques uns de ces problèmes, il est vrai ; cependant une solution d'ensemble doit être pensée par les chercheurs concernés pour résoudre ce problème.

L'acquisition des données satellitaires à haute résolution pose problème pour un utilisateur des pays en développement. A titre d'exemple, le coût moyen d'une scène SPOT, niveau de rectification 1B sur CD-ROM est de 600 000 Francs CFA environ. Il est vrai qu'avec un BRAIS¹¹, accessible à certaines institutions sur projet ISIS comme le CNRS¹², ce prix tombe à environ 250 000 Francs CFA. Mais c'est souvent par le biais de la coopération que ces images arrivent aux mains de certains utilisateurs en milieu universitaire. Les données des satellites météorologiques comme METEOSAT et NOAA-AVHRR sont plus accessibles, notamment grâce aux sites de réception de l'UTIS et du CSE. Cependant, ces données se prêtent très peu ou pas du tout à des études environnementales fines ; elles peuvent tout juste être utilisées dans le cadre d'études régionales en météorologie ou en océanographie physique.

L'utilisation des données de télédétection est appelée à se développer et à s'étendre à des disciplines et des applications de plus en plus diversifiées. Cependant, au prix actuel de l'imagerie satellitaire, il est certain que tout le monde ne pourra pas bénéficier des retombées positives. Il convient donc de développer de nouvelles méthodes d'acquisition et de partage des données.

Ailleurs, le monde scientifique est en passe de résoudre ce problème par la mise en place de banques de données images accessibles à tout usager qui en ferait la demande, sous réserve de partager ses données et de faire bénéficier tout le monde de ses découvertes.

Au Sénégal, le problème se pose tout autrement. En effet, de nombreuses personnes ou organismes disposent d'imagerie satellitaire SPOT ou LANDSAT (Voir annexes), qui il faut le souligner sont exploitées à moins de 50 % de leurs potentialités.

Pour avoir ne serait-ce qu'un extrait de ces images, c'est souvent la croix et la bannière : du courrier à n'en plus finir, des démarches interminables qui peuvent parfois se solder par une fin de non recevoir. En fait, ce qu'il faut comprendre, c'est que l'image brute en elle même n'a aucun intérêt, c'est en l'analysant et en la traitant qu'on arrive petit à petit à en tirer le maximum de renseignements possibles. Et chacun peut en tirer les informations propres à sa discipline.

¹¹ Bon de réduction à l'achat d'image SPOT

¹² Centre National de la Recherche Scientifique

A titre d'exemple, un organisme comme l'OMVS détient à elle seule la plus importante banque de données d'images SPOT¹² du pays, pour ne pas dire de la sous région. En comparant le coût de ces images aux résultats produits à ce jour, c'est pour nous une « déception ».

La solution à ce problème réside dans la constitution de banques de données nationales et ou sous-régionales. Au Sénégal, ce travail de capitalisation pourrait être confié au Laboratoire de Télédétection du Département de Géographie ; il s'agirait dans un tel cas, de donner une description des images, leur support, leur emplacement et si possible les traitements déjà effectués dessus. Pour les étudiants en Géographie, en Sciences de la terre et de l'environnement d'une manière générale, cela représenterait un important gain de temps et permettrait une meilleure orientation des sujets de mémoire ou de thèse.

Une fois acquise, l'image doit être archivée puis traitée pour en extraire l'information utile. Pour charger une scène SPOT XS, il faut au minimum 40 Mo octets d'espace disque, il en faut le double pour le traitement et l'analyse de l'image, jusqu'à la sortie du produit final.

A l'heure actuelle, les programmes de traitement d'images se révèlent particulièrement exigeants en espace disque. À titre d'exemple, nous donnons deux configurations (Tableau XLV) pour traiter des images SPOT avec le logiciel ER-Mapper installé sur PC. Malgré un tel investissement, la capacité des ordinateurs risque d'être rapidement dépassée, surtout si l'on travaille sur des images non échantillonnées.

Une autre limite des données de télédétection à haute résolution spatiale réside dans les délais d'acquisition des images qui parfois peuvent être assez longs ; surtout si l'on se trouve loin des centres de commercialisation de ces produits. La répétitivité de SPOT est de 26 jours et il est donc évident que ses données ne peuvent se prêter à des suivis réguliers sur des phénomènes à évolution rapide comme les inondations et les feux de brousse.

La faible résolution spectrale de SPOT – 0,4 à 0,8 μm – constitue également une limitation majeure à l'utilisation de ses données dans des applications où la discrimination de la végétation est très importante (exemple de la prévision des récoltes basée sur l'examen de l'activité chlorophyllienne). Ce défaut du satellite devrait cependant être rectifié avec SPOT-4 et SPOT-5.

TABLEAU XLV
Deux exemples de configuration pour ER-Mapper 5.20

<i>Configuration minimale</i>	<i>Configuration maximale</i>
Pentium 133 MHz	Pentium 166 MHz
16 Mo RAM	64 MO RAM
Mémoire virtuelle 32 bits	Mémoire virtuelle 32 bits
Système d'exploitation WIN. 95	Système d'exploitation WIN. 95
Écran EGA	Écran EGA
1,2 Go d'espace disque	2,2 Go d'espace disque
Prix moyen 800 000 F CFA	Prix moyen 1 200 000 F CFA

¹² depuis pratiquement 1986

Conclusion à la deuxième partie

La gestion qualitative des eaux du lac de Guiers est une entreprise de grande envergure, si l'on considère ses différentes implications (remise en eau du Ferlo et du Ndiael, projet canal du Cayor). Dix ans après la construction du barrage de Diama, c'est l'occasion de tirer un premier bilan qui nous paraît positif. La disparition des remontées marines est en effet un acquis non négligeable. Bien évidemment, les conséquences spectaculaires sur le développement de la végétation aquatique doivent attirer l'attention sur la fragilité de l'équilibre écologique de la région qui nécessite un suivi régulier et rigoureux. Des acteurs comme la CSS et les petits périmètres privés sont à surveiller et à contrôler car ils participent activement à l'enrichissement des eaux et à l'augmentation de la minéralisation par les apports d'engrais, pesticides et produits chimiques divers. Un autre aspect qui ajoute à la complexité de ce milieu est que la baisse notée au niveau des concentrations en minéraux dissous ne s'est pas répercutée au niveau du stock qui lui est plutôt en hausse, du fait de l'arrêt des pompages CSS dans le lac alors qu'elle continue à y rejeter ses résidus de drainage. Avant la mise en service du barrage de Diama, ces pompages contribuaient à la régulation chimique des eaux du lac de Guiers.

Le modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers (GIL) permet désormais une meilleure compréhension des effets du mode de gestion hydrologique sur le comportement qualitatif des eaux. Il permet d'analyser et de simuler les impacts de différentes options de gestion de la réserve lacustre. Les simulations réalisées montrent l'importance d'une prise en compte des critères de gestion du milieu pour préserver son équilibre. Dans la perspective de la réalisation d'ouvrages comme le canal du Cayor ou la remise en eau de la vallée du Ferlo, cet outil se révèle d'une importance capitale. Cependant, les résultats obtenus à partir du modèle GIL ne doivent pas être considérés comme infaillibles ; ils ne dispensent pas de se confronter aux réalités du terrain qui, seules, aident à la réalisation de mises à jour correctes et fiables.

Ce modèle pourrait être amélioré par le calage de ses paramètres d'entrée aux normes d'utilisation des eaux dans la région lacustre. L'introduction de normes d'utilisation des eaux permettrait bien évidemment un meilleur contrôle des impacts qualitatifs néfastes des différents paramètres du bilan hydrologique.

La télédétection satellitaire à haute résolution spatiale constitue un excellent outil pour le suivi et la gestion de l'espace rural autour du lac de Guiers. Elle permet de mesurer l'évolution des cultures irriguées, la dégradation des sols, l'extension des zones habitées, les plantes aquatiques, l'estimation de la bathymétrie et de la turbidité des eaux. En somme elle permet de caractériser l'évolution du milieu à une échelle de temps pluriannuelle. Cependant, les données actuellement disponibles n'autorisent pas d'aller au-delà de la simple caractérisation du milieu et des composantes principales.

Pour l'heure, les données de télédétection existantes sur le lac de Guiers se sont révélées suffisantes pour la réalisation d'une base de données environnementales très simple mais offrant de nombreuses possibilités d'évolution. L'échelle de ces données est tout à fait adaptée à l'environnement du lac de Guiers d'un point de vue tant spatial que temporel. Les données du satellite SPOT sont tout à fait indiquées pour une prise en main de la gestion de l'espace autour du lac de Guiers. Elles donnent une vision globale de la région lacustre que ne permettent pas les outils classiques d'investigation.

Troisième partie

SIG GUIERS

Un système d'information géographique pour la gestion intégrée et la planification des ressources en eau dans le système fluvio-lacustre du Guiers

Après avoir présenté le tableau général de la région et ses composantes principales, puis insisté sur la gestion qualitative des eaux, qui est un des problèmes majeurs de la région, cette dernière partie aborde les modalités de conception d'un système d'information géographique orienté vers la gestion des eaux et de ses implications dans le système fluvio-lacustre du Guiers.

Outre sa vocation de base de données centrale, un tel système devrait servir de relais entre les différents acteurs et peut-être même de fondement à une structure centralisée chargée de la gestion intégrée du lac et de son environnement.

CODESRIA - BIBLIOTHÈQUE

Chapitre I

DE LA BASE DE DONNEES AU SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE : DEFINITIONS, FONCTIONNALITES, MISE EN ŒUVRE

1. BASES DE DONNEES ET SYSTEMES DE GESTION DE BASES DE DONNEES

L'idée fondamentale d'une base de données est de définir, décrire et gérer des données; de les stocker, les fournir à de multiples utilisateurs ou programmes indépendants au sein d'une structure. La base de données ne doit donc pas être confondue avec la banque de données qui, selon l'AFNOR¹, est un ensemble de données relatives à un domaine précis, organisé de manière à en faciliter la consultation (exemple : météo nationale).

Les systèmes de gestion de bases de données nés dans les années Soixante-dix permettent de gérer des bases de données en assurant les fonctionnalités de saisie, de correction et d'extraction (ROUET, 1991).

1.1. Organisation des données dans les SGBD

La gestion des données dans une base suppose au préalable la description de leur organisation logique dans l'espace de leurs liens, donc la définition d'un modèle d'organisation. Cette modélisation requiert au préalable la définition d'un dictionnaire des données comprenant leur nom, leur type, leur extension, leur individualisation par une clé, leurs liens par combinaison de clés.

1.1.1. Le dictionnaire des données

Le dictionnaire est une liste signalétique de l'ensemble des données élémentaires à utiliser dans le futur système d'information et sur laquelle doivent s'accorder tous les "intervenants". Il doit être épuré de tous les synonymes et polysèmes et accompagné de fiches descriptives mentionnant les contraintes syntaxiques et/ou sémantiques.

Le dictionnaire des données se présente généralement sous la forme d'un tableau à deux entrées (tabl. XLVI). Il comprend le nom des données, leur définition, leur type, leur taille et leur nature et une rubrique d'observations réservée aux remarques éventuelles que l'on peut faire sur certaines données.

Le dictionnaire des données reflète la structure de l'information au sein d'une base et permet de modéliser son organisation. C'est un outil indispensable tant au programmeur qu'à l'utilisateur de la future base de données car il donne une vue claire des possibilités de la base et permet d'en étendre rapidement les champs d'application.

Il accompagnera la base de données tout au long de son évolution jusqu'à la mise en place d'un système d'information.

¹ Association Française de Normalisation

TABLEAU XLVI
Présentation du dictionnaire des données

Nom	Définition	Type	Taille	Nature	Observations
cdst	Code d'une station de mesure	AN	5	SI	
débit	Débit d'une motopompe en m ³ /H	N	3	ST	
nmloc	Nom d'une localité	A	15	SI	
cote	Hauteur d'un cours d'eau en m IGN	N	3.2	M	

AN : alphanumérique ; N : numérique ; A : alphabétique ;
SI ; signalétique ; ST ; situation ; Mouvement
Le chiffre après point indique le nombre de décimales

1.1.2. Les modèles de données

Une base de donnée est un ensemble de données quantitatives et qualitatives stockées dans des fichiers ; la manière dont ces fichiers sont stockés permet de classer les systèmes de gestion de base de données (SGBD) en quatre types. On a, dans l'ordre d'apparition : le modèle hiérarchique ; le modèle réseau ; le modèle entité association et le modèle relationnel. Ces deux derniers types sont les plus connus et aussi les plus utilisés ; leur efficacité a été démontrée avec l'apparition de la méthode MERISE au début des années soixante-dix ; eux seuls seront décrits.

1.1.2.1. Le modèle entité-association

Le modèle modèle entité-association ou individuel est très proche du langage naturel d'où son apprentissage facile. Sa conception résulte d'une amélioration des modèles hiérarchique et réseau qui l'ont précédé. Dans le modèle individuel on distingue (figure 101) :

- les entités qui expriment un type ou une classe d'objets dont l'existence est reconnue par un organisme ;
- les associations entre ces entités qui peuvent être de deux types : dépendance fonctionnelle ("one to many") ou association complexes ("many to many") qui permettent un large éventail de choix possibles dans les associations. On parle aussi de dépendance fonctionnelle forte c'est-à-dire obligatoire et de dépendance fonctionnelle faible ou facultative.

L'entité, de forme substantive, est représentée dans un rectangle tandis que les associations de forme verbale sont figurées dans un ovale. Les cardinalités sont mentionnées avec un minimum et un maximum (exemple : 1,n ou 1,1).

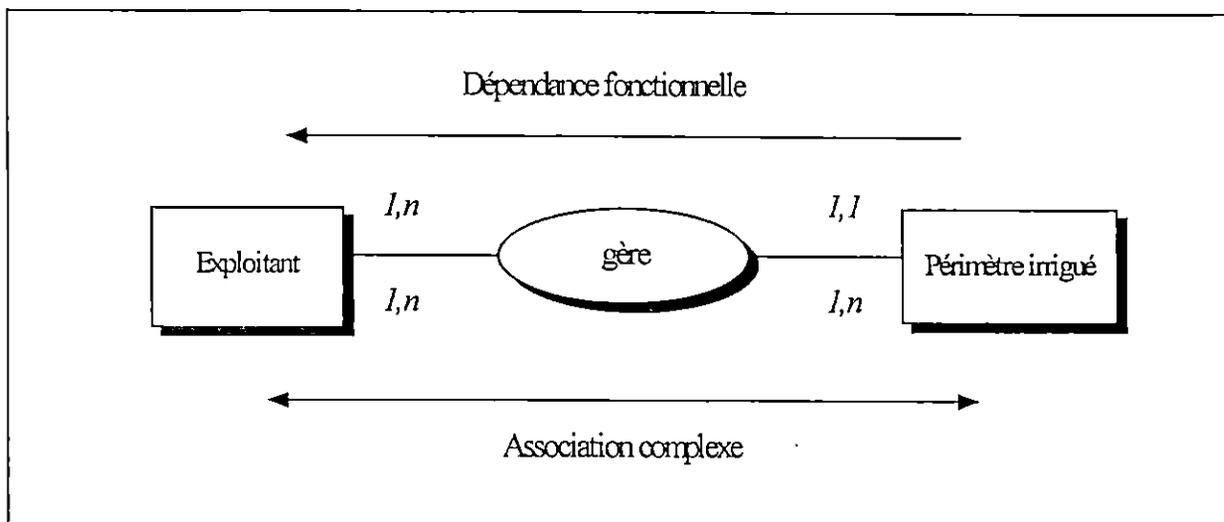


FIGURE 101. — Représentation graphique du modèle entité-association.

Chaque entité est identifiée par une donnée unique et représentée dans le dictionnaire des données. Les redondances sources de difficultés dans les bases de données hiérarchique et réseau sont ainsi évitées, d'où une meilleure gestion de l'espace disque dévolu à la base de données.

Les associations permettent d'activer les liens entre les occurrences de chaque entité et l'accès rapide à une donnée à partir d'une autre donnée à laquelle elle est liée par des clés. Le modèle individuel est associé à un vocabulaire spécifique :

- une entité est un phénomène réel et indivisible qui apparaît à la surface de la Terre ;
- un objet est la représentation numérique de tout ou d'une partie d'une entité ; il peut être élémentaire ou composé ;
- l'association est soit sémantique, topologique ou de composition ; elle lie une entité avec elle-même, deux entités ou plus de deux entités ;
- l'occurrence se rapporte autant aux entités qu'aux associations ; pour une entité donnée, chaque objet élémentaire correspond à une occurrence tandis qu'au niveau des associations, la clé des occurrences est toujours formée par la combinaison des clés des entités associées ;
- La cardinalité est le nombre d'occurrences d'un objet dans une association donnée. Elle est représentée avec deux chiffres entre parenthèses ; le premier chiffre exprime le minimum et indique si la relation est obligatoire (1) ou non (0) tandis que le deuxième appelé maximum doit faire l'objet d'une attention particulière ; il exprime le nombre d'occurrences à rechercher entre les éléments. Il existe quatre types de cardinalité (0,1), (0,n), (1,1), (1,n) ;
- une propriété est un phénomène réel qui apparaît à la surface de la Terre et qui ne se subdivise pas en phénomènes du même type ; c'est une donnée élémentaire conforme aux choix de gestion et utilisée pour décrire les entités et les associations ; une propriété correspond donc à une rubrique d'une association ou d'une entité.
- l'identifiant est une propriété d'une entité permettant de caractériser chacune de ses occurrences d'une manière unique.

1.1.2.2. Le modèle relationnel

La conception des bases de données relationnelles a tout d'abord été l'œuvre de théoriciens et de mathématiciens ; elles ont été envisagées dès 1969 par E. CODD mais considérées comme irréalisables durant les années 70. C'est au début des années 1980, qu'elles ont commencé à être utilisées (ROUET, 1991). Aujourd'hui, c'est devenu un standard en matière de gestion des données.

Une base de données relationnelles est un ensemble de données reliées entre elles par des relations dont chacune peut contenir 1 ou n donnée(s). Le modèle relationnel repose sur la notion mathématique de relation qui est « un sous ensemble du produit cartésien d'une liste de domaines sémantiques » (MOUNYOL, 1991). Dans le modèle relationnel, les données sont organisées en tables à deux entrées dont les lignes sont des enregistrements et les colonnes des attributs.

L'intégrité des données constitue la contrainte majeure dans le modèle relationnel ; elle définit des règles à respecter pour toutes les données lors du chargement dans la base. Le respect de ces règles permet une fiabilité des données et multiplie les possibilités de traitement.

Au modèle relationnel sont associés différents concepts tels que domaine, relation, attribut ainsi qu'un langage lié à sa structure.

Une relation ou table est un ensemble d'informations de même nature regroupées dans un tableau à deux dimensions dont les lignes sont des n-uplets (ou tuples) et les attributs des colonnes.

Une occurrence ou tuple ou encore N-uplet est un ensemble d'informations appartenant à un élément d'une relation ; un tuple représente donc une ligne dans une table.

Un attribut est une colonne ou rubrique d'une relation désignée par un nom de variable. A chaque attribut est associé un domaine sémantique qui fixe les valeurs admises par l'attribut.

La clé d'une relation est un attribut ou un ensemble d'attributs permettant d'identifier de manière unique toutes les occurrences (tuple) de cette relation.

Un domaine sémantique est un ensemble de valeurs que peut prendre un type d'attributs.

L'algèbre relationnelle formalise l'ensemble des opérations abstraites d'appartenance, d'inclusion, de projection, de produit, d'union et de différence dans une base de données.

Le langage SQL ("simple query langage") est lié à la structure des bases de données relationnelles ; il permet, à partir d'un vocabulaire simple et limité, de manipuler et d'accéder aux données mais aussi d'assurer leur protection. Le langage "SQL" a été promu par IBM ; il comporte plusieurs commandes exécutables soit en mode interactif soit sous forme de programmes et permet la mise en œuvre de l'algèbre relationnelle.

Une requête correspond à une manipulation élémentaire de l'information contenue dans une base (interrogation, mise à jour, projection, ...).

La jointure est une opération consistant à croiser des informations se trouvant dans deux tables différentes.

1.1.2.3. Passage du modèle individuel au modèle relationnel

Le passage du modèle individuel au modèle relationnel se fait suivant des règles strictes dont algorithmes et une opération dénommée normalisation.

La conversion en tables ou relations du modèle relationnel des associations d'un modèle individuel repose sur le respect des quatre règles algorithmiques suivantes (figure 102) :

- 1) la liaisons un $[(0,1)$ ou $(1,1)]$ à plusieurs $[(0,n)$ ou $(1,n)]$ est une liaison binaire dite aussi liaison père-fils ; l'entité 2 est père à cause de son caractère de multiplicité. Entité 1 et 2 deviennent des tables et leurs identifiants des clé , l'identifiant de Entité 2 migre dans Entité 1 comme clé étrangère, de même que les propriétés de l'association R qui deviennent ses attributs ;
- 2) dans les liaisons plusieurs $[(0,n)$ ou $(1,n)]$ à plusieurs $[(0,n)$ ou $(1,n)]$ il n'y a ni père ni fils ; Entité 1 et Entité 2 deviennent des tables, R également devient une table dont la clé est la concaténation des identifiants des deux entités ; Si l'association R est porteuse de propriétés, celles-ci deviennent des attributs de la table ainsi créée ;
- 3) dans une liaisons un $[(1,1)]$ à un $[(0,1)]$ les deux entités deviennent des relations ; la migration des identifiants se fait en fonction de la contrainte d'intégrité fonctionnelle (CIF) ; l'entité émettrice de la CIF reçoit l'identifiant de l'autre comme clé étrangère ;
- 4) dans les liaisons n airés ou supérieures à deux, l'association R devient une table dont la clé est la concaténation des identifiants des entités participant à la relation et qui deviennent elles même des tables ; si la relation R est porteuse de propriétés, celles-ci deviennent ses attributs.

CODESRIA - BIBLIOTHÈQUE

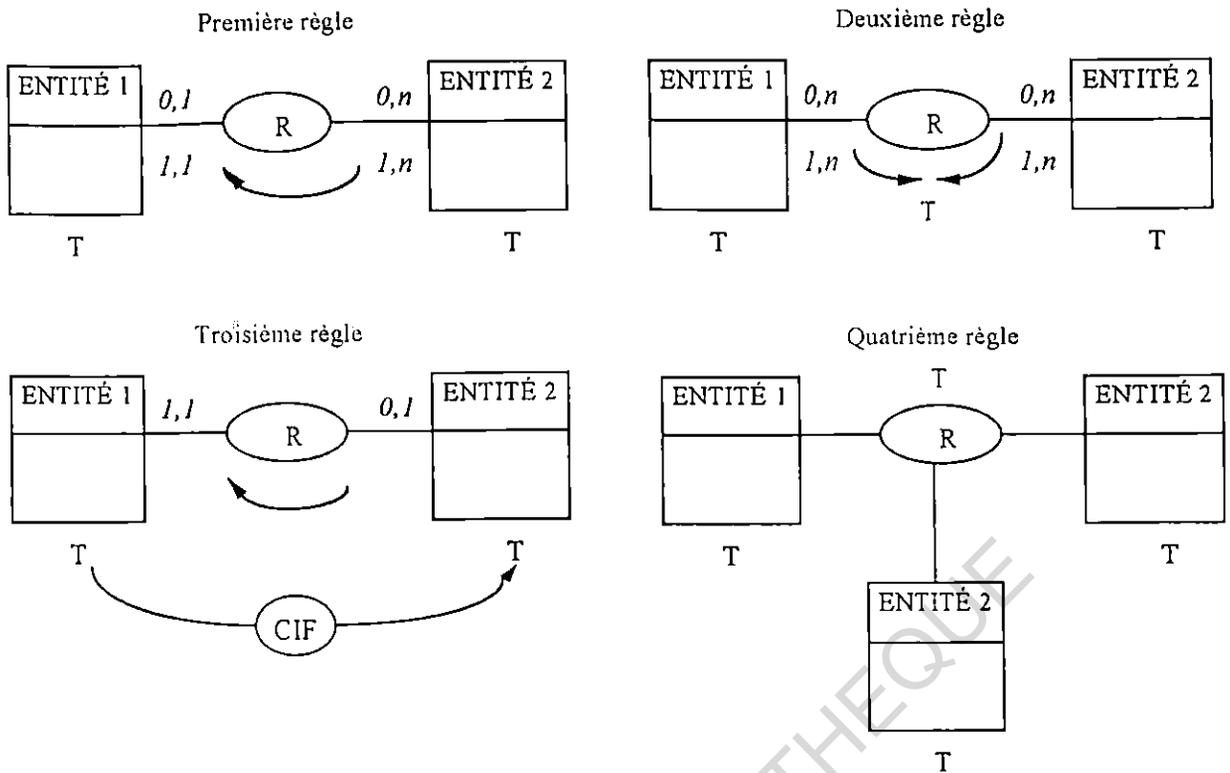


FIGURE 102. — Règles de passage du modèle individuel au modèle relationnel.

Dans le cadre d'une base de données relationnelle, le bien-fondé des relations décrites dans les modèles de données doit être vérifié avant d'aborder le système d'information. L'opération de normalisation repose sur le principe des trois premières formes normales résultant de la sémantique des attributs et des liens entre attributs des relations. Elle permet de réduire les risques d'anomalies lors des mises à jour de relations. Elle repose sur les principes suivants :

- 1) une relation est en première forme normale (1FN) si tous ses attributs sont élémentaires et qu'elle possède au moins une clé ; les redondances doivent être éliminées ;
- 2) une relation est en deuxième forme normale (2FN) si et seulement si elle est en 1FN et si chacun des attributs appartenant à sa clé ne détermine pas un autre attribut non clé ; tout attribut d'une entité doit donc dépendre entièrement de sa clé ;
- 3) une relation est en troisième forme normale (3FN) si elle est en 2FN et si chacun de ses attributs dépend de la clé par une dépendance fonctionnelle élémentaire directe ; une relation en 3FN ne pose généralement pas d'anomalies liées aux mises à jour, ni de redondances.

1.2. Conception d'un SGBD suivant le formalisme MERISE

Les développements de l'informatique de gestion et la nécessité de conceptualiser les opérations au sein des entreprises ont permis la naissance de systèmes de conception dont le plus connu et aussi le plus utilisé est la méthode MERISE. Cette méthode est née en 1974 des réflexions d'une équipe animée par Jean Louis LEMOIGNE² et d'études faites sous la direction de Hubert TARDIEU, en collaboration avec le CETE³, l'Université d'Aix-Marseille III et l'INRIA⁴.

La méthode MERISE est aujourd'hui devenu un passage obligé dans la conception des systèmes d'information ; il met en relief trois niveaux de réflexion (tabl. XLVII) : le niveau conceptuel, le niveau logique et le niveau technique dit aussi niveau physique. À chaque niveau d'organisation correspond deux types de modèles : un modèle de données et un modèle de traitement.

TABLEAU XLVII
Les niveaux de réflexions et les modèles associés

<i>Niveau</i>	<i>Données</i>	<i>Traitements</i>
<i>Conceptuel</i>	Modèle conceptuel des données (MCD)	Modèle conceptuel des traitements (MCT)
<i>Logique</i>	Modèle logique des données (MLD)	Modèle organisationnel des traitements (MOT)
<i>Technique</i>	Modèle physique des données (MPD)	Modèle opérationnel des traitements (MOPT)

La réalisation d'un système d'information nécessite généralement la constitution d'équipes de travail, de façon à respecter le synchronisme requis au niveau de certaines actions.

L'étude de l'existant, c'est-à-dire la compréhension du système de fonctionnement du milieu et le recensement des objectifs en matière de gestion du milieu déjà définis, l'élaboration d'un dictionnaire des données sont des étapes préalables à toute formalisation des données dans une base.

Les modèles conceptuels de données et de traitements ainsi que le modèle organisationnel des traitements sont réalisés simultanément puis validés pour aborder le modèle logique des données. L'étape suivante est le modèle physique des données puis le modèle opérationnel des traitements et enfin le système d'information.

Dans la démarche MERISE, le modèle conceptuel des données est de type entité-association tandis que le modèle logique des données est de type relationnel, permettant de concevoir des bases de données relationnelles. Ce sont ces deux types de modèles qui seront utilisés dans la réalisation de la base Guiers.

² Université d'Aix-en-Provence

³ Centre d'études techniques de l'équipement

⁴ Institut national de recherches en informatique et automatique

1.2.1. Le niveau conceptuel

Le niveau conceptuel correspond à la définition des objectifs du futur système d'information; il comprend différentes étapes qui sont : la définition de la problématique de réflexion, des règles de gestion des données et des contraintes liées au milieu d'étude et aux données. La définition des modèles conceptuels de données et de traitements en constitue l'étape ultime.

Le modèle conceptuel de données permet de passer des données terrain à leur représentation cartographique ou numérique. Il aide à formuler, comprendre et critiquer la modélisation du monde réel et d'y apporter d'éventuelles corrections. Le MCD prend en compte l'ensemble des données nécessaires à l'application des traitements ciblés, de même que celles produites par ces derniers. C'est un puissant outil d'aide à la gestion et à l'interprétation des données. L'ensemble de ces données est décrit dans le dictionnaire des données..

Le modèle conceptuel des données est un passage obligé dans l'organisation des données et la constitution des bases de données relationnelles. Le passage du niveau conceptuel au niveau logique requiert une validation des modèles sur au moins une de leurs sous parties, en particulier sur le MCD. Dans la démarche MERISE, ce passage correspond au passage du modèle entité association au modèle relationnel.

Le modèle conceptuel des traitements (MCT) formalise les actions réalisées dans le système à modéliser ainsi que leur niveau d'exécution ; il répond en fait à la question : quoi ? C'est-à-dire la vraie raison d'être du système. Etablir un MCT revient donc à identifier les différents événements qui transforment les données et à établir entre eux des enchaînements et ou des synchronisations. Le MCT décrit l'ensemble des traitements à appliquer aux données brutes décrites dans le MCD pour aboutir aux produits attendus ; il est généralement représenté sous forme de schéma dynamique. Le MCT repose sur les notions d'acteur, organisme, champ d'étude, flux d'information et d'événements.

La synthèse des traitements donne une vue globale tâches qu'effectue le système et d'en déduire les différents domaines d'activité ; c'est-à-dire des regroupement d'actions présentant entre elles une certaine cohésion.

Dans le cas du lac de Guiers, cinq domaines ont été identifiés : hydrologie, qualité des eaux, agro-industrie, hydrobiologie et santé. La figure 103 décrit les relations de dépendance et d'interdépendance entre ces domaines.

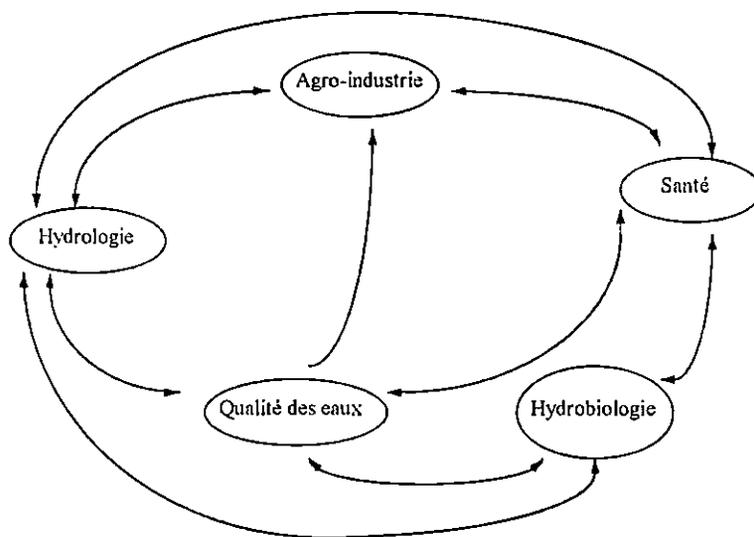


FIGURE 103. — Les domaines d'étude et leurs relations à l'intérieur de la base Guiers.

1.2.2. Le niveau logique

Au niveau logique, dit aussi niveau organisationnel, est définie la méthodologie, c'est-à-dire l'organisation à mettre en place pour atteindre les objectifs du système d'information. C'est à ce niveau que sont définies et réparties les tâches à exécuter dans le futur système d'information.

La modélisation au niveau organisationnel poursuit deux objectifs principaux : définir l'organisation des données traduisant les modèles conceptuels validés, puis optimiser cette organisation par rapport aux besoins des traitements. Elle permet de disposer de schémas logiques qu'il faudra traduire dans un langage de base de données reconnu.

Le modèle logique des données (MLD) correspond, dans la démarche MERISE, à la traduction des schémas du modèle entité - association en tables du modèle relationnel. Il décrit les enregistrements logiques dans une base de données et donne une idée de la structuration physique des données grâce à l'estimation du volume des enregistrements à stocker. La réalisation du modèle logique est une opération quasi mécanique, dès lors que le type de représentation est choisi.

Le passage au modèle logique impose de mettre toutes les relations obtenues à partir d'un MCD doivent être en troisième forme normale (3 FN).

1.2.3. Le niveau physique

Le niveau physique ou opérationnel correspond au choix des moyens techniques, c'est-à-dire le matériel et les logiciels à utiliser pour la réalisation du système d'information, de même que la manière dont les données seront structurées (type, format, taille). Le modèle physique des données (MPD) décrit les choix informatiques et techniques pour la réalisation de la base de données.

L'organisation des données à l'intérieur des bases de données et les méthodes d'accès à ces données ont conduit à la notion de système d'information qui, dans sa conception, même si elle suscite des craintes, permet un plus grand partage des données. Appliquée à l'information géographique, la base de données contient alors :

- des données graphiques qui positionnent l'information dans l'espace ;
- des données sémantiques, c'est-à-dire les éléments descriptifs de l'information géographique.

Le développement des SGBD a permis la naissance des SIG dont ils constituent encore aujourd'hui le fondement principal. La création de la base de données reste encore la première étape dans la conception du SIG.

2. NOTION D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

L'information géographique a d'abord été représentée sous forme de plans, de cartes, cartes numériques puis des iconocartes et spatiocartes et des images. L'essor de la télédétection et de ses produits, leur répétitivité dans le temps et dans l'espace laisse augurer de nouvelles évolutions de la représentation de l'information géographique.

2.1. Représentation de l'information géographique

L'une des difficultés majeures de la représentation de l'information géographique tient au fait que les objets traités ne sont pas toujours de même nature sémantique et géométrique. Les méthodes de représentation sont donc à choisir en fonction du champ d'étude et des objectifs visés.

Il existe deux modes classiques de représentation de l'information géographique: le mode raster et le mode vecteur qui sont tous deux des modes graphiques (figure 104).

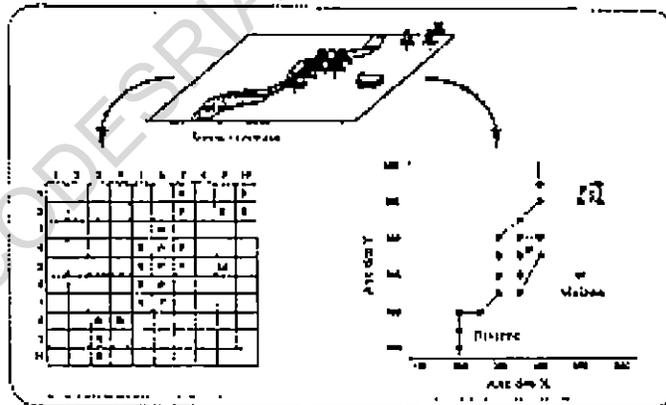


FIGURE 104. — Mode "raster" et mode vecteur (source : ARONOFF, 1989).

2.1.1. Le mode raster

Le mode raster ou mode maillé est composé de cellules juxtaposées, généralement de forme carrée dont la taille est égale à la résolution du système de mesure. En télédétection, on parle du pixel qui est la plus petite unité d'une image satellitaire qui à chaque cellule associe un ensemble de valeurs numériques (n° ligne, n° colonne, contenu) permettant de déduire l'information à partir du thème de l'image et de la valeur de chaque cellule. Une très grande variété d'objets, par exemple la bathymétrie, l'altimétrie ou l'occupation du sol peuvent être représentées plus ou moins finement en fonction de la résolution de l'image.

Les données graphiques issues du mode raster se prêtent à certains types de traitement : filtrages, convolutions, classifications, combinaisons de valeurs, superpositions. La combinaison de cellules provenant de différentes mesures permet au moyen d'analyses statistiques poussées de classer les valeurs en entités logiques avec des résultats parfois spectaculaires. La superposition des résultats obtenus à différentes périodes permet de dégager l'évolution d'un objet à la fois dans le temps et dans l'espace. Il existe trois variantes du modèle raster :

- le modèle à maillage régulier (rectangulaire, triangulaire, carré (pixel)...)
- le modèle à maillage irrégulier (polygones de Thiessen par ex)
- le modèle à maillage hiérarchique (quadtree, pyramides)

Ces variantes se rapportent à la description géométrique des objets et non aux relations qui peuvent exister entre elles. Si la première variante est très utilisée, notamment par la télédétection, les deux dernières le sont moins par contre.

2.1.2. Le mode vecteur

Le mode vecteur correspond à une représentation schématique des objets du monde réel et de leur localisation dans un espace continu. La traduction des données vecteur en mode numérique est très longue mais donne une information plus compacte et d'une plus grande richesse ; on parle de numérisation, digitalisation ou encore de rasterisation. La représentation sous forme mathématique simple (segments, arcs, cercles, polygones...) crée différentes possibilités de traitements géométriques.

Le mode vecteur repose sur cinq primitives graphiques qui permettent de rendre compte de notre espace à deux ou trois dimensions : le point, l'arc, le nœud, la surface et le solide.

Le point est l'unité élémentaire de la représentation spatiale de l'information géographique. Il n'a ni dimension, ni surface ; il est défini dans un espace à deux ou trois dimensions au minimum par une paire de coordonnées. L'arc est une suite de jonctions entre des points ; c'est une entité double car pouvant être formée d'une ou plusieurs jonctions, elles-mêmes reliant au moins deux points. Le nœud, différent du point, est défini comme l'extrémité d'un arc qui est obligatoirement borné par un nœud origine et un nœud destination. La surface est délimitée par des arcs eux-mêmes reliés par des nœuds définis dans un graphe planaire. Le solide, délimité dans l'espace par des surfaces qui comme lui peuvent être partiellement évidées ; il n'est actuellement pas traité par les SIG mais mis en œuvre seulement par les logiciels de CAO (cartographie assistée par ordinateur).

On distingue trois variantes dans le mode vecteur : le modèle Spaghetti, le modèle topologique réseau et le modèle topologique de surface (figure 105).

Le modèle topologique de surface est le modèle le plus complet car il prend en compte toutes les primitives graphiques et ajoute au modèle topologique réseau les surfaces délimitées à gauche et à droite de chaque arc. Une surface est obligatoirement construite autour d'un nœud isolé qui n'appartient pas au parcours des arcs. Les contraintes pesant sur l'organisation des données dans le modèle topologique de surface et qui garantissent leur qualité ont eu pour conséquence de mener à une décomposition de l'information en couches et en cartes elles-mêmes divisées en carreaux.

Une couche (layer) comporte l'ensemble des primitives graphiques partageant les mêmes propriétés topologiques de réseau ou de surface. Exemple de couches : le mode d'occupation du sol, l'altimétrie, la propriété foncière, le réseau d'adduction d'eau, la géologie... Une carte (map) est un ensemble de données cartographiques gérées ensemble et couvrant un ou plusieurs domaines d'information sur le même territoire. Le carreau quand à lui est une partition territoriale d'une couche ; il est l'équivalent d'une planche d'un plan traditionnel d'un découpage irrégulier comme la commune, le quartier.

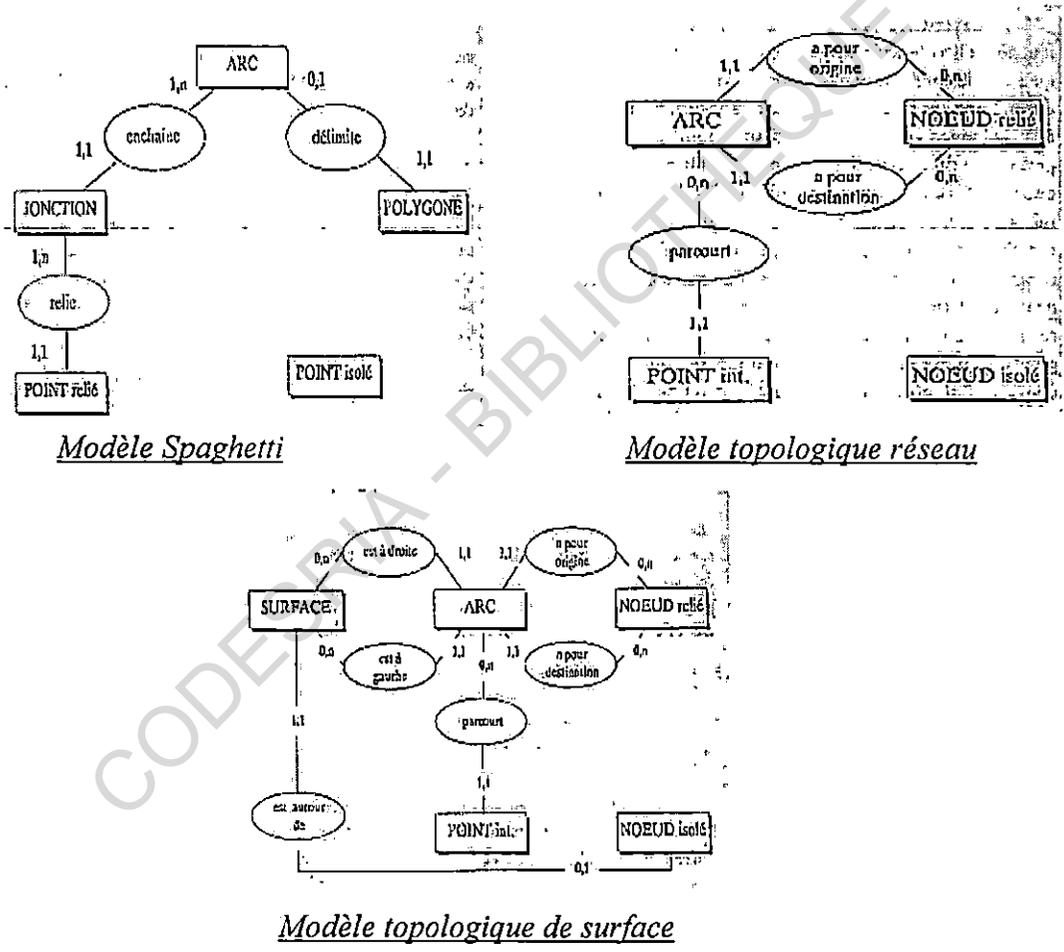


FIGURE 105. — Les variantes du mode vecteur (source : ROUET, 1991).

2.1.3. La représentation tridimensionnelle

La représentation de l'information géographique, dès lors qu'elle intègre l'altimétrie, pose problème car elle demande de grandes ressources tant matérielles que logicielles sans compter les ressources humaines.

En mode "raster", l'altimétrie prend la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui est composé de points disposés aux nœuds d'une maille dont la taille est variable. Chaque point est doté de coordonnées x, y, z donnant une représentation précise de la cote altimétrique. Le MNT s'obtient de manière presque automatique grâce aux prises de vue aériennes ou spatiales (stéréoscopie du système SPOT par exemple).

En mode vecteur, le modèle Triangulated Irregular Network (TIN) permet de traiter les données altimétriques ; il peut être construit à partir de n'importe quelle source : MNT, courbes de niveau, points remarquables du terrain. Son principe est d'éliminer les points altimétriques qui n'apportent pas d'informations intéressantes. Par rapport au MNT, le TIN est très économe en volume de données et autorise des calculs de pente, d'orientation, d'écoulement (plus grande pente), d'ensoleillement théorique, d'estompage, de visibilité et d'intervisibilité.

Raster et vecteur sont complémentaires et facilement convertibles au moyen d'algorithmes. Dans la réalité, le choix de l'un ou l'autre mode de représentation est dépendant du type de données que l'on utilise. Les systèmes d'information géographique permettent généralement d'associer les deux modes, de les superposer de manière à mieux répondre aux demandes des utilisateurs de l'information géographique.

2.2. Localisation de l'information géographique : systèmes de coordonnées et de projection

Un objet est localisé dans l'espace grâce à deux grands types de systèmes de coordonnées : les coordonnées géométriques ou cartésiennes et les coordonnées géographiques qui se rapportent à un globe. Rapportés sur un plan, ils induisent la notion de système de projection.

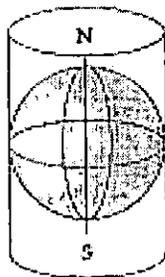
La localisation d'un objet se fait généralement à l'aide de coordonnées géographiques mesurées sur un ellipsoïde de référence (par exemple CLARKE, 1880) ou de coordonnées rectangulaires rapportées à un plan de référence (YOFF 2000, WGS 84, NAD 27 par exemple).

Les coordonnées géographiques sont exprimées en latitude, longitude et altitude dans un système de référence comportant le point origine (O) au centre de la terre et l'axe des pôles. La latitude d'un point A est exprimée par l'angle avec le plan de l'équateur ; la longitude par l'angle avec le méridien origine.

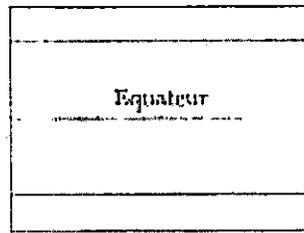
Les systèmes de projection sont utilisés pour représenter les objets de la surface terrestre projetés verticalement sur un ellipsoïde de référence (GEORGES, 1990). Il existe plusieurs types de systèmes de projection dont : les projections équivalentes ; les projections conformes ; les projections analytiques et les projections directes pour lesquelles l'axe de symétrie est l'axe des pôles.

La projection Mercator Transverse Universelle (UTM) ou double projection de Gauss (fig.8) correspond à une projection de la surface terrestre sur un cylindre tangent le long d'un méridien (M) par l'intermédiaire d'une sphère (S). C'est l'une des formes de projection les plus utilisées en cartographie (le fuseau n° 28 passe au dessus du Sénégal).

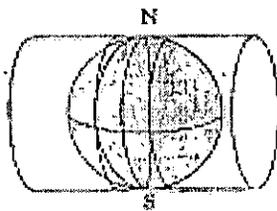
Projection de Mercator



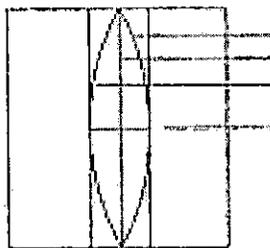
Cylindre tangent à l'équateur



Mercator Transverse Universelle



Cylindre tangent à un méridien
L'ellipsoïde est d'abord projeté sur
la sphère de même grand diamètre.



Méridien à +3°
Méridien tangent
Méridien à -3°
Equateur

FIGURE 106. — *Projection Mercator transverse universelle* (source : ROUET, 1991).

3. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Le concept de système d'information géographique a fait son apparition dans les années 1960. Il est le résultat de l'extension des bases de données et systèmes de gestion de base de données à des données de type géographique, c'est-à-dire établissant un lien direct entre les objets et leur localisation dans l'espace.

La technologie des systèmes d'information géographique a d'abord été utilisée en urbanisme et en aménagement du territoire ; progressivement, on est passé à des applications dans le domaine de la gestion de l'environnement et des études d'impact.

3.1. Définitions du système d'information géographique

Un système d'information géographique (SIG) est généralement décrit comme un outil d'accès à l'information géographique et d'aide à la décision. Il permet d'intégrer en entités cohérentes des données de sources diverses (géographie, socio-économie, statistiques, télédétection, cartographie...) et d'en représenter spatialement les résultats. Il n'existe pas une mais plusieurs définitions du SIG. Quelques unes, émanant de plusieurs auteurs, sont données par CANCES (1992) :

BURROUGH (1986) : un SIG est un ensemble puissant d'outils destinés à rassembler, stocker, extraire à volonté et visualiser des données spatiales du monde réel pour un ensemble particulier d'objectifs ;

SFPT⁵ (1989) : le SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace ;

ROUET (1991) : Les SIG utilisent des moyens informatiques pour stocker, partager, consulter et manipuler les objets représentés sur les cartes et les plans, ainsi que les informations qui leur sont directement ou indirectement attachés ;

GIRARD (1992) donne une définition plus détaillée et plus complète de la notion de SIG : « Les... Systèmes d'Information Géographique apportent de nouvelles possibilités dans la gestion des données (accès plus rapide à l'information), dans le traitement des données (possibilité d'analyses statistiques multivariées, simulations, etc.) et dans la restitution de ces données (automatisation de l'impression des cartes) ; les SIG sont un moyen nouveau de modélisation de l'espace qui demande une réflexion renouvelée sur les concepts relatifs à l'information géographique. ».

GEORGES (1990) définit le système d'information géographique comme un « Modèle conceptuel d'organisation de données géographiques associé à un système informatique, gérant une base de données localisées de nature diverse, telles que MNT, images aériennes et spatiales... En croisant des données géocodées multiples et diverses, en dégagant des corrélations, les SIG sont de précieux instruments d'analyse spatiale et d'aide à la décision. »

Un SIG est donc constitué de données géographiques organisées en base de données et d'un ensemble matériel et logiciel permettant de stocker, gérer, analyser et restituer l'information géographique. La notion d'information géographique représente le noeud central du SIG et contient donc toutes les difficultés de sa réalisation. Le SIG rend compte à la fois de la position et des attributs des objets et des relations spatiales entre eux ; il est articulé autour d'un SGBD. Le SIG est généralement constitué de données attributaires organisées en base de données et de données numérisées qui contiennent les références spatiales des objets de la base.

⁵ Société Française de Photogramétrie et de Télédétection

Dans toute opération de gestion, il y a au moins quatre niveaux : l'acquisition des données, l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la prise de décision. Si le système d'information géographique permet de réaliser les trois premières opérations, le quatrième niveau quant à lui découle de la « sensibilité » et des objectifs spécifiques à chaque gestionnaire. Un SIG en lui-même ne propose pas de solutions à un problème donné ; il dresse plutôt un état de la situation et synthétise l'information de manière à la rendre plus compréhensible à tous les utilisateurs. Il permet aussi de simuler des évolutions futures à partir de données réelles ; d'où son utilisation dans les études d'impact.

3.2. Fonctionnalités d'un système d'information géographique

Les fonctionnalités du SIG, décrites à la figure 107 vont de l'acquisition à la synthèse et à la restitution graphique de l'information.

L'acquisition des données peut se faire soit au sein même du SIG, si celui-ci possède des fonctionnalités de saisie de données, ou se faire par exploitation d'une base de données extérieure déjà existante. L'acquisition des données est capitale car elle est à la base des performances du futur système d'information géographique. Les données peuvent provenir de diverses sources : fichiers statistiques, saisie directe, cartes thématiques, télédétection, scannerisation, digitalisation, cartes, plans, télédétection.

Les performances d'un système d'information géographique se mesurent à la gamme de manipulations qu'il offre, c'est-à-dire aux possibilités d'analyse spatiale : mesures dans l'espace, reclassification et agrégation, analyses de proximité, de contiguïté, de connectivité, de chemin optimal, croisement de données, analyse statistique et analyses de voisinage (interpolation et contourage). L'analyse spatiale des données consiste à modéliser un (ou des) phénomène(s) conditionnel(s) et/ou évolutif(s) par une séquence d'actions élémentaires (requêtes), généralement dans un but d'aide à la décision, à la gestion (CANCES, 1992).

L'analyse spatiale des données est donc l'outil par excellence de l'analyste SIG, grâce aux possibilités de modélisation et de simulation qu'elle offre. La carte est la présentation la plus courante des résultats de l'analyse spatiale. La carte reste encore le moyen par excellence de représentation des données géographiques.

Un SIG est donc un système de gestion de base de données qui permet le traitement en même temps des données spatiales et des données qualitatives correspondantes. C'est aussi, par le biais de l'analyse spatiale un outil d'aide à la décision et à la gestion des milieux. Cependant, les possibilités de résultats et de développements sont conditionnées au départ par les modèles et les données entrés dans la base. Le concepteur d'un schéma de base de données entrant dans un SIG doit toujours garder à l'esprit la propriété principale de l'information géographique qui est d'être changeante à la fois dans le temps et dans l'espace.

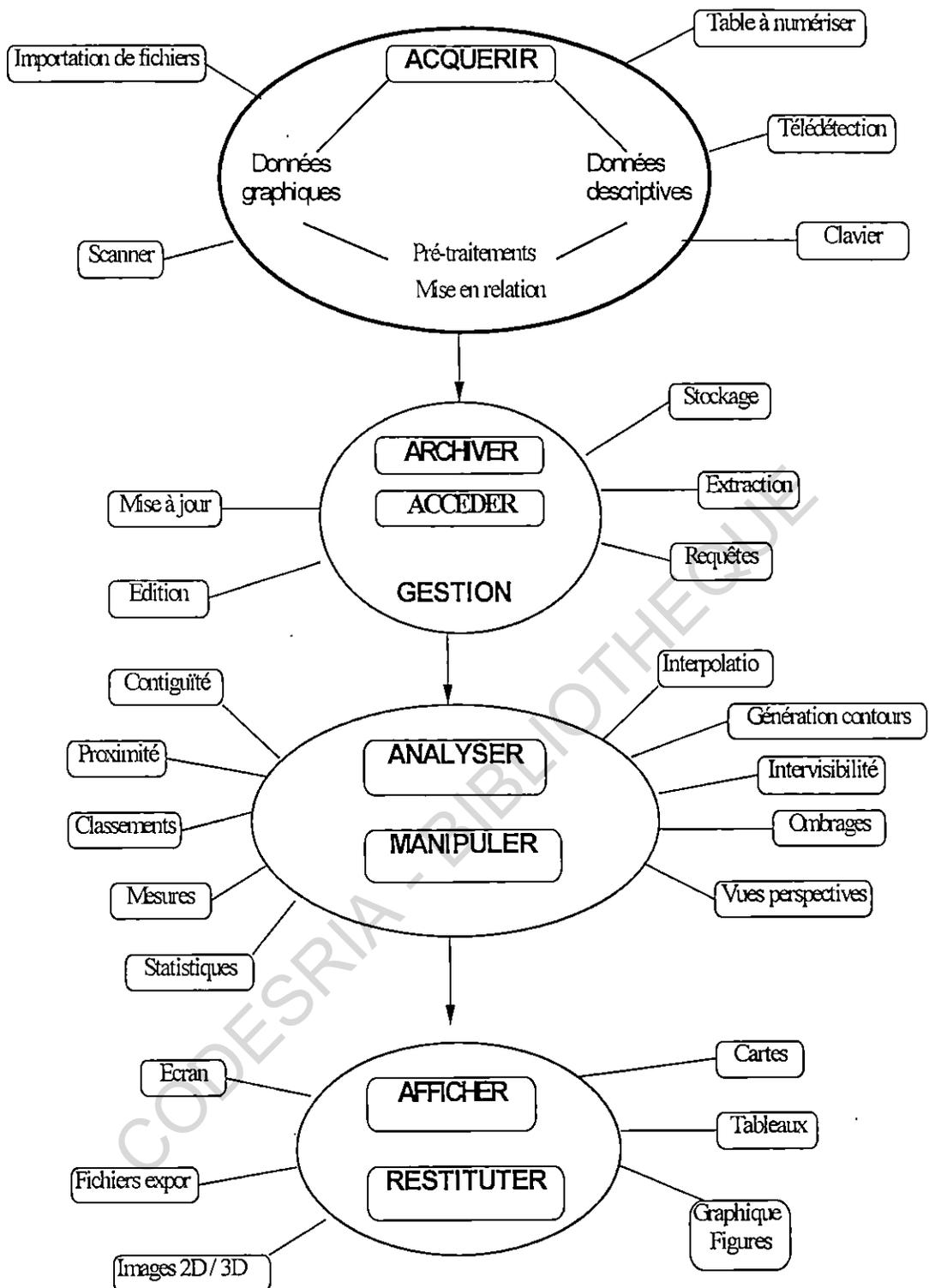


FIGURE 107. — Les fonctionnalités d'un système d'information géographique (source : CANCES, 1992).

Chapitre II

PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES GUIERS

Au Sénégal, on peut noter quelques expériences de systèmes d'information géographique menées avec un succès plus ou moins grand. On peut signaler à ce propos, le système d'information géographique du Centre de Suivi Ecologique, essentiellement orienté vers le traitement d'images NOAA AVHRR et la production régulière et automatisée de cartes de biomasse et d'index de végétation à l'échelle nationale. Plus récemment, le Ministère de l'Hydraulique a entrepris l'installation d'un système d'information géographique pour l'inventaire des ressources en eau du Sénégal.

L'étude entreprise ici utilise les méthodes classiques de conception de système d'information du type MERISE⁶ et représente en même temps une approche novatrice dans ce domaine d'où certaines difficultés lors de la réalisation. Tout d'abord, nous nous sommes attachés à expliquer les théories de base depuis les bases de données et systèmes de gestion de bases de données jusqu'au système d'information géographique puis expliquer la méthodologie d'approche avant de présenter l'ossature du système d'information géographique Guiers et les premiers résultats produits.

1. POURQUOI UN SIG SUR LE LAC DE GUIERS ?

La région du lac de Guiers, identifiée comme zone prioritaire de développement, souffre de quelques insuffisances qui, au plan de la gestion, sont capitales. En effet, on y observe un déficit de coordination et de concertation au niveau décisionnel : chaque acteur économique est en même temps gestionnaire du milieu naturel et planificateur. Les effets induits par cette « gestion » pourraient, à long terme, être catastrophiques pour la région. En particulier si l'on se place dans la perspective de la réalisation des grands projets de développement que l'on connaît.

C'est pourquoi il nous paraît nécessaire de replacer la conception de la base Guiers dans son contexte : un contexte de sécheresse, mais aussi de renouveau face aux défis de l'« Après-barrages ».

1.1. Présentation de la région d'étude

Le cadre géographique de la base de données Guiers définit son pourquoi et ses objectifs ; il pose ses domaines d'intervention et ses prérogatives. Le territoire de la base Guiers est localisé entre 15° 50' et 16° 30' de latitude nord et entre 15° 40' et 16° 10' de longitude ouest.

Le territoire ainsi défini correspond à l'aire d'influence approximative du lac ; il permet de tenir compte des échanges réciproques entre les riverains et les populations vivant dans un rayon de plus ou moins dix kilomètres de part et d'autre du lac. Pour cette raison, le Bounoum (basse vallée du Ferlo) et le Ndiael sont intégrés à la base pour permettre une restitution de la cohérence du système fluvio-lacustre.

⁶ Méthode d'Etude de Réalisation Informatique par Sous-Ensemble

Cette intégration est d'autant plus logique et pertinente que les différents projets de développement vont à terme rétablir le schéma initial de fonctionnement du système (projets canal du Cayor, remise en eau du Ndiael, vallées fossiles).

La région du lac de Guiers a été choisi de préférence au Delta à cause de son étendue. Ce « laboratoire » intéressant est l'objet d'une grande attention des médias ; on la surnomme d'ailleurs "futur grenier du Sénégal".

Le territoire de la base de données est délimité en zones suivant des critères géographiques, hydrologiques et de physico-chimiques existantes. Traditionnellement, le lac de Guiers se divisait en trois zones naturelles (COGELS, 1984) :

- la région Nord, depuis les endiguements CSS jusqu'au seuil de Foss et à la presqu'île de Nouk Pomo ;
- la région centrale qui s'étend jusqu'au seuil de Sier ;
- la région Sud, séparée du Bounoum par la digue de Keur Momar Sarr.

Cette division géographique recoupe la configuration du fonctionnement hydrologique du lac. L'étude physico-chimique menée dans le cadre du programme EQUSEN entre 1989 et 1993 confirme cette subdivision. L'analyse de l'occupation du sol montre une très nette disparité est-ouest ; en effet, la partie ouest du lac est plus peuplée que la rive est. Au total, six zones ont été définies (figure 108) : Nord-Ouest, Nord-Est, Centre-Ouest, centre-Est, Sud-Ouest et Sud-Est.

CODESRIA - BIBLIOTHÈQUE

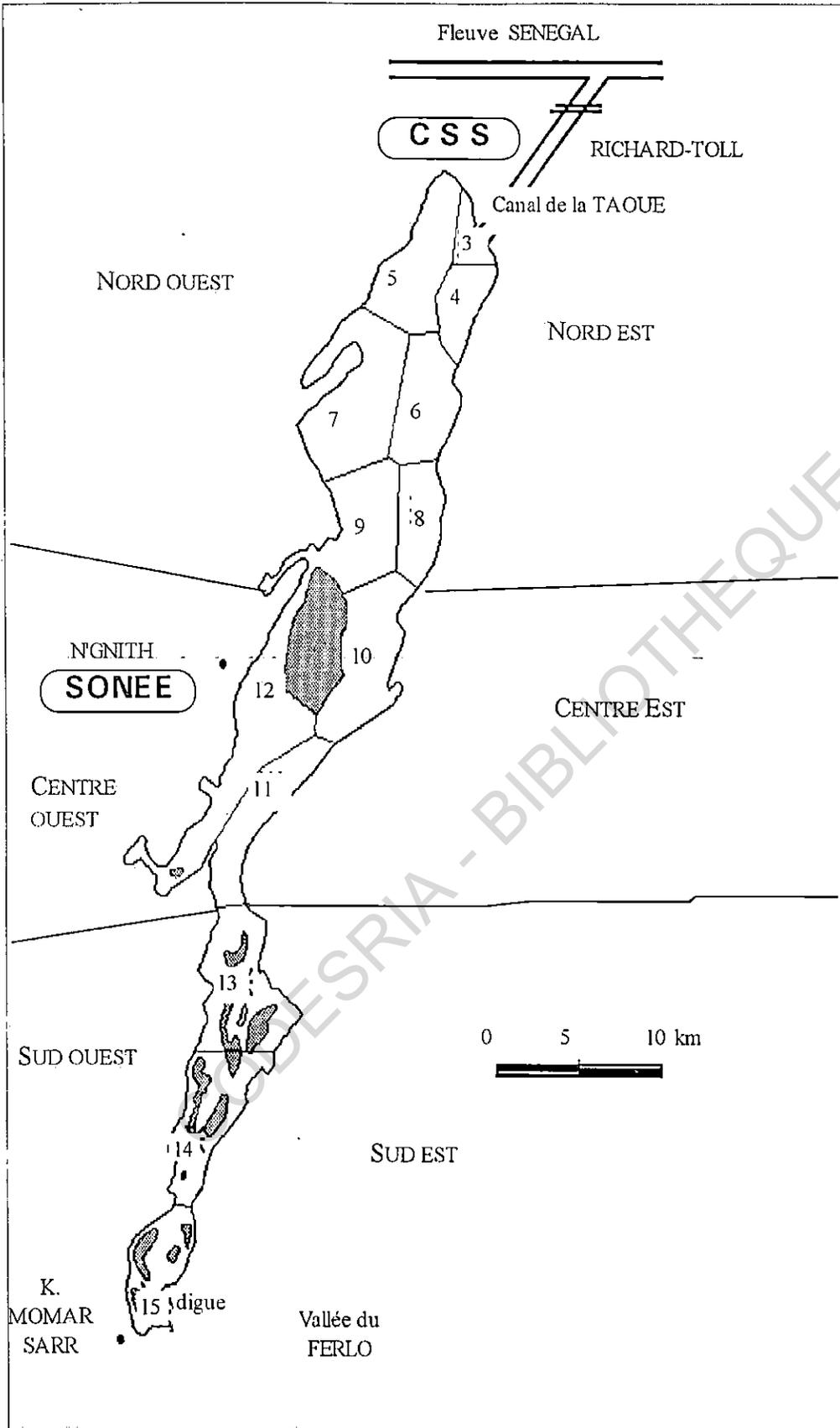


FIGURE 108 - - Vue schématique des zones géographiques et stations physico-chimiques de la région du lac de Guiers.

1.2. Contexte de l'étude : rappel

La mise en place des grands barrages sur le fleuve Sénégal (Diama en 1985 et Manantali en 1987) a marqué le début d'une ère nouvelle pour le lac de Guiers et sa région. La disponibilité de l'eau, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, a favorisé l'émergence d'un foisonnement d'activités et de projets parmi lesquels on peut citer :

- le canal du Cayor ;
- la remise en eau du Ndiael ;
- le programme des vallées fossiles (vallée du Car-Car et du Bounoum) ;

Parallèlement à ces projets, sont apparus aussi de nouvelles contraintes liées à la stabilisation des ressources en eau et à l'intensification des activités agricoles. On note :

- une progression fulgurante des plantes aquatiques (Cf. deuxième partie) qui colonisent les marges du lac, traditionnellement vouées à la culture de décrue ;
- un développement de maladies parasitaires liées à l'eau, comme les bilharzioses intestinale et urinaire ;
- une utilisation accrue et non maîtrisée de produits chimiques (engrais, pesticides) dans la production agricole, additionnée à un système d'irrigation plus que rudimentaire (absence de réseau de drainage, importantes pertes en eau au niveau du réseau d'irrigation...).

A long terme, l'espace du lac de Guiers risque d'être confronté à de multiples problèmes de gestion : gestion de la ressource en eau ; gestion de l'espace agricole ; gestion des impacts de l'agriculture irriguée (notamment pollution des eaux et santé des populations et du bétail).

La gestion de la ressource en eau implique la connaissance précise des facteurs "entrées et sorties" du lac, leur localisation dans le temps et dans l'espace. Le calcul du bilan hydrologique du lac de Guiers établi par COGELS *et al.* (1990, 1992, 1993) et les divers outils de gestion mis au point (EVORA *et al.*, 1991) permettent une approximation des besoins en eau du lac pour une satisfaction optimale des demandes. Le modèle GIL en cours d'expérimentation devrait permettre rapidement une gestion intégrée efficace du réservoir lacustre et donc une meilleure prise en compte des aspects qualitatifs.

La poursuite du développement actuel de l'irrigation autour du lac, et surtout ses techniques de réalisation, impliquent pour les années à venir, une gestion stricte des ressources en eau. Le statut international du fleuve Sénégal représente à ce niveau une limitation majeure.

Le SIG devrait permettre en partie de maîtriser ce phénomène en donnant un recensement, le plus détaillé possible, de tous les utilisateurs, leur localisation, leurs besoins, les types de culture, les surfaces emblavées, etc. La base de données de la SAED qui doit normalement évoluer vers un système d'information géographique ne prend en compte que les installations situées au nord de la localité de Foss dans l'arrondissement de Mbane ; le sud du lac, actuellement en plein essor ne fait l'objet d'aucun suivi.

Le développement de l'irrigation observé depuis quelques années est surtout lié à l'abondance et à la permanence de l'eau. Presque toutes les terres situées à proximité du lac, donc facilement irrigables, sont actuellement exploitées.

Le dynamisme des organisations paysannes devrait normalement se traduire par l'occupation de terres plus éloignées du lac et pose donc le problème de la gestion de l'espace agricole, ce d'autant plus que la région du lac devient de plus en plus une destination à la migration inter-rurale.

Le développement de l'agriculture irriguée s'accompagne de risques majeurs liés au manque de maîtrise de la gestion du système d'irrigation, à l'absence de réseau de drainage mais aussi à l'emploi anarchique de produits chimiques divers dont les impacts, au plan de la qualité de l'eau et de la santé des populations sont encore mal connus. Un premier travail à effectuer avec le SIG est une base de données sur la distribution spatiale des produits utilisés et l'identification des utilisateurs, donc la localisation des zones de risques potentiels. Un SIG nous paraît être la meilleure alternative pour pouvoir, demain, localiser les problèmes et adopter les solutions adéquates en parfaite connaissance de toutes les données locales.

La décomposition du système a permis d'esquisser un modèle de fonctionnement de la région du lac de Guiers (figure 109). Dans ce modèle, l'accent est mis surtout sur la relation entre la configuration du milieu naturel et les objectifs globaux définis en matière de gestion. En effet, le système de fonctionnement actuel de la région représente un héritage de plusieurs décennies. C'est en analysant cet existant que l'on peut aboutir aux choix judicieux à effectuer pour l'avenir et étudier les impacts réels ou potentiels des choix de gestion actuels sur l'ensemble du milieu.

Dans ce contexte, la mise en œuvre de la base de données Guiers obéit à une triple nécessité :

- (1) dresser le bilan et mettre à jour la cartographie de l'évolution du milieu, en intégrant les nouvelles données ;
- (2) procéder à l'évaluation des effets des grands barrages sur la réserve lacustre, une décennie après leur mise en fonction ;
- (3) simuler les impacts potentiels de projets en cours de manière à proposer des mesures, soit correctives, soit d'amélioration.

L'insuffisance de documents concernant la partie sud du système fluvio-lacustre constitue une limitation majeure pour la mise en œuvre d'une gestion intégrée de la région. En effet, ce n'est que depuis 1985 que cette partie du lac de Guiers est devenu un plan d'eau permanent. Avant cela, il était moins intéressant pour l'agriculture irriguée et les projets de développement. Ce qui, aujourd'hui, implique un important investissement en temps de travail sur le terrain.

Les documents cartographiques existants sont relativement anciens ; ils datent presque tous des années cinquante ; le MNT du lac de Guiers reste encore incomplet et surtout peu fiable car ne prenant pas en compte les effets des aménagements récents.

L'inexistence d'une structure centralisée chargée de la gestion des ressources du lac, vient compliquer l'ensemble. Chaque exploitant gère au mieux de ses intérêts avec comme conséquence une gestion d'ensemble assez catastrophique.

Tous ces faits justifient amplement la mise en place d'un système d'information géographique du lac de Guiers.

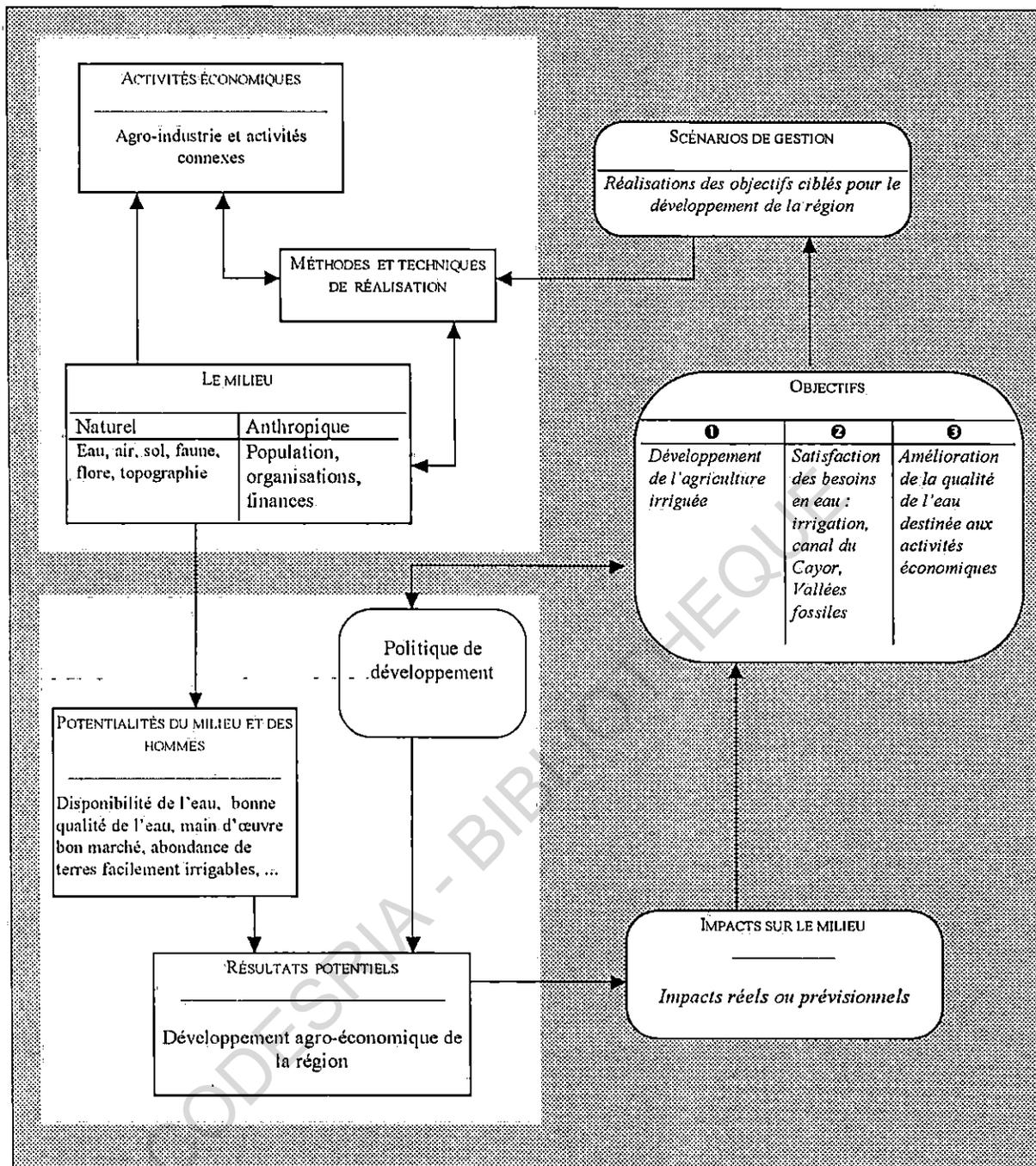


FIGURE 109. — *Modèle simplifié de fonctionnement du système fluvio-lacustre du Guier.*

2. MATERIEL ET METHODES DE REALISATION

La méthodologie utilisée pour la conception de la base Guiers est présentée au tableau synoptique présenté à la figure 110. Elle recoupe les traits classiques de la constitution de système d'information avec deux étapes principales : l'étude préalable et la réalisation.

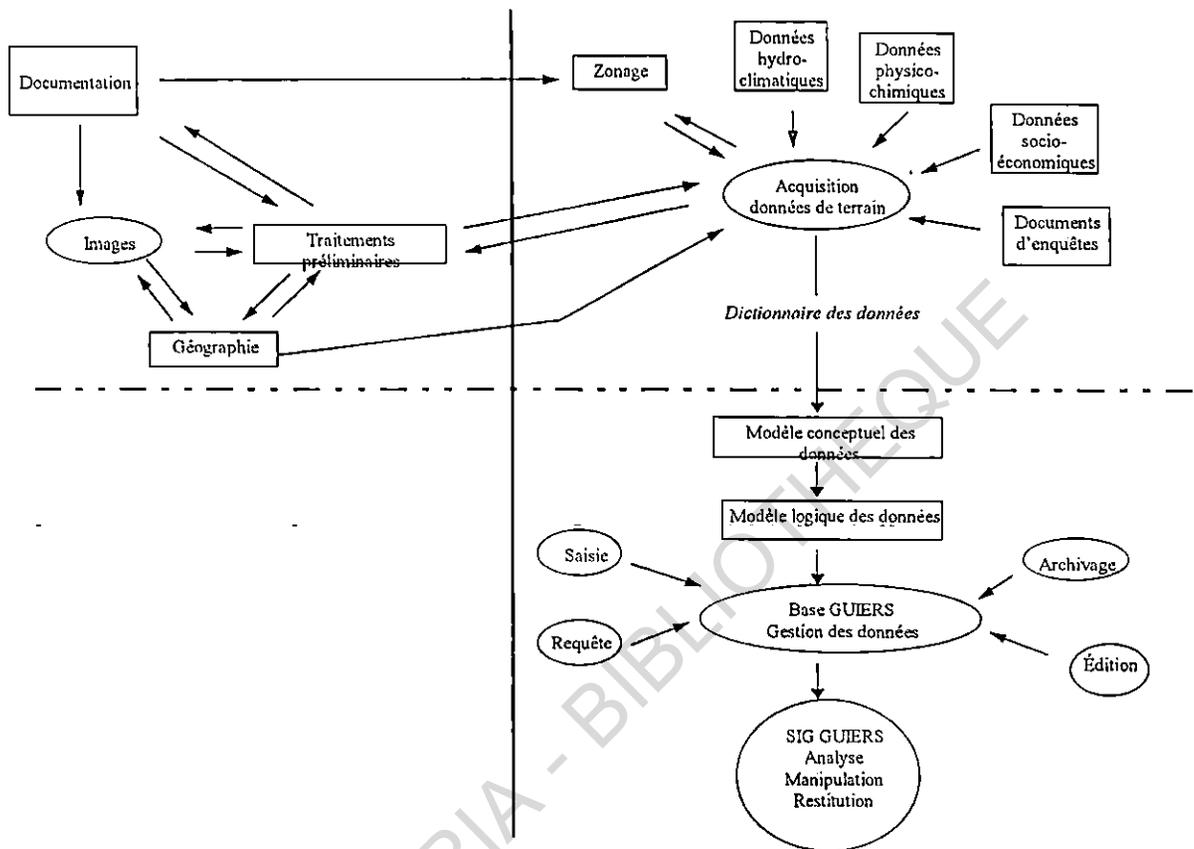


FIGURE 110. — *Tableau synoptique de la méthodologie pour la constitution de la base Guiers.*

2.1. L'étude préalable

L'étude préalable, réalisée dans les deux premières parties de ce mémoire, a permis de définir la problématique et le contexte de l'étude. Elle correspond à la phase d'acquisition des connaissances de base sur le milieu d'étude. On distingue plusieurs niveaux à savoir, la documentation, l'acquisition des données et les traitements préliminaires. On y distingue deux niveaux : l'acquisition des données (documentation, imagerie satellitaire, données attributaires...) et les traitements préliminaires.

2.1.1. Documentation et collecte de données

La collecte des données est un des processus fondamentaux dans la constitution d'une base de données car elle conditionne les résultats du futur SIG.

La base Guiers, qui est une base de données environnementales a nécessité un long travail de recherche et d'acquisition de documents bibliographiques. Les documents ayant servi de référence constituent d'ailleurs une sorte de base de données bibliographiques externe qui ne

peut être présentée dans ce cadre. Si la documentation écrite est très abondante, les documents cartographiques sont très rares et surtout très anciens ; ils datent généralement des années Cinquante.

Les données d'archives ont été recueillies dans plusieurs organismes et instituts parmi lesquels : la SDE, la CSS, la Météorologie Nationale, l'ORSTOM, la SAED, la Direction de la Prévision et de la Statistique, les Communautés Rurales et Centres d'Expansion Rurale. Il s'agit de données physico-chimiques, climatiques, socio-économiques et de télédétection spatiale.

Les données de terrain concernent surtout la gestion et la localisation des petits périmètres irrigués hors zone SAED et localisés vers le sud du lac. Comme données de terrain, il y a également les labels définis lors de la vérité-terrain pour les classifications des images satellitaires.

2.1.2. Traitements préliminaires

Une fois acquises puis saisies, les données sont soumises à des pré-traitements visant à les épurer, éliminer les redondances, optimiser l'espace dans les disques de support et de définir des relations topologiques et/ou sémantiques entre les données.

Comme traitements préliminaires, il y a les conversions de format et de structure, digitalisation, nettoyage, création de topologie, affectation de labels, opérations géométriques, calculs statistiques simples.

Un premier traitement a été appliqué aux images SPOT de 1989 puis de 1993 ; le but en était d'établir une première reconnaissance du terrain et la délimitation du territoire d'étude. La méthodologie pour le traitement des images a été décrite dans la deuxième partie de cette étude. Les résultats du traitement des images ont permis une sélection plus fine des données de terrain.

Les données graphiques sont saisies soit par digitalisation (courbes de niveau du lac de Guiers sur table à digitaliser de format A0), scanérisation ou directement à partir des images SPOT.

Les données descriptives ont fait l'objet d'une vérification minutieuse pour éviter les erreurs d'analyse et d'interprétation ; les données climatiques ont été soumises à des tests simples destinés à vérifier leur homogénéité et leur validité. Les données physico-chimiques acquises lors du programme EQUENSEN avaient déjà été vérifiées et sont donc intégrées telles quelles.

Certaines données calculées (moyenne, maximum, minimum, écart type, somme, ...) ont été éliminées car elles peuvent être obtenues directement par le système d'information géographique lui-même qui possède tous les modules de statistiques élémentaires.

2.2. La phase de réalisation de la base Guiers

La phase opérationnelle correspond à l'adoption d'un formalisme et au passage de la base de données à un système d'information géographique. Le formalisme adopté pour l'organisation des données est basé sur la méthode MERISE. L'originalité de la démarche réside simplement dans l'application de cette méthode à des données géographiques et environnementales. Les données acquises lors de l'étude préalable ont été compilées et organisées dans le dictionnaire des données puis modélisées suivant le formalisme adopté.

2.2.1. La modélisation des données et les traitements SIG

La modélisation des données issues de l'étude préalable correspond à la réalisation de la base Guiers qui est le support du système d'information géographique du même nom.

La nature des données de la base Guiers a rendu très longue le processus de la modélisation des données. Au préalable, il a fallu acquérir toutes les connaissances de base dans le domaine des bases de données et système de gestion de bases de données..

Le MCD réalisé est de type entité-association tandis que le MLD est de type relationnel ; la base de données ainsi constituée est donc une base de données relationnelle.

La base de données descriptives, déjà saisie et mise en forme sous DBASE et EXCEL est directement importée de ces différents supports et intégrée au système d'information géographique.

Le SIG Guiers permet toutes les fonctionnalités de gestion, d'analyse, de manipulation et de restitution des données d'un SIG classique. La mise en place d'un système d'information que ce soit au sein d'une entreprise ou sur un milieu naturel est l'œuvre d'une équipe qui se répartit les tâches, avec à sa tête un coordonnateur. Dans le cas de Guiers, l'équipe se résume à une seule personne, appuyée par un informaticien qui conseille sur les choix informatiques, l'adoption de formalisme et la cohérence des actions menées d'un point de vue informatique.

2.3. Matériel et logiciels

La réalisation de la base Guiers a nécessité la mobilisation de plusieurs moyens techniques. Au niveau matériel, nous avons :

- un PC de type AT avec écran VGA couleur qui a servi autant à la digitalisation qu'à la saisie des données de la base descriptive ;
- une station de travail SUN SPARC avec écran couleur haute définition et ses périphériques associés (lecteurs de CD-Rom et de disquettes) ;
- un Pentium 166 MHz, 64 Mo RAM, 2 Go de disque et lecteur CD-Rom qui gère le système d'information, la base de données et les images en même temps ;
- une imprimante laser post-script et une imprimante couleur.

Les logiciels utilisés sont les suivants :

- Mygale PC, logiciel ORSTOM qui accompagne le SIG SAVANE et TOSCANELI (livré en même temps que IDRISI) ont servi à la digitalisation des données graphiques ;
- ER-Mapper décrit dans la deuxième partie a permis d'extraire les contours du lac et de créer des données vectorielles utilisables par le SIG comme support ;
- EXCEL, DBASE, prennent en charge la saisie des données descriptives ;
- WORD 6, EXCEL pour le dessin et la mise en forme des modèles ;
- le logiciel SAVANE, développé par Marc Souris, initialement choisi comme support au SIG Guiers, s'est par la suite révélé très peu convivial et très difficile à utiliser, faute de documentation détaillée et à jour.

- MapInfo 4.0 Professional a été par la suite choisi, de préférence à SAVANE, car offrant de meilleures possibilités de conversions, de formats et d'échanges avec d'autres logiciels ; et surtout une plus grande souplesse dans la manipulation des données ; il mobilise aussi moins de ressources machine puisqu'il fonctionne sur un simple PC.

3. LES MODÈLES DE DONNÉES DE LA BASE GUIERS

La base de données Guiers est conçue suivant le modèle relationnel qui a déjà été décrit en détail plus haut. Sa réalisation respecte la procédure de réalisation de systèmes d'information décrite dans la démarche MERISE.

Dans un milieu comme celui du lac de Guiers, l'étude de l'existant correspond en réalité à une analyse des choix généraux en matière d'aménagement et de gestion de l'environnement au niveau régional. Elle permet de démonter le système en "règles, tâches, données" qui permettent de comprendre le fonctionnement du milieu et d'édicter des règles de gestion des données.

3.1. Le dictionnaire des données élémentaires

Le dictionnaire des données de la base Guiers comprend 90 données élémentaires (tabl. XLVIII) qui permettent de rendre compte de l'ensemble des interactions et échanges dans ce milieu. Les règles de gestion applicables à ces données ne sont pas figées ; elles procèdent de choix personnels imposés par des contraintes au niveau des ressources humaines et matérielles de la base de données. Celles-ci déterminent les limites que nous avons imposées à cette dernière. En effet, vouloir modéliser l'ensemble des composantes d'un milieu comme celui du lac de Guiers nécessite la mise sur pied d'une équipe de recherche ; ce qui ne pouvait pas être envisagé dans le cadre de ce travail. Cela pourrait cependant être un axe d'investigation dans le futur.

Certaines contraintes (syntaxiques, topologique et/ou sémantiques) ont donc été délibérément imposées au niveau des données à manipuler dans le cadre du système d'information géographique avec cependant des possibilités de modifications, sans changer l'esprit même de l'outil à concevoir.

TABLEAU XLVIII
Dictionnaire des données élémentaires de la base Guiers

N°	Nom	Définition	Type	Taille	Nature	Rques
1.	actp	Activité principale dans une localité	A	10	SI	
2.	alt	Altitude d'un point	N	4.2	SI	
3.	cdap	Code d'un apport à un cours d'eau	AN	3	SI	
4.	cdcl	Code d'un élément climatique	A	3	SI	
5.	cdel	Code d'un élément physico-chimique	AN	5	SI	
6.	cdpe	Code d'une perte par prélèvement sur un cours d'eau	AN	3	SI	
7.	cdpi	Code d'un périmètre irrigué	AN	8	SI	
8.	cdst	Code d'une station de mesure	AN	5	SI	
9.	cdzn	Code d'une zone du lac	AN	2	SI	
10.	cote	Hauteur d'un cours d'eau en m IGN	N	3.2	ST	
11.	cr	Nom de la communauté rurale à laquelle appartient une localité	A	15	SI	
12.	cupi	Culture principale sur un périmètre irrigué	A	10	SI	
13.	datap	Date où survient un apport à un cours d'eau	AN	8	SI	date
14.	datbet	Date de dénombrement d'un bétail malade	AN	8	SI	date
15.	datcl	Date de mesure d'un élément climatique	AN	8	SI	date
16.	datech	Date d'un échantillon de campagne physico-chimique	AN	date	SI	date
17.	datfab	Date de fabrication d'une motopompe	N	4	SI	
18.	datins	Date d'installation d'une infrastructure dans une localité	N	4	SI	
19.	datmal	Date de recensement pour une maladie	N	4	SI	
20.	datmes	Date d'une mesure hydrologique	AN	8	SI	date
21.	datpe	Date où survient une perte (pompage) dans un cours d'eau	AN	8	SI	date
22.	datpi	Date d'installation d'un périmètre irrigué	N	4	SI	
23.	datrec	date d'un recensement de population	N	4	SI	
24.	datref	Date de référence pour la physico-chimie d'une zone	AN	8	SI	date
25.	datst	Date d'installation d'une station de mesure	N	4	SI	
26.	datzn	Date de référence pour l'hydrologie d'une zone	N		SI	
27.	débit	Débit d'une motopompe	N	4.1	SI	
28.	desdr	Destination du drainage d'un périmètre irrigué	A	6	SI	
29.	dev	Développement d'une plante aquatique	A	1	M	logique
30.	drpi	Présence ou non d'un réseau de draine sur un PI	A	1	SI	logique
31.	effe1	Effet d'une plante aquatique sur l'hydrologie du lac	A	3	M	logique
32.	effe2	Effet d'une plante aquatique sur la physico-chimie des eaux	A	3	M	logique
33.	energ	Source d'énergie d'une motopompe	A	7	SI	
34.	ethnd	Nom de l'ethnie dominante dans une localité	A	6	SI	
35.	famb	Famille d'un bétail	A	6	SI	
36.	famf	Famille d'une faune aquatique	A	10	SI	
37.	famp	Famille d'une plante aquatique	A	10	SI	
38.	hacu	Surface cultivée par un périmètre irrigué	N	6.2	ST	
39.	hamoy	Surface moyenne de recouvrement d'une plante aquatique	N	4	ST	
40.	hapi	Surface totale initiale d'un périmètre irrigué	N	6.2	SI	
41.	hfj	Nombre d'heures de fonctionnement d'une motopompe par jour	N	3.1	ST	
42.	kgha	Quantité de produit chimique utilisé à l'hectare sur un PI	N	3.2	ST	
43.	lat	Latitude d'une station de mesure	N	4.2	SI	
44.	latm	Latitude d'un groupe motopompe	N	4.2	SI	
45.	long	Longitude d'une station de mesure	N	4.2	SI	
46.	longm	Longitude d'un groupe motopompe	N	4.2	SI	
47.	marque	Marque d'une motopompe	A	8	SI	
48.	mgl	Concentration d'un élément physico-chimique en mg/l	N	6.1	ST	
49.	nbcas	Nombre de cas recensés pour un maladie	N	5	ST	

50.	nbconc	Nombre de concessions d'une localité	N	4	ST	
51.	nbet	Nombre de têtes d'un bétail dans une localité	N	5	ST	
52.	nbf	Nombre de femmes dénombrées dans une localité	N	5	ST	
53.	nbgmp	Nombre de pompes d'un périmètre irrigué	N	1	ST	
54.	nbh	Nombre d'hommes dénombrés dans une localité	N	5	ST	
55.	nblht	Nombre total d'habitants vivant dans une localité	N	5	ST	
56.	nbpi	Nombre de périmètres irrigués gérés par un même exploitant	N	2	ST	
57.	nbtet	Nombres de têtes de bétail malade dans une localité	N	5	ST	
58.	nmal	Nom d'une maladie hydrique	A	12	SI	
59.	nmbet	Nom d'un bétail	A	6	SI	
60.	nmcl	Nom d'un élément climatique	A	9	SI	
61.	nmeau	Nom d'un cours d'eau	A	10	SI	
62.	nmel	Nom d'un élément physico-chimique	A	15	SI	
63.	nmesp	Nom d'une espèce de faune aquatique	A	15	SI	
64.	nmexp	Nom de l'exploitant d'un périmètre irrigué	A	12	SI	
65.	nminf	Nom d'une infrastructure d'une localité	A	15	SI	
66.	nmloc	Nom d'une localité, ville, village ou hameau	A	12	SI	
67.	nmst	Nom d'une station de mesure	A	15	SI	
68.	nmvill	Nom d'une localité où est recensé un bétail malade	A	5	SI	
69.	nuech	Numéro d'échantillon d'une campagne physico-chimique	N	15	SI	
70.	orig	Village d'origine d'un exploitant	A	13	SI	
71.	paras	Nom d'un parasite	A	1	SI	
72.	pcpi	Utilisation ou non de produit chimique sur un périmètre irrigué	A	1	SI	logique
73.	plant	Nom d'une plante aquatique	A	15	SI	
74.	prczn	Volume d'une zone en % du lac	N	3.1	ST	
75.	propr	Nom du propriétaire d'un périmètre irrigué	A	20	SI	
76.	recul	Recul d'une plante aquatique	A	1	M	logique
77.	série	Numéro de série d'une motopompe	AN	8	SI	
78.	statex	Statut d'un exploitant	A	5	SI	
79.	surfeau	Surface du bassin d'un cours d'eau en km2	N	5.1	ST	
80.	tydon	Type, origine des données de population	AN	3	SI	
81.	tyloc	Type d'une localité (ville, village, hameau de culture, ...)	A	15	ST	
82.	typi	Type de périmètre irrigué	AN	4	SI	
83.	typrod	Type de produit chimique	A	10	SI	
84.	tyst	Type d'une station de mesure	A	2	SI	
85.	valcl	Valeur de la mesure d'un élément climatique	N	5.2	ST	
86.	volap	Volume d'un apport d'eau en millions de m3	N	5.2	ST	
87.	voldr	Volume journalier drainé par un périmètre irrigué en M m3	N	5.2	ST	
88.	voleau	Volume d'un cours d'eau en millions de m3	N	5.2	ST	
89.	volpe	Volume d'une perte d'eau	N	5.2	ST	
90.	volzn	Volume d'une zone du lac en millions de m3	N	5.2	ST	

AN : Alphanumérique

SI : Signalétique

CA Calculé

A : Alphabétique

ST : Situation

MES : Mesuré

N : Numérique

M : Mouvement

EST : Estimé

Le point indique le nombre de décimales après la virgule

3.2. Le modèle conceptuel des données

Le MCD de la base Guiers (figure 111), conçu suivant le schéma entité - association, est composé de vingt cinq associations reliant entre elles dix-sept entités. Les caractéristiques relatives aux entités et aux associations sont décrites dans les fiches descriptives présentées en annexe.

La décomposition en sous-schémas rend plus aisée l'exploitation du MCD. L'exemple donné à la figure 112 concerne la gestion d'un périmètre irrigué ; il se lit de la manière suivante :

1. Périmètre irrigué	pompe	cours d'eau	(0,1)	(1,n)
2. Périmètre irrigué	rejette dans	cours d'eau	(0,1)	(1,n)
3. Périmètre irrigué	se situe	localité	(1,1)	(1,n)
4. Motopompe	équipe	périmètre irrigué	(1,1)	(1,n)
5. Exploitant	gère	périmètre irrigué	(1,n)	(1,n)
6. Zone	comprend	périmètre irrigué	(1,n)	(1,1)
7. Exploitant	vit	localité	(0,1)	(1,n)
8. Localité	appartient	zone	(1;1)	(1,n)
9. Cours d'eau	est découpé en	zone	(1,n)	(1,1)
10. Zone	contient	station	(1,n)	(1,1)
11. Station	mesure	physico-chimie	(1,n)	(1,n)
12. Physico-chimie	caractérise (datref)	zone	(1,n)	(1,1)

En langage naturel, on dirait : un périmètre irrigué est équipé d'un ou n GMP (groupe motopompe), irrigue à partir d'un cours d'eau et rejette ses eaux de drainage dans un cours d'eau qui peut être le même que celui qui l'alimente ; il est géré par un exploitant qui peut être un autochtone ou un étranger. Le périmètre irrigué est situé dans une localité qui elle même appartient à l'une des zones définies à partir de l'hydrologie et de la physico-chimie des eaux à l'intérieur du territoire de la base de données. Une zone contient des stations où sont effectuées les mesures physico-chimiques.

L'ensemble de ces interactions permet de connaître l'activité d'un périmètre irrigué, son environnement d'un point de vue hydrique et physico-chimique ainsi que les règles de gestion qu'il observe au niveau élémentaire. Optimisée, cette méthode permet de quantifier l'impact d'un aménagement hydro-agricole sur son environnement immédiat.

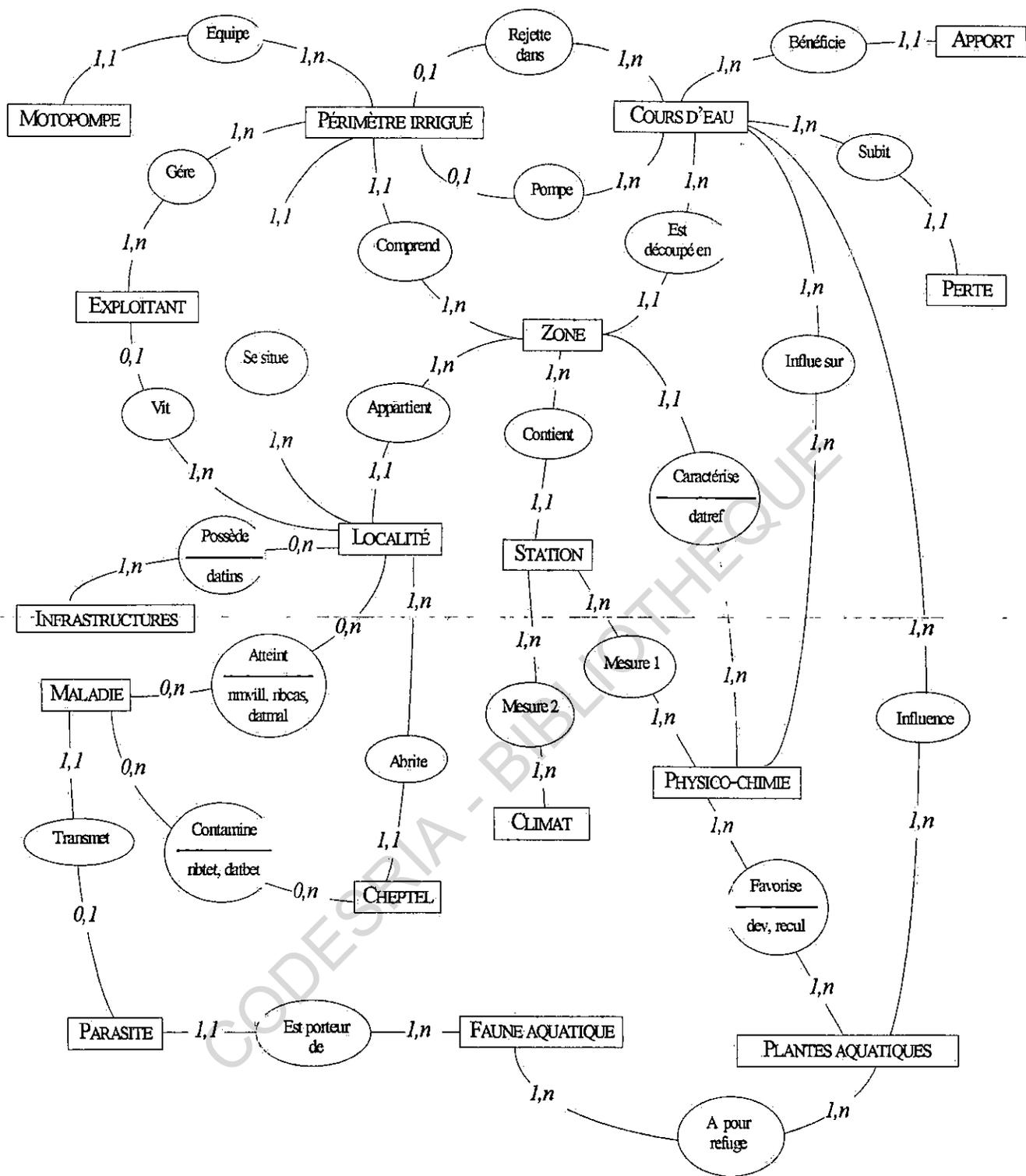
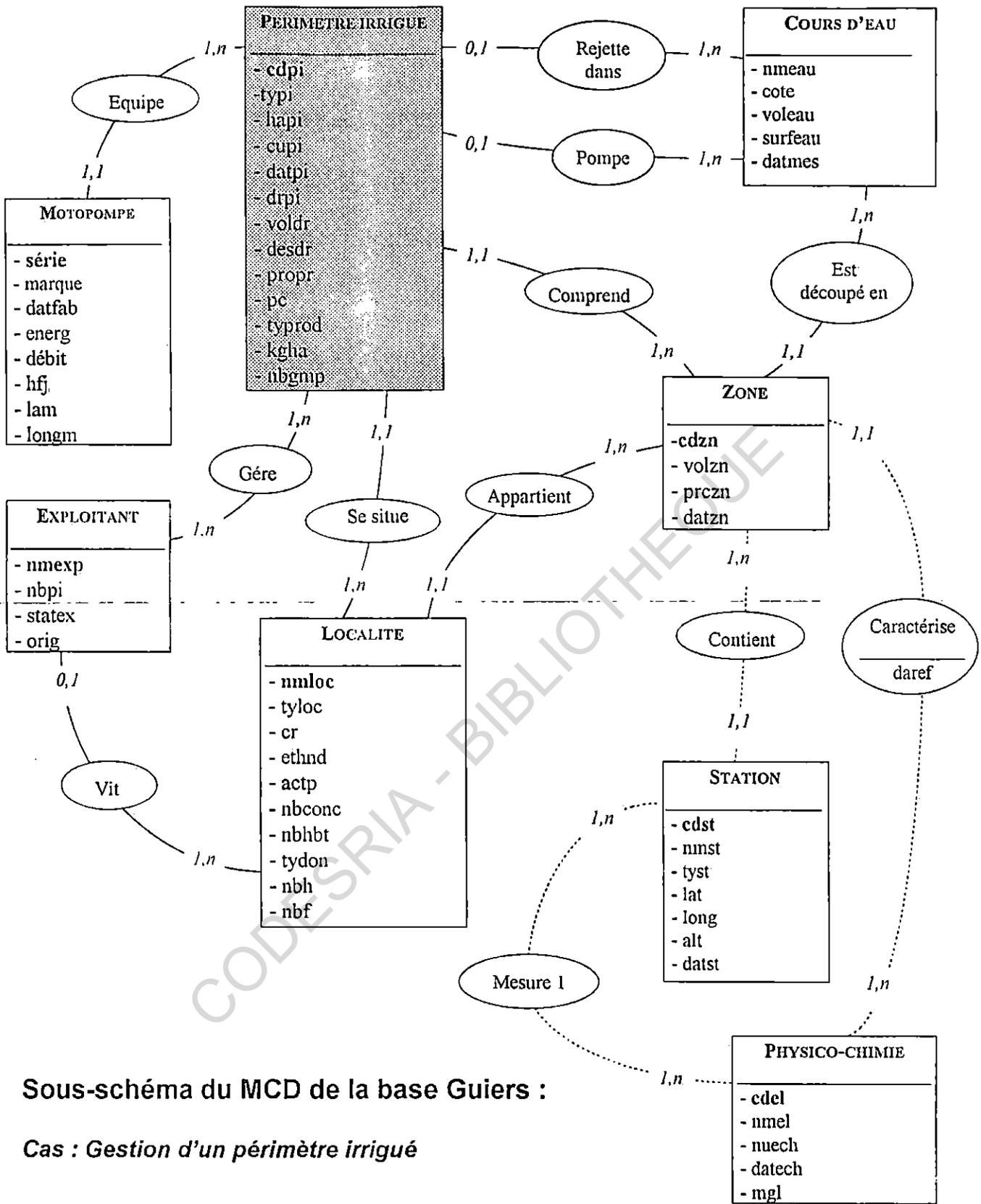


FIGURE 111. — Modèle conceptuel des données de la base Guiers.



Sous-schéma du MCD de la base Guiers :

Cas : Gestion d'un périmètre irrigué

FIGURE 112. — Sous-chéma du modèle conceptuel des données de la base Guiers: Cas de la gestion d'un périmètre irrigué villageois.

3.3. Le modèle logique des données

Le modèle logique de la base Guiers est de type relationnel ; il est déduit des entités et associations décrites dans le MCD. Le passage au MLD s'est effectué suivant les règles de passage déjà explicitées (figure 102).

Le MLD de la base Guiers comprend au total vingt sept tables (figure 113) dont la structuration est présentée au tableau XLIX.

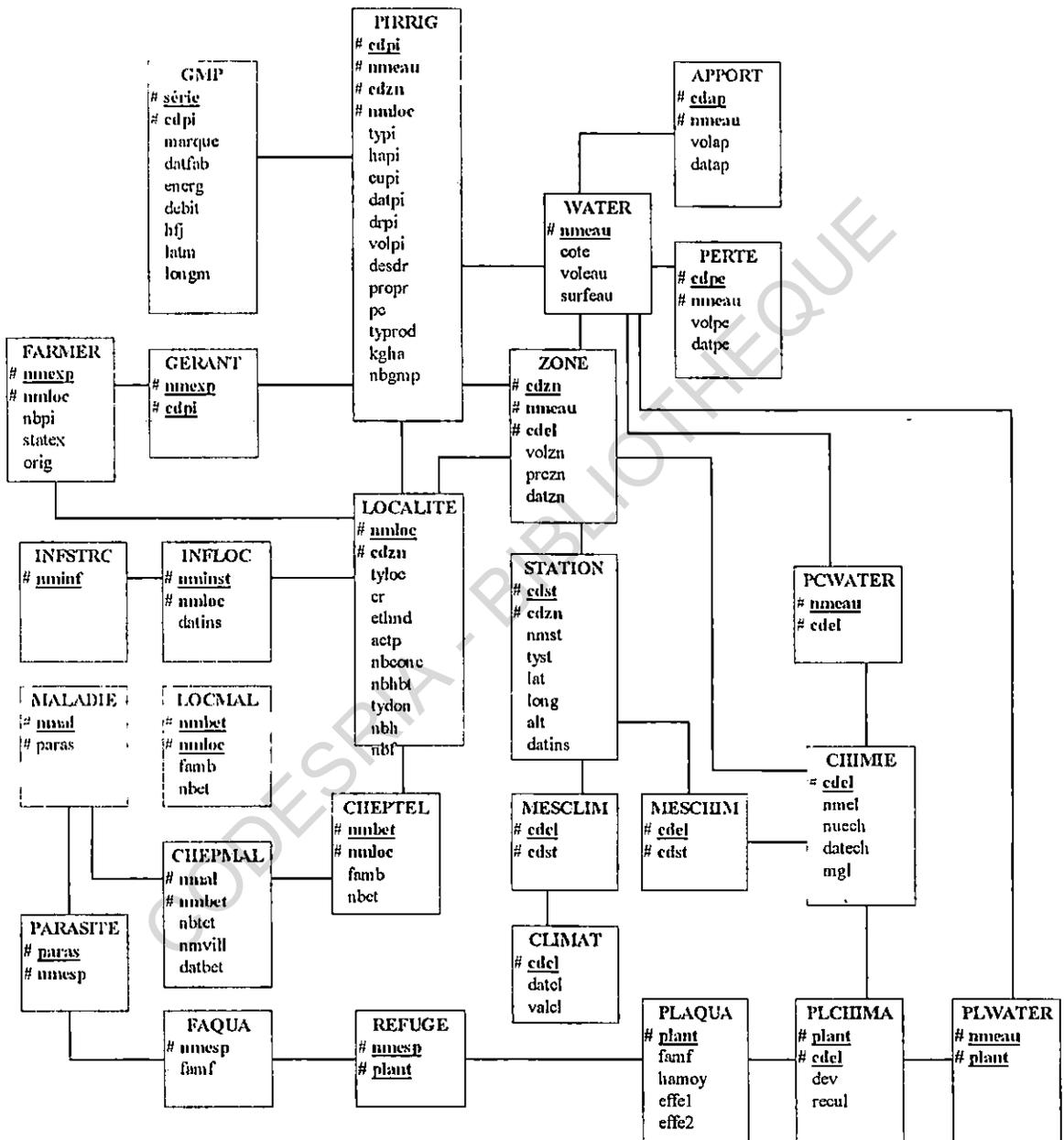


FIGURE 113. — Schématisation du modèle logique des données de la base Guiers.

TABLEAU XLIX
Contenu des tables du modèle logique de la base Guiers

Nom table	Contenu
apport	(cdap, volap, datap, nmeau)
chepmal	(nmal, nmbet, nbtet, nmvill, datbet)
cheptel	(nmbet, famb, nbet, nmloc)
chimie	(cdel, nmel, nuech, datech, mgl)
climat	(cdcl, datcl, valcl)
faqua	(nmesp, famf)
farmer	(nmexp, nbpi, statex, orig, nmloc)
gérant	(nmexp, cdpi)
gmp	(série, marque, datfab, energ, debit, hfj, latm, longm, cdpi)
infloc	(nminf, nmloc, datins)
infstruc	(nminf)
localité	(nmloc, tyloc, cr, ethnd, actp, nbconc, nbhbt, tydon, nbh, nbf)
locmal	(nmal, nmloc, nbcas, datmal)
maladie	(nmal, paras)
meschim	(cdel, cdst)
mesclim	(cdcl, cdst)
parasite	(paras, nmesp)
pcwater	(nmeau, cdel)
perte	(cdpe, volpe, datpe, nmeau)
pirrig	(cdpi, typi, hapi, hacu, cupi, datpi, drpi, voldr, desdr, propr, pc, typrod, kgla, nbgmp, nmeau, cdzn, nmloc)
plagua	(plant, famp, hamoy, effe1, effe2)
plchim	(plant, cdel, dev, recul)
plwater	(nmeau, plant)
refuge	(nmesp, plant)
station	(cdst, nmst, tyst, lat, long, alt, datst, cdzn)
water	(nmeau, cote, voleau, surfeaun, datmes)
zone	(cdzn, volzn, prczn, datzn, nmeau, cdel)

Chapitre III

QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DU SIG GUIERS DANS LE CADRE DE LA GESTION DU SYSTÈME FLUVIO-LACUSTRE

Le SIG Guiers se prête à de nombreuses applications grâce à la modélisation de ses données préalablement effectuée. Des volets tels que la socio-économie, la démographie, le suivi de la qualité des eaux, de la végétation aquatique ; des zones de culture, peuvent être traitées. Le développement de l'intégralité du SIG Guiers échappe à nos modestes moyens, tant humains que matériels. Ce qui suit ne représente qu'une modeste extraction de l'ensemble ; les modèles conceptuel et logique présentés au figures 111 et 113 le démontrent.

C'est pour cette raison que nous en avons développé une partie sous le logiciel MapInfo 4.0 Professional. Celui-ci offre plusieurs possibilités d'importation et d'exportation vers de nombreux logiciels graphiques (ER-Mapper, Surfer, AutoCad, Idrisi, ArcView), de gestion de base de données (Dbase, Acces, FoxPro, Excel) et de Bureautique (logiciels du groupe Office). Le volume de la base de données qui alimente le SIG Guiers est d'environ 100 à 150 Mo (Méga octets), y inclus les images raster formant la série des données SPOT-XS de 1989 et 1993 traitées.

Le choix de MapInfo 4.0 Professional se justifie essentiellement par son coût et sa facilité de manipulation tout en offrant les fonctionnalités les plus usuelles de l'algèbre relationnelle et de l'analyse spatiale.

1. TABLEAU GENERAL DE L'ENVIRONNEMENT DU GUIERS ENTRE 1989 ET 1993

La base Guiers reprend l'ensemble des composantes principales l'environnement présentée aux parties 1 et 2 de cette étude. C'est une sorte de tableau de bord pour la gestion du système fluvio-lacustre du Guiers (figure 114).

Avec des moyens accrus la base de données pourra être améliorée, affinée et validée. Pour le moment, des opérations simples peuvent être effectuées telles que la mesure de la disponibilité et de la demande en eau, le suivi de la qualité des eaux, l'étude de l'évolution des plantes aquatiques, la dynamique démographique et le suivi des maladies hydriques autour du lac.

1.1. Hydrologie

L'hydrologie est le nœud central du développement de la région du lac de Guiers. En effet, ce sont les ressources en eau qui ont donné à cette région la place qu'elle occupe aujourd'hui dans la planification du développement économique de la vallée du fleuve Sénégal.

Dans les années à venir, il sera beaucoup question de gestion et de planification des ressources en eau, surtout lorsque le programme d'aménagement de l'OMVS sera pleinement opérationnel. En prévision de cela, le SIG Guiers tente de couvrir dès à présent des aspects tels que la disponibilité et la demande en eau autour du lac. Ultérieurement, ces connaissances pourront être intégrées dans une base de données globale pour la gestion de l'ensemble du bassin du fleuve Sénégal.

1.1.1. La disponibilité de l'eau

La disponibilité de l'eau est devenue une réalité au lac de Guiers depuis 1985 ; les bilans hydrologiques du lac établis pour la période 1985-1992 en attestent (figures 34, 35).

Deux séries d'images SPOT-XS de 1989 et 1993 permettent de mesurer spatialement cette disponibilité de l'eau par différenciation des contours du lac entre les deux périodes. Ils offrent ainsi la possibilité de vérifier la validité des formules de COGELS *et al.* (1992) pour le calcul de la surface lacustre (Tableau L). Le calcul de la surface du lac est chose aisée, soit à partir de l'image raster traitée, soit à partir des fichiers vecteurs. Les résultats obtenus par ce procédé sont présentés au tableau L. L'écart par rapport aux données de COGELS est d'environ 0,85 à 1,5 km², il pourrait être dû à des erreurs de digitalisation. Mais nous pouvons déjà avancer l'hypothèse d'une validité des formules proposées par COGELS *et al.* (1992) pour le calcul de la superficie du lac, tout au moins dans la gamme de hauteurs d'eau étudiée.

Rappel de la formule de COGELS :

$$\text{Surface (km}^2\text{)} = 170,72 + 80,03 H + 3,01 H^2 + 10,03 H^3 - 1,71 H^4 - 1,93 H^5 - 0,79 H^6 + 0,08 H^7$$

avec H : hauteur d'eau du lac de Guiers en m IGN

TABLEAU L

Morphologie du lac de Guiers correspondant aux dates des images SPOT-XS du lac de Guiers (d'après les formules de COGELS *et al.* (1992) et les données du SIG Guiers)

Date	H lac (m IGN)	Surface (km ²)		Volume M m ³
		COGELS	SIG Guiers	
1 ^{er} février 1989	0,99	239	240,498	388
11 novembre 1993	1,65	272	272,85	560

L'estimation directe du volume du lac est pour le moment impossible dans la mesure où les données bathymétriques du Guiers n'ont pas encore été intégrées. La validation du modèle numérique de terrain du lac de Guiers est en effet une des perspectives de la base Guiers : elle va permettre une mise à jour des abaques de volume et de surface du lac. Cependant, les formules de COGELS peuvent être introduites et appliquées aux données limnimétriques.

La figure 115 montre la configuration du lac de Guiers aux deux périodes d'étude ; elle donne un aperçu des surfaces grignotées progressivement par le lac de Guiers aux détriments des cultures de décrue. Il faut signaler que les surfaces gagnées par le lac sont généralement occupées par la végétation aquatique. Ce qui représente une perte nette pour les populations riveraines, malgré le fait que certaines de ces plantes font l'objet d'une exploitation par l'artisanat local, notamment dans la fabrication de nattes (THIAM, 1984).

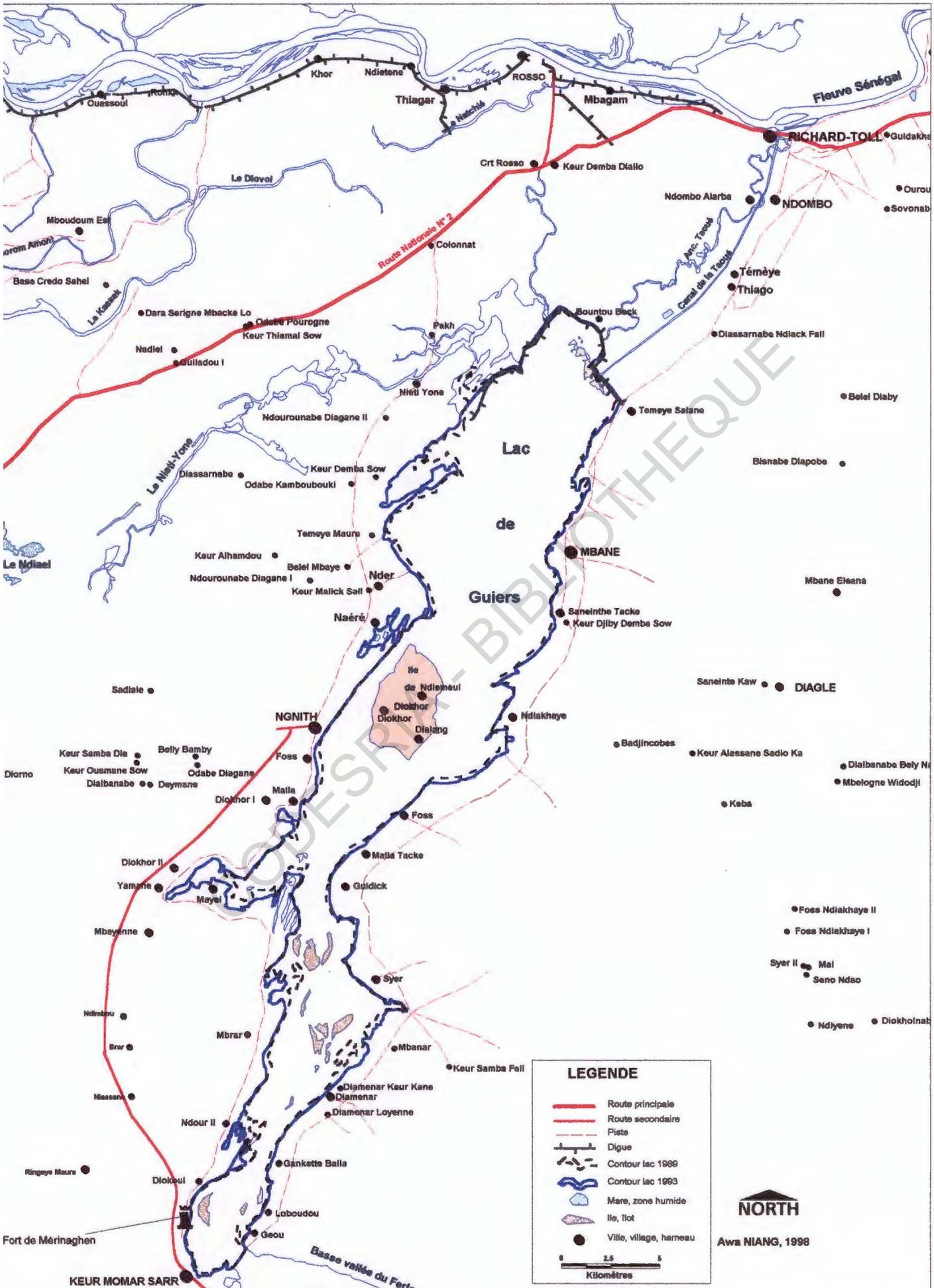


FIGURE 115. — Configuration du lac de Guiers en 1989 et en 1993.

1.1.2. La demande en eau

La demande en eau autour du lac de Guiers peut être estimée grâce à la localisation et à la caractérisation des différentes activités pratiquées, notamment l'agriculture irriguée, la demande en eau potable (Usine de la SDE à Ngnith), la remise en eau du Ferlo¹ et les besoins prévisionnels de projets de développement tels que le Canal du Cayor.

L'intégration de ces différents facteurs devrait permettre une planification précise des remplissages du lac. Celle-ci passant bien évidemment par une maîtrise du chronogramme des différentes activités pratiquées.

1.1.2.1. L'agriculture Irriguée autour du lac de Guiers

La demande actuelle en eau d'irrigation au lac de Guiers provient essentiellement des PIV installés dans les villages riverains, de la CSS dans une moindre mesure depuis 1985, des parcelles sous gestion SAED le long de la Taoué.

Si la localisation et la délimitation des parcelles CSS et SAED est chose assez aisée (figure 116), il n'en est pas de même pour les petits périmètres villageois indépendants qui s'égrènent le long des rives du lac. Le caractère itinérant et quasi anarchique de ces exploitations rend très difficile leur cartographie. Les données sur l'emplacement des groupes motopompes (GMP) n'ont que très peu de valeur dans la mesure que où ce sont généralement des pompes de location ou prêtées qui circulent d'un périmètre à l'autre.

De plus, les propriétaires de GMP sont toujours réticents à fournir les informations sur les débits pompés, le nombre d'heures de fonctionnement des pompes ; en fait tous les données nécessaires pour estimer les quantités d'eau prélevées. Sans doute la hantise d'une facturation des eaux consommées ?

Ce déficit d'information peut être partiellement comblé par les renseignements relatifs aux types de culture pratiqués et aux saisons de culture. Cette méthode est d'ailleurs déjà utilisée par les modèles LGPLG et GIL pour le calcul des volumes pompés pour l'irrigation.

D'ores et déjà, le SIG Guiers fournit quelques renseignements utiles à la compréhension de la dynamique de l'agriculture irriguée autour du lac. Trois constats s'imposent :

1. mis à part les aménagements sous gestion SAED au nord et quelques aménagements dans la cuvette de Nder, les PIV recensés le long des rives du Guiers sont d'installation récente, généralement postérieurs à Diama ;
2. les cultures maraîchères (tomates et oignons principalement) sont les vedettes autour du lac ; de Témèye Salane à Keur Momar Sarr, 90% des PIV pratiquent en exclusivité cette culture, de sorte que se pose parfois un problème d'écoulement de la production ;
3. le système d'irrigation est encore très rudimentaire ; il se caractérise par des parcelles mal délimitées, mal planées, une absence de réseau de drainage, l'utilisation anarchique de produits chimiques ; ce sont en général des exploitations familiales ou de GIE réalisés sur fonds propres.

¹ Opération l'eau à Linguère

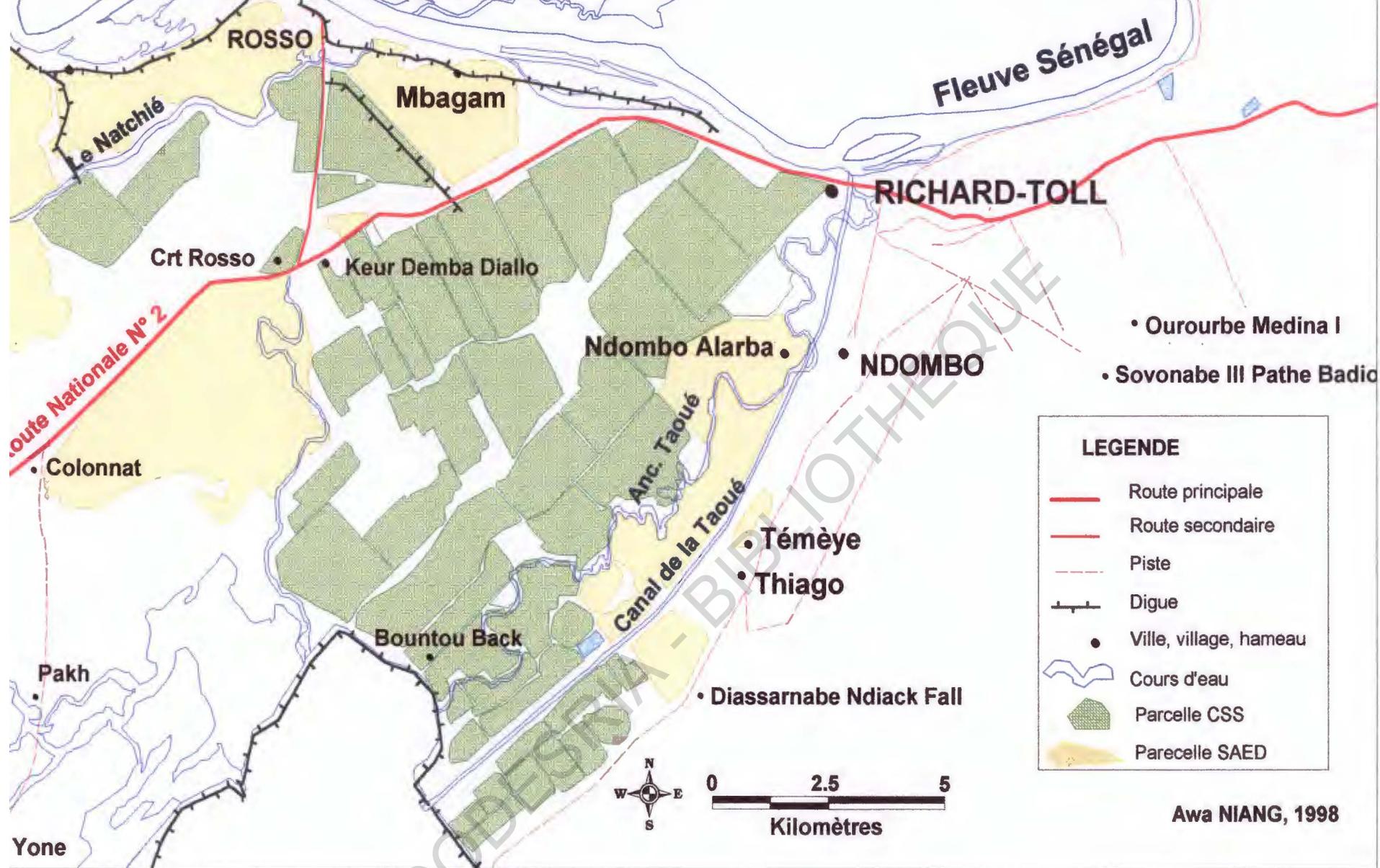


FIGURE 116. — Quelques parcelles CSS et aménagements sous gestion SAED en 1993.

Le croisement entre différentes tables permet d'extraire l'information utile à l'établissement du bilan hydrologique du lac de Guiers. En l'occurrence, il s'agit des tables "GMP", "PIRRIG", "FARMER", "GERANT" et "ZONE" qui une fois agrégées donnent une bonne estimation de la demande en eau d'irrigation autour du lac, dès lors que toutes les rubriques de ces tables sont renseignées. Le tableau LI donne un aperçu des possibilités d'intégration avec des modèles de gestion de l'eau existants (LGPLG, le modèle de COLY (1996), les modèles de COGELS *et al.* (1993) ; il a été obtenu par une requête SQL.

Grâce au procédé du géocodage et à la mesure des coordonnées des GMP, il est possible de localiser l'emplacement des PIV le long du lac (figure 117) ; malheureusement les données sur les superficies des exploitations ne sont pas toujours fiables, ce qui fait que la proportionnalité par rapport à la taille des exploitations n'a pu être respectée. De plus, nous tenons à préciser que ces données ne représentent pas l'intégralité des PIV du lac de Guiers mais leur situation au moment de ces enquêtes.

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

TABLEAU LI
Agrégation des tables "GMP", "PIRRIG", "FARMER", "GERANT" et "ZONE"
et estimation de la demande en eau d'irrigation autour du lac dans quelques localités du lac de Guiers

CDPI	NMEAU	CDZN	NMLOC	PROP	NMEXP	DATINS	TYPI	SURFPI	CUPI	DRPI	PC	TYPROD	KGHA	NBGMP	NBPI	STATEX
G95_17	Lac de Guiers	CE	FOSS	Niang	Niang	1993	PIVP	1,00	maraîchage	NON	FAUX		0	2	2	privé
G95_18	Lac de Guiers	CE	FOSS	Iba Diouf	Iba Diouf		PIVP	-	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_19	Lac de Guiers	CE	FOSS	Ndiongue	Ndiongue	1995	PIVP	12,00	maraîchage	NON	VRAI		0	1	1	privé
G95_21	Lac de Guiers	CE	GUIDICK	GIE Manko(AGETIP)	Cheikh Ndiaye	1994	PIVP	-	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_22	Lac de Guiers	CE	GUIDICK	Massaer Fall	Massaer Fall	1995	PIVP	-	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_23	Lac de Guiers	CE	GUIDICK	Cheikh Fall	Cheikh Fall		PIVP	20,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	2	privé
G95_24	Lac de Guiers	CE	GUIDICK	Ousseynou Ndiaye	Ousseynou Ndiaye	1995	PIVP	13,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	2	privé
G95_25	Lac de Guiers	CE	GUIDICK	Ismaïla Ndiaye	Ismaïla Ndiaye	1992	PIVP	22,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	0	2	privé
G95_20	Lac de Guiers	CE	MALLE	GIE Rénovation Mal	Alioune Pene	1994	PIVP	5,00	maraîchage	NON	VRAI	herbicides	0	1	2	privé
G95_72	Lac de Guiers	CW	DIALANG	Mor Gaye	Mor Gaye		PIVP	-	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_67	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	Aliou Gueye	Aliou Gueye		PIVP	8,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	2	1	privé
G95_68	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	Mawade Ndiaye	Mawade Ndiaye		PIVP	4,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_69	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	Aliou Gueye	Aliou Gueye		PIVP	10,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_70	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	El Hadji Abdou Pène	El Hadji Abdou Pène		PIVP	10,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_71	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	Ndiack Pène	Ndiack Pène		PIVP	-	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	2	1	privé
G95_73	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR	Mame Malick Pene	Mame Malick Pene		PIVP	7,00	maraîchage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_54	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR II	Daouda Ndiaye 1	Daouda Ndiaye 2		PIVP	5,00	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_55	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR II	Arona Pène	Arona Pène		PIVP	-	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_56	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR II	Daouda Ndiaye 2	Daouda Ndiaye 3		PIVP	5,00	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_57	Lac de Guiers	CW	DIOKHOR II	El Hadji Gaye	El Hadji Gaye		PIVP	0,00	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_47	Lac de Guiers	CW	MAYEL	Serigne Bassirou Mbacké	Serigne Bassirou Mbacké		PIVP	207,00	maraîchage	NON	FAUX		0	2	1	privé
G95_48	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Bouya Thioub	Bouya Thioub		PIVP	7,30	maraîchage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_49	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Mamadou thioub	Mamadou thioub		PIVP	4,50		NON	FAUX		0	1	1	privé

G95_50	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Assane Madieumbe Sarr	Assane Madieumbe Sarr		PIVP	11,00		NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_51	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Projet Gollom	Projet Gollom		PIVP	70,00		NON	FAUX		0	2	1	GIE
G95_52	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Adama Sarr	Adama Sarr		PIVP	50,00		NON	FAUX		0	0	1	privé
G95_53	Lac de Guiers	CW	MBAYENNE	Monsieur Terrasse	Avaze	1993	PIVP	60,00		NON	FAUX		0	2	1	privé
G95_59	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Projet Thiékkène	Projet Thiékkène		PIVP	10,00		NON	FAUX		0	1	1	GIE
G95_60	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Racine Seck	Racine Seck		PIVP	8,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_61	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Oumar seck	Oumar seck		PIVP	10,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_62	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Birahime Seck	Birahime Seck		PIVP	2,500	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	2	privé
G95_63	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Birama Seck	Birama Seck		PIVP	2,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_64	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Ali Mbaye	Ali Mbaye		PIVP	40,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_65	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Bacar Gueye	Bacar Gueye		PIVP	4,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_66	Lac de Guiers	CW	NDIEMEUL	Bira Fall	Bira Fall		PIVP	3,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_87	Lac de Guiers	CW	NGNITH	GIE Ngnith	Babacar DIOP	1992	PIVP	3,00	maraichage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_90	Lac de Guiers	CW	NGNITH	Ndiaga DIOP	Ndiaga DIOP	1995	PIVP	2,500		NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_91	Lac de Guiers	CW	NGNITH	GIE EGED	Ousseynou Seck	1995	PIVP	5,00		NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_92	Lac de Guiers	CW	NGNITH	Alassane DIOP	Alassane DIOP	1992	PIVP	1,00	maraichage	NON	FAUX		0	1	1	privé
G95_93	Lac de Guiers	NE	MBANE	OSBI	OSBI		PIP	8000,00		NON	FAUX		0	0	1	GIE
G95_58	Lac de Guiers	NW	NAERE	Gora Niang	Gora Niang	1989	PIVP	800,00	maraichage	NON	VRAI		0	4	1	privé
G95_74	Lac de Guiers	NW	NDER	GIE waar wi	Babacar Fall		PIVP	20,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_78	Lac de Guiers	NW	NDER	Moussa Cissé	Moussa Cissé		PIVP	60,00	maraichage	NON	FAUX		0	2	1	privé
G95_79	Lac de Guiers	NW	NDER	Daouda Guèye	Daouda Guèye		PIVP	25,00	maraichage	NON	VRAI	engrais	0	1	1	privé
G95_80	Lac de Guiers	NW	NDER	Foyer Nder	Foyer Nder		PIVP	150,00	riz	NON	FAUX		0	0	1	GIE
G95_81	Lac de Guiers	NW	NDER	Section Nder	Section Nder		PIVP	70,00	riz	NON	FAUX		0	0	1	GIE
G95_82	Lac de Guiers	NW	NDER	Amath Thioye	Amath Thioye		PIVP	50,00	riz	NON	FAUX		0	0	1	privé
G95_83	Lac de Guiers	NW	NDER	Ali SALL	Ali SALL		PIVP	7,00	maraichage	NON	FAUX		0	0	1	privé
G95_84	Lac de Guiers	NW	NDER	Bacary Diaw	Bacary Diaw		PIVP	3,00	maraichage	NON	FAUX		0	0	1	privé

1.1.2.2. Les lâchers au Ferlo et le Canal du Cayor

En septembre 1988, la réouverture de la digue de Keur Momar Sarr laisse entrevoir de nouvelles perspectives de développement pour la vallée du Ferlo mais aussi pour le lac de Guiers.

Quelques mois après cette ouverture, on notait déjà un important développement de la lame d'eau. Quatre années plus tard, la superficie du Ferlo se trouve deux à trois fois plus importante. La preuve en est que le banc de sable dunaire qui occupait le centre du lit du Ferlo aval se trouve progressivement noyé par les eaux en provenance du lac de Guiers. Au même moment, celui-ci voit également les petits îlots qui occupaient sa partie méridionale disparaître sous les eaux (figure 118).

La disponibilité permanente de l'eau, même si elle a de quoi surprendre dans cette région asséchée depuis près de trente ans, a généré une importante activité de pêche. Cette activité est très développée dans la zone, en particulier aux alentours de la digue de Keur Momar Sarr. La suite logique serait un développement de l'agriculture irriguée ; ce qui n'est pas encore le cas. Mais des aménagements hydro-agricoles sont prévus sur le parcours du Ferlo dans le cadre du PRVF

La zone du Ferlo aval est d'autant plus importante qu'elle verra l'implantation du futur canal du Cayor (figure 119). Ce qui va faire de l'extrême sud du lac un pôle de développement stratégique non seulement pour le Delta et le bassin versant du Ferlo mais aussi pour la Presqu'île du Cap-Vert.

Est-il envisageable de voir cohabiter Canal du Cayor et PRVF ? Qu'en sera-t-il au juste du réservoir lacustre ?

Autant de questions pour l'heure sans réponses mais qui devront être élucidées pour éviter toute surprise désagréable. Une des premières précautions sera de s'assurer de la capacité de stockage du lac de Guiers. Une fois établi, le rythme des remplissages saisonniers de la réserve lacustre devra être intégré dans un schéma global de planification des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal.

Pour le moment, le SIG Guiers donne une vision globale des aménagements réalisés ou à réaliser dans la partie sud du lac et permet d'évaluer la population vivant à leur contact direct, donc susceptible de subir leurs effets bénéfiques ou non.

A première vue, l'estimation de la demande en eau autour du lac semble aisée. Néanmoins, il faut compter avec le caractère assez aléatoire des PIV le long des rives du Guiers. De plus, il existe un important écart entre demande potentielle et utilisation réelle des eaux. Ces facteurs devront être précisés par des investigations poussées sur le terrain, afin de compléter les rubriques déjà disponibles dans la base Guiers.

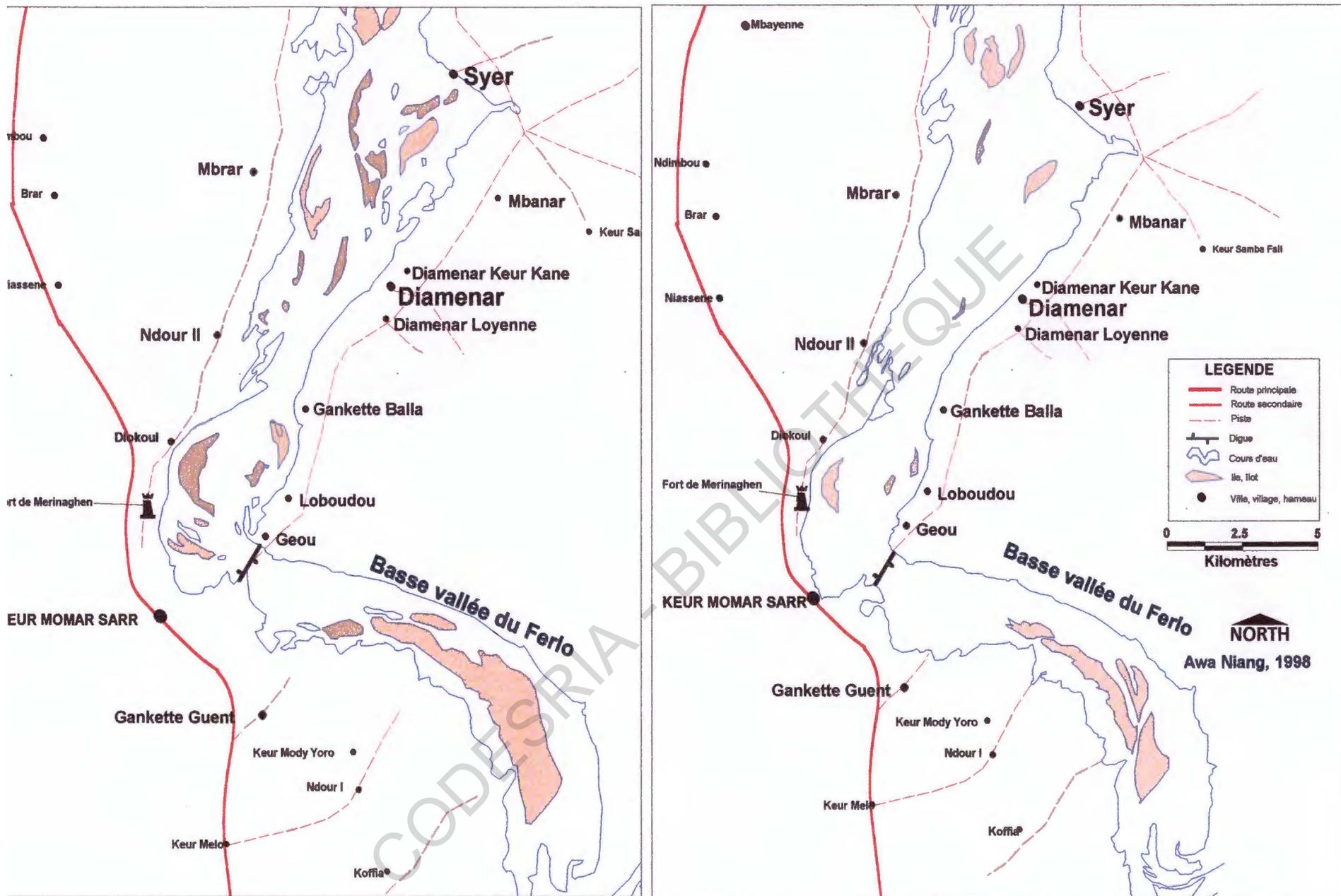


FIGURE 118. — Configuration du bas Ferlo en février 1989 et en novembre 1993.

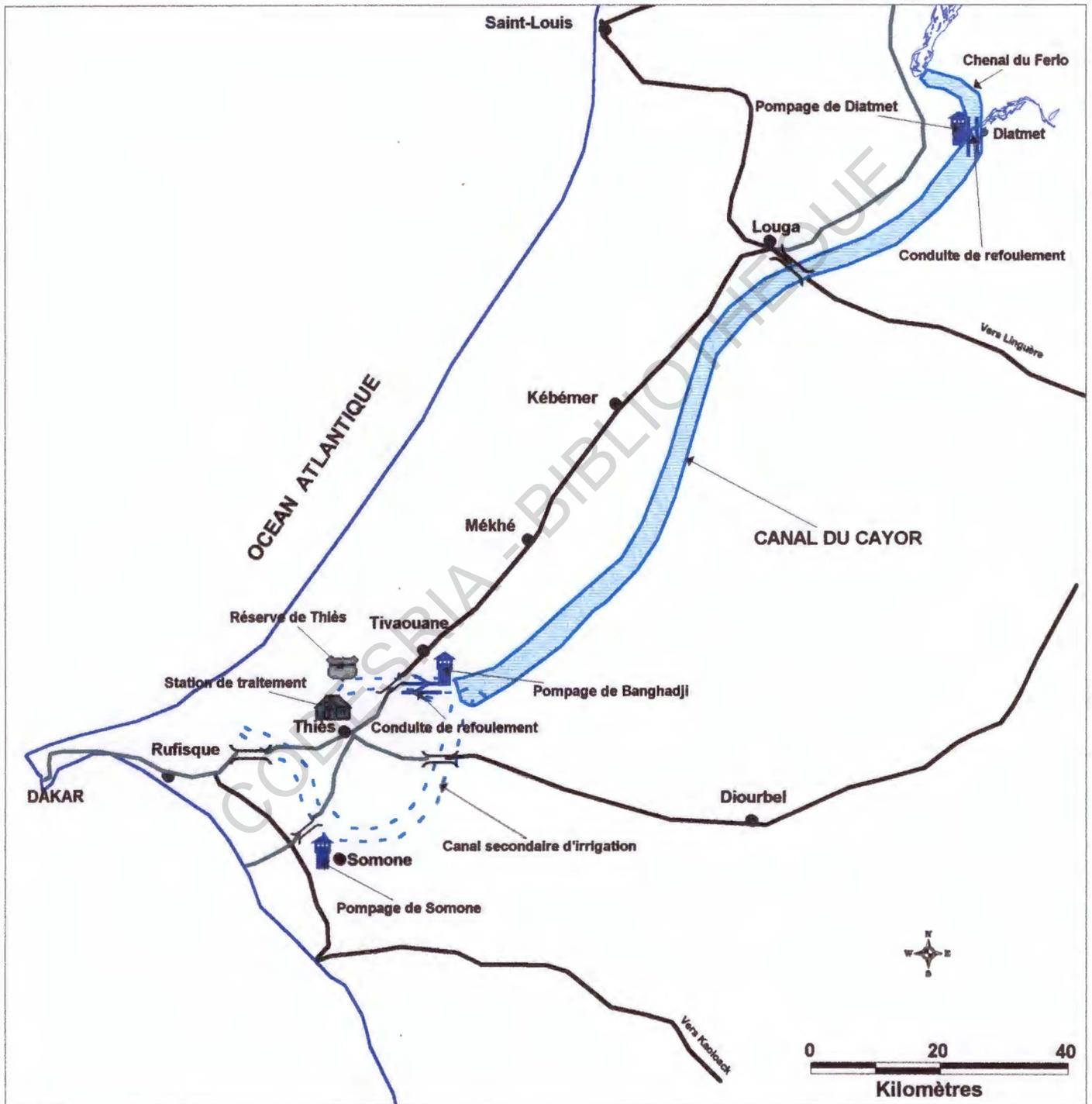


FIGURE 119. — Carte schématique du canal du Cayor.

1.2. Caractérisation de la qualité des eaux du lac de Guiers

Le volet qualité des eaux du lac représente une part importante de la base Guiers ; elle permet une cartographie de la distribution spatiale des différents éléments chimiques mesurés lors des campagnes d'échantillonnage. Les stations et zones reprises ici sont celles définies dans le cadre du programme de recherche EQUÉSEN (tableau LII, figure 120). Pour chaque station, différents renseignements sont disponibles tels que le code de la station, son nom, sa zone, sa superficie, *etc.*

Toutes les données de qualité de l'eau acquises durant le programme EQUÉSEN, c'est-à-dire toutes concentrations de tous les éléments majeurs, sont disponibles dans la base Guiers, de plus des calculs de projection peuvent être effectués grâce à l'intégration des équations de régression entre les hauteurs d'eau mesurées au lac et la concentration en un élément chimique donné (COGELS *et al.*, 1993).

Pour la gestion des eaux du Guiers, l'importance d'une bonne connaissance de la qualité des eaux a été démontrée ; notamment du fait de son interdépendance avec les volumes d'eau stockés dans le réservoir lacustre.

La bonne connaissance de la qualité des eaux permet en outre de procéder à de meilleurs choix en matière d'aménagement et de mise en valeur, de même que l'on peut mesurer les risques pour les populations riveraines par rapport à la qualité de leur eau et aux usages qui en sont faits.

Ce que nous présentons ici sous forme cartographique confirme et affine les résultats obtenus dans la deuxième partie de ce travail. La salinité ou minéralisation globale des eaux nous paraît être un bon indicateur de la qualité des eaux durant les deux périodes d'étude.

TABLEAU LII

Liste des stations de mesure de la qualité de l'eau dans le cadre du programme EQUÉSEN

Code station	Nom de la station	Nom de zone
EQU3	EMB. TAOUE	Nord Ouest
EQU4	TEMEYE	
EQU9	NAERE	
EQU7	NDER	
EQU5	BOUNTOU DIOUGO	Nord Est
EQU6	MBANE	
EQU8	SANINTHE	
EQU10	NDIAKHAYE	Centre Est
EQU11	FOSS	
EQU12	NGNITH	Centre Ouest
EQU13	SYER	Sud Est
EQU14	DIAMENAR	
EQU15	KEUR MOMAR SARR	Sud Ouest

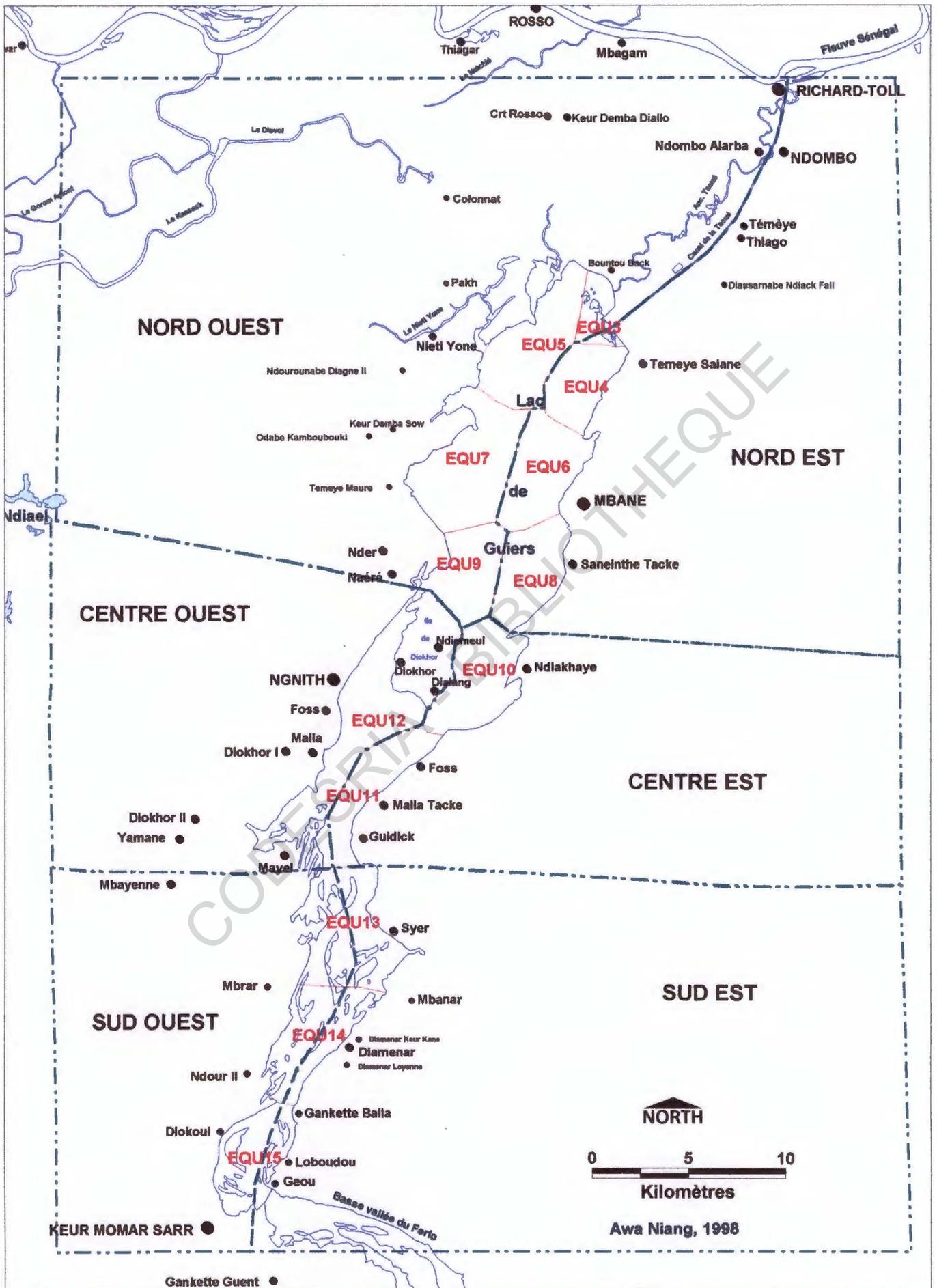


FIGURE 120. — Carte des stations d'échantillonnage de la qualité des eaux du lac de Guier.

1.2.1. La campagne 1979-1982 : situation avant Diama

Avant la construction du barrage de Diama, les eaux du lac de Guiers étaient caractérisées par des valeurs de salinité très élevées, en particulier en zone méridionale et ce du fait des conditions hydrologiques extrêmes qui y prévalaient en fin de saison sèche. La figure 121 présente les concentrations moyennes aux trois régions du lac pour la période 1979-1982.

Certaines années, la salinité pouvait atteindre des valeurs largement supérieures à 1000 mg.l⁻¹ en région sud, ce qui explique une moyenne de 900 mg.l⁻¹ pour cette région. En région nord et centre par contre, la présence de quantités d'eau suffisante presque toute l'année explique des concentrations régionales en sels respectives de 202 et 257 mg.l⁻¹.

D'une manière générale, les hautes valeurs de salinité mesurées dans le lac de Guiers durant cette période s'expliquent par une conjonction de facteurs hydrologiques et hydrodynamiques (Cf. première et deuxième partie). La langue salée remontait en effet dans le lac, via la Taoué, en période de basses eaux du fleuve Sénégal. La qualité des eaux évolue en fonction des cycles de remplissage et d'isolement du lac sous l'effet de phénomènes de dilution et de concentration qui les accompagnent.

Cette situation va d'ailleurs se poursuivre jusqu'en 1985, date de la fermeture du barrage de Diama.

1.2.2. La campagne 1989-1993 : situation après Diama

Dès 1985, la disponibilité permanente de l'eau entraîne un adoucissement des eaux du nord vers le sud du lac. Les valeurs moyennes pour chaque station durant la période 1989-1993 sont présentées à la figure 122. Cependant, on note que la région méridionale (station 15) reste très salée avec des concentrations moyennes de l'ordre de 1000 mg.l⁻¹. Du nord au sud du lac, en fonction des différentes zones, la minéralisation globale des eaux évolue de la manière suivante :

- Nord-est : 184,5 mg.l⁻¹ et nord-ouest : 144 mg.l⁻¹ ;
- Centre est : 223 mg.l⁻¹ et centre ouest : 280 mg.l⁻¹ ;
- Sud-est : 452 mg.l⁻¹ et sud-ouest : 1000 mg.l⁻¹.

La distribution des différents éléments chimiques est, à peu de choses près, la même que celle de la salinité. Elle se caractérise par une baisse générale des concentrations par rapport à la période d'avant la construction du barrage de Diama.

La disponibilité d'eau douce en quantité suffisante dans le fleuve Sénégal toute l'année justifie cette nouvelle tendance de l'évolution qualitative des eaux du lac de Guiers. La fermeture du barrage de Manantali en 1987 améliore les remplissages du Guiers et a par conséquent un effet positif sur la qualité de ses eaux.

L'examen de l'évolution de quelques paramètres chimiques confirme cette tendance. Les taux moyens de chlorures et de sodium par station présentés aux figures 123 et 124 évoluent en effet de la même manière que la salinité. Le choix de ces deux paramètres se justifie par leur relative stabilité et leur caractère conservatif. Ils sont de bons témoins de l'évolution qualitative des eaux au lac de Guiers.

La répartition du pH moyen des eaux permet de comprendre l'évolution nord-sud des concentrations en éléments chimiques dans le lac de Guiers. Légèrement neutres au nord, les eaux évoluent vers des valeurs légèrement basiques dans le sud du lac. La moyenne du pH par station entre 1989 et 1992 est donnée à la figure 125.

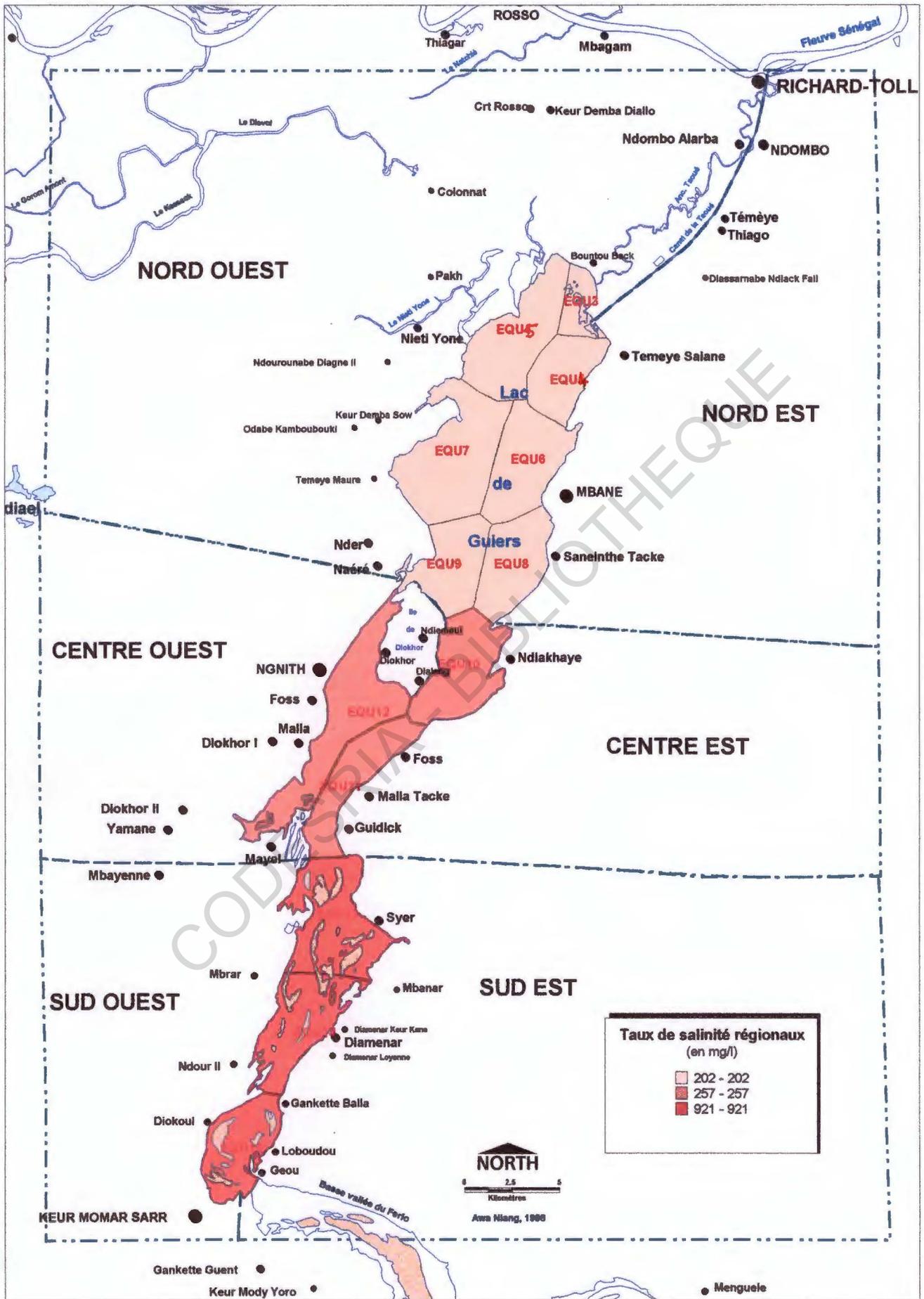


FIGURE 121. — Qualité générale des eaux aux trois régions du lac de Guiers avant Diama.

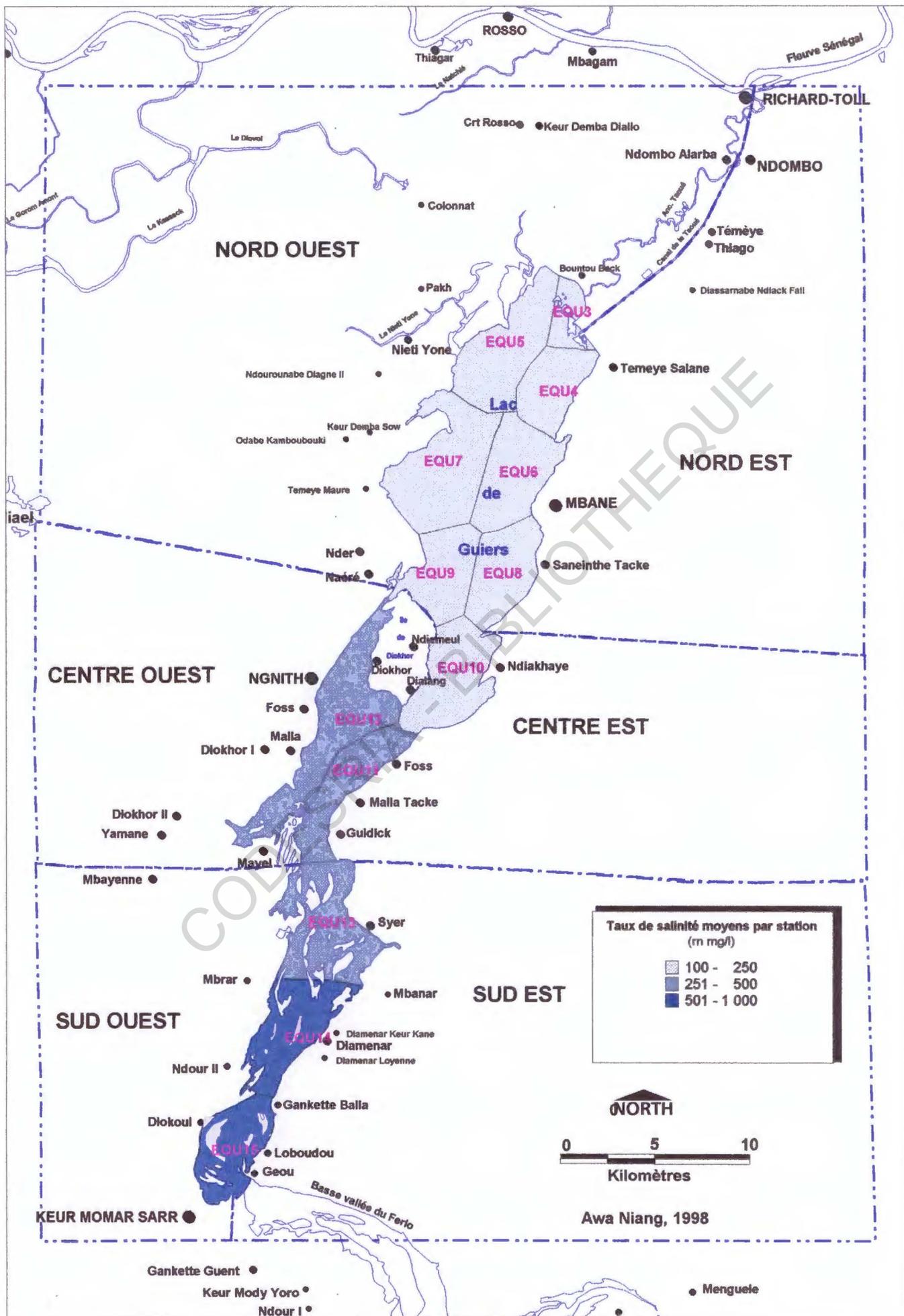


FIGURE 122. — Qualité générale des eaux du lac de Guiers par station après Diama.

A l'horizon 2000, les cotes du lac devraient évoluer vers des valeurs largement supérieures à 1,90 m IGN, pour pouvoir satisfaire l'ensemble des demandes en eau pour les activités prévues sur son pourtour. Les calculs effectués à l'aide du modèle GIL augurent d'une baisse très importante de la salinité à l'horizon 2000, de plus de 50% des valeurs actuelles. Cette baisse sera uniquement fonction de l'amélioration des remplissages du lac mais aussi des vidanges régulières vers le Ferlo et éventuellement le canal du Cayor, s'il se réalise.

Néanmoins, un très grande attention doit être accordée au développement de l'irrigation villageoise qui pourrait causer une altération de la qualité chimique des eaux, du fait de l'usage de produit de composition et de provenance souvent "douteuse". Des enquêtes à ce propos seraient nécessaires pour évaluer les risques et proposer des solutions

Différents usages peuvent être fait des données de qualité de l'eau dans le SIG Guiers. Par exemple, elles permettent d'identifier pour chaque PIV la qualité moyenne de l'eau pompée et à partir de là, l'opérateur peut proposer une adaptation des types de cultures pratiqués en fonction de tel ou tel élément chimique. Un exemple est présenté au tableau LII. Et la gamme des utilisations possibles est encore très large, elle va dépendre des besoins et des objectifs de chaque utilisateur de la base de données.

TABLEAU LIII
PIV et qualité de l'eau : exemple de quelques périmètres irrigués du lac de Guiers
(concentrations exprimées en mg.l⁻¹)

CDPI ²	NMEAU	NMZN	NMLOC	PH	Cl	Na	Salinité
G95_8	Anc. Taoué	Nord Ouest	NDOMBO	7.57	39.14	26.51	184.56
G95_5	Nouv. Guiers	Nord Ouest	NDOMBO ALARBA	7.57	39.14	26.51	184.56
G95_10	Nouv. Taoué	Nord Ouest	THIAGO	7.57	39.14	26.51	184.56
G95_17	Lac de Guiers	Centre Est	FOSS	7.80	81.63	47.34	285.65
G95_21	Lac de Guiers	Centre Est	GUIDICK	7.80	81.63	47.34	285.65
G95_26	Lac de Guiers	Sud Est	SYER	7.88	163.10	114.88	603.61
G95_27	Lac de Guiers	Sud Est	DIAMENAR LOYENNE	7.88	163.10	114.88	603.61
G95_42	Lac de Guiers	Sud Ouest	DIOKOUL	8.11	322.53	234.66	999.99
G95_43	Lac de Guiers	Sud Ouest	MBRAR	8.11	322.53	234.66	999.99
G95_57	Lac de Guiers	Centre Ouest	DIOKHOR II	7.73	64.52	45.52	279.87
G95_71	Lac de Guiers	Centre Ouest	DIOKHOR (Île)	7.73	64.52	45.52	279.87
G95_81	Lac de Guiers	Nord Ouest	NDER	7.57	39.14	26.51	184.56
G95_90	Lac de Guiers	Centre Ouest	NGNITH	7.73	64.52	45.52	279.87
G95_93	Lac de Guiers	Nord Ouest	MBANE	7.62	42.04	29.69	188.61

² Se reporter au dictionnaire des données pour la définition des termes

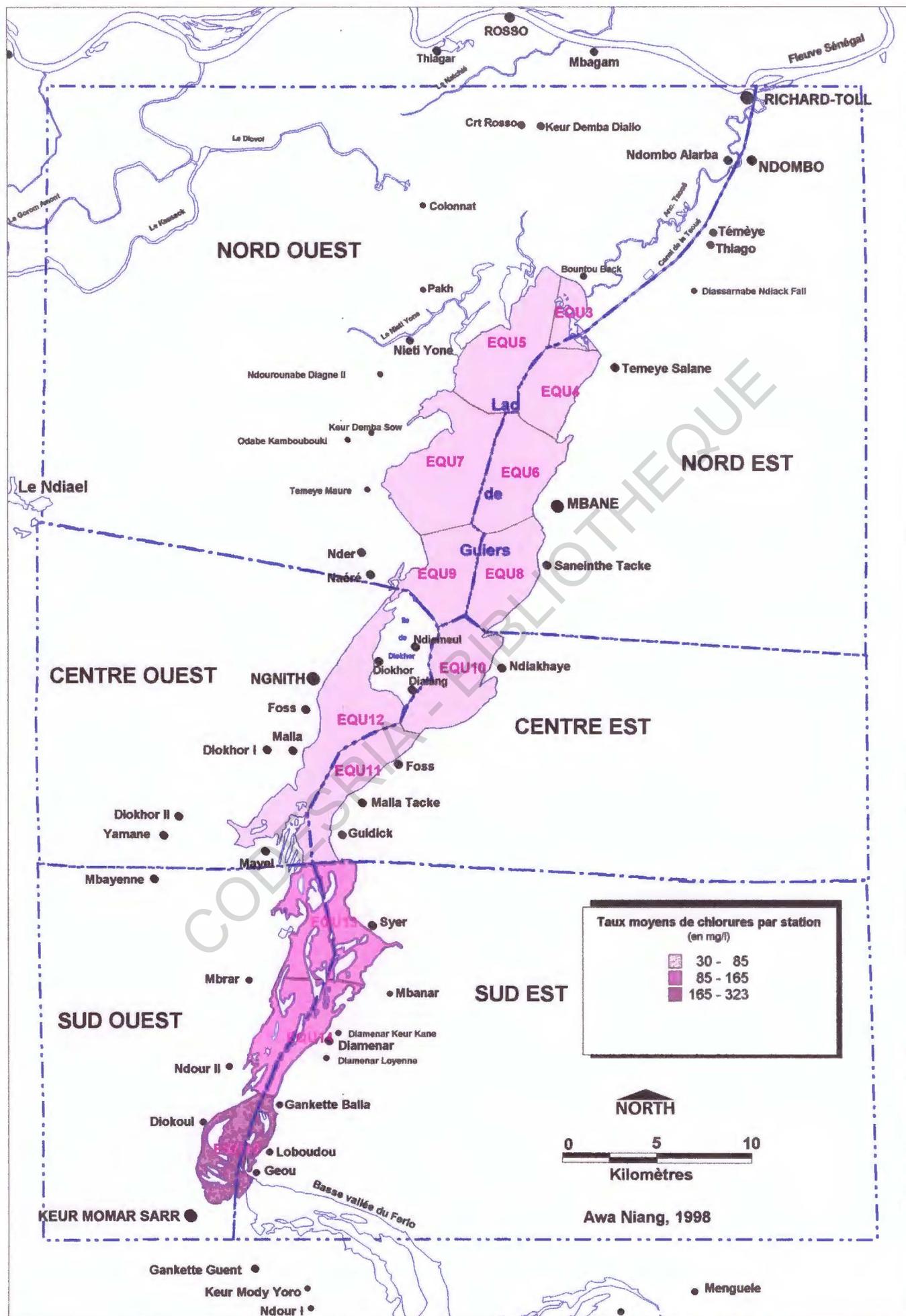


FIGURE 123 — Evolution du taux moyen de chlorures par station des eaux du lac de Guiers

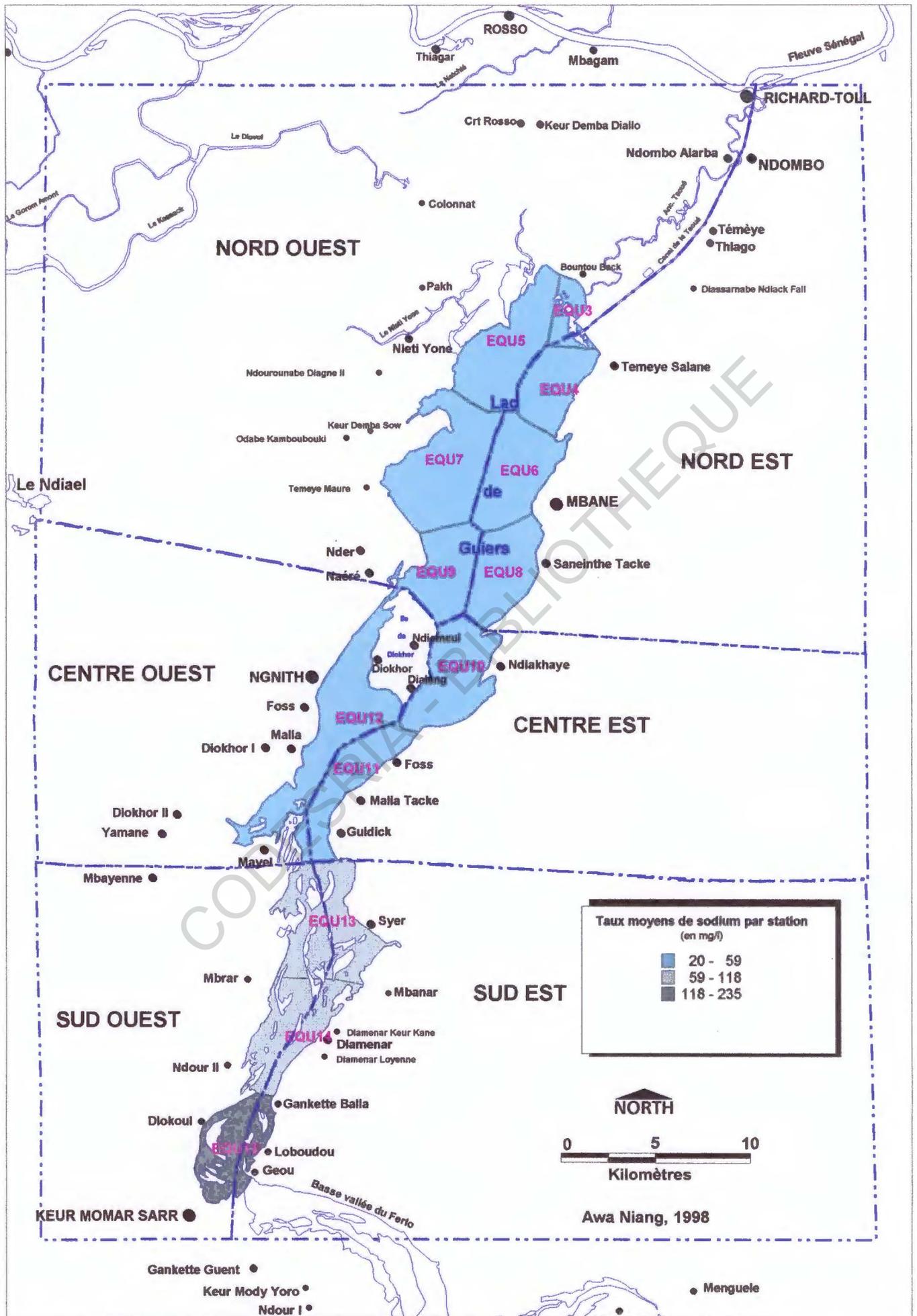


FIGURE 124. — Evolution du taux moyen de sodium par station des eaux du lac de Guiers.

1.3. Plantes aquatiques

Dès les premiers mois après la fermeture du barrage de Diama, la conjonction entre des facteurs hydrologiques et hydrochimiques favorables entraîne une poussée spectaculaire des plantes aquatiques au lac de Guiers et même dans tout le Delta du fleuve Sénégal.

Au début de l'apparition de la végétation aquatique, diverses causes avaient été évoquées à ce phénomène ; certains avançaient même l'hypothèse d'une eutrophisation du lac de Guiers. Des analyses de phosphore et d'azote effectuées lors des campagnes de mesure EQUÉSEN ont démonté cette hypothèse.

La prolifération de plantes aquatiques nuisibles n'est pas un fait nouveau au lac ; des faits similaires ont été observés dans le passé (GROSMAIRE, 1957 ; THIAM, 1981). Dans d'autres milieux aménagés des problèmes similaires sont apparus (DEJOUX, 1988).

Ce qui nous pousse à considérer cette prolifération de plantes aquatiques comme une étape normale dans la stabilisation du milieu, suite à l'artificialisation du régime hydrologique du fleuve Sénégal. En effet, la végétation aquatique du lac de Guiers semble s'être stabilisée depuis.

L'étude de la végétation aquatique est envisagée suivant une classification en trois groupements principaux :

- le groupement à *Æchynomene elaphroxylon* localisé à l'embouchure de la Taoué dans le lac ;
- le groupement *Pistia stratiotes* ;
- le groupement à *Typha Australis*.

Par groupement nous entendons un amas ou îlot de végétation aquatique avec une espèce principale dominante. Ce qui implique pour un groupement donné que l'on puisse y retrouver différentes autres espèces qu'il est impossible de discriminer par le biais de l'imagerie satellitaire.

Si l'identification du groupement à *Æchynomene elaphroxylon* est assez aisée, il n'en est pas de même pour les deux autres beaucoup plus hétérogènes du point de vue de leur distribution spatio-temporelle. C'est le groupement à *Pistia stratiotes* qui en réalité pose le plus de problèmes, du fait du caractère de la plante, très sensible aux moindres variations de son environnement hydrique.

Entre 1989 et 1993, l'augmentation de la couverture spatiale des plantes aquatiques est estimée à 4277 ha, soit en valeur relative 236% (tableau LIII, figure 126). La plus forte expansion a été observée chez le groupement à *Pistia stratiotes* dont l'augmentation se chiffre à une valeur de 435% entre les deux périodes, soit une superficie de 2807 ha.

Le groupement à *Æchynomene elaphroxylon* quant à lui est resté plus stable, il n'a enregistré que 46% d'augmentation de sa surface. Au même moment, *Typha Australis* a vu sa superficie doubler, il passe ainsi de 1202 ha en 1989 à 3156 ha en 1993, soit une augmentation de 163%.

TABLEAU LIV
Estimation des surfaces couvertes par la végétation aquatique en 1989 et 1993

Groupements	<i>Aechynomene elaphroxylon</i>		<i>Pistia stratiotes</i>		<i>Typha australis</i>		Total groupements	
	S (ha)	% S lac	S (ha)	% S lac	S (ha)	% S lac	S (ha)	% S lac
1 ^{er} février 1989	89	0,4	525	2,2	1202	5	1816	7,5
11 novembre 1993	130	0,5	2807	10,3	3156	11,6	6093	22,3
Augmentation en %	46	-	435	-	163	-	236	-

S (ha) : surface en hectares ; % S lac : % surface lac

Les résultats obtenus avec le SIG Guiers sont conformes à ceux donnés par THIAM *et al.* qui estiment la couverture de typhaies du lac à environ 3 000 ha en 1995. Alors que dans les années 1980, au moment où le sud du lac de Guiers était asséché une bonne partie de l'année, la surface de la typhaie est évaluée à 220 ha par COGELS (Cf. Deuxième partie, Chapitre I).

Pour le groupement à *Pistia stratiotes*, aucune donnée chiffrée sur leur extension spatiale n'a été retrouvée. De sorte que la seule base de comparaison dont nous disposons consiste en une série de description de la végétation aquatique de la réserve lacustre. Ce groupement était bien entendu présent au lac avant la fermeture du barrage de Diama mais dans des proportions beaucoup plus raisonnable que le phénomène qu'on a observé en 1993.

Considérant la répartition spatiale des différents groupements (figure 127), deux faits méritent d'être notés :

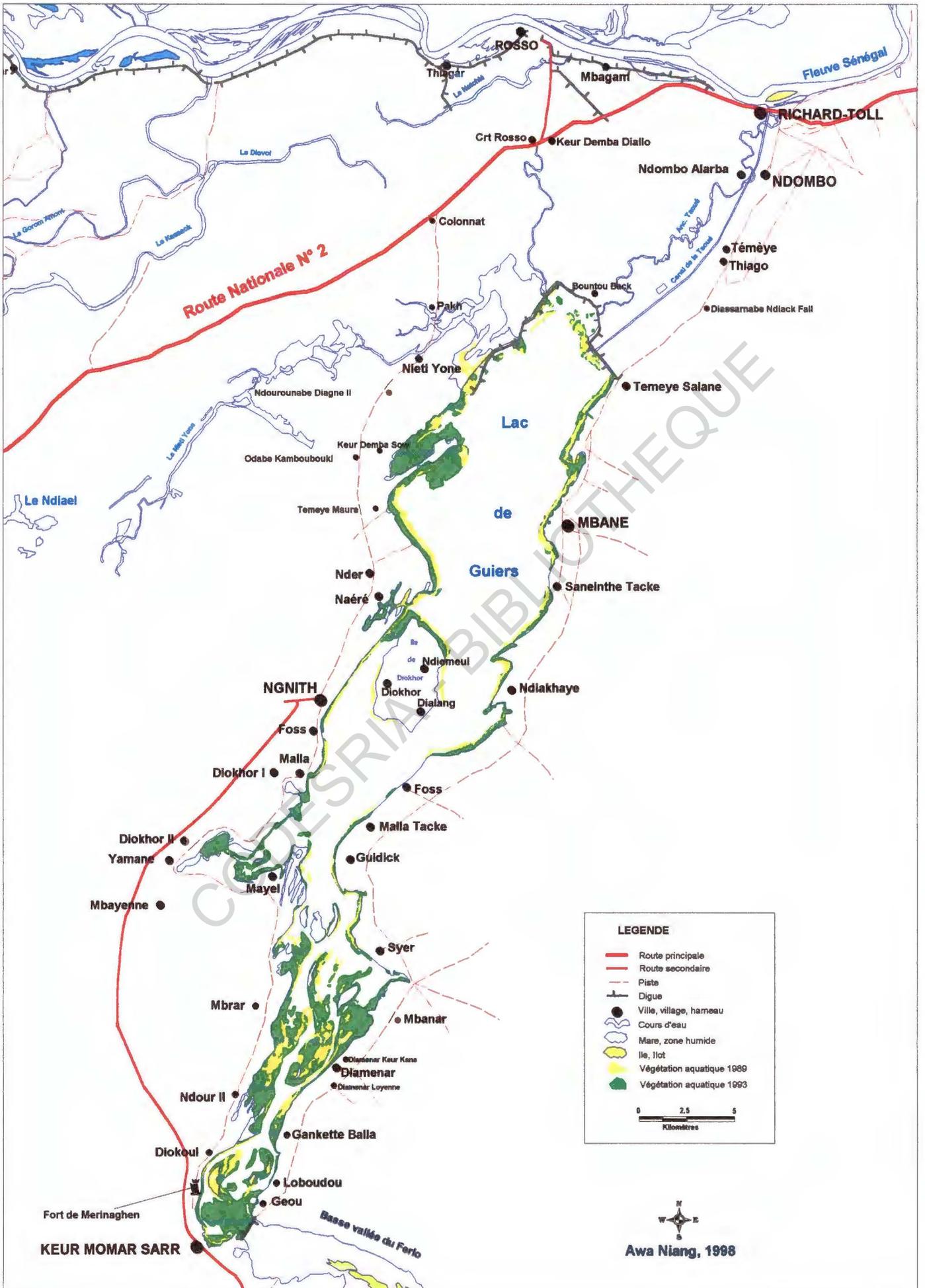
le groupement à *Typha Australis* se localise de préférence le long des rives du lac ;

le groupement à *Pistia stratiotes* évolue généralement en îlots flottants, sa zone de prédilection étant la partie méridionale du lac.

La corrélation entre la composition chimique moyenne des eaux et la distribution des différents groupements de plantes aquatiques en 1993 (tableau L V) montre que les différents groupements ont chacun leurs exigences particulières en matière de qualité de l'eau, même s'ils évoluent souvent dans des conditions hydrologiques similaires. On remarque que le groupement à *Pistia stratiotes* supporte les concentrations les plus élevées ; dans le contexte du lac de Guiers, il évolue dans des eaux de salinité moyenne allant jusqu'à 436 mg.l⁻¹.

TABLEAU LV
Corrélation entre la composition chimique des eaux et les groupements de plantes aquatiques (en mg.l⁻¹).

Groupement	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	Ca	Mg	Na	K	Salinité	pH
<i>Aechynomene elaphroxylon</i>	30,40	13,11	56,19	1,72	10,91	7,50	20,49	4,15	144,14	7,48
<i>Pistia stratiotes</i>	160,69	39,61	202,62	7,79	24,53	29,51	115,05	15,65	436,02	7,87
<i>Typha australis</i>	117,45	32,09	156,77	5,75	20,72	22,22	82,72	12,04	300,11	7,82



1.4. La bilharziose dans quelques villages du lac de Guiers

La construction du barrage de Diama et l'abondance hydrologique qui s'en est suivie a causé le développement d'une importante activité d'agriculture irriguée. De sorte que la région connaît une importante dynamique démographique (figure 128).

Dans la zone d'étude du SIG, dans la plupart des localités l'augmentation de la population s'élève à environ 39-40 % par rapport à la population de 1988 ; avec cependant quelques expressions assez frappantes comme le village de Ndiemeul où la population a plus que doublé (+ 162 %).

Cette évolution assez rapide de la population ne peut être entièrement imputé au taux de croissance qui est d'environ 12 % par an. Il se justifie également par une relative stabilisation d'une certaine frange de la population qui avant Diama était très attirée par l'émigration ou l'exode rural.

Depuis 1985 donc, de plus en plus de riverains, en particulier des jeunes s'adonnent à cette activité et se fixent dans la région. L'irrigation est également un facteur d'attraction pour des gens extérieurs à la région et qui viennent chercher des emplois d'ouvriers agricoles, notamment dans les grandes exploitations.

Cette nouvelle dynamique démographique a apporté au lac le foyer humain qui lui faisait défaut pour le développement de la bilharziose humaine. C'est ainsi qu'en même temps que la végétation aquatique apparaissait autour du lac de Guiers les premiers cas de bilharziose.

L'épidémie de 1988 a fait de Richard-Toll le plus grand foyer de bilharziose intestinale d'Afrique de l'Ouest et paradoxalement en dehors de la limite habituelle de développement de cette maladie. La bilharziose est de deux types autour du lac de Guiers (figure 129) :

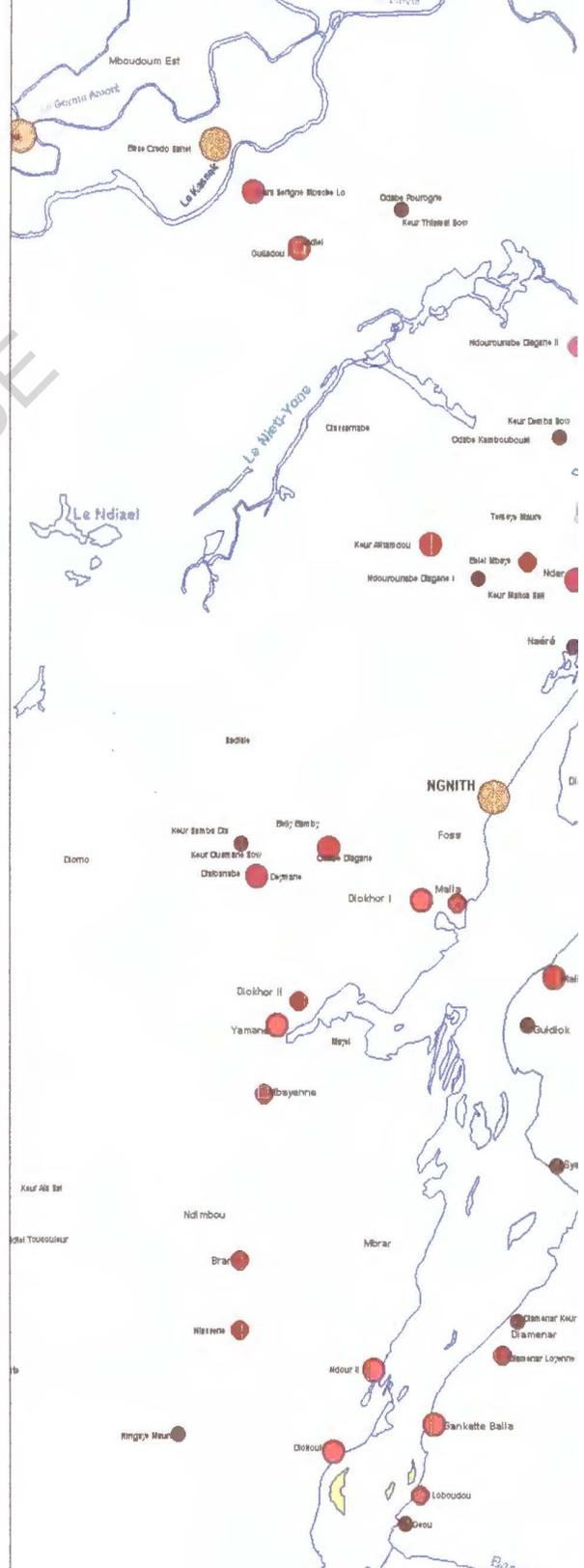
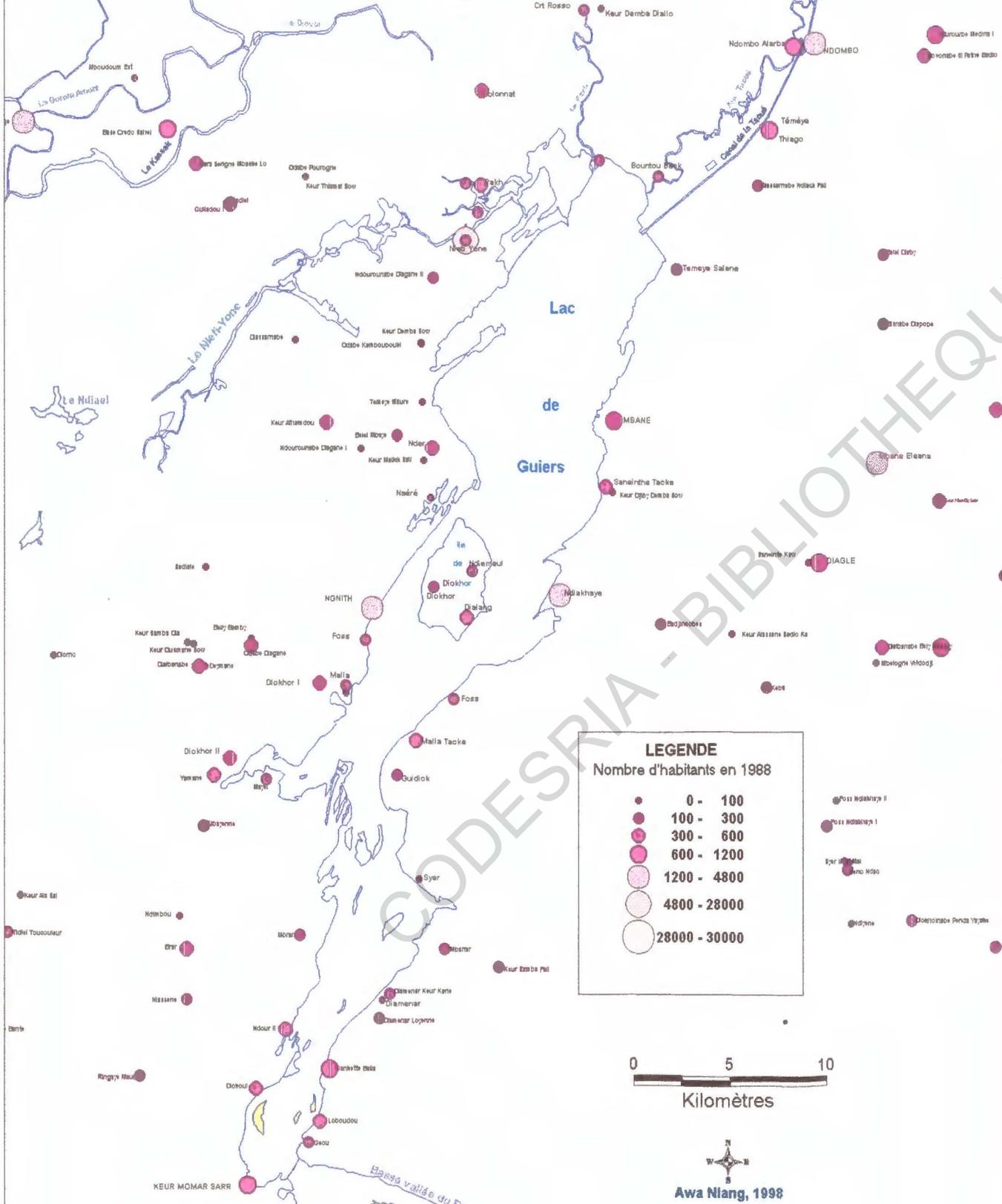
- le type à *Schistosoma hæmatobium* ou bilharziose urinaire ;
- le type à *Schistosoma mansoni* ou bilharziose intestinale.

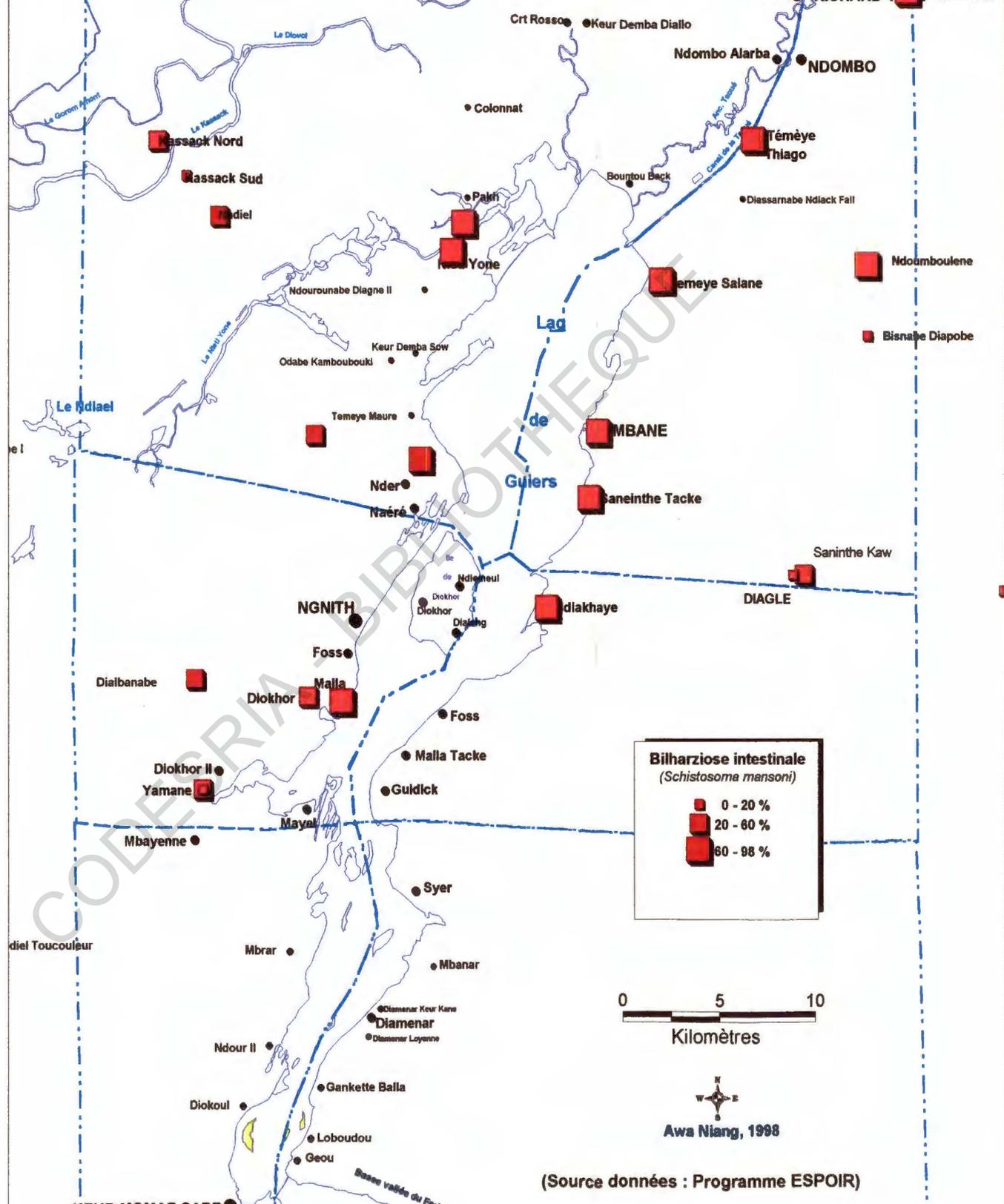
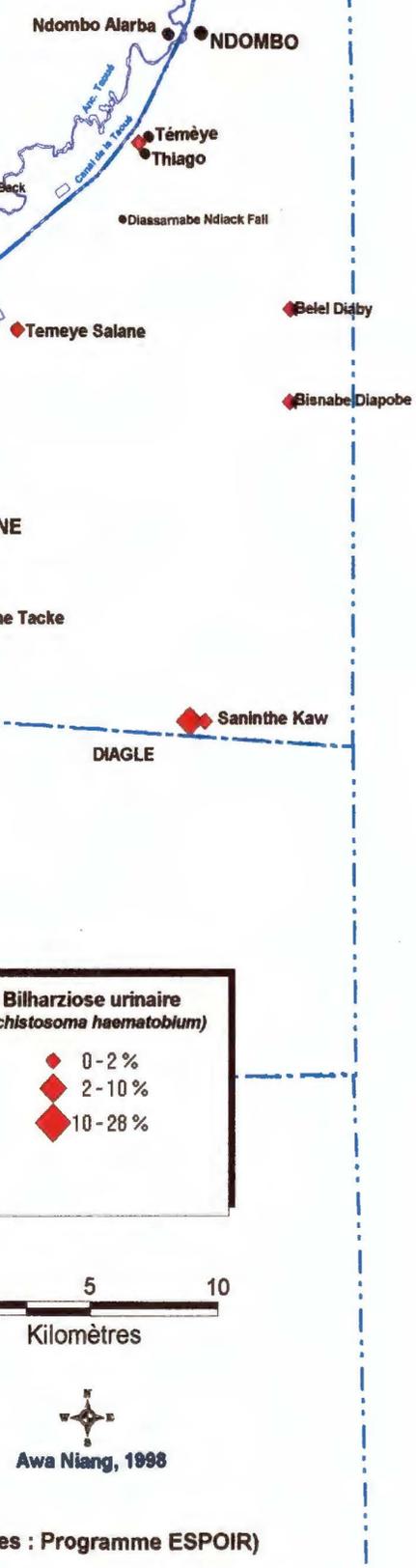
Le taux de prévalence de la bilharziose urinaire dans la zone d'étude du lac de Guiers est presque partout compris entre 0-2 % hormis à Keur Birama, un hameau aux alentours de Saninthe Kaw où il avoisine les 10 %.

La bilharziose intestinale est beaucoup plus fréquente dans les localités autour du lac de Guiers. Les taux de prévalence y sont compris entre 2 et 98 %. Les localités subissant l'influence directe du lac paraissent beaucoup plus touchés, leur taux de prévalence est généralement compris entre 60 et 98 %.

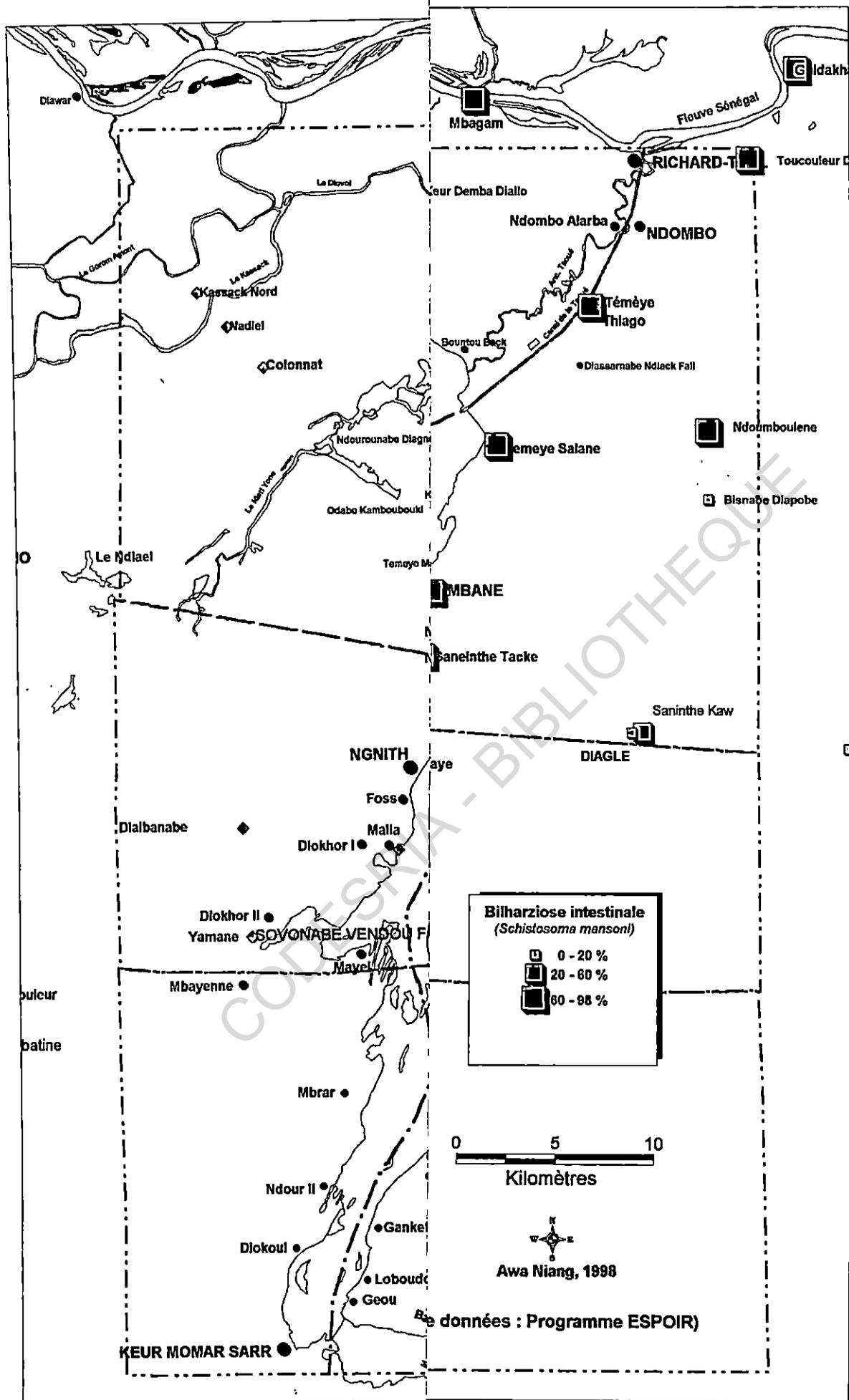
Quelques statistiques sont disponibles en ce qui concerne les cas de bilharziose déclarés. La figure 130 montre le nombre de cas par village recensés au dispensaire de Ngnith entre le 27 mars et le 21 septembre 1995.

Le développement de la maladie semble lié à la prolifération des mollusques vecteurs *Schistosoma* qui se trouvent désormais dans leurs conditions optimales de développement (Cf. Deuxième partie) mais aussi à la multiplication des aménagements hydro-agricoles.





(Source données : Programme ESPOIR)



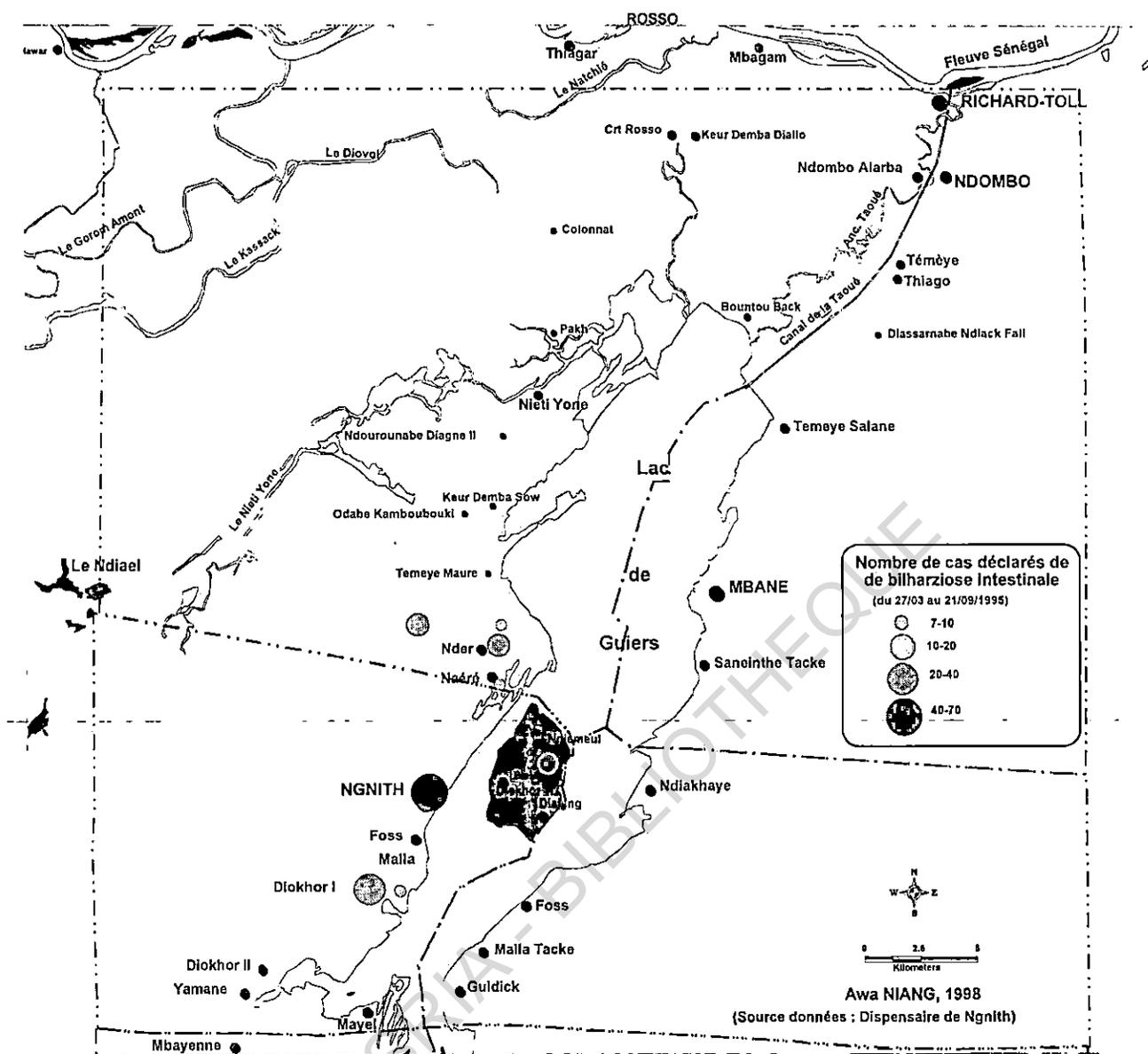


FIGURE 130. — Nombre de cas de bilharziose soignés au dispensaire de Ngnith du 27 mars au 21 septembre 1995.

La corrélation entre composition chimique des eaux du lac et taux de prévalence de la bilharziose n'a pas donné de résultats satisfaisants dans la mesure où nous ne disposons pas de données exactes sur l'alimentation en eau des populations. A l'avenir, il sera intéressant dans le cadre du suivi des maladies hydriques, de disposer de telles informations.

De plus, la base Guiers est encore dépourvu de données sur la faune malacologique qui est un des éléments rattachant le milieu humain au milieu aquatique dans la modélisation des données de la base Guiers (figure 114).

2. SIMULATIONS

Les deux simulations qui suivent représentent deux cas théoriques d'utilisation du SIG Guiers. Leur but est de démontrer les performances de notre base de données et son aptitude à prendre en charge certains aspects "gestionnels" autour du lac de Guiers.

2.1. Simulation 1 : Suivi-évaluation du bilan hydrologique du lac

Le suivi et l'évaluation des termes du bilan hydrologique du lac de Guiers représente à la fois une préoccupation et une contrainte majeures pour les gestionnaires du réservoir lacustre. L'approche classique du bilan hydrologique a toujours été de considérer le lac comme une baignoire, avec un jeu d'additions et de soustractions³.

A l'heure actuelle, l'enjeu que représente le Guiers pour le développement du pays n'autorise plus de telles opérations ; les termes du bilan hydrologiques doivent être connus avec le plus de précision possible.

Cette simulation a comme objectif d'examiner les possibilités et les limites d'utilisation du SIG Guiers dans le calcul du bilan hydrologique.

Si l'on reprend l'équation de calcul du bilan hydrologique du lac de Guiers, on peut alors identifier les termes directement quantifiables avec le SIG Guiers.

-- Rappel formule du bilan hydrologique : $V_2 - V_1 = (V_F + V_{p0} + V_r) - (V_E + V_{p1} + V_{p2} + V_{p3})$ --

La correspondance des termes du bilan peut être retrouvée dans les tables PIRRIG, WATER, APPORT, PERTE et CLIMAT de la base Guiers est présentée. Cependant la modélisation de cette partie de la base de données devra être légèrement modifiée pour éviter toute redondance entre des éléments des tables APPORT et PERTE et certaines composantes de la table PIRRIG ou CLIMAT.

De plus, la bathymétrie du lac devra nécessairement être intégrée, dans la table WATER ou ailleurs, de manière à permettre un calcul automatique des volumes et surfaces du lac.

L'intérêt de cette méthode par rapport à l'approche classique réside dans le fait que l'on peut espérer une meilleure estimation des termes clés du bilan hydrologique. Un recensement exhaustif de l'ensemble des PIV pompant dans le lac sera déjà un grand pas vers cela. La faisabilité de cette opération est assujettie à une bonne connaissance des débits transitants par la Taoué et ceux sortant au niveau de la digue de Keur Momar Sarr. De plus, une approche cartographique pourra être développée.

Le suivi-évaluation du bilan hydrologique est tout à fait réalisable avec le SIG Guiers mais la modélisation des données devra être complétée afin d'avoir une plus grande fiabilité des résultats et surtout d'éviter les redondances.

³ N.B. : nous ne remettons nullement en cause le calcul du bilan hydrologique effectué par Cogels et al., le but est de le préciser et de l'affiner.

2.2. Simulation 2 : Implantation d'une nouvelle unité agro-industrielle

Cette deuxième simulation présente le cas d'un investisseur qui veut mettre en place une unité agro-industrielle, à proximité du lac de Guiers. Les critères sont les suivants :

1. de l'eau en quantité suffisante pour assurer pendant toute l'année l'irrigation des champs de légumes ;
2. une salinité $< 350 \text{ mg.l}^{-1}$ et un $\text{pH} < 8$;
3. de la main d'œuvre féminine disponible pour l'unité de conserverie ;
4. des terres assez loin de l'influence et/ou de la concurrence d'une quelconque autre unité agro-industrielle ;
5. un accès facile aux grands centres urbains de la région et du pays, donc la proximité des voies de communication.

Objectifs :

L'objectif de cette unité agro-industrielle est la production puis la transformation des légumes. Ce qui implique d'importants besoins en eau tant pour la production que pour la transformation. Cette eau devra être d'une certaine qualité assez bonne pour être utilisée dans le *process* de l'unité.

Méthode de réalisation :

Cette manipulation sera réalisée via une série de requêtes SQL qui vont permettre de sélectionner un site répondant à toutes les exigences définies. Les critères sont examinés fonction de leur importance. Le cheminement est le suivant :

1. *Requête 1* : croisement des tables WATER et ZONE pour définir les sites où l'on disposerait de suffisamment d'eau tout en restant à proximité du lac de Guiers ;
2. *Requête 2* : croiser le résultat de la requête 1 avec la table CHIMIE pour déterminer les zones répondant aux critères de qualité de l'eau définis ;
3. *Requête 3* : résultat requête 2 croisé avec la table LOCALITE et sélection des sites présentant un bon taux de population féminine ;
4. *Requête 4* : : résultat requête 3 analysé en fonction du nombre de périmètres irrigués et/ou d'unités agro-industrielles situés dans la zone pour identifier une zone présentant le moins d'interférences possible et situé non loin des grands axes de communication ; la requête sera effectuée avec le résultat de la : résultat requête 3 et les tables PIRRIG et INFLOC ;

Le résultat de la quatrième requête sera la réponse définitive au problème posé par l'investisseur et en fonction des critères que lui même a défini au préalable.

Dans ce cas-ci, tout à fait théorique, rappelons-le, le site idéal serait situé en zone est du lac, entre les localités de Témèye Salane et de Ndiakhaye (figure 131). Cette zone répond à toutes les caractéristiques préalablement définies avec cependant une contrainte qui pourrait se révéler limitative : la seule voie de communication à proximité est une piste carrossable certes mais réalisée par la CSS qui en quasiment le propriétaire.

En rive ouest, l'entreprise pourrait s'installer entre Témèye Maure et Nieti Yone mais devra tenir compte en ce moment des parcelles SAED voisines et de la proximité de la digue nord-ouest du lac.

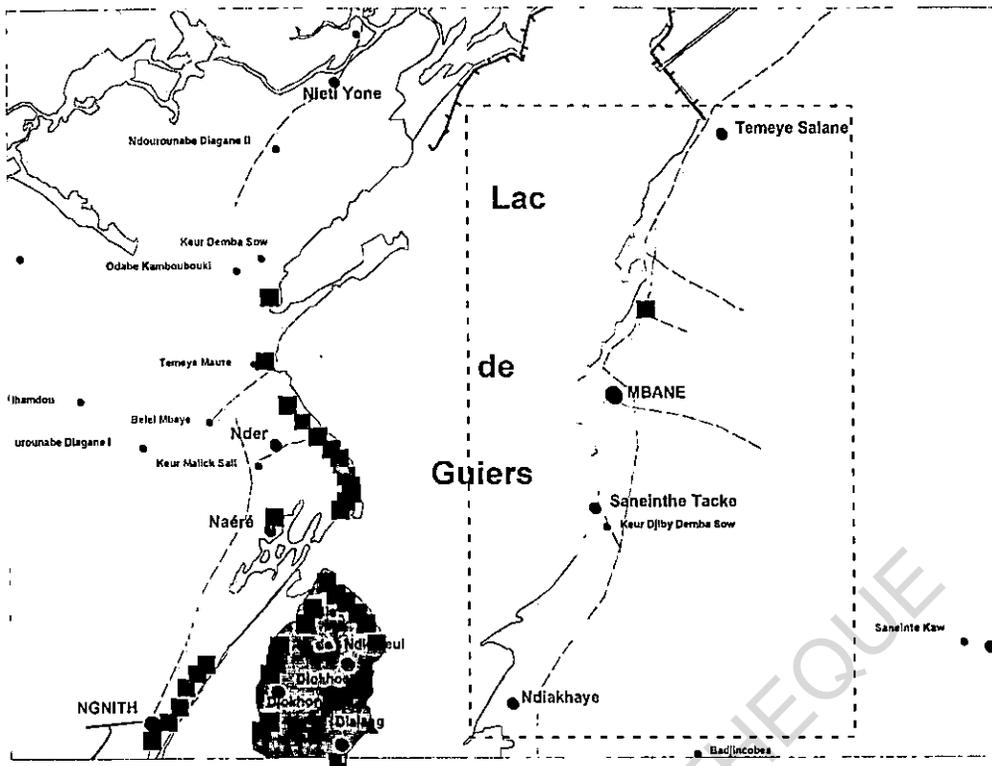


FIGURE 131. — *Implantation d'une nouvelle unité d'agro-industrie au lac de Guieras : sélection de site.*

Le SIG Guieras peut être un outil très performant de modélisation, de suivi et de simulation de l'évolution de l'environnement du lac de Guieras. Sa limite actuelle réside dans le renseignement de ses rubriques. Ses performances seront d'ailleurs accrues dès lors que la base de données sera transférée sous une autre interface, plus puissante.

Ces deux simulations prouvent dès à présent l'applicabilité du SIG dans de nombreux domaines touchant au suivi et à la gestion du plan d'eau lacustre. Et ceci en perspective des aménagements qui vont être apportés au système fluvio-lacustre.

3. PERSPECTIVES DU SIG GUIERS

Dans sa forme actuelle, la base de données Guieras permet de nombreuses applications ; notamment en socio-économie, environnement, suivi de la qualité des eaux, cartographie des plantes aquatiques, *etc.* Cependant, des améliorations devront lui être apportées pour atteindre les objectifs qui lui étaient assignés au départ, à savoir la gestion et la planification des ressources en eau du lac de Guieras et partant du Delta du fleuve Sénégal.

3.1. Gestion et planification des ressources en eau

Dans le domaine de la gestion des eaux, la base de données du lac de Guieras permet de prendre en charge différents volets telles que l'estimation de la demande en eau et sa répartition entre les différents domaines d'activité ; la prévision des besoins en fonction des activités des différents utilisateurs...

Malheureusement, il reste encore beaucoup de rubriques non renseignées ou alors mal renseignées. L'une des premières activités à développer sera de vérifier tout d'abord les données déjà acquises puis de les compléter soit par le biais d'enquêtes sur le terrain, soit par de la documentation déjà existante.

La base Guiers devra donc être complétée avec les renseignements suivants :

- Bathymétrie pour la mise à jour des abaques de volume et de surface ainsi que le calcul d'un modèle numérique de terrain ;
- Recensement de l'ensemble des PIV pompant dans le lac et estimation de leur consommation en eau ;
- Intégration des données pluviométriques entrant dans le calcul du bilan hydrologique ;
- Quantification des volumes d'eau envoyés vers la basse vallée du Ferlo dans le cadre de l'opération "l'eau à Linguère" ;

La planification de l'utilisation future des eaux requiert une analyse particulière sur la dynamique des populations riveraines et les prévisions d'aménagement à partir du lac de Guiers. C'est ainsi que des composantes telles que le canal du Cayor ou le PRVF devront être régulièrement suivis.

3.2. Cartographie évolutive du milieu

L'une des applications les plus intéressantes du SIG Guiers est dans le domaine de la cartographie de l'environnement lacustre.

Deux séries de données SPOT nous paraissent insuffisantes à retracer l'évolution du milieu. L'un des premiers travaux à réaliser est de compléter les données satellitaires par des images antérieures, par exemple des scènes LANDSAT-TM des années 1970 et d'autres données SPOT plus récentes. L'intégration de la scène LANDSAT-TM de 1988 aurait permis de caractériser le rythme d'évolution du milieu dans à l'échelle d'une année hydrologique. Cela ne s'est pas réalisé, faute de temps.

A l'heure actuelle, l'acquisition d'imagerie satellitaire ne devrait pas poser de problème majeur. D'ailleurs des images peuvent parfois être obtenues gratuitement sur certains sites Internet. En ce moment-là, le prix de revient de l'image est égal au prix de la connexion sur le site en question.

Une fois que la base de données images est étendue, le SIG Guiers pourra être orienté vers des tâches de cartographie automatisée du milieu lacustre. Mais cela va nécessiter d'importants efforts de mise à jour régulière des données. Déjà, compléter la base de données actuelle est un travail qui ne pourra se réaliser qu'en équipe et avec d'importants moyens logistiques.

Conclusion à la troisième partie

Le SIG Guiers, dès lors que l'intégralité de ses rubriques sera renseigné, constituera sans aucun doute un outil très performant pour la gestion des eaux et de l'environnement du lac de Guiers. Ceci pour la bonne et simple raison que les modèles de données ont été adaptés aux réalités du milieu lacustre.

La réalisation de cet outil de gestion du milieu lacustre se place résolument dans une perspective de développement des potentialités du milieu lacustre. Cette région, destinée à accueillir des projets de portée nationale va être l'objet de beaucoup de sollicitations ; sa gestion risque par conséquent d'en être davantage compliquée. D'où la justification de cette recherche initiée sur la faisabilité de l'utilisation du système d'information géographique dans le cadre de la gestion du système fluvio-lacustre du Guiers.

Ces dernières années, l'intérêt que suscite le lac de Guiers s'est traduit par la réalisation d'outils de modélisation de son environnement aquatique, tant quantitativement que qualitativement. Le SIG Guiers, de par son approche résolument humaine et environnementaliste vient appuyer et compléter ces outils de gestion. L'importance particulière apportée à la modélisation des données au sein de la base de données Guiers se justifie par une volonté de se départir des approches SIG classiques, c'est-à-dire élaborées sous forme de simple banque de données cartographiques.

Mais il est clair cependant que pour être pleinement rentable, le SIG Guiers devra être transféré sous d'autres interfaces offrant de plus larges choix de manipulation et d'exploitation. Développé sous MapInfo 4.0, le SIG Guiers peut servir à plein d'usages, avec cependant des limites au niveau de l'algèbre relationnelle et des opérations spatiales. Les fonctionnalités les plus usuelles sont assurées mais un utilisateur averti peut très vite se trouver limité dans ses possibilités de manipulation. Mais la possibilité d'une cartographie automatisée de l'environnement lacustre n'est pas un fait à négliger.

Pour jouer pleinement le rôle pour lequel il a été conçu, l'idéal serait la reprise du SIG Guiers dans le cadre d'une structure centralisée à une future structure centralisée chargée de la gestion de l'environnement du lac de Guiers.

Espérons donc que ce SIG serve de point de départ à une telle structure, avec tout le bénéfice que vont en tirer autant les populations riveraines que l'environnement lacustre stricto sensu.

A terme, notre ambition est d'étendre ce SIG à l'ensemble du Delta du Sénégal et pourquoï du bassin du fleuve Sénégal ?

Le lac de Guiers pris individuellement ne présenterait aucun intérêt ; c'est sa position dans un bassin versant de l'envergure du Sénégal qui lui donne tout son poids et toutes ses potentialités. Un système d'information géographique pour la gestion de l'intégralité du bassin versant du Sénégal, c'est vers cela que l'on doit tendre pour mettre fin à cette « Gestion cloisonnée » en vigueur depuis tant d'années et qui a déjà montré ses limites dans tous les milieux, toutes les régions où elle a été appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Le système fluvio-lacustre du Guiers, de par sa situation géographique à l'intérieur du bassin du fleuve Sénégal, son évolution récente, représente un enjeu majeur. Réservoir d'eau douce pour l'approvisionnement en eau potable de l'agglomération dakaroise, il sert aussi de réservoir d'eau pour l'irrigation des périmètres irrigués installés sur son pourtour. Jusque dans un passé récent, il alimentait en eau les casiers de canne à sucre de la CSS installée au nord. Et dans un futur proche, le lac devrait servir de transit aux eaux destinées au Canal du Cayor et à la réalimentation de certaines vallées fossiles dans le cadre du PRVF. Déjà, la remise en eau de la vallée du Ferlo a débuté avec l'opération "l'eau à Linguère".

Très marqué par la sécheresse, le lac de Guiers a vu ses ressources en eau multipliées par deux voire trois depuis la mise en place des grands barrages sur le fleuve Sénégal. D'après les prévisions de nombreux auteurs (MEACC, 1993, 1996 ; MIETTON *et al.*, 1991 ; COGELS *et al.*, 1994 ; DIOP *et al.*, 1993), l'approvisionnement en eau, eau potable, eau pour l'irrigation et le bétail, ne devrait plus poser de problèmes majeurs, au moins jusqu'aux alentours de 2030.

L'accroissement des ressources en eau dans le système fluvio-lacustre a cependant mis à jour de nombreux problèmes. Essentiellement des problèmes de gestion : gestion des ressources en eau, gestion de l'espace agricole, gestion des impacts environnementaux. A l'horizon 2000-2015, lorsque tous les grands travaux préconisés par le PDRG seront réalisés, la situation risque d'être assez "chaotique". Le schéma d'aménagement du lac de Guiers assez simple (figure 52), en apparence, va nécessiter, du point de vue hydrologique, une gestion stricte et surtout concertée des approvisionnements du lac à partir du fleuve. D'importants volumes d'eau seront mobilisés annuellement ; théoriquement entre 700 et 1 000 Mm³ d'eau d'ici l'horizon 2030 (tableau XXI). Les impacts sur le milieu environnant et les populations seront plus ou moins positifs suivant les modes de gestion pratiqués et la compréhension des mécanismes régulant ces impacts.

Du point de vue qualitatif, les eaux du lac de Guiers ont également bénéficié des retombées positives de la construction du barrage de Diama. Par rapport à la période antérieure, la composition chimique des eaux s'est nettement améliorée. La salinité globale des eaux a ainsi fortement baissé depuis la mise en service des grands barrages.

Mais cette baisse n'est que le fait d'une dilution plus importante ; dans la réalité, le stock de minéraux dissous aurait plutôt tendance à augmenter du fait de l'arrêt des pompages CSS dans le lac. Antérieurement ceux-ci contribuaient à la régulation chimique des eaux du lac de Guiers. L'entrée en fonction du canal du Cayor allié à une poursuite des chasses d'eau vers le Ferlo permettra de faire baisser sensiblement et durablement la salinité des eaux, en particulier en région sud.

Mais dès à présent, la plus grande attention doit être accordée au développement de la petite irrigation villageoise autour du Guiers. Sans suivi ni contrôle, elle représente un danger potentiel pour l'évolution qualitative des eaux du fait de ses caractéristiques : réseau d'irrigation généralement déficient, absence de réseau de drainage et utilisation importante d'engrais, pesticides et produits chimiques divers.

La baisse de la minéralisation globale des eaux conjuguée à la stabilité du niveau du plan d'eau ont favorisé le développement d'une végétation aquatique immergée particulièrement envahissante, dès les premières années de fonctionnement de l'ouvrage de Diama. De sorte que l'on craignait une eutrophisation de la réserve lacustre. Et aujourd'hui, même si son développement semble s'être stabilisé, cette végétation doit attirer l'attention sur la fragilité de l'équilibre écologique de la région qui nécessite un suivi régulier et rigoureux. Les récents développements de la bilharziose humaine autour du lac en sont une preuve.

développements de la bilharziose humaine autour du lac en sont une preuve.

La gestion qualitative des eaux du lac de Guiers est donc une entreprise de grande envergure, si l'on considère ses différentes implications actuelles et futures. Le modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers (GIL) permet de comprendre les effets du mode de gestion hydrologique sur l'évolution qualitative des eaux mais également d'analyser et de simuler les impacts de différentes options de gestion de la réserve lacustre. Déjà opérationnel, le modèle GIL devrait être amélioré par le calage de ses paramètres d'entrée aux normes d'utilisation des eaux dans la région lacustre, ce qui permettrait bien évidemment un meilleur contrôle des impacts qualitatifs néfastes des différents paramètres du bilan hydrologique.

En complément des méthodes classiques, l'approche par télédétection satellitaire à haute résolution spatiale (type SPOT) permet différentes applications : mesure de l'évolution des surfaces irriguées, de la dégradation des sols, l'extension des zones habitées, suivi des plantes aquatiques, estimation de la bathymétrie et de la turbidité des eaux à des échelles de temps pluriannuelles ou même mensuelles.

De plus, l'échelle des données SPOT est parfaitement adaptée à l'environnement du lac de Guiers tant spatialement que temporellement. Elles sont tout à fait indiquées pour une prise en main de la gestion de l'espace parce que offrant une vision globale de l'environnement lacustre. Les données de SPOT se sont révélées suffisantes pour élaborer une base de données environnementales très simple mais offrant de nombreuses possibilités d'évolution.

Les constats effectués sur la gestion quantitative et qualitative du réservoir lacustre justifient l'approche SIG comme aide et appui à une meilleure planification et à la gestion intégrée des eaux du lac de Guiers. Le SIG Guiers se place dans une perspective de développement des potentialités du milieu lacustre. En effet, après la réalisation des différents projets prévus sur le pourtour du lac, sa gestion risque d'être d'avantage compliquée. L'approche humaine et environnementaliste développée dans le SIG Guiers permet de compléter efficacement les outils de gestion déjà disponibles.

Le SIG Guiers, dans sa configuration actuelle permet une prise en charge de plusieurs aspects de la gestion de la réserve du lac de Guiers tels que les volets hydrologie, suivi de la qualité des eaux et de la végétation aquatique, cartographie automatisée, socio-économie, démographie, maladies hydriques, etc. En somme, le SIG Guiers offre la possibilité de centraliser toute l'information de gestion disponible et mieux, la base de données peut être reliée aux différents modèles de gestion des eaux existants.

Certaines rubriques devront bien évidemment être complétées, de manière à optimiser les potentialités du système d'information géographique. De plus, de nouvelles interfaces devront être choisies pour élargir le champ de ses manipulations et de son exploitation.

A présent des outils permettant de gérer efficacement le lac de Guiers existent ; même s'ils se trouvent encore dispersés. Pour jouer pleinement leur rôle, l'idéal serait leur reprise dans le cadre d'une structure centralisée chargée de la gestion de l'environnement du lac de Guiers. Telle a été d'ailleurs la recommandation de nombreux auteurs ces dernières années.

Notre souhait au terme de cette étude est de voir un jour ce SIG Guiers institutionnalisé dans le cadre d'une structure centrale de gestion du lac de Guiers, pour une meilleure efficacité de sa gestion et surtout pour un mieux être de ses populations riveraines. Et voir enfin disparaître cette « gestion cloisonnée » qui constitue un limite majeure pour le développement des potentialités de la région lacustre.

BIBLIOGRAPHIE

- SEGUIS (L.), 1993. — Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration en matières de suspension (Exemple du Sénégal). In : « Télédétection des ressources en eau ». *Cinquièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'UREF*, Tunis, septembre 1993, 14 p.
- LEMOALLE (J.), 1978. — Application des images LANDSAT à la courbe bathymétrique du lac Tchad. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrobiologie*, vol. XII, n° 1, pp. 83-87.
- PUECH (C.), 1992. — Télédétection et milieux sahéliens. *Rapport du Laboratoire commun de Télédétection CEMAGREF / ENGREF*, Montpellier, France, 18 p. + figures
- PAGES (J.), CITEAU (J.), DEMARC (H.), 1988. — Bathymétrie par imagerie SPOT sur la Casamance (Sénégal), résultats préliminaires. Signatures spectrales d'objets en télédétection. ESA, Aussois, France, pp. 387-392.
- DIOP (E. H. S.), CHEVILLOTTE (H.), 1993. — Etude des modifications entre Diama et l'embouchure d'après l'imagerie satellitaire. In : MICHEL (P.), BARUSSEAU J. P.), RICHARD (J. F.), SALL (M.), Eds. « L'Après-Barrages dans la vallée du Sénégal : Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques, conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992 ». Presses Universitaires de Perpignan, *Coll. Etudes*, pp. 73-81.
- ADAM (J. G.), 1960. — Quelques plantes adventices des rizières de Richard Toll. *Bulletin IFAN*, T. XXII, série A, N° 2, pp. 361-384
- ADAM (J. G.), 1964. — Contribution à l'étude de la végétation du lac de Guiers (Sénégal). *Bull. IFAN*, 26 (1), pp. 1-72.
- ADAM (J. G.), 1965. — Éléments de politique sylvo-pastorale au Sahel sénégalais. Deuxième partie : Les conditions du milieu. fascicule 12 : La végétation. Contribution à l'étude floristique des paturages du Sénégal, 91 p.
- ADAM (J. G.), 1965. — Généralités sur la flore et la végétation du Sénégal. Climats, sols et végétation. *Études sénégalaises*, n° 9, Connaissance du Sénégal, Centre de Rech. Doc. Sénég., Saint-Louis, fasc. 3, pp. 155-214.
- ANTHEAUME (B.), BLANC-PAMARD (C.), CHALEARD (J.-L.), DUBRESSON (A.), LASSAILLY-JACOB (V.), MARCHAL (J.-Y.), PILLET-SCHWARTZ (A.-M.), POURTIER (R.), RAISON (J.-P.), SEVIN (O.), 1989. — Tropiques : lieux et liens. Florilège offert à Paul PELISSIER et Gilles SAUTTER. Ed. ORSTOM, Paris, *Coll. Didactiques*, 620 p.
- AUBERT (M.), 1963. — La classification des sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride. Colloque CCTA sur la classification des sols des régions intertropicales, Léopoldville. *Cah. Off. Rech. Sci. Tech. Outre-mer, Pédologie, Fr.*, vol. 2, n° 3, pp. 1-7.
- AUBERT (M.), 1965. — Classification des Sols. Tableaux des Classes, Sous-Classes, Groupes et Sous-Groupes de Sols utilisés par la section de Pédologie de l'ORSTOM (1965). *Cah. Off. Rech. Sci. Tech. Outre-mer, Pédologie, Fr.*, vol. 3, n° 3, pp. 269-288

- AUDIBERT (M.), 1970. — Delta du fleuve Sénégal : étude hydrogéologique. Rapport O.E.R.S., PNUD-FAO, Saint-Louis (Sénégal), 1-2, 68 p.
- BANCAL (P.), 1923. — Le problème de l'eau au Sénégal. *Union hydroélectrique Africaine*, Paris, 11 p.
- BARRY (B.), 1984. — Le royaume du waalo : le Sénégal avant la conquête. Editions Khartala.
- BDPA-SCETAGRI, ORSTOM, SECA, AFID, SERADE, 1995. — Etude des problèmes d'environnement et de protection des milieux naturels dans le delta du fleuve Sénégal. Phase I : Bilan et diagnostic ; bilan et analyse des causes évolutives. OMVS, FAC.
- BEN MOUSSA, VOILLIER (M.), BELSHER (T.), 1989. — Télédétection des algues macrophytes de l'Archipel de Molène (France) : Radiométrie de terrain et application aux données du satellite Spot, *Int. Journ. of Remote Sensing*, vol. 10, n°1, pp. 53-59.
- BLANC-PAMARD (C.), BONNEMAISON (J.), BOUTRAIS (J.), LASSAILLY-JACOB (V.), LERICOLLAIS (A.), 1984. — Le développement rural en questions. Paysages, espaces ruraux, systèmes agraires. *Mém. ORSTOM*, n° 106, 505 p.
- BONN (F.), ROCHON (G.), 1992. — Précis de télédétection, Vol. 1 : Principes et méthodes, AUPELF, 485 p.
- BONNEFILLE (R.), 1986. — Modifications des végétations intertropicales et changements climatiques. In « Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé - Présent - Futur ». Symposium International, Dakar 21-28 avril 1986. Coll. T & D ORSTOM n° 197, pp. 49-51.
- BRGM, 1967. — Notice explicative de la carte géologique du Sénégal au 1/200 000^e, feuilles de Dagana et Saint-Louis. Etude réalisée par le BRGM pour le compte du Gouvernement du Sénégal. Direction des Mines et de la Géologie (Ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Artisanat), Dakar, 1967.
- BRUNET-MORET (Y.), 1969. — Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, vol. VI, n°3, 99 p.
- BUCHE (P.), KING (D.), LARDON (S.), 1992. — Gestion de l'espace rural et système d'information géographique. INRA, Paris.
- BURROUGH (P. A.), 1986. — Principles of geographic information systems for land resource assessment. Oxford, Sciences Publications, *Monographs on soil and resource survey* N° 12, 194 p.
- BYERS (A.) ROBERT, 1983. — Initiation aux bases de données pour micro-ordinateurs ; Application à DBASE II. *ASHTON-TATE*, 284 p.
- CANCES (M.), 1992. — Concepts et fonctionnalités des SIG. Module cours du GTDA, Toulouse, 39 p.
- CARMOUZE (J. P.), DURAND (J. R.), LEVEQUE (C.), 1983. — The lacustrine ecosystem during the « Normal Chad » period and the drying phase. In : Lake Chad. Ecology and Productivity of a shallow tropical ecosystem. *Monographiae Biologicae*, vol. 53, Dr. W. Junk Publishers., pp. 527-560.

- CECCHI (P.), 1993. — Phytoplancton et conditions de milieu dans l'estuaire du fleuve Sénégal : Effets du barrage de Diama. *Ed. ORSTOM, coll. TDM, n° 94, 437 p + annexes.*
- CHAMPOUX A., TOUTANT (C.), — Eléments d'hydrologie. *Éditions Le Griffon d'argile, 262 p.*
- CHARNEY (J. G.), QUIRK (W. J.), CHOW SHU (H.), KORNEFIELD (J.), 1977. — A comparative study of albedo change on drought in semi arid regions. *J. Atm. Sci.*, vol. 34, pp. 1366-1385.
- CHARNEY (J. G.), STONE (P. H.), QUIRK (W. J.), 1975. — Drought in the Sahara : a biophysical feed back mechanism. *Science* 187, pp. 434-435.
- CHARREAU (C.), FAUCK (R.), 1965. — Les sols du Sénégal. Climat, sols, végétation. *Études sénégalaises*, n° 9, Connaissance du Sénégal, Centre Rech. Doc. Sénég., Saint-Louis, fasc. 3, pp. 111-154, 1 carte , 2 photo.
- CHATEAU (R.), 1986. — Essai sur l'histoire de l'aménagement et de la mise en valeur de la vallée du fleuve Sénégal en République du Sénégal. Tome 1.
- CHUZEVILLE (B.), 1990. — Hydrologie tropicale et appliquée en Afrique sub-saharienne. *Min. De la Coopération et du Développement, Coll. Maîtrise de l'eau, 275 p.*
- CMED⁷⁸, 1988. — « Notre avenir à tous ». Les Editions du fleuve, Montréal, Québec, Canada.
- COGELS (F. X.), CARN (M.), NIANG (A.), GAC (J. Y.), 1993. — La qualité des eaux du lac de Guiers. 1. Bilan qualitatif 1989-1992; 2. Effets des aménagements du fleuve Sénégal; 3. Première utilisation d'un modèle de gestion qualitative. *Rapport CEE, projet EQUENSEN (TS 2 0198 F EDB) et rapport ORSTOM, Dakar, 51 p.*
- COGELS (F. X.), 1984. — Étude limnologique d'un lac sahélien : le lac de Guiers (Sénégal). Propositions de gestion de l'écosystème lacustre sur base de la connaissance de son fonctionnement hydrologique et hydrogéochimique, de ses potentialités et des impacts des futurs aménagements de la vallée du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat d'État en Sciences de l'Environnement, Fondation Univ. Luxembourgeoise, Arlon, Belgique, 329 p.*
- COGELS (F. X.), 1986. — Étude chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) et de leur évolution annuelle. Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. *Géodynamique* 1 (2), pp. 121-134.
- COGELS (F. X.), 1995. — Suivi et gestion de la qualité de l'eau dans le delta du fleuve Sénégal et au lac de Guiers. *Doc. OMVS, Dakar, 10 p.*
- COGELS (F. X.), COLY (A.), NIANG (A.), 1997. — Impact of dam construction on the hydrological regime and quality of a sahelian lake in the river Senegal basin. *Reulated rivers research & management*, vol. 13, pp. 27-41.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1982. — Le lac de Guiers : fonctionnement, bilan hydrique, évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne. *Cah. ORSTOM, Série Géol.*, vol. XII, n° 1, pp. 41-60.

⁷⁸ Commission mondiale sur l'environnement et le développement

- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1983. — Circulation et salinité des eaux du lac de Guiers. Problèmes de développement et modèle de gestion. *In* : « Actes du colloque Le lac de Guiers, problématique d'environnement et de développement », pp. 25-40.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1983. — La chlorinité des eaux du lac de Guiers. Bilan quantitatif, qualitatif, perspectives. *In* : « Actes du colloque Le lac de Guiers, problématique d'environnement et de développement »,
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), 1987. — Évolution spatio-temporelle de la chimie des eaux du lac de Guiers (Sénégal). *Géodynamique*, vol. 1, n° 2, pp. 121-134.
- COGELS (F. X.), GAC (J. Y.), APPAY (J. L.), EVORA (N.), LABROUSSE (B.), 1990. — Fonctionnement et bilans hydrologiques du lac de Guiers de 1976 à 1989. *Rapport ORSTOM*, Dakar, projet CEE (EQUESEN), 60 p.
- COGELS (F. X.), NIANG (A.), CARN (M.), GAC (J. Y.), 1992. — Recherche d'une station de référence pour un suivi qualitatif régulier des eaux du lac de Guiers. *Rapport CEE*, projet EQUESEN, 15 p.
- COGELS (F. X.), NIANG (A.), COLY (A.), GAC (J. Y.), 1994. — Le lac de Guiers : Étude générale du système lacustre et problématique de gestion. *Rapport multigr. ORSTOM*, Dakar, 68 p.
- COGELS (F. X.), THIAM (A.), GAC (J. Y.), 1993. — Premiers effets des barrages du fleuve Sénégal sur hydrologie, la qualité des eaux et la végétation aquatique du lac de Guiers. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 26 (2).
- COMITAS, 1988. — Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale. *Bull. de la SFPT*, n° 112, 63 p.
- COMPÈRE (P.), 1991. — Contribution à l'étude des algues du Sénégal. 1 - Algues du lac de Guiers et du bas Sénégal. *Bull. Jardin Bot. Nat. Belg.*, n° 61 (3/4), pp. 171-267.
- COURBOULES (J.), MANIERE (R.), BOUCHON (C.), 1988. — Systèmes d'informations géocodées et télédétection à haute résolution : Exemple d'application aux côtes jordaniennes. *Océanologia acta*, 1988, vol 11, n° 4, pp. 337-351.
- COUREL (M. F.), 1985. — Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir de données fournies par les satellites. *Thèse de doctorat d'état es Lettres et Sciences Humaines*, Paris I (20 juin 1984), 407 p + annexes.
- COUREL (M. F.), 1986. — Variations récentes de l'albédo de surface dans les régions sahéliennes et critique du mécanisme de CHARNEY. *In* « Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé - Présent - Futur ». Symposium International, Dakar 21-28 avril 1986. Coll. T & D ORSTOM n° 197, pp. 87-90.
- CREMOUX (R.), 1961. — Étude de la pêche dans les eaux fluviales du nord Sénégal. *CTFT*, Richard-Toll, 271 p.
- CROUSSE (B.), MATHIEU (P.), SECK (S. M.), 1991. — La vallée du fleuve Sénégal : Evaluation et perspectives d'une décennie d'aménagements. Khartala, Paris, 380 p.
- D'AVEZAC (M.), 1840. — Analyse géographique d'un voyage de MM. CAILLE, HUARD-BESSINIÈRE, POTIN-PATERSSON et PAUL'HOLLE au lac Paniéfoul et au pays Yolof, en octobre, novembre et décembre 1839. *Bull. Soc. de Géogr.*, IIème série, t. XIV, pp. 193-216.
- DA BOIT (M.), 1993. — Impact des aménagements hydroagricoles sur la nappe superficielle de la basse vallée du fleuve Sénégal (Thiagar, Richard Toll, Dagana).

Mémoire de D.E.A de géologie appliquée, mention Hydrogéologie. Faculté des Sciences et Techniques, U.C.A.D. de Dakar, 94 p. + annexes.

- DANDOUY (G.), 1989. — Du terroir au système d'information géographique ou de l'enrichissement de la "boîte à outils" du géographe. In : « Tropiques : lieux et liens », *Coll. Didactiques ORSTOM*, pp. 111-116.
- DAT, 1986. — Cartographie et télédétection des ressources de la république du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. Pojet USAID, SDSU-RSI-86-01, 653 p. + cartes h.-t.
- DATE (C. J.), 1986. — An introduction to database systems. In : « The systems programming series, » vol I, 4th Edition. USA, *Addison-Wesley Publishing Company*, 639 p.
- DEFCCS, 1993. — La pêche continentale et l'aquaculture. *Rapport conseil interministériel*, MEPN, Dakar, 21 p.
- DEJOUX (C.), 1988. — La pollution des eaux continentales africaines. Expérience acquise, situation actuelle et perspectives. Ed. ORSTOM, Collection Travaux et Documents, n° 213,
- DENEGRE (J.), 1987. — L'information géographique. Paris, *La jaune et la rouge*, n° 426, Juin/Juillet.
- DEVINÉAU (), 1990. — Propriétés spectrales de la végétation. In : « Images satellites et milieux terrestres en régions arides et tropicales ». Journées Télédétection, Bondy (14-17 novembre 1988). *Coll. Colloques et Séminaires*, ORSTOM, pp.
- DIA (A.), REYNAUD (P. A.), 1982. — Le phytoplancton du lac de Guiers : approche qualitative et quantitative. *Cah. ORSTOM, série Biol.*, n° 45, pp. 35-47.
- DIAKHATE (M.), 1988. — Ecodynamique des milieux et effets d'impact potentiels du barrage de Diama dans le delta du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat*, Univ. Lumière Lyon II, 401 p. + annexes.
- DIALLO (P. A.), SARR (R.), 1995. — Organisation des données dans les SGBD et les SIG : du dictionnaire des données aux modèles conceptuel et logique des données. *Systèmes d'information géographique*, Kit pédagogique n° 1, ISRA - ORSTOM, 18 p.
- DIALLO (S.), NDIR (O.), SOUARE (D.), GAYE (O.), DIENG (T.), 1990. — Prévalence des bilharziose et autres parasitoses intestinales dans le bassin du fleuve Sénégal : Résultats d'enquêtes effectuées à Ricchard Toll et dans la zone du périmètre de Diomandou. *Rap. ORSTOM/ES/DK/22.90, Doc. multigr.* 41 p.
- DIAW (O. T.), VASSILIADES (G.), SEYE (M.), SARR (Y.), 1992. — Programme eaux et santé ORSTOM. Etude malacologique et helmintologique : Rapport de synthèse. *Rapport. ORSTOM/ES/DK/56.92, Doc multigr.* 9 p.
- DIENG (O.), 1994. — Pollution des eaux de Richard-Toll : des algues mises en cause, Dakar, APS,
- DIOP (E. H. S.), CHEVILLOTTE (H.), 1993. — Etude des modifications entre Diama et l'embouchure d'après l'imagerie satellitaire. In : MICHEL (P.), BARUSSEAU J. P.), RICHARD (J. F.), SALL (M.), Eds. « L'Après-Barrages dans la vallée du Sénégal : Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques, conséquences sur le milieu

et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992 ». Presses Universitaires de Perpignan, *Coll. Etudes*, pp. 73-81.

- DIOP (N.), MIETTON (M.), HUMBERT (J.), 1993. — Conséquences sur la mise en valeur. *In* : MICHEL (P.), BARUSSEAU (J. P.), RICHARD (J. F.) et SALL (M.) Eds. « L'après-Barrages dans la vallée du Sénégal. Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992 ». Min. de la Coopération et du Développement, Presses Universitaires de Perpignan, *Coll. Etudes*, pp. 29-36.
- DIOUF (P. S.), 1991. — La pisciculture dans le bassin du fleuve Sénégal. *Doc. Scientifique CRODT/ISRA*, n° 125, 25 p.
- DIOUF (P. S.), BOUSSO (T.), 1988. — Fleuve Sénégal. Environnement aquatique et pêche. *Doc. Scientifique CRODT/ISRA*, n° 108, 109 p.
- DUBOIS (J.), 1955. — Quelques résultats sur le drainage et la migration du sel à Richard-Toll. *Bull. MAS*, Saint-Louis, n° 21.
- DUSSART (B.), 1966. — Limnologie. L'étude des eaux continentales. *Ed. Gauthiers-Villars*, Paris.
- ELOUARD (P.), 1959. — Etude géologique et hydrogéologique des formations sédimentaires du Guebla mauritanien et de la vallée du Sénégal. *Thèse Sciences*, Paris, *Mém. BRGM*, Paris, n°7 (1962), 274 p., 31 fig., 8 pl. photo.
- ELOUARD (P.), FAURE (H.), HEBRARD (L.), 1969. — Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Port Etienne (18°-21° Latitude Nord). *Bull ASEQUA*, Dakar, n° 23-24, pp. 15-24, 2 fig., rés. fr.
- EQUESEN, 1993. — Rapport de synthèse du projet EQUESEN (Environnement et Qualité des Eaux du fleuve Sénégal). *Rapport ORSTOM multigr.*, Dakar et *rapport CEE (EQUESEN)*, TS 2 0198 F EDB, 6 tomes.
- ESCADAFAL (R.), 1990. — Les propriétés spectrales des sols. *In* : « Images satellites et milieux terrestres en régions arides et tropicales ». Journées Télédétection, Bondy (14-17 novembre 1988). *Coll. Colloques et Séminaires*, ORSTOM, pp. 19-41.
- EVORA (N. D.), GAC (J. Y.), COGELS (F. X.), 1991. — Logiciel de gestion prévisionnelle (LGPLG) des eaux du lac de Guiers. *Rapport CEE, projet EQUESEN*, 56 p.
- FAO, 1989. — Le système d'information géographique de la FAO, 20 p + annexe.
- FAURE (H.), ELOUARD (P.), 1967. — Schéma des variations du niveau de l'océan Atlantique sur la côte de l'Ouest de l'Afrique depuis 40 000 ans. *C. R. Acad. Sci., D, Fr.*, tome 265, pp. 784-787, 2 fig.
- FAURE (H.), FAURE (L.), DIOP (E. S.), 1986. — Les changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé - Présent - Futur. INQUA, ASEQUA, Symposium de Dakar (21-28 avril 1986). *Coll. T. & D. ORSTOM*, n° 197, 515 p.
- FAURE (H.), GAC (J. Y.), 1981. — Will the Sahelian drought en in 1985 ? *Nature*, 291, n° 5815, pp. 475-478.
- FRECAUT (R.), PAGNEY (P.), 1983. — Dynamique des climats et de l'écoulement fluvial. *Ed. MASSON*, 239 p.

- GAC (J. Y.), CARN (M.), VILLENEUVE (J.), BAMBA (B. S.), TRAVI (Y.), VINCKE (P. P.), Diop (M.), LE BRUSQ (J. Y.), GOULEAU (D.), COGELS (F. X.) 1985. — Etude préliminaire de la physico-chimie des eaux interstitielles des sédiments du lac de Guiers (Sénégal). *Rapport multigr. ORSTOM*, Centre de Dakar, 48 p.
- GAC (J. Y.), KANE (A.), SAOS (J. L.), CARN (M.), VILLENEUVE (J.), 1985. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal. *Rapport multigr. ORSTOM*, Centre de Dakar, 64 p.
- GAC (J. Y.), APPAY (J. L.), LABROUSSE (B.), 1990. — L'intrusion des eaux océaniques dans la basse vallée du Sénégal au cours du XX^e siècle. *Rapport CEE, projet EQUENSEN, TS 2 0198 EDB, rapport multigr.*, 52 p.
- GAC (J. Y.), CARN (M.), EVORA (N. D.), COGELS (F. X.), COLY (A.), 1992. — Fonctionnement et bilan hydrologique du lac de Guiers en 1991. *Rapport CEE, projet EQUENSEN, TS 2 0198 EDB*, 40 p. + annexes.
- GAC (J. Y.), CARN (M.), SAOS (J. L.), 1986 a. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal : I.- Période 1903-1980. *Rev. Hydrobio. trop.*, 19, (1), pp. 3-17.
- GAC (J. Y.), CARN (M.), SAOS (J. L.), 1986 b. — L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal : II.- Période 1980-1983, proposition d'un nouveau modèle d'intrusion continentale des eaux océaniques. *Rev. Hydrobio. trop* 19 (2), pp. 93-108.
- GAC (J. Y.), FAURE (H.), 1987. — Le « vrai » retour à l'humide au Sahel est-il pour demain ? *C. R. Acad. Sci.*, Paris, tome 305., série II, pp. 777-781.
- GAC (J. Y.), KANE (A.), MONTEILLET (J.), 1981. — Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. *Cah. ORSTOM, série Géol., vol. XII, n° 1*, pp. 73-75.
- GAC (J. Y.), COLY (A.), NIANG (A.), CARN (M.), COGELS (F. X.), 1993. — Bilan hydrologique du lac de Guiers en 1992 : vers une gestion concertée des crues du fleuve Sénégal ? *Rapport CEE, projet EQUENSEN, TS 2 0198 EDB*, 21 p.
- GAC (J.Y.), COGELS (F.X.), 1986. — Étude chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) et leur évolution annuelle. Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. *Géodynamique*, vol. 1, n°2, pp. 121-134.
- GAC (J.Y.), COGELS (F.X.), APPAY (J.L.), BOUCHEZ (J.M.), DUPREY (J.L.), ORANGE (D.), 1990. — Reconnaissance géochimique sur les eaux de la lame de submersion de la vallée du ferlo. *Rapport ORSTOM, Dakar, projet CEE (EQUENSEN)*, 85 p.
- GAC (J.Y.), COGELS (F.X.), EVORA (N.), LABROUSSE (B.), 1991. — Le bilan hydrologique du lac de Guiers en 1990. *Rapport CEE (Projet EQUENSEN)*. 20 p.
- GAUDET (J. J.), MITCHELL (D. S.), 1981. — Macrophytes (Aquatic vegetation). *In* : « the ecology and utilisation of African Inland Water ». *UNEP. Rep and proceedings*, Nairobi, pp. 27-36.
- GEORGES (P.), 1990. — Dictionnaire de la Géographie. *P.U.F., 4^e édition revue et augmentée*, 510 p.
- GERSAR-ACG, 1990 a. — Plan Directeur de Développement intégré de la Rive Gauche du Sénégal. Note de synthèse, 29 p.
- GERSAR-ACG, 1990 b. — Plan Directeur de Développement intégré de la Rive Gauche du Sénégal. Programme de développement des infrastructures, cartes. Pp. 83-129.

- GIRARD (C. M.), 1992. — Modèles de représentation. In : « BUCHE (P.), KING (D.), LARDON (S.), éd. : *Gestion de l'espace rural et système d'information géographique* », Paris, INRA, pp. 3-4.
- GIRARD (M.C.), GIRARD (C.M.), 1989. — Télédétection appliquée : zones tempérées et intertropicales, *Coll. Sciences Agronomiques*, Masson, Paris, 260 p.
- GIRAUD (A.), MANIERE (R.), MONGET (J. M.), 1983. — Un système d'aide à la recherche et à la décision appliqué à la gestion des milieux naturels : mise en place et fonctionnement d'une banque de données cartographiques sur l'environnement. *Ecol. Médit.*, 1, pp. 101-135.
- GRONDIN (J. L.), 1982. — Paramètres physico-chimiques. Mesures in situ. Orstom, centre de Dakar-Hann, Note technique N° 4, 50 p.
- GROSMAIRE (P.), 1956. — Éléments de politique sylvo-pastorale au Sahel Sénégalais. II - Les conditions du milieu. Fascicule 10 : Le milieu physique. Titre 3 : Les eaux, le lac de Guiers, la basse vallée du Ferlo, céanes et puisards, puits. Bull. du Serv. des Eaux et Forêts du Sénégal (Inspection Forestière du Fleuve, Saint-Louis), II, 10-3, 56 p.
- GROSMAIRE (P.), 1957. — Éléments de politique sylvo-pastorale au Sahel sénégalais. II : conditions du milieu, fascicule 9, sous partie A : le milieu physique, Titre II : Les sols et les terres, Titre III : Les eaux, les mares, le fleuve Sénégal
- GUYONNET (J. P.), 1981. — La sucrière sénégalaise touche au but. *Afrique Agriculture*, n° 69, pp. 20-29.
- HACHETTE, 1994. — Grand dictionnaire encyclopédique en couleurs. *Hachette*, Paris, 1587 p.
- HANDSCHUMACHER (P.), 1990. — Les fondements géographiques de la bilharziose à Richard Toll, Programme Eaux et santé / ORSTOM. *Rap. ORSTOM/ES/DK/61.92, Doc multigr.* 16 p.
- HANDSCHUMACHER (P.), HERVE (J-P.), HEBRARD (G.), 1992. — Des aménagements hydroagricoles dans la vallée ou le risque de maladies hydriques en milieu sahélien. *Sécheresse* 4, vol. 3, pp. 219-226.
- HANDSCHUMACHER (P.), TALLA (I.), HERVE (J. P.), DUPLANTIER (J. M.), SENE (M.), DIAW (O. T.), HEBRARD (G.), 1994. — Petit atlas informatisé de Richard-Toll. Environnement urbain et bilharziose intestinale. ORSTOM / ESPOIR, 10 p. + 1 disquette 1,44 MO.
- HEBRARD (L.), 1978. — Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral entre Nouakchott (18° - 21° Latitude Nord). Participation à l'étude des désertifications du Sahara. *Doc. Lab. Géol., Fac. Sci., Lyon*, 71, 210 p., 59 fig.
- HENRY (Y.), 1918. — Irrigations et cultures irrigués en Afrique tropicale. Editions *Larose*, Paris 8^e, 296 p., 35 fig., 10 photos, cartes h. -t. dpl.
- HERVE (J-P.), BRENGUES (J.), MOUCHET (J.), HEBRARD (G.), LEGROS (F.), HANDSCHUMACHER (P.), DUPLANTIER (J-M.), 1992. — L'eau et la santé dans les contextes du développement, État d'avancement du programme au Sénégal, principaux résultats, *Rap. ORSTOM/ES/DK/67.92, Doc. multigr.* 14 p.
- HUBERT (H.), 1921. — Eaux superficielles et souterraines au Sénégal : notice explicative et carte en couleurs. *Paris V^e, Emile Larose libraire-éditeur*, 31 p.

- ILTIS (A.), 1980. — Les algues. *In* : Flore et faune aquatique de l'Afrique sahélo-soudanienne. Tome 1. *Init. et Doc. techniques, ORSTOM*, n° 44 : 9-61.
- INRA, 1992. — Gestion de l'espace rural et système d'information géographique. *Séminaire INRA*, Florac, France, 22-24 octobre 1991, 421 p.
- ISE, 1983. — Actes du colloque "Le lac de Guiers : Problématique d'environnement et de développement". *ISE*, Univ. de Dakar, Fac. des Sciences, 506 p.
- JOIRE (J.), 1947. — Amas de coquillages du littoral sénégalais dans la banlieue de Saint-Louis. *Bull. IFAN*, tome 9, pp. 170-340, 37 fig., 3 photos.
- JOLY (G.), 1986. — Traitement des fichiers-images. *Coll. Télédétection satellitaire*, n° 3,
- KANE (A.), 1985. — Le bassin du Sénégal à l'embouchure : Flux continentaux dissous et particuliers. Invasion marine dans la vallée du fleuve. *Thèse de doctorat de 3^e cycle*, Univ. Nancy II, 205 p.
- KANE (O.), 1992. — Contribution à l'étude des systèmes irrigués dans la zone du lac de Guiers. *Mém. DEA en Sciences de l'Environnement*, ISE, Univ. de Dakar, 77 p.
- KLUMPP (R. K.), CHU (K. Y.), 1980. — Importance of the aquatic weed *Ceratophyllum* to transmission of *Schistosoma haematobium* in the Volta Lake. *Ghana Bull. WHO*, 58, 5, pp. 791-798.
- LAHMEYER INTERNATIONAL-SOGREAH, 1994. — Etudes de faisabilité et d'avant-projet sommaire de l'Emissaire Delta.
- LAMAGAT (J. P.), SEGUIS (L.), DUBEE (G.), PEPIN (Y.), 1990. - Campagne de jeaugeage sur le canal de la Taoué (hiverange 1990). Rapport OMVS et ORSTOM, multigr. Dakar, 11 p.
- LAROUSSE, 1986. — Encyclopédie médicale de l'Afrique. Tome 1, partie 3 : Les maladies transmissibles, pp. 253-258.
- LARSSON (R. Å.), STRÖMQUIST (L.), 1991. — A practical approach to satellite image analysis for environmental monitoring, *Land Focus / Swedish space corporation*, Uppsala, 115 p.
- LAZARD (J.), 1981. — Plan directeur de développement forestier du Sénégal. Hydroagricole dans le département de Matam (III^{ème} phase). CTFT, Nogent-sur-Marne, 17 p.
- LE BORGNE (J.), 1988. — La pluviométrie au Sénégal et en Gambie. *UCAD, Dépt. de Géographie, Labo. de Climatologie*, 93 p.
- LE FLOC'H (E.), GROUZIS (M.), CORNET (A.), Bille (J. C.), 1992. — L'aridité : une contrainte au développement. Caractérisations, réponses biologiques, stratégies des sociétés. *Coll. Didactiques*, ORSTOM, Paris, 597 p.
- LECLERCQ (L.), 1991. — Intérêt et limites des méthodes d'estimation de la qualité des eaux courantes. *Module de cours FUL*, Stage AGCD, Arlon, 55 p + annexes.
- LEMASSON (J.), 1957. — L'amélioration de la situation de la pêche dans la vallée du Sénégal. Rapport de mission, CTFT Richard-Toll, mars 1957.
- LEMMET (J.), SCORDEL (M.), 1918. — Contribution à l'étude agrologique du bas Sénégal. *Bull. Com. et Hist. Sc. AOF* : 17-56.

- LEMOALLE (J.), 1978. — Application des images LANDSAT à la courbe bathymétrique du lac Tchad. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrobiologie*, vol. XII, n° 1, pp. 83-87.
- LEROUX (M.), 1980. — Le climat de l'Afrique de tropicale. *Thèse de doctorat es Lettres*, Univ. de Dakar, 1427 p.
- LEROUX (M.), 1986. — Les mécanismes des changements climatiques en Afrique. In « Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire. Passé - Présent - Futur ». Symposium International, Dakar 21-28 avril 1986, *Coll. T & D ORSTOM* n° 197, pp. 255-259.
- LEUDEULOT (M.), LELIEVRE (M.), 1828. — Journal d'un voyage au lac de N'ghier ou Paniéfole. Manuscrit original. Archives nationales du Sénégal. Réf. P273. 14 p.
- LEVEQUE (C.), 1980. — Mollusques. In : « Flore et faune aquatique de l'Afrique sahélo-soudanienne ». *Init. et Doc. techniques ORSTOM*, tome 1. n° 44 : 283-305.
- MAHE (G.), 1993. — Les écoulements sur la façade atlantique de l'Afrique. Étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle ; analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Coll. Etudes et Thèses*, ORSTOM, 438 p.
- MAÏGA (M.), 1995. — Le fleuve Sénégal et l'intégration de l'Afrique de l'Ouest en 2011. *CODESRIA, Kharthala*, 243 p.
- MAIGNEN (R.), 1965. — Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000°. ORSTOM, Dakar, 63 p., 1 carte couleur, pl. h.-t.
- MATHIEU (P.), 1983 - Agriculture irriguée et culture traditionnelle de décrue dans la zone du lac de Guiers . In : « Actes du colloque "le lac de Guiers : problématique d'environnement et de développement » . *ISE*, Université de Dakar, pp. 287-306.
- MAYMARD (J.), 1960. — Etudes pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal. *Bull. M.A.S.*, Saint-Louis, n° 112, 38 p. Multigr., 8 fig.
- MBENGUE (A.), 1981. — Populations et utilisation actuelles de l'espace dans la région du lac de Guiers, Dakar. Institut des sciences de l'environnement, UCAD, 139 p. (Mém., DEA).
- MEACC, 1993. — Projet canal du Cayor. Note de présentation. Min. Hydraulique, MEACC, Dakar, 51 p.
- MEACC, 1996. — Etude des impacts du canal du Cayor sur l'environnement. Rapport A10 : Etude du lac de Guiers et du fleuve Sénégal. *Consortium SNC LAVALLIN / BCEOM*.
- MEACC, 1996. — Etude des impacts du canal du Cayor sur l'environnement. Rapport sur les inventaires. *Consortium SNC LAVALLIN / BCEOM*.
- MICHEL (P.), 1973. — Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. *Mém. ORSTOM*, 702 p.
- MICHEL (P.), 1985. — Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le delta du Sénégal. *Rev. Géomorphologie dynamique*, n° 4, pp. 113-130.
- MICHEL (P.), BARUSSEAU (J. P.), RICHARD (J. F.), SALL (M.), 1993. — L'après-barrages dans la vallée du Sénégal : Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques, conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet Campus 1989-1992. Presses universitaires de Perpignan, *Coll. Etudes*, 152 p. + annexes.

- MICHEL (P.), SALL (M.), 1984. — Dynamique des paysages et aménagements de la vallée alluviale du Sénégal. In : « Le développement rural en questions ». *Mémoires ORSTOM*, n° 106, pp. 89-109.
- MIETTON (M.), HUMBERT (J.), RICHOU (S.), 1991. — Projet de remise en eau du Ndiaël. Préfaisabilité hydraulique, bilan hydrologique et impacts. U.L.P. Strasbourg, CEREG - U.R.A 95, CNRS, 73 p. + annexes + pl. h.t.
- MONTEILLET (J.), 1980. — Le Quaternaire du delta du Sénégal : synthèse des connaissances actuelles avec de nouvelles données sur l'Holocène. *Bull. IFAN*, tome 41, Série A, n°1, pp. 1-20.
- MONTEILLET (J.), 1988. — Environnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire. *Thèse de doctorat 1986*, Univ. de Perpignan, Labo. de Sédimentologie Marine (Ed.), Perpignan, 267 p.
- MONTEILLET (J.), FAURE (H.), PIRAZZOLI (P. A.), RAVISE (A.), 1981. — L'invasion marine du Ferlo (Sénégal) à l'Holocène supérieur (1900 BP). *Rotterdam, Palaeocology of Africa*, 13, pp. 205-215.
- MOUNYOL (R.), 1991. — MÉRISSE par l'exemple : Modèles pour l'analyse d'organisation et d'informatisation. Paris, *Ellipses*, 204 p.
- MULLON (C.), RENAUD (P.), 1990. — Systèmes d'information sur l'environnement : nouveaux outils, - nouveaux concepts. In : Systèmes d'information pour l'environnement. Paris, Séminfor 3, Ed. Orstom, *Colloques et Séminaires*, 361 p.
- BRIGAUX (F.), 1961. — Etudes Sénégalaises n°9 : Connaissance du Sénégal. Fascicule n°2 : Hydrographie. IFAN, Saint-Louis, 102 p.
- NIANG (A.), 1992. — Premières approches pour la mise au point d'un modèle de gestion intégrée des eaux du lac de Guiers. Mémoire de DEA de Géographie physique et Rapport CEE, projet Equesen, 38 p.
- NUTALL (C.), 1991. — La moyenne vallée du fleuve Sénégal dans la perspective de l'Après-barrages. In : « La vallée du fleuve Sénégal. Evaluations et perspectives d'une décennie d'aménagements », CROUSSE (B.), MATHIEU (P.), SECK (S. M.) Ed. scient., pp. 83-95
- OCDE, 1982. — Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte.
- OLIVRY (J. C.), 1983. — Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Îles du Cap-Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitation). *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.*, vol. XX, n° 1, pp. 47-70.
- OLIVRY (J. C.), BRICQUET (J. P.), MAHE (G.), 1993. — Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? Proceeding of the Yokohama symposium, july 1993, *IAHS Publ.* n° 216, pp. 66-78.
- OMVS Magazine, 1990. — O.M.V.S : un tournant décisif. *OMVS Magazine* n°1, mai 1990.
- OMVS, 1994. — Étude de l'environnement du Delta du fleuve Sénégal. Phase I : Bilan et analyse des causes évolutives.
- OMVS., 1980. — Étude socio-économique du fleuve Sénégal.

- PAGES (J.), CITEAU (J.), DEMARC (H.), 1988. — Bathymétrie par imagerie SPOT sur la Casamance (Sénégal), résultats préliminaires. Signatures spectrales d'objets en télédétection. ESA, Aussois, France, pp. 387-392.
- PAPY (L.), 1951. — La vallée du fleuve Sénégal : Agriculture traditionnelle et riziculture mécanisée. Cahiers Outre-mer, n° 16, pp. 277-324.
- PERROUX (F.), 1981. — Pour une philosophie du nouveau développement : Préface. Paris, Aubier, *les Presses de l'Unesco*.
- PORNON (H.), 1990. — Systèmes d'information géographiques : des concepts aux réalisations. Rapport Service Technique de L'urbanisme, Paris, *Hermès*, 108 p.
- POUPON (H.), 1976. — Influence de la sécheresse de l'année 1972-73 sur la végétation d'une savane sahéenne du Ferlo septentrional. In : « La désertification au Sud du Sahara », Nouv. Ed. Afr., Dakar, pp. 96-101.
- PUECH (C.), 1992. — Télédétection et milieux sahéens. *Rapport du Laboratoire commun de Télédétection CEMAGREF / ENGREF*, Montpellier, France, 18 p. + figures
- RAYNAL-ROQUES (A.), 1980. — Les plantes aquatiques. In : Flore et faune aquatique de l'Afrique sahélo-soudanienne. Tome 1. Init. et Doc. techniques, ORSTOM, n° 44 : 63-152.
- REIZER (C.), 1971. — Contribution à l'étude hydrobiologique du Bas Sénégal. Premières recommandations d'aménagement halieutique. *CTFT*, Nogent-sur-Marne, 142 p.
- REIZER (C.), 1974. — Définition d'une politique d'aménagement des ressources halieutiques d'un écosystème aquatique complexe par l'étude de son environnement abiotique, biotique et anthropique. Le fleuve Sénégal Moyen et Inférieur. *Thèse de 3^e cycle*, 2 vol. FUL, Arlon (Belgique), 563 p.
- REIZER (C.), CHEVALIER (J. L.), LESSENT (P.), 1972. — Incidence sur la pêche de l'aménagement hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Fasc. I. *CTFT - OMVS*, Nogent-sur-Marne, Saint-Louis, 89 p.
- ROCHETTE (C.), 1964. — Remontée des eaux marines dans le fleuve Sénégal. Rapport multigr. ORSTOM, Dakar, 81 p.
- ROCHETTE (C.), 1966. — Monographie hydrologique du fleuve Sénégal; 2e partie : les données d'observation hydrologiques. Tome 2 : station de la vallée, 143 p. + carte.
- ROCHETTE (C.), 1974. — Le bassin du fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques de l'ORSTOM, Paris, n° 1, 391 p.
- RODIER (J.), 1980. — L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer (Chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie). DUNOD Technique, Paris, 1135 p.
- ROQUIN (C.), DANDJINO (T.), FEYSSINET, PION (J. C.), TARDY (Y.), 1987. — Premiers résultats de cartographie des couvertures latéritiques par images Spot, région de Kangaba (Sud Mali), *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 304, série II, n° 8, pp. 321-324.
- ROUET (P.), 1991. — Les données dans les systèmes d'information géographique. Paris, Ed. HERMÈS, (traité des nouvelles technologies, série géographique assistée par ordinateur), 278 p.
- ROUGE (D.), 1989. — Introduction à DBASE IV, version 1.1 incluse. *Sybox*, 393 p.

- RYDING (S.-O.), RAST (W.), 1994. — Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Coll. Sces. de l'environnement, UNESCO / MASSON, 294 p.
- SALL (M.), 1979. — Hydrologie et géomorphologie du delta du Sénégal à partir de l'image LANDSAT du 30 Septembre 1972., *Rev. de Photo-interprétation*, pp. 79-5.
- SALL (M.), 1981. — Régime sédimentaire du delta et du lac de Guiers et modèle d'interprétation des données multispectrales appliquées à la qualité des eaux. In : « Télédétection et cartographie thématique : nord Sénégal et basse Gambie ». Dakar, *Équipe TECASEN*, Dépt. Géogr., rapport n° 3, pp. 49-60.
- SALL (M.), 1982. — Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal occidental. Thèse Strasbourg, 2 tomes, 604 p. + fasc. Planches h. T.
- SALL (M.), 1993. — La dynamique éolienne. In : « MICHEL (P.), BARUSSEAU (J. P.), RICHARD (J. F.), SALL (M.), Ed. : L'après-barrages dans la vallée du Sénégal : Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques, conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du projet Campus 1989-1992 », *Presses Universitaires de Perpignan, Coll. Études*, pp. 9-17.
- SAOS (J. L.), COGELS (F. X.), CASTA (L.), FABRE (M.), FAURE (H.), GAC (J.Y.), 1981. — Étude préliminaire de deux sondages dans les sédiments holocènes du lac de Guiers. (Sénégal). *Cah. ORSTOM, Série Géol.*, vol. XII, n° 1, pp. 61-71.
- SCHOWENGERDT (R. A.), 1983. — Techniques for image Processing and Classification on Remote Sensing, Academic Press, in., 249 p.
- SEGUI (L.), 1993. — Modélisation de la signature spectrale d'eau continentale par prise en compte de l'épaisseur de la tranche d'eau, de la nature du fond et de la concentration en matières de suspension (Exemple du Sénégal). In : « Télédétection des ressources en eau ». *Cinquièmes Journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'UREF*, Tunis, septembre 1993, 14 p.
- SIRCOULON (J.), 1976. — Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale ; comparaison avec sécheresses de "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, Série Hydrol.* Paris, XIII, pp. 75-174.
- SOW (A. A.), 1984. — Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Univ. Nancy II, 435 p.
- THIAM (A.) *et al.*, 1993. — Macrophytes aquatiques et zooplancton du lac de Guiers (Sénégal). *Rapport projet ISE/FUL*, Univ. Ch. A. Diop, 53 p.
- THIAM (A.) *et al.*, 1995. — Macrophytes aquatiques du lac de Guiers (Sénégal) et groupements végétaux aquatiques de la basse vallée du Ferlo. Échanges hydrogéologiques entre les eaux du lac de Guiers et la nappe alluviale superficielle sous-jacente. *Rapport projet ISE/FUL*, Univ. Ch. A. Diop, 73 p.
- THIAM (A.), 1983. — *Typha Australis* Shum et Thonn : une entrave au développement socio-économique des rives du lac de Guiers? In : « Actes du colloque de l'ISE : "Le lac de Guiers. Problématique d'environnement et de développement" », pp. 133-138.
- THIAM (A.), 1984. — Contribution à l'étude phytoécologique de la zone de décrue du lac de Guiers (Sénégal). Thèse de 3^e cycle en Sciences de l'environnement, I.S.E., Faculté des Sciences, Univ. de Dakar, 101 p + annexes.

- THIAM (A.), COGELS (F. X.), 1995. — Incidences des nouvelles conditions hydrologiques et de qualité des eaux sur les macrophytes aquatiques du lac de Guiers. Rapport multigr., 13 p.
- TRENOUS (J. Y.), 1954. — Étude de la structure du dôme du Guiers (Sénégal Nord-Occidental). *Bull. Soc. Géol. de France*, 7, XIII, n° 1-2, pp. 133-139.
- TRENOUS (J. Y.), 1968. — Rapport de mission dans la région du lac de Guiers, la vallée du Ferlo, la zone de Linguère, Dahra, Coki, Louga. *Rapport Dpt. de Géologie, Fac. de Sciences, Univ. de Dakar*, 13 p.
- TRENOUS (J. Y.), MICHEL (P.), 1971. — Étude de la structure du dôme du Guiers (Sénégal Nord Occidental). *Bull. Soc. Géol. de France*, 7, XIII, n° 1-2, pp. 133-139.
- TRICART (J.), 1954. — Influence des sols salés sur la déflation éolienne en Basse Mauritanie et dans le delta du Sénégal. *Rev. Géom. dyn., Fr.*, tome 5, n° 3, pp. 124-132.
- TRICART (J.), 1954. — Notice explicative de la carte géomorphologique du Delta du Sénégal. Feuille de Richard-Toll. *Bull. de la M.A.S.*, tome II, fasc. 6, n° 15, 8 p.
- TRICART (J.), 1961. — Notice explicative de la carte géomorphologique du Delta du Sénégal. *Mémoires du BRGM*, n° 8, 137 p., 9 pl. Photo., 3 cartes coul., pl. h.t.
- TRICART (J.), 1984. — Quelques réflexions écogéographiques sur le développement rural. In : « Le développement rural en questions ». *Mém. ORSTOM*, n° 106, pp. 1-14.
- TROCHAIN (J.), 1940. — Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. *Dakar, Mém. IFAN*, n° 2, Larose, Paris, 433 p.,
- TROCHAIN (J.), 1956. — Rapport préliminaire de mission botanique au Sénégal. Paragraphe I : Le problème de la pullulation des Typha dans le lac de Guiers. *I fascicule miméogr.*, Montpellier.
- VAN DER WERFF (A.), HULLS (H.), 1957-1974. — Diatomeeenflora van Nederland. Abflev. 1-9, Abcoude - De Hoef.
- VIERS (G.), 1990. — Eléments de climatologie. *Coll. Nathan-Université, Série Histoire et géographie*, 224 p.
- VINCKE (P. P.), 1983. — Présence d'une absence : la bilharziose humaine au lac de Guiers et les aménagements à venir. In : « Actes du colloque ISE : Le lac de Guiers. Problématique d'environnement et de développement. », ISE, Dakar, pp. 98-118.
- VINCKE (P. P.), CISSE (F.), 1983. — Etat de la bilharziose humaine au lac de Guiers. In : « Actes du colloque ISE : Le lac de Guiers. Problématique d'environnement et de DEVELOPPEMENT. », ISE, DAKAR, pp. 91-98.
- WANE (O.), 1983. — Utilisation urbaine de l'eau du lac de Guiers et planification écologique intégrée de la ville. In : « Actes du colloque ISE : Le lac de Guiers. Problématique d'environnement et de développement. », ISE, Dakar, pp. 63-75.
- WATSON (J. M.), 1970. — Mise en valeur de la vallée du Sénégal. Aspects sanitaires. Rapport de mission, WHO, AF/PAA/ 60, 27.
- WELCOME (R. L.), 1972. — The inland waters of Africa. *CIFA*, techn. paper n° 1, 117 p.

ANNEXES

Annexe 1 : CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION PAR LA FORMULE DE TURC

EVAPOTRANSPIRATION mm/mois = $k * (t^{\circ} \div t^{\circ} + 15) (Rg + 50 K)$

t° : température moyenne mensuelle

Rg : radiation solaire globale en calories/cm²/jour, fonction de la durée moyenne de l'insolation h ; elle s'obtient par la formule :

$$Rg = IgA (0,18 + 0,62 (h/H))$$

IgA = radiation globale

h = durée réelle moyenne de l'insolation pendant la période considérée

H = durée maximale d'insolation possible en heures ; elle est déterminée par la latitude et donnée par des tables

$K = 1$ si $HR \geq 50 \%$

$K = (120 - HR) / 70$ si $HR < 50 \%$

$\bar{k} = 0,013 \times \text{nombre de jours du mois}$

= 0,4 ---> 31 jours

= 0,39 --> 30 jours

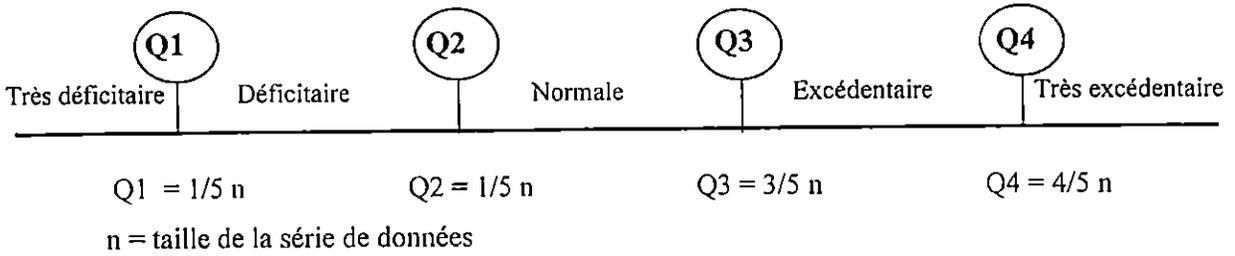
= 0,37 --> 28 jours

= 0,38 --> 29 jours

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

9	21-mars-95	Amadou Diaw	VRAI	0,000		0,000	1994	Temeye, thiago	nord		tomates;subergines
10	21-mars-95	Abdoulaye Diop (prop. AGETIP)	FALX	0,000		0,000		Thiago			
11	21-mars-95	Idrissa Fall	FALX	0,000		0,000		Thiago			
12	21-mars-95	GIE groupement des hommes	FALX	0,000		0,000		Thiago			
13	21-mars-95	Yamer Diop	FALX	0,000		0,000		Thiago			
14	21-mars-95	Doudou Fall	FALX	0,000		0,000		Thiago			
15	21-mars-95	Exploitation des mourides	FALX	0,000		0,000		Thiago			
16	21-mars-95	Projet Jica	FALX	0,000		0,000		Thiago			
17	21-mars-95	Niang	VRAI	1,000	PVP	1,000	1993	Foss	nord		tomates;oignons.petates dou
18	22-mars-95	Iba Diouf	FALX	0,000		0,000		Foss			
19	22-mars-95	Ndiongue	FALX	12,000	FVP	12,000	1995	Foss	nord		tomates;oignons;arachides;p
20	22-mars-95	GIE Rénovation Mel resp.elioune pb	VRAI	5,000	FVP	5,000	1994	Mella		habdo(ven)	tomates;oignons;pastèques;
21	22-mars-95	GIE Manko(AGETIP) president:cheikh Ndiaye	FALX	0,000	PVP	6,000	1994	Guidick			tomates;oignons;légumes;aul
22	22-mars-95	Messaer Fall	FALX	0,000	PVP	0,000	1995	Guidick			oignons.petates douces.pim
23	22-mars-95	Cheikh Fall	VRAI	20,000		0,000		Guidick			tomates;oignons;melons;past
24	22-mars-95	Ousseynou Ndiaye	VRAI	13,000		0,000	1995	Guidick			tomates;oignons;légumes(chi
25	22-mars-95	Ismaïlla Ndiaye	VRAI	22,000	FVP	1,000	1992	Guidick			tomates;oignons;légumes;pe
26	22-mars-95	Baba Wade	VRAI	6,000		1,000	1993	Sier			tomates;oignons;pastèques;n
27	22-mars-95	Inconnu 2	FALX	2,000	PVP	0,000	1994	Diemenar Loyenne			tomates;oignons.pastèques;
28	22-mars-95	GIE AGETIP	VRAI	3,000		0,000		Diemenar Loyenne			tomates
29	23-mars-95	Geleys Souare	FALX	0,200		0,200		Diemenar Loyenne			oignons
30	23-mars-95	Talla Souaré	VRAI	1,500	PVP	1,000	1994	Diemenar Loyenne			tomates;oignons.pastèques;e
31	23-mars-95	Bath Souaré	FALX	0,250	PVP	0,250	1994	Diemenar Loyenne			piment;oignons;navets;maïs(é
32	23-mars-95	Ngagne Fall	VRAI	1,500	PVP	1,500		Gankette			tomates;oignons;légumes(chi
33	23-mars-95	Thiam (AGETIP)	FALX	17,000		2,000		Gankette			arachide;piment;tomates;oi
34	23-mars-95	Atoumane Ndiaya	VRAI	5,000		1,000	1994	Gankette			tomates;oignons;légumes(ge
35	23-mars-95	Abdou Aziz Thiam	VRAI	3,000	PVP	1,500	1994	Gankette			tomates;oignons;légumes(me
36	23-mars-95	Mamadou Thiam	VRAI	1,000	PVP	1,000		Gankette			oignons
37	23-mars-95	Projet les merveilles maritimes	VRAI	3,000	PVP	3,000		Loboudou			tomates;oignons;melons;past
38	23-mars-95	Ousmane Sarr responsable projet 20						Thiarène			riz;tomates;légumes
39	23-mars-95	Projet peul face jica						Thiago			riz
40	23-mars-95	Serigne Ndiaye	VRAI	5,000	PVP	1,500	1994	Gâou			tomates;oignons;légumes(chi
41	23-mars-95	Adrame Rebel Mbow	VRAI	10,000	PVP	2,000	1995	Gâou			tomates;oignons;légumes(au
48	19-sept-95	Projet SENPRIM		10,000	PVP	0,000	1997	Diokhor	S		Aucune depuis 5 ans
49	19-sept-95	Mbaye Touré		2,000	PVP	2,000		Mbrer	S		oignons
50	19-sept-95	Habibou Sarr		30,000	PVP	4,000		Mbrer	S		
51	19-sept-95	Aybou Ndiouck		100,000	PVP	60,000		Mbrer	S		
52	19-sept-95	Ablaye Guèye		70,000	PVP	70,000		Mbrer	S		
53	20-sept-95	Serigne Bassirou Mbacké (DASPI: Domaine agro-sylvopastoral et industriel)		207,000				Meyel			tomates, légumes, pastèques
54	20-sept-95	Bouya Thioub		7,300	PVP			Gallom (Mbayène)	S		tomates, patates douces
55	20-sept-95	Mamadou thioub		4,500	PVP	2,000		Gallom (Mbayène)			
56	20-sept-95	Assane Madieumbe Sarr		11,000	PVP	1,000		Gallom (Mbayène)			
57	20-sept-95	Projet Gallom		70,000	PVP	4,000		Gallom (Mbayène)			
58	20-sept-95	Adama Sarr		50,000	PVP	15,000		Gallom (Mbayène)			
59	20-sept-95	Aveze (propriété Terrasse)		60,000	PVP	35,000	1993				
60	20-sept-95	Daouda Ndiaye 1		5,000	PVP	3,000		Diokhor 2			
61	20-sept-95	Arona Pène			PVP	1,000		Diokhor 2			
62	20-sept-95	Daouda Ndiaye 2		5,000	PVP	1,000		Diokhor 2			
63	20-sept-95	El Hadji Gaye			PVP	4,000		Diokhor 2			
64	21-sept-95	Gora Niang		800,000	PVP	180,000	1989	Naréré	C		riz tomates, oignons, légumes
65	21-sept-95	Projet Thiakkèna		10,000	PVP	10,000		Ndieuemeul	C		
66	21-sept-95	Racine Seck		8,000	PVP	2,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
67	21-sept-95	Oumar seck		10,000	PVP	10,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
68	21-sept-95	Birehima Seck	VRAI	2,500	PVP	2,500		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
69	21-sept-95	Birama Seck		2,000	PVP	2,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
70	21-sept-95	Ali Mbaye		40,000	PVP	3,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
71	21-sept-95	Bacer Gueye		4,000	PVP	4,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
72	21-sept-95	Bira Fall		3,000	PVP	3,000		Ndieuemeul	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
73	21-sept-95	Aliou Gueye		8,000	PVP	8,000		Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
74	21-sept-95	Mawada Ndiaye		4,000	PVP	4,000		Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
75	21-sept-95	Aliou Gueye		10,000	PVP	10,000		Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
76	21-sept-95	El Hadji Abdou Pène		10,000	PVP	10,000		Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
77	21-sept-95	Ndiack Pène			PVP			Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
78	22-sept-95	Mor Gaye			PVP			Diakeng	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
79	22-sept-95	Mame Malick Pène		7,000	PVP	7,000		Diokhor	C	V/Ae	tomates, oignons, patates do
80	22-sept-95	Babacar Fall (GIE waer w)		20,000	PVP	14,000		Nder	C	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
81	22-sept-95	Saloum Diop (Gie Rembatim)		91,000	PVP	5,000		Temeye Maure	N	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
82	22-sept-95	GIE wadabé kannu bouky		20,000		3,500		Odabé Kamboubouly	N	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
83	22-sept-95	Ndiaye Kane (Delta Prime)		30,000		30,000		Ndiouré	N	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
84	22-sept-95	Moussa Cissé		80,000		80,000		Nder	N	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
85	22-sept-95	Daouda Guèye		25,000		17,000		Nder	N	V/Ae	Melon Pastèque, tomates, oi
86	23-sept-95	Foyer Nder		150,000	PVP	150,000		Nder	C		riz
87	23-sept-95	Section Nder		70,000	PVP	70,000		Nder	C		riz
88	23-sept-95	Amath Thiaye		50,000	PVP	50,000		Nder	C		riz
89	23-sept-95	Ali SALL		7,000	PVP	7,000		Nder	C		maraichage
90	23-sept-95	Bacary Diaw		3,000	PVP	3,000		Nder	C		maraichage
91	23-sept-95	Ablaye Ndiaye		4,000	PVP	4,000		Nder	C		maraichage
92	23-sept-95	Ndiaye Sarr Diaw		30,000	PVP	30,000		Nder	C		riz
93	05-déc-95	GIE Ngnith (Resp : Babacar DIOP)		3,000	PVP	1,000	1992	Ngnith	C		maraichage, tomates, oignon
94	05-déc-95	Projet Baye Dara Wouma		6,000	PVP	4,000	1992	Ngnith	C		tomates, oignons, patates
95	05-déc-95	Mama Ndiaye et Pape Ndiaye			PVP						
96	05-déc-95	Ndiaga DIOP		2,500	PVP	1,000	1995				

Annexe 3 : LA MÉTHODE DES QUINTILES



Dans un tableau à deux colonnes (année et pluie annuelle), on range les différentes valeurs partant de la plus basse vers la plus élevée.

Les différentes valeurs de Q permettent d'évaluer les seuils moyens de sécheresse ou d'excédent pluviométrique.

Les valeurs de ces différents seuils sont obtenus en calculant l'écart moyen par la formule suivante :

$$E = \frac{\sum (X - X)}{X} * 100 \text{ avec } X : \text{ pluie d'une année et } X \text{ moyenne de la série}$$

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

Annexe 4 : FICHES DESCRIPTIVES DES OBJETS DE LA BASE GUIERS

Nom : PERIMETRE IRRIGUE		Identifiant : cdpi	
Définition : Surface cultivée équipée d'un réseau d'irrigation plus ou moins perfectionné et dont l'alimentation en eau dépend directement d'une des sources d'eau identifiées dans le territoire de la base Guiers.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Pomper	0,1	Cours d'eau	
Rejeter dans	0,1	Cours d'eau	
Se situer	1,1	Localité	
Gérer	1,n	Exploitant	
Contenir	1,1	Zone	
Equiper	1,n	Motopompe	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdpi	Code du périmètre irrigué	AN	8
typi	Type de périmètre irrigué	AN	4
hapi	Surface totale initiale du périmètre irrigué	N	6.2
hacu	Surface cultivée sur le périmètre irrigué	N	6.2
cupi	Culture principale sur le périmètre irrigué	A	10
datpi	Date d'installation du périmètre irrigué	N	4
drpi	Présence ou non d'un réseau de drainage sur le périmètre	A	1
voldr		N	5.2
desdr	Volume moyen journalier drainé par le périmètre irrigué	A	6
propr		A	20
pc	Destination du drainage d'un périmètre irrigué	A	1
typrod	Nom du propriétaire du périmètre irrigué	A	10
kgaha	Utilisation ou non de produit chimique sur le périmètre irrigué	N	3.2
nbgmp	Type de produit chimique utilisé sur le périmètre irrigué	N	1
	Quantité de produit chimique utilisé à l'hectare sur le PI		
	Nombre de motopompes que possède le périmètre irrigué		

Nom : ZONE		Identifiant : cdzn	
Définition : Sous région du territoire de la base, homogène, délimitée d'après l'analyse des données hydrologiques et physico-chimiques du lac de Guiers. Au sens SIG, une zone correspond à un polygone délimité par un nœud début et un nœud de fin.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Comprendre	1,n	Station	
Contenir	1,n	Périmètre irrigué	
Etre découpé en	1,1	Cours d'eau	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdzn	Code de la zone du lac de Guiers	A	2
volzn	Volume de la zone du lac en millions de m3	N	5.2
prczn	Volume de la zone en % du lac	N	3.1
datzn	Date de référence pour l'hydrologie de la zone	date	

Nom : STATION		Identifiant : cdst	
Définition : Une station correspond soit à un point d'échantillonnage de la qualité des eaux, soit un point de mesure des paramètres climatiques.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Mesurer 1	1,n	Physico-chimie	
Mesurer 2	1,n	Climat	
Comprendre	1,n	Zone	

LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdst	Code d'une station de mesure	A	5
nmst	Nom de la station de mesure	A	12
tyst	Type de station de mesure	A	2
lat	Latitude de la station de mesure	N	4.2
long	Longitude de la station de mesure	N	4.2
alt	Altitude de la station de mesure	N	4.2
datst	Date d'installation de la station de mesure	N	4

Nom : LOCALITE		Identifiant : nmloc	
Définition : Zone d'habitation jouxtant le lac et ayant une interaction plus ou moins directe avec celui-ci.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Posséder	0,n	Infrastructure d'une localité	
Abriter	1,n	Cheptel	
Appartenir	1,1	Zone	
Atteindre	1,n	Localité	
Vivre	1,n	Exploitant	
Se situer	1,n	Périmètre irrigué	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmloc	Nom de la localité	A	15
tyloc	Type de localité (ville, village, hameau, ...)	A	15
cr	Nom de la communauté rurale à laquelle appartient le	A	15
ethnd	village	A	6
actp	Nom de l'ethnie dominante dans la localité	A	10
nbconc	Nom de l'activité principale dans la localité	N	4
nbhbt	Nombre de concessions dans la localité	N	5
tydon	Nombre total d'habitants vivant dans la localité	AN	3
nbh	Type, origine des données de population	N	5
nbf	Nombre d'hommes dénombrés dans la localité	N	5
	Nombre de femmes dénombrées dans la localité		

Nom : EXPLOITANT		Identifiant : nmexp	
Définition : Un exploitant est soit le propriétaire soit le gestionnaire d'un périmètre irrigué ou les deux en même temps. Il peut être d'une localité riverain ou par contre originaire d'une autre région. Dans certains cas, l'exploitant n'est pas une personne physique mais une société ou une entreprise.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Gérer	1,n	Périmètre irrigué	
Vivre	0,1	Localité	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmexp	Nom de l'exploitant d'un périmètre irrigué	A	15
nbpi	Nombre de périmètres gérés par le même exploitant	N	2
statex	Statut de l'exploitant	A	5
orig	Localité d'origine de l'exploitant	A	15

Nom : INFRASTRUCTURES		Identifiant : nminf	
Définition : Infrastructure appartenant à une localité et participant à sa dynamique ; il peut s'agir d'une école, dispensaire, marché, ...			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Posséder	1,n	Infrastructures possédées par une localité	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nminf	Nom d'une infrastructure dans une localité	12	A

Nom : PHYSICO-CHIMIE		Identifiant : cdel	
Définition : Composition chimique élémentaire d'une eau donnée ; seuls les éléments majeurs sont pris en compte (Chlorures, sulfates, magnésium, potassium, calcium, ...) en plus de la conductivité, du pH mesuré aux 13 stations lors des campagnes d'analyse.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Caractériser	1,n	Zone	
Favoriser	1,n	Plantes aquatiques	
Mesurer 1	1,n	Station	
Influer sur	1,n	Cours d'eau	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdel	Code de l'élément physico-chimique	AN	5
nmel	Nom de l'élément physico-chimique	A	10
nuech	Numéro de l'échantillon	AN	5
datech	Date de l'échantillon	AN	date
mg/l	Concentration de l'élément physico-chimique en mg/l	N	6.1

Nom : CLIMAT		Identifiant : cdcl	
Définition Eléments du climat : pluie, températures, humidité relative, évaporation, tension de vapeur,, vents, mesurés à une station.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Mesurer 2	1,n	Mesure climatique journalière ou mensuelle	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdcl	Code de l'élément climatique	A	3
datcl	Date de mesure de l'élément climatique	AN	8
valcl	Valeur de la mesure de l'élément climatique	N	5.2

Nom : PLANTES AQUATIQUES		Identifiant : plant	
Définition : Formations végétales flottant à la surface de l'eau et ayant une interaction très forte avec le milieu aquatique et susceptibles d'influer sur ses conditions écologiques.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Avoir pour besoin	1,n	Physico-chimie	
Avoir comme refuge	1,n	Faune aquatique	
Influer	1,n	Cours d'eau	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
plant	Nom d'une plante	A	15
famp	Famille de la plante aquatique	A	10
hamoy	Surface de recouvrement moyen de la plante aquatique	N	4
effe1	Effet de la plante aquatique sur l'hydrologie	AN	3
effe2	Effet de la plante aquatique sur la physico-chimie des eaux	AN	3

Nom : FAUNE AQUATIQUE		Identifiant : nmesp	
Définition : Faune vivant dans un des cours d'eau identifiés dans le territoire de la base Guiers et ayant un lien très fort avec les plantes aquatiques qui leur servent généralement de support. Cette faune est susceptible de jouer un rôle important dans la diffusion des maladies hydriques.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Avoir comme refuge	1,n	Plantes aquatiques	
Etre porteur de	1,n	Parasite	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmesp	Nom d'une espèce de faune aquatique	A	15
famf	Famille d'une faune aquatique	A	10

Nom : PARASITE		Identifiant : paras	
Définition : Facteur de transmission d'une maladie et ayant comme lieu de diffusion le milieu aquatique.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Transmettre	0,1	Maladie	
Etre porteur de	1,1	Faune aquatique	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
paras	Nom du parasite	A	13

Nom : CHEPTEL		Identifiant : nmbet	
Définition : Il s'agit des ovins, bovins, caprins et équins composant le bétail dans localités comprises à l'intérieur du territoire de la base de donnée.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Abriter	1,1	Localité	
Contaminer	0,n	Parasite	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmbet	Nom d'un bétail	A	6
famb	Famille à laquelle appartient un bétail	A	6
nbet	Nombre de têtes composant le bétail d'une localité	N	5

Nom : MALADIE		Identifiant : nmal	
Définition : Il s'agit de maladies d'origine hydrique pouvant affecter l'homme ou le cheptel dans une localité située dans le territoire de la base Guiers.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Contaminer	0,n	Cheptel	
Atteindre	1,n	Population	
Transmettre	1,1	Parasite	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmal	Nom d'une maladie hydrique	A	12

Nom : APPORT		Identifiant : cdap	
Définition : Il s'agit de tous les types d'apport à un cours d'eau à l'exception des rejets des périmètres irrigués qui sont déjà pris en compte par l'objet Périmètre irrigué.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Bénéficiaire	1,1	Apport en eau dont bénéficie journalièrement un cours d'eau	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdap	Code d'un apport à un cours	AN	3
volap	Volume d'un apport à un cours d'eau	N	5.2
datap	Date où survient l'apport à un cours d'eau	AN	8

Nom : PERTE		Identifiant : cdpe	
Définition : Perte de volume pour un cours d'eau suite à un prélèvement dont l'origine n'est pas lié au périmètre irrigué. Il s'agit essentiellement ici des pompages SONEES, de l'alimentation en eau du ferlo et de l'évaporation.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Subir	1,1	Perte en eau subie par un cours d'eau	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
cdpe	Code d'un prélèvement sur un cours d'eau	AN	3
volpe	Volume d'un prélèvement sur un cours d'eau	N	5.2
datpe	Date où intervient le prélèvement	AN	8

Nom : COURS D'EAU		Identifiant : nmeau	
Définition : L'entité cours d'eau définit l'hydrologie lacustre et regroupe aussi tous les paramètres afférant aux autres cours d'eau consacrés dans les limites du territoire de la base Guiers. Elle permet de connaître la disponibilité réelle en eau dans le temps et dans l'espace.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Bénéficiaire	1,n	Apports	
Subir	1,n	Pertes	
Etre découpé en	1,1	Zone	
Pomper	1,n	Périmètre irrigué	
Rejeter	1,n	Périmètre irrigué	
Influer sur	1,n	Physico-chimie	
Influencer	1n	Plantes aquatiques	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
nmeau	Nom du cours d'eau	A	9
cote	Hauteur du cours d'eau en m IGN	N	3.2
voleau	Volume du cours d'eau en millions de m3	N	5.2
surfeau	Surface du bassin du cours d'eau en km2	N	5.1
datmes	Date de mesure hydrologique	AN	8

Nom : MOTOPOMPE		Identifiant série	
Définition : Pompe à moteur utilisé pour tirer l'eau d'irrigation d'un périmètre irrigué. Certaines de ses caractéristiques servent à qualifier le degré de développement et ou de rentabilité d'un périmètre.			
LISTE DES RELATIONS			
Libellé	Cardinalité	Observation	
Equiper	1,1	Périmètre irrigué	
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
marque	Marque de la motopompe	A	8
série	Numéro de série de la motopompe	AN	8
datfab	Date de fabrication de la motopompe	N	4
energ	Source d'énergie de la motopompe	A	7
débit	Débit d'une motopompe	N	4.1
hfj	Nombre d'heures de fonctionnement d'une motopompe par jour	N	3.1
latm	Latitude d'un groupe motopompe	N	4.2
longm	Longitude d'un groupe motopompe	N	4.2

Annexe 5 : FICHES DESCRIPTIVES DES RELATIONS DE LA BASE GUIERS

Nom : POMPER	Numéro :
PERIMETRE IRRIGUE (0,1) <-----> (0,n) COURS D'EAU	
Définition : La relation POMPER permet d'évaluer les volumes d'eau pompés par un périmètre dans une des sources d'eau identifiées dans le territoire d'étude.	

Nom : REJETER DANS	Numéro :
PERIMETRE IRRIGUE (0,1) <-----> (1,n) COURS D'EAU	
Définition : REJETER DANS met en évidence l'existence de réseaux de drainage susceptibles de constituer un apport pour le cours d'eau où ces drains sont rejetés. Seule la CSS possède de tels réseaux dont on peut quantifier l'apport au lac ; les résidus issus des autres périmètres par contre peuvent être estimés faute de pouvoir être mesurés.	

Nom : SE SITUER	Numéro :
PERIMETRE IRRIGUE (1,1) <-----> (1,n) LOCALITE	
Définition : La relation SE SITUER permet d'affirmer l'appartenance d'un périmètre irrigué à une localité. La notion de situation est ici très large car l'inclusion d'un périmètre irrigué dans une localité suppose que ses acteurs appartiennent au village en question	

Nom : GERER	Numéro :
PERIMETRE IRRIGUE (1,n) <-----> (1,n) EXPLOITANT	
Définition : Un périmètre est géré par un ou plusieurs exploitants qui eux-mêmes peuvent être responsables de plusieurs autres périmètres. La relation GERER donne un aperçu du mode de gestion des périmètres d'un point de vue « administratif ». L'exploitant est ici le gérant qui peut être en même temps le propriétaire.	

Nom : VIVRE	Numéro :
EXPLOITANT (0,1) <-----> (1,n) LOCALITE	
Définition : La relation VIVRE spécifie le lieu de résidence des exploitants de périmètres irrigués. Elle permet de connaître la place des locaux (c'est à dire les résidents de la région) dans la mise en valeur et l'exploitation des terres.	

Nom : POSSEDER	Numéro :
LOCALITE (0,n) <-----> (1,n) INSTALLATION	
Définition : Chaque village possède ses installations qui lui sont propres : dispensaire, école, marché, forage, puits, ... La relation POSSEDER campe le niveau ou l'importance d'une localité à travers ses infrastructures : elle renseigne sur les modes de vie, le degré de satisfactions de certaines demandes notamment au plan sanitaires et scolaires.	

LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
datins	Année d'installation d'une infrastructure dans une localité	N	4

Nom : ABRITER	Numéro :
LOCALITE (1,n) <-----> (1,1) CHEPTEL	
Définition : ABRITER privilégie la relation localité-bétail plus que celle homme-bétail qui elle peut difficilement être mise en évidence dans un SIG. La présence de bétail dans une localité sédentaire ne pose a priori pas de problèmes ; par contre dans les campements peuls, cette donnée est difficile à saisir du fait de leur relative instabilité saisonnière.	

Nom : TRANSMETTRE	Numéro :
PARASITE (0,1) <-----> (1,1) MALADIE	
Définition : La relation TRANSMETTRE définit les liens entre une maladie et son agent de transmission représenté ici par l'entité parasite. La contrainte d'intégrité fonctionnelle à ce niveau est qu'une maladie est transmise obligatoirement par un parasite.	

Nom : ATTEINDRE	Numéro :
MALADIE (0,n) <-----> (0,n) LOCALITE	
Définition : La relation ATTEINDRE se rapporte aux maladies hydriques pouvant affecter la population d'une localité. Elle permet à travers les statistiques sur le nombre de malades et la date de dénombrement de dresser le tableau sanitaire des localités concernées à des dates bien déterminées.	

Liste des propriétés			
Nom	Définition	Type	Taille
nbcas	Nombre de cas recensés pour une maladie	N	5
datmal	Date de recensement pour une maladie	N	4

Nom : ETRE PORTEUR	Numéro :
FAUNE AQUATIQUE (1,n) <-----> (1,1) PARASITE	
Définition : La relation ETRE PORTEUR renseigne sur l'hôte intermédiaire des parasites en question. On peut grâce à cette relation arriver à reconstituer tout le cycle de la maladie à travers la très forte relation existant entre les populations de bulins et les schistosomes.	

Nom : CONTAMINER		Numéro :	
MALADIE (0,n) <-----> (0,n) CHEPTEL			
Définition : CONTAMINER est relatif aux maladies hydriques qui peuvent toucher le bétail en contact avec les eaux lacustres notamment par le biais des abreuvoirs. Elle pose le même problème que celui de la quantification du bétail.			
Liste des propriétés			
Nom	Définition	Type	Taille
nmvill	Nom de la localité où est dénombré le bétail malade	A	15
nbtet	Nombre de têtes de bétail malades dénombrées dans une localité	N	5
datbet	Date de dénombrement d'un bétail malade	date	8

Nom : FAVORISER		Numéro :	
PLANTES AQUATIQUES (1,n) <-----> (1,n) PHYSICO-CHIMIE			
Définition : AVOIR POUR BESOIN indique l'intervention et l'importance des conditions physico-chimiques dans le développement des plantes aquatiques. Elle permet de déterminer et ensuite de prévoir le développement d'une espèce donnée grâce à la connaissance de ses besoins tant physiques, chimiques que hydrologiques.			
LISTE DES PROPRIETES			
Nom	Définition	Type	Taille
dev	Développement d'une plante aquatique	A	1
recul	Recul d'une plante aquatique	A	1

Nom : AVOIR COMME REFUGE		Numéro :	
FAUNE AQUATIQUE (1,n) <-----> (1,n) PLANTES AQUATIQUES			
Définition : L'hôte intermédiaire dans le cas des maladies hydriques, en l'occurrence les mollusques sont eux-mêmes dépendants de la végétation aquatique qui leur sert de refuge. AVOIR COMME REFUGE met en relation une faune aquatique et son refuge constitué par les plantes aquatiques ; en particulier les quatre espèces majeures reconnues au lac de Guiers.			

Nom : CARACTERISER		Numéro :	
PHYSICO-CHIMIE (1,n) <-----> (1,1) ZONE			
Définition : Une zone est caractérisée par un ensemble de caractères physico-chimiques homogènes à une date précise qui est prise comme référence. Bien évidemment, ces caractères qui ne peuvent être identiques d'une d'une zone à l'autre varient d'une période à l'autre.			
Liste des propriétés			
Nom	Définition	Type	Taille
datref	Date de référence pour les caractères physico-chimiques de la zone	date	8

Nom : COMPRENDRE		Numéro :	
ZONE (1,n) <-----> (1,1) STATION			
Définition : Une zone peut contenir une ou plusieurs stations alors qu'une station ne peut être à cheval sur deux zones. La relation CONTENIR 1 regroupe les stations par groupes homogènes ayant en commun une composition chimique moyenne des eaux à l'intérieur d'une zone commune.			

Nom : CONTENIR		Numéro :	
ZONE (1,n) <-----> (1,1) PERIMETRE IRRIGUE			
Définition : La relation CONTENIR 2 rapporte un Périmètre irrigué à l'une des zones du lac définies en fonction de l'hydrologie et de la physico-chimie des eaux. C'est ainsi qu'elle spécifie qu'un périmètre irrigué ne peut appartenir qu'à une et une seule zone ; donc elle pompe une eau de qualité égale à celle de la moyenne de la zone.			

Nom : MESURER 1		Numéro :	
STATION (1,n) <-----> (1,n) PHYSICO-CHIMIE			
Définition : MESURER 1 définit un premier groupe de stations qui ne servent qu'à la mesure d'un ou plusieurs caractères physico-chimiques moyens des eaux. L'accent est surtout mis sur les éléments majeurs.			

Nom : MESURER 2		Numéro :	
STATION (1,n) <-----> (1,n) CLIMAT			
Définition : MESURER 2 définit un deuxième groupe de stations dont la vocation est la mesure des éléments climatiques telles les pluies, les températures, l'humidité et l'évaporation.			

Nom : INFLUER SUR		Numéro :	
COURS D'EAU (1,n) <-----> (1,n) PHYSICO-CHIMIE			
Définition : L'influence de certains paramètres hydrologiques tels que la hauteur d'eau est très nette. A une situation hydrologique donnée correspond une composition chimique élémentaire qui varie d'une zone à l'autre en fonction des paramètres locaux.			

Nom : INFLUENCER		Numéro :	
COURS D'EAU (1,n) <-----> (1,n) PLANTES AQUATIQUES			
Définition : Les fluctuations du plan d'eau au même titre que les caractères physico-chimiques exercent une influence sur le développement des plantes aquatiques. La hauteur d'eau est un des paramètres capitaux.			

Nom : ETRE DECOUPE EN	Numéro :
COURS D'EAU (1,n) <-----> (1,1) ZONE	
Définition : Le lac de Guiers est divisé en zones homogènes tant du point de vue physico-chimique que hydrologique (volume). Chaque zone est déterminée par un pourcentage volumétrique par rapport au lac.	

Nom : APPARTENIR	Numéro :
LOCALITE (1,1) <-----> (1,n) ZONE	
Définition : Une localité appartient (est localisé) à une et une seule zone du lac ; cette appartenance est déterminante pour l'étude des impacts du lac sur les activités économiques.	

Nom : BENEFICIER	Numéro :
COURS D'EAU (1,n) <-----> (1,1) APPORT	
Définition : BENEFICIER met en évidence l'alimentation d'un cours d'eau qui peut lui provenir de différentes sources (pluies, drainage de parcelles, autres cours d'eau, ...).	

Nom : SUBIR	Numéro :
COURS D'EAU (1,n) <-----> (1,1) PERTE	
Définition : Un cours d'eau servant à satisfaire les besoins en eau des activités humaines subit de ce fait des pertes de volume. La relation SUBIR permet d'identifier les types et volumes des pertes inhérentes à chaque cours d'eau.	

Nom : EQUIPER	Numéro :
MOTOPOMPE (1,1) <-----> (1,n) PERIMETRE IRRIGUE	
Définition : La relation EQUIPER décrit l'équipement d'un périmètre irrigué à travers une de ses composantes essentielles qu'est la motopompe.	

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. — Situation du bassin versant du fleuve Sénégal en Afrique de l'ouest.....	15
FIGURE 2. — Les zones hydro-géographiques du bassin du fleuve Sénégal.....	16
FIGURE 3. — Cartes des isobathes du toit du Mæstrichtien et failles (cotes basées sur le 0 IGN)	17
FIGURE 4. — Les régions naturelles du lac de Guiers	18
FIGURE 5. — Configuration de la basse vallée du Ferlo	20
FIGURE 6. — La cuvette du Ndiael	20
FIGURE 7. — Croquis géomorphologique et géologique du Delta du Sénégal	23
FIGURE 8. — Les formations quaternaires sur la rive occidentale du lac de Guiers à Ngnith.....	24
FIGURE 9. — Les fluctuations climatiques et les grandes étapes de la morphogenèse	28
FIGURE 10. — Évolution de la basse vallée du Sénégal depuis la dernière transgression.....	31
FIGURE 11. — Mise en évidence d'une faune marine dans les sédiments de la basse vallée du Ferlo	33
FIGURE 12. — Carte de répartition des principaux sols au Sénégal et en Gambie.....	36
FIGURE 13. — Coupe schématique des sols de la vallée du fleuve Sénégal	37
FIGURE 14. — Représentation schématique de la végétation du Delta et de la vallée du Sénégal	38
FIGURE 15. — Schéma de la circulation troposphérique générale	43
FIGURE 16. — Schéma des principaux flux de masses d'air en Afrique de l'ouest et centrale durant les deux situations extrêmes de l'année : janvier-février et juillet-août.....	44
FIGURE 17. — Situation géographique des stations de mesure du climat.	45
FIGURE 18. — Évolution interannuelle de la pluviométrie et moyennes mobiles sur cinq ans	47
FIGURE 19. — Distribution mensuelle des précipitations	48
FIGURE 20. — Évolution moyenne mensuelle des températures au cours de la période 1951-1994.....	51
FIGURE 21. — Évolution moyenne mensuelle de l'humidité relative	52
FIGURE 22. — Évolution mensuelle de la tension de vapeur à Saint-Louis et Podor.....	54
FIGURE 23. — Évolution de la moyenne mensuelle de la demande évaporative en mm.	56
FIGURE 24. — Pluviométrie et évapotranspiration (calculée par la formule de Penman) annuelles	58
FIGURE 25. — Moyennes mobiles sur 7 et 11 ans (Source des données : Asecna).....	60
FIGURE 26. — Débits moyens annuels du fleuve Sénégal à Bakel et moyennes mobiles sur 7 ans.....	61
FIGURE 27. — Écarts par rapport à la moyenne (en %)	63
FIGURE 28. — Fonctionnement annuel du lac de Guiers de 1976 à 1985.	66
Figure 29. — Fonctionnement annuel du lac de Guiers depuis 1985.	67
FIGURE 30. — Courbes de variation et tendance d'évolution des niveaux d'eau du lac de Guiers de 1976 à 1995.	68
FIGURE 31. — Évolution limnimétrique journalière du lac de Guiers en 1991 et 1992.....	69
FIGURE 32. — Relation entre la surface et le volume du lac	70
FIGURE 33. — Les composantes du bilan hydrologique du lac de Guiers	72
FIGURE 34. — Bilan hydrologique moyen du lac de Guiers : période 1976-1985.....	74
FIGURE 35. — Bilan hydrologique moyen du lac de Guiers : période 1986 à 1994.....	75
FIGURE 36. — Situation administrative du Delta.....	81
FIGURE 37. — Évolution de la population de Richard-Toll entre 1958 et 1992	84

FIGURE 38. — Prévision d'évolution démographique à Saint-louis et Richard-Toll.....	84
Figure 39. — Cadre d'organisation du développement rural	85
FIGURE 40. — Vue du casier sucrier de la CSS dans la zone de Richard-Toll en 1989.....	89
FIGURE 41. — Carte des aménagements hydro-agricoles du Delta en 1982.....	92
FIGURE 42. — Carte des aménagements hydro-agricoles du Delta en 1993.....	93
FIGURE 43. — Volumes moyens annuels pompés par l'usine de la SDE à Ngnith de 1976 à 1994 et courbe de tendance.....	101
FIGURE 44. — Schéma du tracé du canal du Cayor	110
FIGURE 45. — Évolution des besoins nets totaux à satisfaire par le canal du Cayor (BNT) et des besoins en eau brute au niveau du chenal du Ferlo (BEB) en millions de m ³ par an.....	111
FIGURE 46. — Plan d'ensemble de l'aménagement des vallées fossiles	113
FIGURE 47. — Schéma du drainage du delta à l'horizon 2015 suivant le PDRG	115
FIGURE 48. — Émissaire Delta : alternative décharge nord	116
FIGURE 49. — Volumes moyens mensuels (V Mm ³) et apports fluviaux (Q Mm ³) dans la cuvette du Ndiael en année moyenne, scénario de remise en eau permanente.....	118
FIGURE 50. — Volumes moyens mensuels (V Mm ³) et apports fluviaux (Q Mm ³) dans la cuvette du Ndiael en année moyenne, scénario de remise en eau périodique	118
FIGURE 51. — Schéma d'aménagement de la cuvette du Ndiael (source : MIETTON et al., 1991).....	120
FIGURE 52. — Schéma d'aménagement du lac de Guiers à l'horizon 2000.....	127
FIGURE 53. — Situation géographique des stations d'échantillonnage dans le lac de Guiers.	132
FIGURE 54. — Moyennes mensuelles des températures aquatiques du lac de	135
FIGURE 55. — Évolution du pH et de la hauteur d'eau et courbes de tendance de 1977 à 1992.....	136
FIGURE 56. — Évolution des concentrations en éléments majeurs dans les eaux du lac de Guiers	137
FIGURE 57. — Évolution comparée du volume et des taux de chlorures et de sodium des eaux du lac de Guiers ..	138
FIGURE 58. — Évolution du volume et du taux de sulfates des eaux du lac de Guiers.....	139
FIGURE 59. — Évolution du volume et de l'alcalinité des eaux du lac de Guiers.....	140
FIGURE 60. — Évolution du volume et du taux de calcium des eaux du lac de Guiers	141
FIGURE 61. — Évolution du volume et du taux de magnésium des eaux du lac de Guiers.....	142
FIGURE 62. — Évolution du volume et du taux de potassium des eaux du lac de Guiers.....	142
FIGURE 63. — Distribution régionale des différents paramètres chimiques en 1979-82.	144
FIGURE 64. — Distribution régionale des différents paramètres chimiques en 1989-92	145
FIGURE 65. — Évolution de la salinité moyenne du lac de Guiers de 1977 à 1995	146
FIGURE 66. — Situation géographique des transects effectués par Thiam (1993).....	152
FIGURE 67. — Transect entre Mbane et l'embouchure de la Taoué dans le lac de Guiers.....	153
FIGURE 68. --- Transect au nord du village de Guidick.....	154
FIGURE 69. — Transect digue de Keur Momar Sarr.	155
FIGURE 70. — Carte de la densité et de la répartition des mollusques dans la région du Delta	162
FIGURE 71 — Cycle de la bilharziose intestinale et de la bilharziose urinaire	168
FIGURE 72. — Prévalence de la bilharziose urinaire et intestinale dans la zone de Richard-Toll et au lac de Guiers(source données : Programme ESPOIR, 1994).....	172
FIGURE 73.— Les paramètres du bilan hydrologique et leur intervention dans l'évolution qualitative des eaux du lac de Guiers.	178

FIGURE 74. — Évolution de la salinité moyenne des eaux du lac de Guiers : comparaison des mesures de terrain aux données issues du modèle GIL (1990-1994).....	180
FIGURE 75. — Bilans quantitatif et qualitatif moyens annuels (période 1990-1994).....	181
FIGURE 76. — Évolution simulée du stock des chlorures dans le lac de Guiers avant et après la mise en fonction du barrage de Diama (source : COGELS et al., 1994).	183
FIGURE 77. — Évolution simulée du stock de chlorures suivant quatre options de gestion du lac de Guiers.....	184
FIGURE 78. — Gestion du lac avec variations de niveau (option 1) Évolution du niveau lacustre, des volumes fluviaux et de la salinité.....	191
FIGURE 79 — Gestion du lac avec variations de niveau (option 1) : bilans hydrologique et chimique	192
FIGURE 80. — Gestion du lac avec variations de niveau (option 2)	193
FIGURE 81. — Gestion du lac avec variation de niveau (option 2) : bilan hydrologique et chimique	194
FIGURE 82. — Gestion du lac à un niveau constant (option 1) e.....	196
FIGURE 83. — Gestion du lac à un niveau constant (option 1) : bilan hydrologique et chimique.....	197
FIGURE 84. — Gestion du lac à un niveau constant (option 2)	199
FIGURE 85. — Gestion du lac à un niveau constant (option 2) : bilan hydrologique et chimique.....	200
FIGURE 86. — Les différents domaines du spectre électromagnétique	202
FIGURE 87. — Courbes de réflectance de quelques objets dans les canaux de LANDSAT et de SPOT	204
FIGURE 88. — Schéma du satellite SPOT : vue générale et coupe schématique.....	206
FIGURE 89. — Composition colorée de la mosaïque d'images SPOT-XS (023-317 et 023-318) du 01/02/1989 ...	213
FIGURE 90. — Carte topographique du lac de Guiers d'après les données de l'IGN au 1/50 000 ^e et la carte topographique du Sénégal au 1/200 000 ^e	215
FIGURE 91. — Modèle numérique de terrain du lac de Guiers calculé d'après les données de l'IGN au 1/50 000 ^e et la carte topographique du Sénégal au 1/200 000 ^e	217
FIGURE 92. — Report cartographique des transects bathymétriques réalisés en mai 1994.....	218
FIGURE 93. — Canal composite XS3/XS2 (mosaïque SPOT-XS 023-317 et 023-318 de février 1989)	220
FIGURE 94. — Classification des eaux du lac de Guiers par le Minimum de Distance radiométrique.	222
FIGURE 95. — Superposition de la carte topographique du lac à l'image SPOT de 1989.....	225
FIGURE 96. — Report cartographique des données de turbidité à quelques stations du lac de Guiers.....	226
FIGURE 97. — Cartographie des plantes aquatiques au sud du lac de Guiers en 1989.....	229
FIGURE 98. — Cartographie des plantes aquatiques au sud du lac de Guiers en 1993.....	230
FIGURE 99. — Cartographie des plantes aquatiques du sud du lac de Guiers (1989-1993).	232
FIGURE 100. — Localisation de quelques points de pompes privés autour du lac de	234
FIGURE 101. — Représentation graphique du modèle entité-association.....	244
FIGURE 102. — Règles de passage du modèle individuel au modèle relationnel.....	247
FIGURE 103. — Les domaines d'étude et leurs relations à l'intérieur de la base Guiers.	250
FIGURE 104. — Mode "raster" et mode vecteur (source : ARONOFF, 1989).	251
FIGURE 105. — Les variantes du mode vecteur (source : DIALLO et SARR, 1995).	253
FIGURE 106. — Projection Mercator transverse universelle (source : ROUET, 1991).	255
FIGURE 107. — Les fonctionnalités d'un système d'information géographique (source : CANCES, 1992).....	258
FIGURE 108 — Vue schématique des zones géographiques et stations physico-chimiques du lac de Guiers.....	261
FIGURE 109. — Modèle simplifié de fonctionnement du système fluvio-lacustre du Guiers.	264
FIGURE 110. — Tableau synoptique de la méthodologie pour la constitution de la base Guiers.	265

FIGURE 111. — Modèle conceptuel des données de la base Guiers.....	271
FIGURE 112. — Sous-schéma du modèle conceptuel de la base Guiers : cas de la gestion d'un périmètre irrigué	273
FIGURE 113. — Schématisation du modèle logique des données de la base Guiers.	274
FIGURE 114 — Fenêtre d'étude du SIG Guiers.	277
FIGURE 115. — Configuration du lac de Guiers entre 1989 et 1993.....	279
FIGURE 116. — Quelques parcelles CSS et aménagements sous gestion SAED en 1993.	281
FIGURE 117. — Localisation des zones culture irriguée autour du lac de Guiers.	285
FIGURE 118. — Configuration du bas Ferlo en février 1989 et en novembre 1993.	287
FIGURE 119. — Carte schématique du canal du Cayor.	288
FIGURE 120. — Carte des stations d'échantillonnage de la qualité des eaux du lac de Guiers.	290
FIGURE 121. — Qualité générale des eaux aux trois régions du lac de Guiers avant Diama.	292
FIGURE 122. — Qualité générale des eaux aux trois régions du lac de Guiers après Diama.	293
FIGURE 123. — Évolution du taux moyen de chlorures des eaux du Guiers.....	295
FIGURE 124. — Évolution du taux moyen de sodium des eaux du Guiers.....	296
FIGURE 125. — pH moyen des eaux du Guiers de 1989 à 1992.	297
FIGURE 126. — Évolution de la couverture spatiale des plantes aquatiques entre 1989 et 1993	300
FIGURE 127. — Répartition spatiale des différents groupements de plantes en 1993	300
FIGURE 128 — Classification des localités dans la zone du lac de Guiers en fonction de la population en 1988 et 1992.....	300
FIGURE 129. — Taux de prévalence de la Bilharziose dans quelques localités du lac de Guiers	300
FIGURE 130. — Nombre de cas de bilharziose soignés au dispensaire de Ngnith du 27/03 au 21/09/95.....	300
FIGURE 131. — Implantation d'une nouvelle unité d'agro-industrie au lac de Guiers : sélection de site.	300

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I Les principales phases de la formation de la vallée du Sénégal	25
TABLEAU II Caractéristiques des stations de mesure de l'étude	45
TABLEAU III Moyennes annuelles de la pluviométrie (en mm) à différentes périodes	46
TABLEAU IV Données mensuelles de la pluviométrie (en mm) dans le Delta.....	49
TABLEAU V Moyennes mensuelles des températures en degrés Celsius (°C).....	50
TABLEAU VI Moyennes mensuelles de la température (en degrés Celsius) pour la période 1970-1994.....	52
TABLEAU VII Moyennes mensuelles de l'humidité relative (en %)	53
TABLEAU VIII Moyennes mensuelles de la tension de vapeur en millibars	53
TABLEAU IX Moyennes mensuelles de l'insolation en heures	54
TABLEAU X Moyennes de la demande évaporative en millimètres à différentes périodes	55
TABLEAU XI Moyennes mensuelles de l'évaporation TURC (en mm).....	57
TABLEAU XII Estimation de l'évapotranspiration en millimètres calculée par la formule de PENMAN	57
TABLEAU XIII Caractéristiques des stations et des séries étudiées à la figure 44	60
TABLEAU XIV Répartition de la pluviométrie par quintiles pour les normales 1931-1960 et 1961-1990	62
TABLEAU XV Caractéristiques générales des systèmes aquifères du Delta du Sénégal	78
TABLEAU XVI Quelques données de population dans la région du Delta.....	81
TABLEAU XVII Population des principales localités du lac de Guiers, selon le RGPH de 1988	82
TABLEAU XVIII Quelques résultats d'enquêtes sur les périmètres irrigués autour du lac de Guiers	95
TABLEAU XIX Production piscicole du fleuve Sénégal et du lac de Guiers.....	99
TABLEAU XX Besoins moyens en eau potable pris en compte par le canal du Cayor (en m ³ .j ⁻¹	109
TABLEAU XXI Synthèse des aménagements autour du lac de Guiers à l'horizon 2000 - 2030.....	128
TABLEAU XXII Classification de eaux suivant la méthode de VAN DER WERFF et HULLS (1957-1974).....	133
TABLEAU XXIII Potabilité de l'eau en fonction du taux de minéralisation globale.....	134
TABLEAU XXIV Le pH moyen au trois régions du lac de Guiers	136
TABLEAU XXV Concentrations moyennes des éléments majeurs (mg.l ⁻¹) dans les eaux du lac de	137
TABLEAU XXVI Répartition régionale des éléments chimiques (en mg.l ⁻¹) mesurés lors des deux campagnes d'échantillonnage	144
TABLEAU XXVII Salinité moyenne (en mg.l ⁻¹) du lac et de ses régions aux deux séries d'échantillonnage et pour une même hauteur d'eau de 1.00 m IGN	146
TABLEAU XXVIII Évolution du stock de sels dissous dans les eaux du lac de Guiers avant et après la mise en fonction du barrage de Diama (en tonnes).....	147
TABLEAU XXIX Espèces ichtyologiques pêchées dans le lac de Guiers en 1981 et 1982 (Source : COGELS, 1984) 158	
TABLEAU XXX Nombre d'individus recensés au triage forestier de Ngnith de janvier à août 1995 (Source : Service régional des eaux et forêts de Richard-Toll).....	160
TABLEAU XXXI Taux de prévalence de la bilharziose urinaire et intestinale dans quelques villages du lac de Guiers	171
TABLEAU XXXII Nombre de cas de bilharziose dans quelques localités du lac de Guiers	172
TABLEAU XXXIII Simulations GIL : données de base	188

TABLEAU XXXIV Gestion du lac avec variations de niveau : bilans hydrologique et chimique	192
TABLEAU XXXV Gestion du lac à un niveau constant : bilans hydrologique et qualitatif.....	197
TABLEAU XXXVI Décomposition des différentes bandes spectrales dans le visible.....	203
TABLEAU XXXVII Les satellites SPOT HRV1 ET HRV2 : les canaux, les capteurs et les longueurs d'onde	205
TABLEAU XXXVIII Identification des scènes SPOT	208
TABLEAU XXXIX Quelques données bathymétriques du lac de Guiers	216
TABLEAU XL Classification par le Minimum de distance : tableaux statistiques.....	219
TABLEAU XLI Mosaïque lac de Guiers (1989) : classification par le Minimum de Distance.....	223
TABLEAU XLII Mesure de la turbidité à quelques stations du lac de Guiers (réalisation : mai 1994)	226
TABLEAU XLIII Caractéristiques des images de la partie sud du lac en 1989 et 1993	228
TABLEAU XLIV Sud du lac de Guiers : classification par le minimum de distance radiométrique	231
TABLEAU XLV Deux exemples de configuration pour ER-Mapper 5.20.....	239
TABLEAU XLVI Présentation du dictionnaire des données.....	243
TABLEAU XLVII Les niveaux de réflexions et les modèles associés	248
TABLEAU XLVIII Dictionnaire des données élémentaires de la base Guiers.....	269
TABLEAU XLIX Contenu des tables du modèle logique de la base Guiers.....	275
TABLEAU L Morphologie du lac de Guiers correspondant aux dates des images SPOT-XS du lac de Guiers	278
TABLEAU LI Agrégation des tables "GMP", "PIRRIG", "FARMER", "GERANT" et "ZONE" et estimation de la demande en eau d'irrigation autour du lac dans quelques localités du lac de Guiers.....	283
TABLEAU LII Liste des stations de mesure de la qualité de l'eau dans le cadre du programme EQUENSEN.....	289
TABLEAU LIII PIV et qualité de l'eau : exemple de quelques périmètres irrigués du lac de Guiers (.....	294
TABLEAU LIV Estimation des surfaces couvertes par la végétation aquatique en 1989 et 1993.....	299
TABLEAU LV Corrélation entre la composition chimique des eaux (en mg.l ⁻¹)	299

GLOSSAIRE

Algèbre relationnelle : Elle formalise l'ensemble des opérations abstraites d'appartenance, d'inclusion, de projection, de produit, d'union et de différence dans une base de données.

Analyse spatiale : Modélisation d'un ou de plusieurs phénomènes conditionnels ou évolutifs par une séquence d'opérations élémentaires dans un but d'aide à la décision et à la gestion. Elle comprend des mesures dans l'espace, des reclassifications, agrégation, analyses de proximité, de contiguïté, de connectivité, recherche de chemin optimal, croisement de données, analyses statistiques, interpolation et contournage.

Association sémantique : Association basée sur les caractéristiques sémantiques des objets.

Association topologique : Association basée sur les caractéristiques topologiques des objets.

Attribut : Colonne de la table d'une relation, il appartient forcément à un domaine. Deux attributs de la même table peuvent appartenir au même domaine sans que cela constitue une gêne dans le cadre du modèle.

Base de données : Ensemble d'informations hétérogènes structurées, organisées et évolutives susceptibles de répondre rapidement aux besoins d'une application.

Bourgou : Au sens strict Bourgou est le nom donné à une graminée aquatique : *Echinochloa stagnina* ; au sens large le bourgou englobe toutes les espèces qui vivent généralement avec *Echinochloa stagnina* (*Echinichloa pyramidalis*, *Paspalidium geminatum*, *Vossia cuspidata*, *Oryza barthii*, ...) et forment des prairies aquatiques flottantes.

Clé : Ce qui permet d'entrer quelque part, d'accéder à quelque chose ; ce dont dépend, ce qui conditionne le fonctionnement de quelque chose

Dieri : Terres non inondables lors de la crue

Domaine : Toutes les données élémentaires appartiennent à un domaine dont ils tirent à la fois leur définition et leurs occurrences. Le produit cartésien de deux domaines est l'ensemble de toutes les combinaisons possibles de leurs valeurs prises deux à deux. Il est possible d'envisager le produit cartésien de plusieurs domaines qui représente tous les cas théoriquement possibles. cependant, par rapport à ce produit, la réalité observée sur le terrain occupe une place très modeste.

Donnée : Fait, phénomène ou notion représentable sous une forme conventionnelle, convenant à une communication, une interprétation ou un traitement.

Falo : Terrain de culture situé en bordure du fleuve

Fondé : Hautes terres situées entre le fleuve et la zone d'inondation

Géographie : science qui a pour objet l'étude des phénomènes physiques, biologiques, humains localisés à la surface du globe terrestre, d'en assigner les situations réciproques et d'en donner la description

Graphe planaire :

Hollaldé : Terrain bas en sol argileux, généralement cultivé en mil.

Information : Renseignement sur quelque chose, quelqu'un. En sciences se dit de ce qui peut être transmis par un signal ou une combinaison de signaux ; ce qui est transmis (objet de connaissance, de mémoire) ; action de prendre des renseignements

Méthode : Ensemble coordonné de pratiques tendant à obtenir un résultat. Ensemble de procédés et de moyens pour arriver à un résultat.

Methodologie : Ensemble des méthodes appliquées à un domaine particulier de la science, de la recherche.

MNT : Modèle numérique de terrain, ensemble discret de valeur numériques permettent une représentation du relief d'une zone géographique.

Modèle relationnel : Mode d'organisation des données en tables à deux dimensions. Un SGBD relationnel est un logiciel permettant de définir et de gérer des bases de données organisées suivant le modèle relationnel

Nebka : Petite dune qui se forme à l'abri d'un obstacle, généralement une touffe de végétation.

Niayes : Dépression marécageuse inondée par les fluctuations de la nappe phréatique.

Photogrammétrie : Discipline qui a pour objet principal la mesure des propriétés géométriques de l'environnement à partir de photographies aériennes. Application de la stéréophotographie aux levés topographiques, aux levés des formes et des dimensions de choses très diverses.

Photo-interprétation : Discipline qui consiste à examiner des images photographiques dans l'intention de reconnaître des objets, d'analyser les structures et d'apprécier leur signification thématique. Elle s'appuie en grande partie sur la vision stéréoscopique du relief car l'exagération verticale que celle-ci procure permet repérer des subtilités du relief qui sont souvent indicatrices de phénomènes géologiques ou géomorphologiques sous-jacents.

Pixel : De l'anglais Picture element, c'est la plus petite surface homogène constitutive d'une image numérisée définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage.

Polysèmes : Un même nom désignant des réalités différentes.

Potamologie : De potamologie, science des fleuves, des cours d'eau.

Relation : Sous ensemble du produit cartésien de plusieurs domaines qui correspond à des réalités observées et donc introduites dans la base. Chaque combinaison élémentaire est un cas réel ; elle porte le nom de tuple ou occurrence ou tout simplement ligne de la table représentative de la relation.

Sebkha : Dépression caractérisée par la présence de dépôts salins et par l'absence de végétation.

SGBD : Ensemble de logiciels permettant d'exploiter une base de données notamment en consultation et mise à jour.

SIG : Base de données géographiques et apparentées en général relative à une région déterminée.

Synonymes : Des noms différents pour une même réalité.

Système : Un ensemble composé de parties coordonnées entre elles ; doctrine à l'aide de laquelle on dispose et coordonne toutes les notions particulières ; plan que l'on se fait, moyens qu'on se propose pour réussir quelque chose ; théorie générale présentant un ensemble d'objets, de connaissances comme soumis à des lois.

Tanne : Terre salée, impropre à la culture ; équivalent du Schorre.

Téledétection : Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (COMITAS, 1988).

Topologie : Géométrie qui étudie les positions indépendamment des formes et des grandeurs (géométrie de situation). C'est une manière de structurer les données graphiques en informatique, ce qui facilite leur utilisation dans le domaine de la cartographie (PORNON, 1991). Géométrie qui étudie les positions indépendamment des formes et des grandeurs (géométrie de situation) selon le Robert.

Vendou : Mare temporaire ou permanente

Visible : Portion du spectre électromagnétique comprise entre 0,4 et 0,7 μm .

Walo : Ensemble des terres inondables lors de la crue annuelle du fleuve

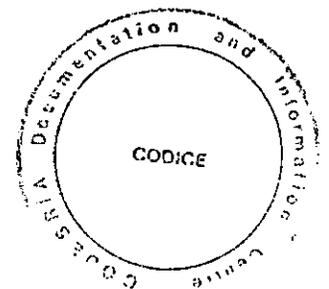


TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	4
REMERCIEMENTS	5
AVANT-PROPOS	7
INTRODUCTION	10
PREMIÈRE PARTIE	13
PREMIERE PARTIE : LE SYSTEME FLUVIO-LACUSTRE DU GUIERS	
Cadre géographique, caractéristiques physiques et humaines.....	13
Chapitre I - LE CADRE PHYSIQUE GÉNÉRAL	14
1. <i>Le relief et l'hydrographie</i>	14
1.1. le bassin du fleuve Sénégal et le Delta.....	14
1.2. Le lac de Guiers.....	16
2. <i>La géologie et la géomorphologie</i>	21
2.1. Structure géologique.....	21
2.2. Paléoclimatologie et évolution géomorphologique au Quaternaire récent.....	25
3. <i>Les sols et La végétation</i>	34
3.1. Les grandes classes de sols	34
3.2. Les formations végétales	37
3.3. Y-a-t-il désertification dans le Delta du Sénégal ?.....	39
4. <i>Le climat</i>	41
4.1. Les mécanismes de la circulation générale et la délimitation climatique.....	41
4.2. Évolution des profils pluviométriques moyens.....	44
4.3. Les facteurs thermiques et l'évaporation	50
4.4. Le régime des Vents	57
4.5. Caractérisation de la sécheresse récente dans le Delta.....	58
5. <i>Les ressources en eau</i>	63
5.1. L'hydrologie du lac de Guiers.....	64
5.2. L'hydrogéologie	75
Chapitre II - LES HOMMES ET LEURS ACTIVITÉS ADAPTATION AUX CONDITIONS CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES	79
1. <i>Le milieu humain</i>	79
1.1. Composition ethnique.....	79
1.2. Evolution démographique.....	80
2. <i>Les activités économiques : influence du lac de guiers</i>	84
2.1. L'activité Agricole.....	85
2.2. La pêche au lac de Guiers.....	95
2.3. La production d'eau potable : l'usine de la SDE à Ngnith.....	100
Chapitre III - LES ÉTAPES DE LA MISE EN VALEUR DANS LE DELTA ET LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE ET HUMAIN	103
1. <i>Historique des aménagements dans le Delta</i>	103
1.1. Les aménagements artisanaux (1916-1947) : lutte contre la langue salée	104
1.2. La période transitoire (1947-1985)	105
1.3. Les grands aménagements du fleuve Sénégal	106
2. <i>Les grands projets d'aménagement</i>	108
2.1. Le projet Canal du Cayor.....	108
2.2. Le PRVF et la remise en eau du Ferlo	112
2.3. L'Émissaire Delta	114
2.4. Le projet de remise en eau du Ndiael.....	116
3. <i>Impacts des aménagements sur le milieu et les hommes</i>	121
3.1. Aspects positifs.....	121
3.2. Aspects négatifs.....	122
DEUXIÈME PARTIE : QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX DU LAC DE GUIERS	129
Chapitre I - SYNTHÈSE DE LA QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX LES EFFETS DU BARRAGE DE DIAMA.....	130
1. <i>Qualité physico-chimique générale</i>	130
1.1. Protocole de suivi de la physico-chimie des eaux.....	131
1.2. Caractères physiques	134

1.3.Composition chimique des eaux	137
2. <i>Qualité biologique des eaux</i>	147
2.1.La végétation aquatique	147
2.2.La faune aquatique.....	157
3. <i>conséquences des modifications de la qualité des eaux sur l'écologie lacustre</i>	162
3.1.Les effets sur la physico-chimie des eaux.....	163
3.2.Les impacts sur la flore et la faune du Guiers.....	163
3.3.Les conséquences sur la santé des populations.....	166
3.4.Y-a-t- il eutrophisation des eaux du lac de Guiers ?	173
Chapitre II - MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DES EAUX DU LAC DE GUIERS.....	176
1. <i>Présentation du modèle GIL</i>	176
1.1.Bases, principes et fonctionnement du modèle GIL	177
1.2.Validation du modèle GIL	179
2. <i>Facteurs déterminants de la qualité des eaux du lac de Guiers</i>	181
2.1.Les apports du fleuve Sénégal	182
2.2.Les rejets d'eaux de drainage de la CSS.....	182
2.3.Les lâchers d'eaux vers le Ferlo.....	183
3. <i>Quelques exemples d'application du modèle GIL</i>	185
3.1.Critères de gestion de eaux du lac de Guiers	185
3.2.Données de base des simulations.....	188
3.3.Gestion du lac avec variations de niveau en cours d'année	190
3.4.Gestion du lac à un niveau constant.....	195
Chapitre III - APPORTS DE LA TÉLÉDÉTECTION A LA CARACTÉRISATION DE LA QUALITÉ GÉNÉRALE DES EAUX ET AU SUIVI DES PLANTES AQUATIQUES.....	201
1. <i>Quelques notions de télédétection</i>	201
1.1. Bases physiques de la télédétection	202
1.2. Le système SPOT	205
1.3. Analyse et traitement d'images : matériel et méthodes.....	208
2. <i>L'imagerie satellitaire SPOT appliquée à la gestion du lac de Guiers entre 1989 et 1993</i>	212
2.1. Caractérisation de la bathymétrie et de la turbidité des eaux	214
2.2. Estimation de la couverture de plantes aquatiques du lac de Guiers.....	227
2.3. Evolution des surfaces irriguées à partir du lac entre 1989 et 1993	233
3. <i>Commentaires et perspectives</i>	236
3.1. Avantages de l'utilisation des données de télédétection dans le cadre de la gestion des milieux naturels	236
3.2. Facteurs limitants dans la mise en œuvre de la télédétection : le coût des produits.....	238
TROISIÈME PARTIE : SIG GUIERS	241
Chapitre I - DE LA BASE DE DONNÉES AU SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE : Définitions, fonctionnalités, mise en œuvre.....	242
1. <i>Bases de données et systèmes de gestion de bases de données</i>	242
1.1.Organisation des données dans les SGBD	242
1.2.Conception d'un SGBD suivant le formalisme MERISE	248
2. <i>Notion d'information géographique</i>	251
2.1.Représentation de l'information géographique.....	251
2.2.Localisation de l'information géographique : systèmes de coordonnées et de projection.....	254
3. <i>Le système d'information géographique</i>	255
3.1.Définitions du système d'information géographique.....	256
3.2.Fonctionnalités d'un système d'information géographique	257
Chapitre II - PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNEES GUIERS.....	259
1. <i>Pourquoi un SIG sur le lac de Guiers ?</i>	259
1.1.Présentation de la région d'étude.....	259
1.2.Contexte de l'étude : rappel	262
2. <i>Matériel et méthodes de réalisation</i>	265
2.1.L'étude préalable	265
2.2.a phase de réalisation de la base Guiers.....	266
2.3.Matériel et logiciels	267
3. <i>Les modèles de données de la base Guiers</i>	268
3.1.Le dictionnaire des données élémentaires.....	268
3.2.Le modèle conceptuel des données.....	271
3.3.Le modèle logique des données.....	274
QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DE LA BASE GUIERS DANS LE CADRE DE LA GESTION DU SYSTÈME FLUVIO-LACUSTRE.....	276
1.1. <i>Impacts de la qualité des eaux sur le milieu et les hommes</i>	276
1.1. Impacts hydrologiques.....	276

1.2. Impacts écologiques.....	276
1.3. Impacts économiques.....	276
2.2. Perspectives.....	276
Chapitre III - QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION DU SIG GUIERS DANS LE CADRE	
DE LA GESTION DU SYSTÈME FLUVIO-LACUSTRE.....	276
1. <i>Tableau general de l'environnement du Guiers entre 1989 et 1993.....</i>	276
1.1. Hydrologie.....	276
1.2. Caractérisation de la qualité des eaux du lac de Guiers.....	289
1.3. Plantes aquatiques.....	298
1.4. La bilharziose dans quelques villages du lac de Guiers.....	300
2. <i>Simulations.....</i>	300
2.1. Simulation 1 : Suivi-évaluation du bilan hydrologique du lac.....	300
2.2. Simulation 2 : Implantation d'une nouvelle unité agro-industrielle.....	300
3. <i>Perspectives du sig guiers.....</i>	300
3.1. Gestion et planification des ressources en eau.....	300
3.3. Cartographie évolutive du milieu.....	300
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	300
BIBLIOGRAPHIE.....	313
ANNEXES.....	327
LISTE DES FIGURES.....	338
LISTE DES TABLEAUX.....	300
GLOSSAIRE.....	300
TABLE DES MATIÈRES.....	346

CODESRIA - BIBLIOTHEQUE