



HAL
open science

Les "territoires salés" de l'eau du delta du Sénégal: Cartographie et pratiques de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

Ousmane Diouf

► **To cite this version:**

Ousmane Diouf. Les "territoires salés" de l'eau du delta du Sénégal: Cartographie et pratiques de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar. Géographie. Université d'Orléans, 2020. Français. NNT: 2020ORLE3061 . tel-03629115v3

HAL Id: tel-03629115

<https://theses.hal.science/tel-03629115v3>

Submitted on 4 Apr 2022

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

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

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS
ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES DE LA SOCIÉTÉ :
TERRITOIRES, ÉCONOMIE, DROIT (SSTED)
Centre d'Études pour le Développement des Territoires et
l'Environnement (CEDETE)

THÈSE présentée par :

Ousmane DIOUF

soutenue le : **10 juillet 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : **GÉOGRAPHIE, AMÉNAGEMENT ET ENVIRONNEMENT**

Les « territoires salés » de l'eau du delta du Sénégal :
Cartographie et pratiques de gestion de la salinité dans le
Gorom-Lampsar

Thèse dirigée par :

M. TOUCHART Laurent
M. BARTOUT Pascal

Professeur des universités, Université d'Orléans
Maître de conférences HDR, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

M. DESCROIX Luc

Directeur de Recherche en Hydrologie, IRD (UMR
PALOC)

Mme TAÏBI Aude Nuscia

Maitre de conférences (HDR), Université d'Angers

JURY :

Mme MERING Catherine

Professeure émérite, Université de Paris 7, Pré-
sident du jury

M. DESCROIX Luc

Directeur de Recherche en Hydrologie, IRD (UMR
PALOC)

Mme TAÏBI Aude Nuscia

Maitre de conférences (HDR), Université d'Angers

M. BARTOUT Pascal

Maître de conférences HDR, Université d'Orléans

M. TOUCHART Laurent

Professeur des universités, Université d'Orléans

POUR FACILITER LA NAVIGATION DANS LE DOCUMENT

Pour faciliter la lecture et la navigation, des liens hypertextes (en [bleu](#)) ont été pré-configurés dans tout le document.

- 1 Cliquez sur la citation pour aller sur sa référence dans la bibliographie.
- 2 Depuis la bibliographie cliquez sur le numéro de page (backref) pour revenir sur la page de lecture.
- 3 La liste des figures, des encadrés, des tableaux, des formules ont également un lien qui renvoie sur l'objet dans le texte.
- 4 Le sommaire et la table de matières sont aussi liés au texte par des liens cliquables.
- 5 Des mini-sommaires sont en début de chaque chapitre avec des liens qui renvoient dans le texte.
- 6 Les numéros des notes de bas de page sont aussi cliquables, ils renvoient sur la juste ligne du texte en bas de page.
- 7 Dans le texte cliquez sur le numéro de tableau, de figure, de schéma, de photos, de chapitre, de sous chapitre... pour l'afficher.

RÉSUMÉ

Le delta du fleuve Sénégal se situe au nord-ouest de la zone sahélienne. Ses caractéristiques climatiques, pédologiques et hydrologiques lui confèrent ses multiples potentialités agricoles et ses particularités écosystémiques, toutes s'organisant autour de la ressource en eau. Ce potentiel a été le socle de politiques de mise en valeur agricole depuis l'époque coloniale, mais celles-ci se sont soldées, dans la majorité, par des échecs. Cette mise en valeur agricole, à travers la politique de territorialisation de la ressource, a engendré des conséquences géographiques, dont la salinisation des terres agricoles qui constitue le cœur de ce travail.

La salinisation des sols dans le delta du fleuve Sénégal est un dégât collatéral de la mise en place d'un territoire hydraulique inabouti, où l'on a apporté des hommes et voulu mettre en place des pratiques agricoles nouvelles. Cette thèse a pour objectifs de faire une analyse cartographique par le biais de la géostatistique et de la télédétection et d'évaluer les stratégies de gestion de la salinité basée sur l'exploitation des données de terrain.

L'analyse cartographique de la salinité dans les périmètres irrigués du Gorom-Lampsar a permis d'abord de constater que la principale variable qui explique la salinisation des sols est la distance à l'axe hydraulique. Le type de sol, d'après l'analyse des statistiques de cartographie, n'aurait pas d'impacts sur la salinisation des sols. En effet les *Hollaldé* et les *Fondé* présentent les mêmes profils de salinité. L'ancienneté des surfaces agricoles se confond avec la typologie des aménagements (les Grands Aménagements (GA) avant et les Périmètres Irrigués privés (PIP) et Périmètres Irrigués Villageois (PIV) après) et est fonction de la distance à l'axe hydraulique. Les grands aménagements plus proches de la ressource, moins salés et plus anciens, mais disposent de drainage suffisant pour contrôler la salinité et les PIP, plus distants à la ressource, plus salés et ne disposant pas de drainage.

L'évaluation des pratiques de gestion dans les PIP et PIV montre que les populations paysannes utilisent les mêmes indicateurs et un seul terme pour caractériser les phénomènes de salinité et de sodicité. Ces paysans, malgré l'absence de cadre de gestion opérationnel et collectif de l'irrigation, mettent en œuvre des pratiques individuelles de gestion de la salinité, qui nécessite, dans une perspective d'aménagement et de gestion durable des ressources, un cadre opérationnel et stratégique de gestion des périmètres irrigués.

Mots clés : Territoire hydraulique, Perception, salinité, cartographie, stratégies, gestion, delta

ABSTRACT

The delta of the Senegal River is located in the north-west of the Sahelian zone. Its climatic, pedological and hydrological characteristics confer to it its multiple agricultural potentialities and its particular ecosystems, all organized around the water resource. This potential has been the bedrock of agricultural development policies since the colonial era, but most of these have failed. This agricultural development, through the policy of territorialisation of the resource, has generated geographical consequences, including the salinization of agricultural land which is the heart of this research.

The salinization of soils in the deltas is a collateral damage to the establishment of an undeveloped hydraulic territory where men were brought in, wanted to set up new agricultural practices. This thesis aims to make a cartographic analysis through geostatistics and remote sensing and evaluation salinity management strategies based on the exploitation of field data.

The cartographic analysis of the salinity in the irrigated perimeters of the Gorom-Lampsar made it possible first to note that the main variable which explains the salinization of the grounds is the distance to the hydraulic axis. Soil type, based on the analysis of mapping statistics, would not have any impact on soil salinization. Indeed *Hollaldé* and *Fondé* have the same salinity profiles. The age of the agricultural surfaces is confused with the typology of developments (the Wide layouts (WL) before and the Irrigated Private Perimeters (IPP) and Villagers Perimeters Irrigated (VIP) after) and is a function of the distance to the hydraulic axis. Wide Layouts closer to the resource, less salty and oldest, but have sufficient drainage to control salinity and IPP, more distant to the resource, more salty and lacking drainage.

Evaluation of management practices in IPP and VIP shows that peasant populations use the same indicators and a single term to characterize the phenomena of salinity and sodicity. These farmers, despite the absence of an operational and collective irrigation management framework, implement individual salinity management practices, but require, from a management and sustainable resource management perspective, an operational framework and strategic management of irrigated perimeters.

Key words : Hydraulic territory, Perception, salinity, mapping, strategies, management, delta

DÉDICACES ♥

Je dédie ce travail à mes
deux adorables moitiés, *Mouhamadou Moukhtar* et *Khadim Mbacké*. Ces deux bouts, la plus belle
chose qui me soit arrivée, sont venus à la fin de cette thèse
et m'ont donné plus de courage, d'abnégation et de persévérance. Je dédie également ce travail à mes parents
qui m'ont toujours accompagné sur cet épineux
chemin vers la réussite ; à ces deux braves
figures, ce travail vous est dédié. À
ma très chère épouse pour
son soutien !



REMERCIEMENTS

Cette thèse de géographie est le résultat d'un effort individuel, mais surtout d'un travail collectif. Ces quelques lignes ne pourront jamais exprimer la reconnaissance que j'éprouve envers tous ceux-là qui ont contribué à son aboutissement.

Je ne pourrai jamais assez remercier mes deux professeurs M. **Laurent TOUCHART** et M. **Pascal BARTOUT** pour m'avoir accueilli et accepté d'encadrer et qui m'ont témoigné durant ce travail d'étude et de recherche, de leur soutien, de leur confiance et de leur patience malgré vos responsabilités et vos agendas trop chargés. Je vous remercie d'avoir bien voulu me faire bénéficier de votre précieux encadrement. Vos conseils avisés, votre sens du travail bien fait, vos critiques constructives, et vos qualités humaines et plus encore votre volonté de tirer vos étudiants vers le haut, ont été les leviers de la réussite de cette entreprise.

Je tiens également à remercier Mme Aude Nuscia TAÏBI, Maître de conférences (HDR) à l'Université d'Angers, Luc DESCROIX, Directeur de Recherche en Hydrologie à IRD (UMR PALOC), d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Des remerciements équivalents vont à l'endroit de Mme Catherine MERING, Professeur à Université Denis Diderot (Paris VII), d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Mon cursus étant partagé entre deux Universités (l'Université Gaston BERGER et l'Université d'Orléans), mes remerciements vont d'abord à l'endroit de tout le personnel enseignant ainsi qu'à tout le personnel administratif du département de géographie de l'Université d'Orléans. J'exprime parallèlement ma sincère reconnaissance aux professeurs M. Boubou Al-diouma SY, M. Dah DIENG, M. Adrien COLY et M. Sidy Mouhamed SECK du département Géographie de l'Université Gaston BERGER de Saint-Louis du Sénégal pour leur conseil et leur implication dans cette thèse.

Des remerciements particuliers à l'endroit du personnel de la Société d'aménagement des Eaux du Delta et de la Falémé (SAED) pour leur soutien technique dans la réalisation de ce TER à travers une convention de partenariat. J'adresse mes remerciements envers M. Djiby SALL directeur des aménagements de la SAED, à M. Amadou NIANG, Chef Division des Statistiques et Géomatique (DSG) pour son soutien technique et méthodologique au cours des missions de terrain.

Je tiens à remercier les populations paysannes des villages pour leur disponibilité et d'avoir répondu aux questionnaires et aux entretiens. Je remercie également les personnes qui m'ont aidé sur le terrain (Abou SY, Seydou SOW et Amadou NDIME, étudiants en thèse de doctorat à l'Université Gaston BERGER de Saint-Louis). Je vous remercie chers collègues pour vos contributions pertinentes et sur la récolte de données de terrain.

Je tiens à remercier ma famille académique avec qui j'ai partagé mon cursus pédagogique qui a aidé à la relecture de ce document (Alioune Toumany BADIANE, Mouhamadou Bassirou SECK, Souleymane CISS, El Hadji Bity GUÈYE, Ndèye Awa FALL, Abdou FALL, Éric DIANDY, Kadjatou DIALLO). Je remercie mes collègues doctorants et docteurs du laboratoire CEDETE (Quentin, Seydou, Rivel, Tarek, Severin, Francesco, Duy, Antoine, Margot, Cathy, Simon...)

À toute la communauté sénégalaise d'Orléans (Oumar DIALLO, Hamath GALLO, Magatte FALL, Ramatoulaye SOW, Omar SIDIBE, Ousseynou DIOP, Souleymane SALL, Alioune NGOM, Amadou NIANG, Sokhna Ami, Sokhna Fatou, Yakhara DIOP, Diaw NGAMBE, Martine MENDY, Mouhamed KONTÉ, Awa MANÉ, Amadou Lamine DIOUF).

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus particuliers à toute ma famille, mon père Talla DIOUF, ma mère Diakher DIOP, ma grand-mère Anta SÈNE, mes tantes Ndèye DIOP et DIOR GUÈYE et oncles Lahad et Mor DIOP, mes frères et sœurs Aïda, Fatou, Cheikh, Mouhamed, Ndèye Fatou, Maty.

Que tous ceux qui, de par le geste et/ou le souhait, ont contribué à ce travail trouvent ici l'expression de ma gratitude et de toute ma considération !

AVANT-PROPOS

Cette thèse est l'aboutissement d'un long voyage dans la sphère de la recherche géographique. Dès le début de mes études supérieures à l'Université Gaston BERGER (UGB) de Saint-Louis du Sénégal, j'ai nourri l'ambition de réaliser une thèse en Géographie, idées qui m'ont encore animé pendant mes deux années de master de Géomatique à l'Université d'Orléans en France.

Le choix de ce sujet de recherche portant sur « LES TERRITOIRES SALÉS » de l'eau du delta du fleuve Sénégal n'est pas fortuit. Il s'explique d'abord, par le fait d'avoir longtemps, pendant mon cursus à l'UGB, travaillé sur les questions concernant le delta du Sénégal. Ensuite, mon master géomatique a été bouclé par un mémoire de recherche sur la cartographie de la végétation sur l'amont du barrage de Diama et les contours du lac de Guiers⁽¹⁾. Ce travail est la continuité d'un ensemble de travaux écrits sur la géographie du delta du Sénégal.

Cette thèse est possible grâce à la subvention annuelle du laboratoire CEDETE⁽²⁾, à l'encadrement sans faille de mes deux directeurs de thèse, mais également grâce au partenariat conjoint avec la SAED⁽³⁾ qui constitue, dans le delta du Sénégal, une instance de prise de décision vers laquelle cette thèse est destinée.

(1). O. DIOUF, 2015. « Cartographie de la végétation aquatique dans le bas delta du Sénégal : Approche orientée objet sur l'évolution de la végétation et essais sur la discrimination du typha à l'aide d'indice ». Mémoire de Master. Orléans : Université d'Orléans. 101 p.

(2). Le CEDETE (Centre d'Etude sur le Développement des Territoires et l'Environnement) rassemble des géographes et des sociologues et psycho-sociologues de l'Université d'Orléans. Le développement durable en est un fil directeur, croisant les recherches sur les « territoires de l'eau, la limnologie et la géomatique » et des questionnements sur les aspects sociaux et solidaires du développement des territoires, qu'ils soient ruraux/urbains ou à l'interface.

(3). Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED). Sa mission est de promouvoir le développement de l'agriculture irriguée en rive gauche du fleuve Sénégal et de la Falémé. Elle se décline à travers les six domaines d'activités suivants : réalisation des investissements publics, maintenance des infrastructures hydroagricoles, gestion de l'eau et de l'environnement, aménagement rural et sécurisation foncière, appui à la mise en valeur et à la professionnalisation, appui à l'entrepreneuriat rural privé.

SIGLES, ACRONYMES ET SYMBOLES

AHA : Aménagement Hydroagricole

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CDI : Charte du Domaine Irrigué

CE : Conductivité Électrique

CEC : Capacité d'Échange Cationique

CEDETE : Centre d'Études pour le Développement des Territoires et de l'Environnement

CIGB : Commission Internationale des Grands Barrages

CIRAD : Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement

CNCAS : Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal

CNRS : Centre National des Recherches Scientifiques

CSE : Centre de Suivi Écologique

DAIH : Direction des Aménagements et Infrastructures Hydro- agricoles

DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau

ESP : Exchangeable Sodium Percentage

FAO : Food and Agriculture Organization

FIT : Front Inter-Tropical

FMI : Fonds Monétaire International

GA : Grands Aménagements

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau

GMP : Groupe Moto Pompe

GRET : Groupe de Recherche et d'Échange Technologique

IGN : Institut National de l'Information Géographique

IRD : Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)

Is : Indice de salinité

K : Potassium

LMI : Laboratoire Mixte International

MAB : Man and Biosphere

MAS : Mission d'Aménagement du Sénégal

Mg : Magnésium

MO : Matière Organique

Na : Sodium

NaCl : Chlorure de sodium

NDSI : Normalized Difference Salinity Index

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NPA : Nouvelle Politique Agricole

OAD : Organisation Autonome du Delta

OERS : Organisation des États Riverains du Sénégal

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

OP : Organisation Paysanne

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PAGIRE : Plan d'Action et de Gestion Intégrée des Ressources en Eau

PATEO : Patrimoines et Territoires de l'eau

PDRG : Plan Directeur de la Rive Gauche

pH : Potentiel Hydrogène

PIP : Périmètre Irrigué Privé

PIV : Périmètre Irrigué Villageois

PND : Parc National de Diawling

PNOD : Parc National des Oiseaux de Djoudj

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

POAS : Plan d'Occupation et d'Affectation des Sols

PPM : Partie Par Million

RBTFDS : Réserve de Biosphère Transfrontalière du Delta du Fleuve Sénégal

SAB : Surfaces Abandonnées

SAED : Société d'Aménagement des Eaux du Delta

SAR : Sodium Absorption Ratio

SAU : Surface Agricole Utile

SAVI : Soil Adjusted vegetation Index

SE : Surfaces Exploitées

SEDAGRI : Société d'Études et de Développement Agricoles

SI : Salinity Index

SIG : Système d'Information Géographique

SNE : Surfaces Non Exploitées

TER : Travail d'Étude et de Recherche

UCAD : Université Cheikh Anta DIOP de DAKAR

UGB : Université Gaston BERGER

UH : Union Hydraulique

UMV : Unité de Mise Valeur

UP : Unité de Paysage

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	12
I CONTEXTUALISATION DU TERRITOIRE HYDRAULIQUE	26
INTRODUCTION PARTIELLE	27
Chapitre 1 : Concepts et méthodes	28
Chapitre 2 : Les composantes naturelles des territoires de l'eau	68
Chapitre 3 : Le delta : des écosystèmes remarquables et en profondes mutations dans un milieu sahélien	100
Chapitre 4 : Le processus de territorialisation de l'eau dans le delta du Sénégal	117
CONCLUSION PARTIELLE	136
II GÉOGRAPHIE DES « TERRITOIRES SALÉS » DE L'EAU	137
INTRODUCTION PARTIELLE	138
Chapitre 5 : Cartographie de la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar	139
Chapitre 6 : Perception et pratiques de gestion de la salinité dans les PIP et PIV	176
Chapitre 7 : Perspectives d'aménagement et de gestion durable des ressources	197
CONCLUSION PARTIELLE	213
CONCLUSION GÉNÉRALE	214
RÉFÉRENCES	220
LISTES DES ILLUSTRATIONS	251

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de l'étude...

Selon la FAO, dans le monde, les sols sont menacés de dégradation, principalement par la salinisation, l'érosion et la pollution, causes induites par la croissance démographique, l'industrialisation, la variabilité climatique et les pratiques agricoles. La dégradation des sols prend principalement 3 formes : la dégradation physique (érosion éolienne), la dégradation chimique (salinisation) et la dégradation biologique (destruction de la faune et de la flore biologiquement active). Chacun de ces cas traduit une perte de fertilité, exposant la vie au risque, à un danger, car les sols sont des supports de la végétation naturelle et cultivée. Le risque peut être mesuré en termes de degré de dommages subis par les surfaces agricoles utiles (SAU), car on peut faire des analyses pour déterminer le niveau d'aptitude cultural. Le sol est une ressource naturelle, un bien économique non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine ; il se met en place à l'échelle géologique (1000 ans) (SY, 2008).

La salinisation est identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres dans les zones arides et semi-arides (FAO, CISEAU et al., 2006). En effet, chaque minute, 3 hectares de terres sont perdus à cause de la salinisation des terres, et c'est souvent de manière irréversible. Si 80% des terres salées ont une origine naturelle, les 20% restants sont dûs aux activités humaines⁽⁴⁾ (les pratiques agricoles de l'irrigation qui diminuent les flux d'eau sans diminuer les flux de sels). La salinité est une caractéristique naturelle des sols, elle est souvent liée à l'histoire géomorphologique des sols (transgression/régression marine), mais la salinisation est aussi causée par l'activité humaine notamment l'agriculture irriguée (ABBAS et al., 2013 ; FERNANDEZ-BUCES et al., 2006 ; JOB, 1992a ; LE BRUSQ, 1980). La salinité est par définition l'accumulation des sels solubles dans le sol ou sur sa surface. Au-delà d'une certaine concentration, elle a pour conséquence la dégradation des sols. (BOIVIN, 1993 ; MARLET et JOB, 2006 ; B. NDIAYE et al., 2008 ; SALOMON, 2006).

Plus de 12 millions de km² de terres se sont dégradés sous l'effet d'activités humaines depuis 50 ans (FAO, 1998). D'après des chercheurs de la société de conservation des sols de l'Inde, quelques 2,6 milliards de personnes sont affectés par la dégradation des sols dans plus de 100 pays. La surface affectée représente 33 % de la surface terrestre (SY, 2008). Si la tendance se maintient, quelques 2,5 millions de km² de terres cultivables deviendront stériles d'ici 2050

(4). FAO, CISEAU et al., 2006. *Conférence électronique sur la salinisation : extension et stratégies de prévention et réhabilitation*. Rapport de recherche. CISEAU (Centre d'Information Sur l'Eau Agricole et ses Usages), FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture) et IPTRID (Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage). 11 p.

selon la FAO qui estime qu'entre 2500 et 5000 km² de terres sont soustraits à la production /an par l'action de la salinité. Quelques 11% seulement de la surface terrestre sont revêtus de sols de première qualité desquels on tire la majorité de la production alimentaire mondiale. Cette production nourrit actuellement plus de 6 milliards de personnes, et plus de 8 milliards en 2020 (FAO, CISEAU et al., 2006).

Au Sahel⁽⁵⁾, l'irrigation permet de lever cette principale contrainte pour la production, mais combinée aux facteurs climatiques (variabilité des pluies et forte évaporation), elle engendre également des risques de salinisation secondaire liée à l'évaporation et/ou à la remontée de nappes salées due à la percolation, l'appauvrissement du sol en éléments minéraux et en matière organique liée à la mise en culture continue... Ce risque de salinisation et de baisse de fertilité des sols est souvent mis en parallèle aux résultats décevants qu'enregistre l'agriculture irriguée, notamment la riziculture qui occupe la majeure partie des surfaces aménagées.

Aussi, la variabilité du climat⁽⁶⁾ entraîne aussi des mutations dans les modes de mise en valeur des terres agricoles induits par les diverses politiques hydroagricoles (création de barrages par exemple).

Cette variabilité du climat, dans les pays arides d'Afrique occidentale, s'est particulièrement marquée au cours de la fin du XXe siècle qui a coïncidé avec l'ère industrielle dans les pays les plus avancés (R. NDIAYE, 2004; M. A. TOURÉ, 2018). Durant cette période, le Sahel a traversé différentes époques d'alternance de conditions sèches et humides. Une période humide entre 1930 – 1960, les sécheresses des années 1970 – 1980 et une timide hausse des précipitations dans les années 1990 et 2000. Étant donné que l'économie du Sahel dépend fortement de deux ressources essentielles (les terres agricoles et les ressources en eau), ce premier épisode a fortement déstabilisé les systèmes de production traditionnels d'antan, actuellement confrontés à des problèmes de famine et d'exode rural. Alors, l'irrigation apparaît dans ce contexte comme un moyen de remédier la famine et de fixer les populations locales. Dans le bassin du fleuve Sénégal, où vivent plus de 2 millions de personnes, les activités économiques dépendent de la ressource fluviale (A. KANE, 1997; B. NDIAYE et al., 2008).

(5). Le sahel désigne une aire géographique marquant la transition entre les régions désertiques et celles où règne le climat soudanien et caractérisé par une tendance à la péjoration de son climat depuis plusieurs millénaires, remontant à 7000 ans B.P.(SY, 1995).

(6). La variabilité climatique est un facteur explicatif de la salinisation dans les zones semi-arides et arides, car la modification du processus hydrologique entraîne une modification des processus salins dans les milieux initialement salés

La mise en place du territoire de l'eau...

Ce contexte problématique a favorisé un processus de territorialisation de l'eau dans toute la vallée et le delta du Sénégal (figure 1), une idée coloniale. Les expériences menées au *XIX^{ème}* et au *XX^{ème}* siècle par la puissance coloniale n'ont pas connu de succès auprès des populations. L'idée est néanmoins reprise après l'indépendance (POUSSIN, 2008) mais les résultats sont loin d'être satisfaisants. En effet, ce constat d'échec de la riziculture irriguée dans la vallée du Sénégal n'est pas nouveau. Les études agronomiques effectuées par le passé (BONNEFOND, 1981 ; JAMIN et al., 1986) ont identifié les principales contraintes, toutes liées au manque de maîtrise technique : irrigation, enherbement, fertilisation... À l'époque, la Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du Sénégal (SAED), société d'État chargée du développement et de l'encadrement de la riziculture sur le fleuve, gère les aménagements au plan technique, ainsi que l'ensemble de la filière rizicole (BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ, 1999). La SAED était chargée de l'irrigation, fournissait les intrants et les prestations mécanisées, dictait les interventions à réaliser et leur calendrier, achetait le paddy⁽⁷⁾ récolté à un prix fixé par l'État et le transformait.

À partir de 1980, l'État sénégalais a mis en œuvre la politique d'ajustement structurelle demandée par la Banque Mondiale. La SAED s'est alors progressivement « désengagée », et la gestion des aménagements a été confiée à des organisations paysannes (OP), ayant le statut de Groupement d'Intérêt Économique (GIE) (POUSSIN, 1998). Ces organisations se sont vu alors confiées non seulement la gestion hydraulique de l'aménagement, mais aussi l'achat et la distribution des engrais et des produits phytosanitaires, la réalisation des travaux mécanisés, la commercialisation des productions et, avant tout, le financement de la campagne agricole. Ce désengagement de la SAED conjugué aux aléas de sécheresse a poussé les États membres de l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS)⁽⁸⁾ qui partagent le bassin, à créer des barrages pour maintenir la cote du fleuve entre 1,50 m et 2,20 m au-dessus du niveau de la mer, et de conserver de l'eau dans les lacs de Guiers au Sénégal et de R'kiz en Mauritanie.

(7). Le riz paddy est un grain complet, sans aucun traitement biologique.

(8). En 1972, avec la naissance de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), un large projet d'aménagement du fleuve est défini. Ce projet, dont le coût est estimé à environ 400 milliards de FCFA (soit plus d'un milliard d'Euros), se fonde sur l'installation d'ouvrages de régulation du fleuve permettant à la fois l'irrigation de 375 000 ha (dont 240 000 ha sur la seule rive sénégalaise), la production d'énergie hydroélectrique, la navigation et la génération d'une crue artificielle pour le maintien des cultures de décrue en moyenne vallée (POUSSIN (2008))

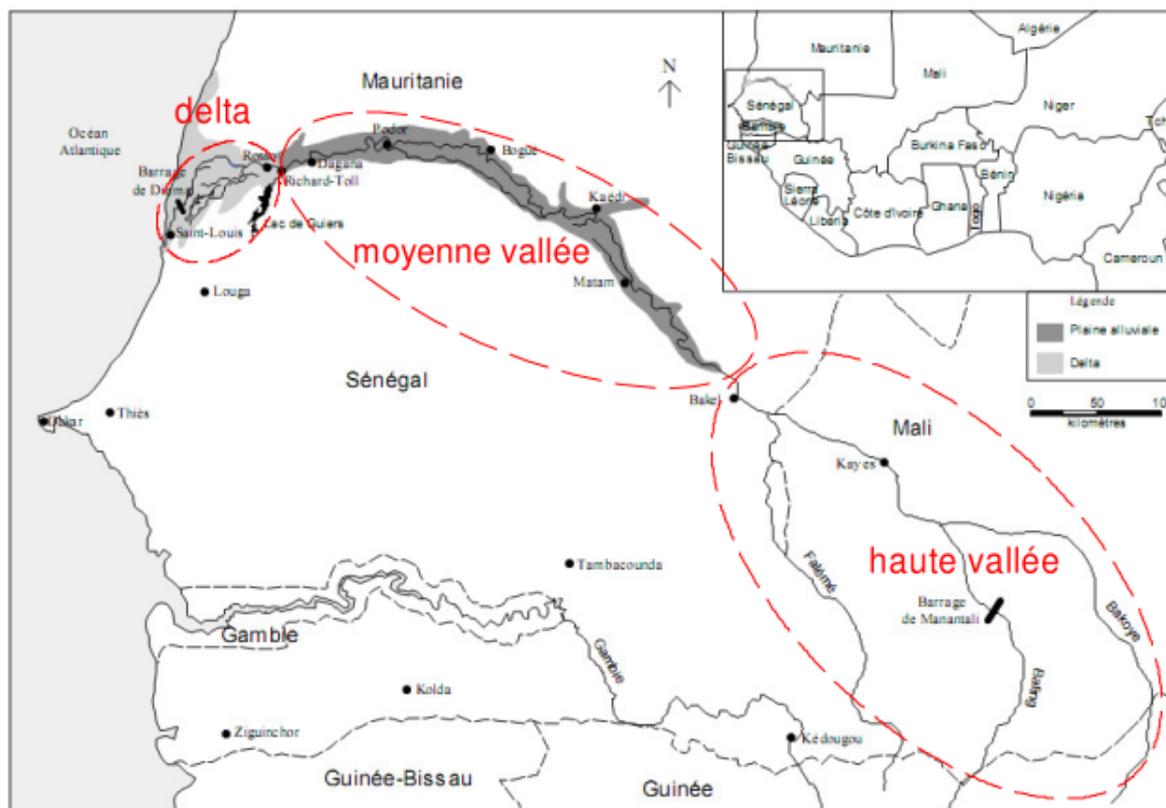


FIGURE 1 – Les trois domaines du bassin du fleuve Sénégal (Source : POUSSIN (2008))

En effet, d'importants investissements ont été mobilisés pour accroître le développement économique de la région et réduire la vulnérabilité face aux conditions climatiques difficiles. Ont été construits les barrages de Diama et Manantali et l'agriculture irriguée a été développée dans la vallée et le delta, des deux côtés des rives.

Sur les rives sénégalaises, les aménagements sont confiés à la SAED et l'État définit une politique de « l'après barrages » avec le Plan Directeur de la Rive Gauche (PDRG)⁽⁹⁾ qui constitue un outil de planification du développement de la rive sénégalaise. Ainsi, on distingue différents types d'aménagements selon la taille et le niveau de sophistication, voire le mode de mécanisation préconisé (BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ, 1999 ; POUSSIN, 2008 ; S. M. SECK, 1991).

- Les Grands Aménagements (GA) : d'une surface de plusieurs centaines à quelques milliers d'hectares, disposent d'une station de pompage importante (plusieurs pompes à moteurs diésels ou électriques), d'un réseau d'irrigation et d'un réseau de colature (ou réseau de drainage de surface) consolidés pour l'évacuation des eaux, de parcelles nivelées avec

(9). Le PDRG avait pour objectif 240 000 ha irrigués avec une intensité culturale de 1,6 et l'autosuffisance alimentaire du pays en riz, les objectifs n'ont pas été atteints

des voies d'accès.

- Les « périmètres irrigués villageois » (PIV) sont beaucoup plus modestes en surface (moins de 50 ha) et de conception beaucoup plus sommaire (canaux d'irrigation non consolidés, absence de réseau de colature, nivellement sommaire des parcelles...). Ils ont été réalisés à partir de 1975, à l'époque des grandes sécheresses, pour permettre aux populations locales de survivre en demeurant sur place. Ils sont exploités par des agriculteurs issus du même village. La surface aménagée est répartie équitablement entre tous les villageois ; les parcelles sont donc généralement de très petite taille (la dizaine d'ares).
- Enfin, près de la moitié (45%) des surfaces ont été aménagées sur initiative privée et sans appui technique de la SAED à partir de la fin des années 1980. Ces aménagements privés, dénommés « périmètres irrigués privés » (PIP), ont une taille similaire aux PIV et une infrastructure souvent plus sommaire, car ils ont été installés au moindre coût ou par seule stratégie foncière. Ils sont exploités par un seul agriculteur-investisseur (c'est le cas du delta qui regroupe 84% des surfaces), ou par une ou plusieurs familles, ayant-droits traditionnels des terres dans la vallée. Du fait de leur qualité d'installation, certains PIP ont été rapidement abandonnés après seulement quelques campagnes de culture.

La construction du barrage de Diama, qui limite la pénétration de l'amont des eaux salées de l'océan, a permis la création de périmètres irrigués qui offrent la possibilité de pratiquer plusieurs cycles de culture par an (ZANTE, 1995), mais a néanmoins changé le système hydrologique en amont et influence l'évolution des caractéristiques du sol (THIAM, 2013).

Dans le delta du Sénégal, la culture du riz est la principale cible de ces efforts il exige une grande quantité d'eau en raison de niveaux d'évaporation élevés localement. La culture du riz irrigué a été cependant aussi identifiée comme la cause la plus importante de la dégradation de l'environnement par le biais de la salinisation secondaire du sol (S. M. SECK, 1986a).

La salinisation des sols dans les territoires de l'eau du delta du Sénégal, suite aux politiques d'aménagements, est une préoccupation majeure. La question de la salinité des sols est dès lors inhérente à la question de l'eau ainsi qu'à sa gestion qui intègre toutes les dimensions inhérentes à l'exploitation des ressources en eau (la terre, la forêt, les activités socioéconomiques traditionnelles, la modernisation de l'agriculture pour l'autosuffisance alimentaire nationale, les inondations, les sécheresses hydrologiques et climatiques, les changements climatiques, etc.).

L'enjeu de l'eau est tel qu'il fait débats dans les grandes rencontres internationales. La conférence de Rio de Janeiro⁽¹⁰⁾ prône une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et le plan agricole, c'est la Déclaration de Turin de 1999 qui a fait de la gestion de l'eau pour l'irrigation une priorité dans ses plans d'action. La conférence de Johannesburg (Rio + 10) de 2002 met en avant la priorité donnée aux ressources naturelles aux fins du développement économique et social et prône une gestion des ressources naturelles durable et intégrée, la gestion intégrée des zones côtières et la lutte contre la pollution des terres et des eaux.

Il est clair que la salinisation est un phénomène dynamique qui doit être surveillé régulièrement dans l'espace et dans le temps afin de détecter les tendances spatiotemporelles et aussi pour mieux comprendre les paramètres qui régissent les types et niveaux de salinité des sols, mais il faut également prendre en compte les logiques de gouvernance locale des ressources (souvent non pris en compte dans les études de salinité) car la gouvernance d'un territoire de l'eau se doit d'être la plus complète possible (BARTOUT et TOUCHART, 2017).

Problématique et hypothèses de recherche

Le delta du fleuve Sénégal s'inscrit dans ces marges saharo-sahéliennes où la population est sous la menace de processus de désertification particulièrement agressifs depuis les sécheresses des années 1970 (figure 2). Dans ce contexte, tout aménagement hydraulique ou hydro-agricole visant à maîtriser l'eau apparaît *a priori* comme une solution bénéfique à la protection de l'environnement humain et écologique (PHILIPPE et al., 1997). Suite à la mise en eau des barrages, la maîtrise des eaux du delta a été bénéfique certes, car elle a permis une amélioration économique conséquente avec le développement de la riziculture irriguée par des institutions d'État. Mais la perturbation du fonctionnement hydrologique du fleuve et des zones humides en a résulté combinée avec les effets de sécheresse, a aussi engendré des conséquences graves et immédiates dans le delta (BARUSSEAU et al., 1993 ; THIAM, 2013).

(10). La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement connue sous le nom de « Sommet de la planète Terre » s'est tenue du 3 au 14 juin 1992 dans la ville de Rio de Janeiro, au Brésil. Le sommet de la Terre adopte un Plan d'action pour le développement appelé : Agenda 21. Le chapitre 18 évoque le concept de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) indispensable dans le contexte mondial de pénurie

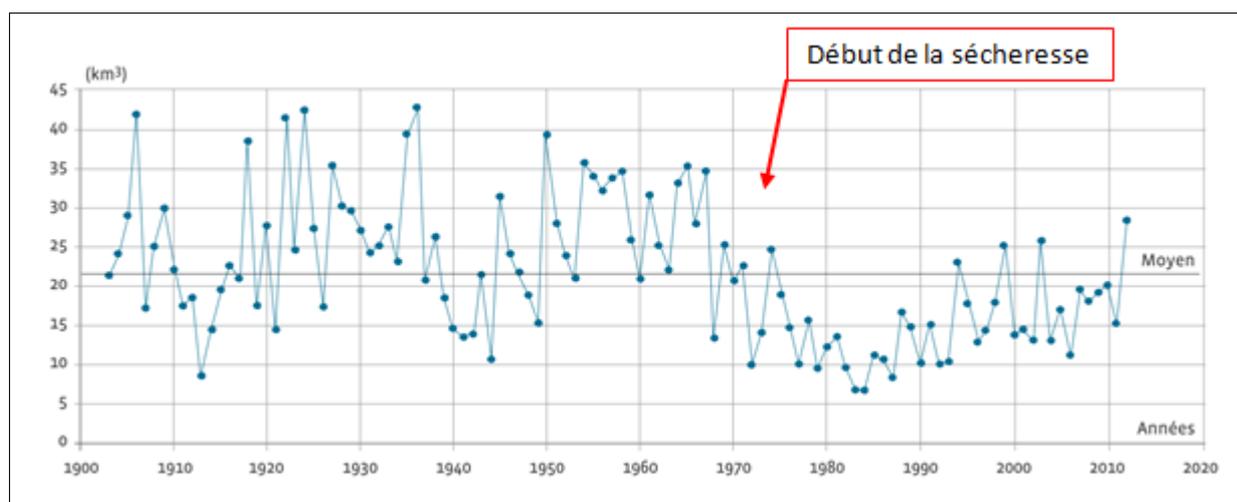


FIGURE 2 – Volume écoulé annuel du Sénégal à Bakel (mai année i à avril année $i+1$).
(Source : BADER, 2015)

En effet, le barrage antisel de Diama, mis en service en novembre 1985 dans la zone centrale du delta Sénégal, a créé de profondes modifications au niveau de l'environnement de toute la vallée tant du point de vue physique, biotique, humain que socioéconomique (A. KANE, 1997 ; THIAM, 2013). Ces transformations ou bouleversements, précurseurs de profondes mutations se manifestent déjà au niveau du fleuve, des sols, des plans d'eau comme le lac de Guiers, de la faune et de la flore et des paysages sahéliens (WADE, 1998). Il faut noter également que le facteur humain n'est pas tout de même épargné par les effets de ce barrage avec l'intensification des périmètres agricoles posant ainsi des problèmes sur la santé publique, avec l'apparition des maladies liées à l'eau, car l'eau douce est présente sur les territoires. Le développement de l'agrobusiness, effet indirect du barrage de Diama, accentue cet ensemble d'effets négatifs, du fait du lessivage des sols et l'extensification des périmètres irrigués.

La salinisation des terres, projet central de cette thèse, s'inscrit dans cette série d'impacts dans un contexte où l'irrigation est pratiquée sans système de drainage adéquat et sans assistance pour certains, des services de l'État.

Des travaux antérieurs (BÈYE (1972), BOIVIN (1993), CEUPPENS et al. (1997), HAMERLYNCK et al. (2003), LE BRUSQ (1980), MAYMARD (1960) et WADE (1998)) ont déjà souligné l'impact de la qualité de l'eau souterraine et des activités agricoles sur la salinisation des terres. L'étude de salinité dans le delta du Sénégal qui fait l'objet de cette thèse s'inscrit dans cette démarche scientifique de compréhension du phénomène qui est de plus en plus problématique. Mais dans le contexte du delta du Sénégal marqué par des « mutations agraires et sociologiques » cette première explication paraît *a priori* insuffisante. C'est la raison pour laquelle

une nouvelle approche de la salinité par « *le territoire de l'eau* » nous paraît utile. En effet, la salinisation est un dégât collatéral causé par la mise en place d'un « territoire hydraulique » inabouti où l'on a apporté des hommes et voulu mettre en place des pratiques agricoles nouvelles, mais sans savoirs locaux à même d'éviter les manques de maîtrise de l'eau et des sols. Cette nouvelle hydraulique a favorisé le passage du traditionnel à l'agriculture irriguée, dans un souci de sécurité alimentaire et de développement régional, ce qui a engagé un processus de territorialisation hydraulique⁽¹¹⁾ dans le delta du Sénégal. Le delta du fleuve Sénégal est à cet effet un « *territoire de l'eau* ». En hydrologie, le concept de « *territoire de l'eau* » a émergé en France dans les débuts des années 2000, mais auparavant « *l'espace hydraulique* » BETHEMONT (1972), forme de régionalisation hydrologique se voulant géosystémique, où le bassin versant apparaissait comme la régionalisation la plus à même de répondre aux nouveaux besoins des usagers de l'eau, a été théorisé. Mais le « *territoire* » supplantant l'« *espace géographique* » dans la pensée géographique, ce concept fut réaménagé puis théorisé en « *territoire hydraulique* » BETHEMONT (2002) au contact des sociétés Méditerranéennes et Africaines (BARTOUT et TOUCHART, 2017). Le territoire hydraulique peut aussi élargir le territoire local en le connectant à « l'aire de consommation pour laquelle est développé l'aménagement » (ALEXANDRE et al., 2004), difficilement envisageable dans ce contexte d'étude.

L'application du concept de territoire de l'eau à l'étude de la salinité dans ce travail renvoie au « *territoire hydraulique* » (celui des hydrauliciens qui désigne l'ensemble des ouvrages hydrauliques), à la gestion, la gouvernance et des politiques de l'eau et aux populations locales à l'échelle du delta du Sénégal.

Cette approche des « territoires salés » de l'eau va d'abord nous conduire à identifier les causes du territoire « salé » et trois d'entre elles ayant été préétablies pour être posées comme hypothèses de travail. Aussi cette démarche géographique pleine et entière nous conduira également à identifier les comportements des agriculteurs pour s'adapter à un environnement caractérisé, d'une part, pour les PIP et les PIV, par la salinité et l'absence de réseaux de drainage, et d'autre part, par le manque d'assistance de la part de l'État (échec du territoire hydraulique). Ces comportements déterminent un ensemble de pratiques individuelles que l'on se propose de présenter.

(11). Le processus de territorialisation découle du concept de la territorialité qui est, « un système de relations qu'entretient un individu ou une collectivité avec l'extériorité et/ou l'altérité à l'aide de médiateurs ou instruments dans la perspective de satisfaire ses besoins de manière autonome » (ZOUNGRANA, 2006). Il est défini par TURCO (1986) comme « l'ensemble des procédures à travers lesquelles un territoire se forme et évolue »

Hypothèse 1 : Influence du type de sol dans le processus de salinisation

Le type de sol détermine largement la vitesse d'évacuation des sels par percolation profonde et la quantité des sels par capillarité. Il existe 2 types de sol dans notre zone d'étude : les *Hollaldé* et les *Fondé*. Deux paramètres physiques essentiels pour les différencier ; la vitesse de percolation et la remontée capillaire. Les valeurs de ces paramètres, déterminées par DECKERS et al. (1996) pour deux types de sols. La source de sels peut être la nappe phréatique, ces sels arrivent dans la partie supérieure du sol par remontée capillaire, lequel influencé par la profondeur de la nappe phréatique (en relation avec la topographie) et la texture des sols. Le type de sol a-t-il une influence sur la salinité globale ? La salinité est-elle plus élevée sur les fondés que sur les *Hollaldé* ou inversement ?

Tableau 1 – Vitesse de percolation et remontée capillaire selon les types de sols

Type de sol	Percolation (mm/jour)	Remontée capillaire (mm/jour) nappe a 2 m	Remontée capillaire (mm/jour) nappe a 1 m
<i>Hollaldé</i>	1 à 2	0,075	0,12
<i>Fondé</i>	3 à 4	0,045	0,075

Dans ce cas, deux situations peuvent se présenter : soit la vitesse de percolation est plus ou moins équivalente pour les deux types de sols et qu'il s'agira de conclure que le type de sol n'a pas d'impact sur la salinité, soit la vitesse de remontée capillaire favorise le phénomène. Dans le premier cas de figure (le type de sol n'a pas d'impact sur la salinité), les variations de topographie peuvent atténuer l'influence du type de sol.

Hypothèse 2 : Influence de l'axe hydraulique le plus proche

La distance par rapport à l'axe hydraulique le plus proche est un facteur de salinisation. Ceci peut nous amener également, dans cette thèse, à nous intéresser aux paramètres physico-chimiques (Ph, CE, t°) de l'eau des canaux d'irrigation et de drainage, car généralement une augmentation de la teneur en sels dans l'eau d'irrigation résultera d'une augmentation de la salinité de la solution des sols. Les dépressions inondées du krankaye de du Boar (entre le Gorom et le Lampar) et le marigot Gorom aval peuvent aussi avoir une quelconque incidence sur le processus de salinisation, car la nappe phréatique (2 m) est plus proche en se rapprochant de ceux-ci. Aussi, la cartographie met-elle en exergue les différents niveaux de salinisation, et une analyse sous SIG permettra d'évaluer la corrélation entre niveau de salinisation et distance à

l'axe hydraulique. Les rapports techniques de la SAED montrent en moyenne une bonne qualité des eaux d'irrigation sur tous les axes hydrauliques du Delta, pour toutes les spéculations avec une conductivité inférieure à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette conclusion diffère selon les axes hydrauliques. Certains axes (exemple du Gorom aval) ont une valeur de CE élevée qui influe plus ou moins sur la qualité des eaux d'irrigation. Cette situation est due au lessivage des sols à proximité du canal après la pluie. Ces rapports montrent également que les drains sont « légèrement salés » à « très salés » ; par conséquent certains peuvent être réutilisés pour l'irrigation du riz et d'autres ne sont pas réutilisables.

Hypothèse 3 : Influence de l'année de mise en culture

Les premiers aménagements agricoles peuvent-être plus salés que les aménagements récents. En exploitant les données issues du SIG de la SAED, il est possible de croiser les mesures de CE sur le terrain avec la première année de mise en valeur de parcelle agricole. Étant donné que le SIG de la SAED ne nous fournit que les informations sur ses superficies aménagées, le reste des informations (les périmètres villageois et les aménagements intermédiaires de type agrobusiness) sera recueilli auprès des exploitants durant nos missions de terrain. Il s'agira dans cette hypothèse de vérifier si oui ou non, la plus ou moins forte salinité dépend de l'année de mise en culture ou le nombre d'années de mise en culture. Les sols récemment mis en culture sont-ils plus salés que ceux anciennement exploités ?

Dans le cas de l'absence d'un système de drainage inexistant, la théorie de la salinisation en fonction du nombre d'années de mise en culture pourrait-il se vérifier ; c'est-à-dire la salinité des sols augmente-t-elle avec le nombre d'années de mise en culture ?

Hypothèse 4 : Les connaissances traditionnelles sont des outils de gestion de la salinité

Les connaissances et les pratiques traditionnelles sont un facteur déterminant dans la gestion de la salinité. Le sens de l'espace, la manière dont le milieu est perçu ne sont que rarement objet d'enquête directe. Les réflexions les plus originales ont toujours été le fait d'hommes de laboratoire, c'est-à-dire que ces réflexions étaient conditionnées par le souci expérimental. Petit à petit, l'échelle change, la curiosité s'oriente vers la perception de l'environnement global (CLAVAL, 1974). La salinité des sols est un phénomène dont les approches diffèrent. En géo-

graphie, cette approche devrait intégrer la perception qui est la fonction par laquelle l'esprit se représente des objets en leur présence, elle apparaît comme une composante de la représentation dont elle se diffère. Il s'agira dans cette hypothèse de vérifier si oui ou non la bonne perception des paysans pourrait être un outil pour mieux expliquer et gérer la salinité des sols. Des travaux comme ceux de KIELEN⁽¹²⁾ ont avancé des résultats concrets.

Les objectifs généraux de la thèse

L'objectif principal de thèse est de faire une analyse géographique de la salinité des sols afin de comprendre les facteurs (hypothèses) qui expliquent la distribution des niveaux de salinité dans les périmètres irrigués. Cet objectif s'appuie sur l'analyse et l'exploitation des données de salinité mesurées, couplées aux traitements d'images.

En objectif secondaire, il s'agira d'évaluer, dans un contexte de la mise en place d'un territoire hydraulique inabouti, les différentes stratégies de gestion individuelle de ce phénomène dans la logique du territoire hydraulique perçu. Il sera question dans cet objectif d'initier une approche de la salinité par territoire hydraulique, approche qui considère la salinité comme une résultante de l'inaboutissement de la mise en place des territoires de l'eau. Il s'appuie sur l'exploitation des données sociales collectées sur le terrain d'étude (enquêtes, entretiens...).

Finalités scientifique et socioéconomique de la thèse

Cette thèse a une double finalité, ce qui justifie l'enjeu et l'importance de son élaboration. Elle trouve sa justification scientifique dans le souci de réduire, dans un pays aux prises avec des difficultés de développement, l'écart entre les institutions de productions scientifiques et les instances de prise de décision. L'OMVS, un organisme de bassin, et la SAED, une institution d'aménagement, mènent tous les deux dans le delta des études sur la salinisation des terres et parfois des travaux sont élaborés sur des problématiques les concernant, mais ces travaux « dorment » dans des bibliothèques. Contribuer à la production de matières scientifiques sur des problématiques que connaît le delta aujourd'hui et avancer des propositions d'aménagement, telle est la finalité scientifique de ce mémoire.

(12). N. KIELEN, 1996. *Farmers' Perceptions on Salinity and Sodicty*. Lahore, Pakistan : International Irrigation Management Institute. 70 p.

À cela s'ajoute une finalité socioéconomique et écologique qui trouve son soubassement dans le volet scientifique des problématiques environnementales (M. B. SECK, 2018). Au plan socioécologique et économique, le bas delta du fleuve Sénégal est une zone écogéographique qui regorge d'une armada de potentialités qu'il faut exploiter et gérer en même temps. D'abord, l'irrigation est le moteur de développement dans la vallée et le delta, grâce à une meilleure maîtrise de la technologie, mais aussi à une maîtrise des phénomènes environnementaux. Aujourd'hui, on sait que le phénomène de la salinisation influence la productivité des terres agricoles qui aura indirectement un impact économique conséquent sur les populations locales, car c'est une zone également qui englobe une grande diversité ethnique caractérisant sa population qui s'organise autour des ressources, qui les socialisent et les valorisent par les activités.

Une démarche transversale et systémique

Cette thèse de géographie se place à cheval entre les sciences et techniques et les sciences humaines et sociales, une approche par le territoire de l'eau, point de convergence entre le milieu physique et les sociétés hydrauliques (LAGANIER et al., 2000). Il s'agira de répondre à une problématique de géographie physique c'est-à-dire la question de la salinisation des terres dans le bas delta du Sénégal. Par ailleurs, cette problématique comporte pour nous trois axes principaux. Le premier axe s'intéresse à la spatialisation dans une portion de terre du delta. La géomatique nous offre une armada de possibilités de cartographie des phénomènes géographiques notamment ceux continus. En effet, notre analyse bibliographique montre et confirme l'utilité de géomatique dans l'étude des phénomènes des terres salées. Le point de départ dans cette étude est l'estimation spatiale de la salinité. Le deuxième axe sera de comprendre toute l'ampleur géographique du phénomène. Dans ce qui précède, nous avons montré que l'artificialisation (création de barrages) du bassin du fleuve Sénégal avait comme impacts d'abord la modification du régime hydrologique du fleuve qui se fait ressentir plus vers l'aval dans le delta.

Cependant, cette modification n'est pas qu'hydrologique ; le géosystème deltaïque a été modifié entraînant ainsi des phénomènes de salinisation secondaire qui vient s'ajouter à une première déjà existante. Spatialiser le phénomène de salinisation ne donne pas à elle seule toute la géographie de la salinité. On essaiera alors d'analyser les paramètres (déclinées en hypothèses) qui permettent de comprendre les taux variables de salinité dans le bas delta du Sénégal. En dernier axe, une analyse sociologique de la salinisation complétera notre étude ; ce qui fera la transversalité et faisant aussi de cette thèse de doctorat un sujet de géographie actuelle. Il

sera question dans l'analyse sociologique d'évaluer les stratégies de gestion individuelles de ce phénomène. La perception de la salinité par les populations locales influence les pratiques locales d'irrigation, mais aussi influence le choix des stratégies (hydrauliques et agronomiques) mises en œuvre.

La structure du document

Cette thèse sera structurée autour de 2 parties organisées en 7 chapitres :

- 1** Première partie : Contextualisation du territoire hydraulique.
 - Chapitre 1 : Concepts et méthodes
 - Chapitre 2 : Les composantes naturelles des territoires de l'eau
 - Chapitre 3 : Le delta : des écosystèmes remarquables et en profondes mutations dans un milieu sahélien
 - Chapitre 4 : Le processus de territorialisation de l'eau dans le delta du Sénégal
- 2** Et une deuxième partie sur la géographie des « territoires salés » de l'eau.
 - Chapitre 5 : Cartographie de la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar
 - Chapitre 6 : Perception et pratiques de gestion de la salinité dans les PIP et PIV
 - Chapitre 7 : Perspectives d'aménagement et de gestion durable des ressources

Première partie

Contextualisation du territoire hydraulique

INTRODUCTION PARTIELLE

Le delta du fleuve Sénégal est une construction naturelle caractérisée par plusieurs éléments : une mise en place géomorphologique qui explique la distribution des pédopaysages (très rizicultivables), un climat sahélien aux précipitations très basses, qui permet de replacer la portée stratégique qu'a la ressource « eau » du fleuve Sénégal (commerce, transport, irrigation), un fleuve au régime fluvial tropical (les crues importantes arrivent entre juin- septembre) dont le bassin est le domaine d'application de plusieurs politiques hydrauliques (la création des barrages pour la mise en valeur agricole).

Cette première partie traite de la contextualisation du delta du Sénégal sur le plan physique et humaine mais aussi sur le plan de la mise sa mise en valeur. Elle aborde les concepts et méthodes favorables à l'étude de la salinité des sols, les caractéristiques physiques et humaines de delta mais également les processus de mise en valeur des terres.

- Dans un premier chapitre (1), nous élaborerons une discussion conceptuelle et méthodologique sur le thème d'étude.
- Il s'agira dans un second temps (2), d'énumérer les caractéristiques physiques des territoires.
- Les deltas sont des milieux hydromorphes abritant souvent des zones humides parfois support de vie des populations. Nous mettrons en exergue, dans un troisième chapitre (3), la particularité des zones humides deltaïques du Sahel sénégalais.
- Et dans un quatrième chapitre (4), nous fixerons les différentes politiques de mise en valeur agricole et leurs impacts sur le delta du Sénégal.

CONCEPTS ET MÉTHODES

Sommaire

1.1	Définitions des concepts	29
1.1.1	Salinité et salinisation	30
1.1.2	Le sol et la terre	32
1.1.3	Le delta	37
1.1.4	Superficie et surface	40
1.1.5	Stratégie et pratique	40
1.2	Cadre opératoire	41
1.2.1	L'objet d'étude	42
1.2.2	Les indicateurs de l'étude	42
1.3	La phase documentaire et de terrain	44
1.3.1	La recherche documentaire	45
1.3.2	Le travail de terrain	46
1.3.3	État des lieux des connaissances sur les sols et la salinité	50
1.4	La géostatistique et la télédétection	53
1.4.1	La géostatistique : des méthodes de normalisation des données jusqu'aux méthodes d'interpolation	54
1.4.2	La télédétection spatiale	58
1.4.3	Les systèmes d'information géographique (SIG)	65
	Conclusion du Chapitre 1	67

Dans ce chapitre seront présentés et discutés les différents concepts utilisés dans cette thèse ainsi qu'un cadre opérationnel et méthodologique, essentiels dans la démarche scientifique. Avant d'utiliser les principaux concepts qui gravitent autour du thème de recherche, nous nous devons, d'abord, de fournir une définition conceptuelle qui est une phase importante de la théorie, en ce qu'elle clarifie par l'extension sémantique et la diversité des approches, différents concepts qui concernent la problématique de la salinisation dans le delta du Sénégal. Autrement, il s'agira de mots-clés qui définissent le sujet de recherche. Ensuite, de montrer les liens entre les hypothèses de recherche, les variables et les indicateurs qui les matérialisent dans un cadre opératoire. La pluralité dans l'usage des données géographiques, des indicateurs, des signes, des caractères, des instruments méthodologiques est telle que le discours géographique est empreint d'ambiguïtés. Par conséquent, il s'agira de fixer, dans cette partie du travail, les indicateurs géographiques permettant de mieux comprendre le phénomène de la salinité (tableau 1.3). Enfin dans une troisième section, il sera question de présenter les démarches, les techniques, les outils et méthodes nécessaires pour la rédaction de cette thèse, tout entrant dans la vérification des hypothèses prédéfinies. La salinisation est une problématique dont les approches méthodologiques, quant à son étude, diffèrent. Dans cette thèse de géographie, cette approche méthodologique part des sciences et techniques géochimiques et géomatiques (télédétection, analyse de sol) et va jusqu'aux méthodes humaines et sociales (socialisation du risque de salinité, enquête de terrain, pratiques et perception). Ces méthodes sociales sont aujourd'hui de plus en plus intégrées dans l'analyse des phénomènes en géographie physique.

1.1. Définitions des concepts

La formulation de notre sujet « *Les territoires salés* » de l'eau du delta du Sénégal : *Cartographie et pratiques de gestion dans les périmètres irrigués du Gorom-Lampsar* » fait ressortir différents éléments clés. Ce libellé sous-entend également quelques concepts qui mériteraient une conceptualisation, car dans le travail ceux-ci, dont l'utilisation est un peu ambiguë, sont utilisés. Nous nous sommes permis de présenter dans ce qui suit ces concepts : **salinité, salinisation, sol, delta, superficie agricole, surface agricole.**

1.1.1. Salinité et salinisation

Dans le langage courant ces deux termes sont utilisés, l'un pour qualifier un état, l'autre un processus. Cependant, un certain flou subsiste souvent, qu'il convient de surmonter. Dans les définitions les plus courantes, la **salinité** est caractéristique naturelle, car un grand nombre de sols contiennent des concentrations élevées à l'état naturel de sels hydrosolubles, dont les sulfates de sodium (Na_2SO_4), de calcium (Ca) et de magnésium (Mg), alors que la **salinisation** est un processus engagé par l'homme et le climat, qui augmente la salinité du sol. Cependant, la salinité naturelle est le résultat d'une « salinisation » sédimentaire d'origine marine au cours de laquelle d'importantes quantités de sels solubles sont mobilisées par les écoulements, donc elle est aussi le résultat d'une salinisation déterminée par la variable temps.

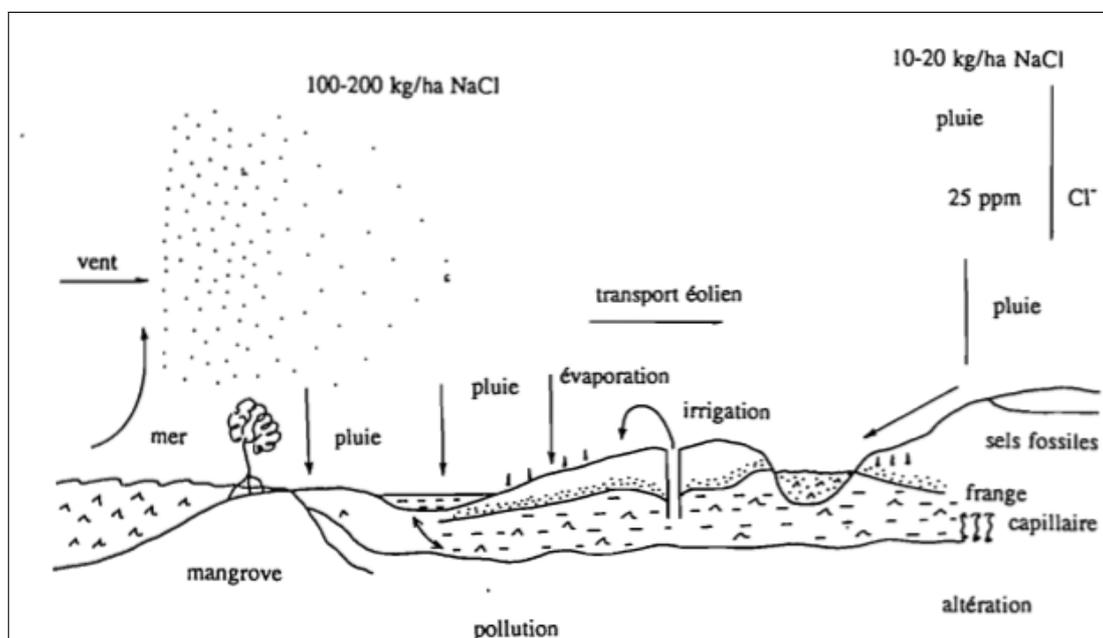


FIGURE 1.1 – Situation des sels dans le paysage (JOB, 1992a)

À très faible concentration, ces sels naturels sont absorbés comme élément nutritif par les végétaux. Elle est alors une variable importante du biotope et non une contrainte, et on parle de cette dernière qu'en faisant référence à la salinisation (la salinisation causée par l'homme). Le dictionnaire **Larousse** la définit comme « une augmentation de la teneur en sels d'un sol » ; on parle ici de seuil et c'est pourquoi elle est toujours assimilée à dégradation, menace, problème, contrainte à la fois pour la biodiversité et à l'économie. Cette augmentation a comme seuil, la salinité naturelle (200 μs). Elle est toujours mise en rapport avec les pratiques humaines, alors que dans certains milieux l'accumulation naturelle des sels en surface peut être liée à une

augmentation des températures.

Aujourd'hui, elle est perçue comme une contrainte socioéconomique qui aurait un coût et celui-ci étant très difficile à évaluer. La salinité naturelle est géomorphologique, pétrographique ou hydrodynamique et désigne une seule forme de salinité c'est-à-dire la présence de composés chimiques et la salinisation primaire désigne l'apparition de ces composés sous l'influence du climat.

ENCADRÉ 1.1 – La salinisation des terres dans le monde

Le développement des technologies agricoles et une meilleure appréciation de la connaissance existante, mais sous-utilisée, de gestion de ressources, seront les points cruciaux pour satisfaire les besoins écologiques et les demandes alimentaires prévues de la population croissante. Un défi important pour les prochaines décennies réside dans le fait que les environnements de production sont instables et dégradés. Les causes techniques les plus importantes à l'origine de la diminution de la production sur de nombreux périmètres irrigués, particulièrement dans les zones arides et semi-arides, ou de désastre sur de grandes surfaces en agriculture pluviale, sont l'engorgement, la salinisation et la sodisation. Il est estimé, à partir de diverses données disponibles que : *le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à cause de la salinité du sol*. Bien que de nombreux pays utilisent les terres salinisées en raison de leur proximité aux ressources en eau et de l'absence d'autres contraintes environnementales, il y a un besoin clair d'une base scientifique solide afin d'optimiser leur utilisation, de déterminer leur potentiel, productivité et durabilité pour cultiver diverses cultures, et d'identifier les pratiques de gestion intégrées appropriées. La gestion de la salinité exige une combinaison de pratiques agronomiques spécifiques, des caractéristiques du sol, de la qualité de l'eau et des conditions locales, (...) et les systèmes de cultures existants. Le contrôle de la salinité peut généralement se réaliser de diverses façons, particulièrement en agriculture irriguée. Cependant, plusieurs pratiques peuvent être combinées au sein d'un système intégré qui fonctionne de manière satisfaisante.

Source : FAO, CISEAU et al. (2006) : *Conférence électronique sur la salinisation : extension et stratégies de prévention et réhabilitation*

La **salinisation** est une notion générique qui désigne non seulement l'accumulation de ces sels naturels (processus d'apparition des sels naturels en surface d'un milieu originellement

salé), mais aussi la sodisation et l'alcalinisation. La sodisation se traduit par une augmentation de la teneur en (Na) sur le complexe d'échange cationique (Exchangeable Sodium Percentage, ESP). L'alcalinisation est caractérisée par une alcalinité résiduelle (ou Residual Sodium Carbonate) positive par mesure du pH du sol. Ces trois processus sont également appelés « formes de salinisation ». Dans ce travail, la salinisation des sols désigne les deux voies de salinisation (salinisation et sodisation), car la troisième moins présente dans le delta et moins contraignante pour l'agriculture.

1.1.2. Le sol et la terre

Le **sol** est couramment utilisé dans son sens premier : ce qui est sous nos pieds, et désigne autant la couche meuble qui est cultivée que l'ensemble de la croûte terrestre (AUBERT et BOULAIN, 1972 ; BAIZE et al., 1995 ; M.-C. GIRARD, WALTER et al., 2011). C'est l'épiderme vivant de la Terre, la partie superficielle à l'état naturel ou aménagé par l'homme. Pour le pédologue il désigne la partie supérieure qui constitue la croûte terrestre issue de la métamorphose de la roche mère, sert de trait d'union entre la lithosphère et la biosphère (AFES et al., 2009 ; BOULAIN, 1975 ; BOULAIN, 1997).

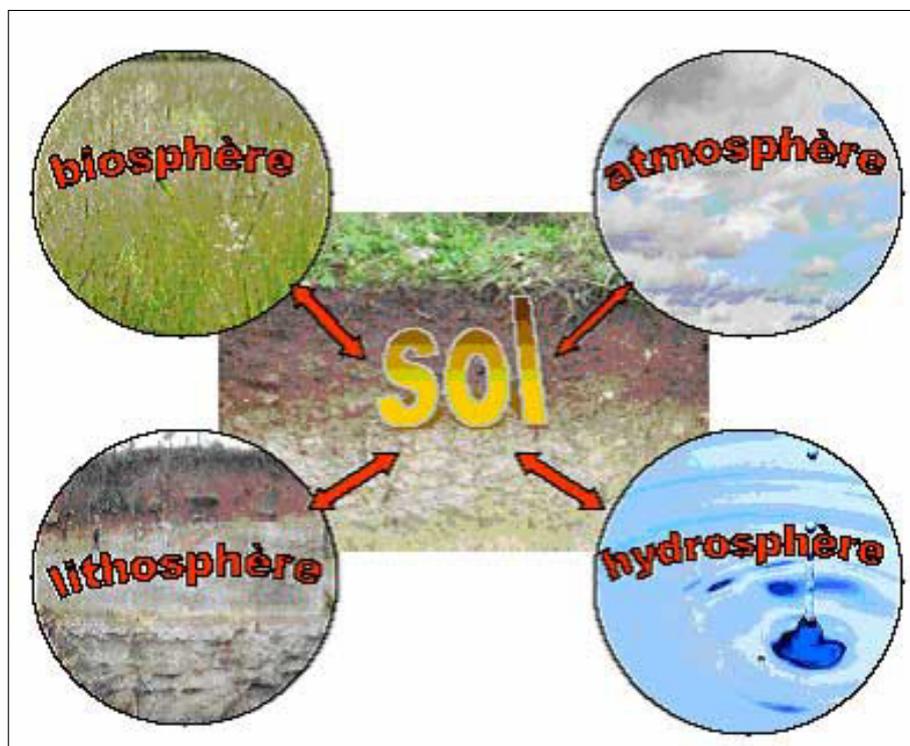


FIGURE 1.2 – Le sol : interface vis-à-vis des autres compartiments environnementaux - BELLEC et al. (2005)

Le sol n'est pas la croûte terrestre, il sert de support au développement d'un écosystème au stockage de l'azote et du carbone de l'atmosphère. D'après BOULAIN (1983), DOKOUT-KHAEV, le père de la pédologie, avait été le premier à considérer le sol sous un angle pédologique, et qui le définit comme « *un corps de la nature comme les plantes et les animaux. Il est indépendant et variant. C'est le résultat cumulé au cours des âges de l'action du climat et des êtres vivants sur les roches nuancée par le relief, et dans certains cas les nappes d'eau* ». Pour le géomorphologue, le sol dépend de l'évolution géomorphologique du milieu (SY, 1995) et se définit comme tributaire des unités géomorphologiques. Autant la pédologie considère le sol comme un ensemble d'horizons-éléments autant la géomorphologie le considère comme une résultante géomorphologique. Pour l'hydrologue, le sol est un lieu stockage et un espace de transit des eaux continentales dans le grand cycle naturel de l'eau. Pour la géotechnique, le sol est constitué de tout le matériau plus ou moins meuble : couverture pédologique et altérée, qui se situe au-dessus de la roche non altérée. Les agronomes avaient observé que toute plante puisait dans le sol les éléments nutritifs dont elle avait besoin pour son développement. Le sol est perçu donc par l'agronome comme un support pour la végétation et une réserve pour son alimentation (DORE et al., 2006). Une définition plus complète de la norme ISO 11074 le définit ainsi : « les différentes fonctions du sol : contrôle des cycles des éléments et de l'énergie en tant que compartiment des écosystèmes, support des plantes, des animaux et de l'homme ; base des constructions et des immeubles ; production agricole ; rétention de l'eau et des dépôts ; constitution d'une réserve génétique ; conservation en tant que mémoire de l'histoire et de la nature, protection en tant qu'archive archéologique et paléocéologique ». Finalement, le sol est une entité naturelle (non construit par l'Homme, mais support de vie des hommes), affleurant à la surface de la Terre et souvent meuble résultant de la transformation au contact de l'atmosphère, de la biosphère et de la lithosphère, issue le plus souvent d'une roche mère, sous l'influence de processus biologiques, physiques et chimiques. Pour le géographe, le sol est géomorphologique, biologique, hydrologique, mais en plus cela il est un objet géographique, une matière de la pensée géographique caractérisée par sa spatialité (il est matériel, localisable et relatif), sa constructivité et sa complexité systémique.

Les sols dans le contexte du delta sont hydromorphes (qui montrent des marques physiques de saturation régulière en eau) et halomorphes (dont les propriétés sont affectées par la présence de sels). Le fait que le delta soit formé en milieu originellement marin plus ou moins confiné a entraîné une incorporation de sels dans tous les paysages. On retrouve aujourd'hui des

traces de sel jusqu'à 350 km de l'embouchure soit dans les sols, soit dans les nappes partout présentes en profondeur. Après la construction des digues et le barrage anti-sel, le facteur pédogénétique principal est la fluctuation de la nappe phréatique causée par l'infiltration de la pluie et de l'eau d'irrigation.

- Si la nappe phréatique monte, les sels des couches supérieures s'accumulent à la surface par des forces capillaires. Dans les périmètres irrigués, ces sels peuvent être évacués par une percolation de l'eau d'irrigation et/ou par un lessivage de surface (salinisation - désalinisation).
- Si la nappe phréatique descend trop bas dans le profil, des couches contenant de la pyrite peuvent être exposées à l'oxygène (acidification).

Dans le delta du Sénégal, la géomorphologie a des conséquences profondes sur les sols. En effet la géographie des sols et la pédogenèse actuelle sont fortement déterminées par la physiographie du delta et par le régime hydrique qui y règne. Il est évident que les grands changements du système hydrologique engendrés par la construction des digues et le barrage anti-sel ont démarré de nouvelles pistes évolutives dans les caractéristiques des profils pédologiques (SAED, 1993). Ainsi la classification locale (*Hollaldé, Fondé*) des différents pédopaysages qu'on peut distinguer dans le delta est liée au relief (tableau 1.1)

Tableau 1.1 – Les pédopaysages du delta du fleuve Sénégal - SAED (1993)

Paysage	Physiographie	Texture	Unité pédologique
Dunes, et cordons littoraux	<i>Jeeri</i>	Sable	Cambic Arénosols
Terrasses marines et fluviales	-	Sablo-argileux	Eutric Cambisols
Levées et delta de rupture	<i>Fondé</i>	Argilo-sableux	Eutric Fluvisols
Cuvettes	<i>Hollaldé</i>	Argile	Salic Fluvisols

Les types de sols sont ainsi classés en fonction de leur texture et de leur structure (voir ci-dessous, tableau de classification des sols, source : OMVS (2006)) :

Tableau 1.2 – Classification détaillée des types de sols du delta du Sénégal - SAED (2009)

Nomenclature locale	Méthode ORSTOM	Méthode FAO
<p><i>Hollaldé</i> : 36 % du potentiel irrigable</p> <ul style="list-style-type: none"> - contiennent 50 à 75 % d'argile (sont argileux) - mauvais drainage, favorables à riziculture - structure prismatique à sols sans structure - supportent la submersion et sont très difficiles à travailler. 	<p>Vertisol et paravertisols / Vertisols topomorphes non grumosoliques</p> <p>Hydromorphes / Gley de surface et d'ensemble</p>	<p>Chromic vertisols</p> <p>Eutric Gleysols</p>
<p><i>Faux- Hollaldé</i> : 31 % du potentiel irrigable contiennent 30 à 50 % d'argile</p> <ul style="list-style-type: none"> - mauvais drainage - sols sans structure, favorables à la riziculture et autres cultures. 	<p>Vertisols et paravertisols / Vertisols topomorphes non grumosoliques</p> <p>Hydromorphe / pseudogley à taches et Concrétions</p> <p>Peu évolué / d'apport hydromorphe</p>	<p>Chromic vertisols</p> <p>Eutric fluvisols</p> <p>Eutric fluvisols</p>
<p><i>Fondé</i> : 33 % du potentiel irrigable- teneur en argile de 10 à 30 % (sont limoneux)</p> <ul style="list-style-type: none"> - drainage moyen structure cuboïde - favorables à toutes cultures autres que le riz, sols filtrants. 	<p>Peu évolué / d'apport hydromorphe</p> <p>Hydromorphe / pseudogley à taches et Concrétions</p>	<p>Eutric fluvisols</p> <p>Eutric fluvisols</p>
<p><i>Diéri</i> : contiennent 80 à 90 % de sable (sols sablonneux)</p> <ul style="list-style-type: none"> - structure monogranulaire - supportent toutes les cultures autres que le riz. 	<p>Sols isohumics / brun rouge subaride</p> <p>Minéral brut / d'apport éolien</p> <p>Minéral brut / d'apport fluviale</p>	<p>Haplic xenosols</p> <p>Eutric regosols</p> <p>Eutric fluvisols</p>

Ces types de sols précités sont supports des terres cultivées dans le delta du Sénégal. La **terre** quant à elle est d'une dimension plus petite et renvoie à la matérialité biophysique des sols et à l'immatérialité sociojuridique du foncier. Sa définition est plus humaine que physique (à la différence du **sol**). Il désigne une portion de sol composé d'horizons. Ses divers emplois (la terre de mes ancêtres, le prix des terres, les propriétaires terriens) font lui un bien destiné à l'utilisation de l'homme (terres irriguées, terres emblavées, terres cultivées). Dans ce contexte agricole, on parlera plus de la salinisation des terres. La salinisation des sols désigne ici, toutes les terres (agricoles et non agricoles) du delta du Sénégal (GANTET et al., 2017).

Le sol fait partie du « paysage » et ne peut en être dissocié. En conséquence, la démarche du pédologue est globale, systématique (BOULAINÉ, 1975). Ce dernier fait une large place à la méthode expérimentale, observation et mesure des faits, hypothèses, expérimentations, théories, définitions, tout en apportant un soin tout particulier dans le choix de l'objet à étudier. Il s'agit là d'une attitude nouvelle engendrée par la nécessité de construire des cartes lorsque, « à partir du deuxième tiers du XX^{ème} siècle, les opérations de mise en valeur de nouvelles terres se sont multipliées dans le monde entier ». De fait, l'ensemble carte-légende-notice constitue « le document ultime de l'étude pédologique », « la forme la plus complète et la plus concentrée que les pédologues donnent à leurs travaux. (LE BERRE, 1976).

Les opérations de mise en valeur des terres agricoles du delta du fleuve Sénégal sont accompagnées de l'établissement de cartes pédologiques, de cartes d'aptitude des terres à l'irrigation (FAO et SEDAGRI, 1970). Les technologies géomatiques de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle ont facilité l'inventaire et la surveillance diachronique et exhaustif du des sols (M.-C. GIRARD, WALTER et al., 2011). De nos jours la télédétection facilite l'identification des terres salées et améliore la cartographie. On distingue des effets directs sur la réflectance avec la présence de sels en surface (croûtes ou efflorescences salines), et des effets indirects sur la structure (pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes (MOUGENOT et al., 1993).

L'approche globale, historique et géographique, du sol a été le fait de V. V. Dokoutchaev (1846-1903) et de ses élèves. La pédologie a en effet connu un développement considérable au XX^{ème} siècle. Le terme *Soil Science*, recouvre tout le champ conceptuel des phénomènes relatifs au sol, quelles que soient les techniques et les méthodes que l'on utilise pour l'étudier (BOULAINÉ, 1983).

En français, le mot pédologie recouvre tantôt toute la science du sol comme le mot pédologue désigne tous ceux qui en font, tantôt une approche restreinte à l'étude de la pédogenèse, à la cartographie et à la caractérisation du sol.

1.1.3. Le delta

L'embouchure est l'endroit où un cours d'eau se jette dans l'océan. Il existe deux types d'embouchure : l'estuaire, une embouchure en général à bras unique remontée par la marée, et le delta qui commence souvent à une topographie un peu plus élevée où le fleuve dépose ses sédiments et se divise en plusieurs bras entre lesquels se localisent des zones humides. Pour GUILCHER (1954), le père des écrits des sur les deltas en France, « *un delta est une embouchure de fleuve où les alluvions fluviales s'accumulent, au lieu d'être redistribués en majorité sur une grande étendue par la mer* ». Il s'appelle delta par analogie avec sa forme triangulaire de la lettre grecque (Δ), mais tous les deltas qui n'ont pas cette forme sont dits « deltas non fonctionnels ». Le cas du delta du Sénégal qui infléchit vers le sud pour se jeter vers le sud de l'embouchure paléogéographique. La multiplicité des bras n'est pas critère de delta, certains n'ont qu'un bras et d'autres en ont plusieurs (MIOSSEC, 2004; PINOT, 1998); c'est l'avancée qui est un critère (GUILCHER, 1954). Le mot « delta » remonte à l'Antiquité (Hérodote 482 – 425 av. J-C) fut probablement le premier à l'avoir utilisé pour désigner la plaine alluviale du Nil (LARCHER, 1802). Le terme continua à évoluer et devint nom commun dans les dictionnaires. En géomorphologie, pédologie, selon beaucoup d'auteurs, la forme triangulaire n'est plus un critère de définition des deltas. Pour FANCHETTE (1997), "*un delta est une embouchure où le fleuve dépose les sédiments limons et sables qu'il a transportés depuis les montagnes d'où il prend sa source jusqu'à la mer dans laquelle il se jette. La pente qui donnait au courant la force d'entraîner les sédiments s'affaiblit rapidement à l'approche de la région côtière, la vitesse diminue et, pour poursuivre sa course, le fleuve doit se diviser en plusieurs bras. Incapable d'entraîner plus loin sa charge de sédiments, le fleuve se met à façonner de nouvelles terres*". Il ressort de FANCHETTE que la définition du delta est d'ordre pédologique, hydraulique et hydrologique, mais aussi topographique. Ces caractéristiques confèrent aux deltas une connotation humaine, car ils ont partout et toujours engendré d'importantes densités de population. Un delta se définit aussi par ses riches terres et fertiles et ses autres caractéristiques naturelles. TOURRAND (2000) dans ouvrage intitulé « *L'élevage dans la révolution agricole au Waalo, delta du fleuve Sénégal* » associe le terme delta à celui de *Waalo*, la plaine deltaïque des terres argileuses du delta

vouées au pastoralisme et à la riziculture.

Un delta comporte 3 des structures morphologiques (BEAUCHAMP, 2005 ; PASKOFF, 1998) (Figure 1.3 A) : la *plaine deltaïque*, la partie visible où se déposent les sédiments argileux, le *front du delta*, partie sous-marine peu profonde où se déposent les sédiments plus grossiers en lits subhorizontaux, et le *prodelta* au contact de l'action des vagues et des courants marins, où les sédiments se déposent en lits à pente accentuée.

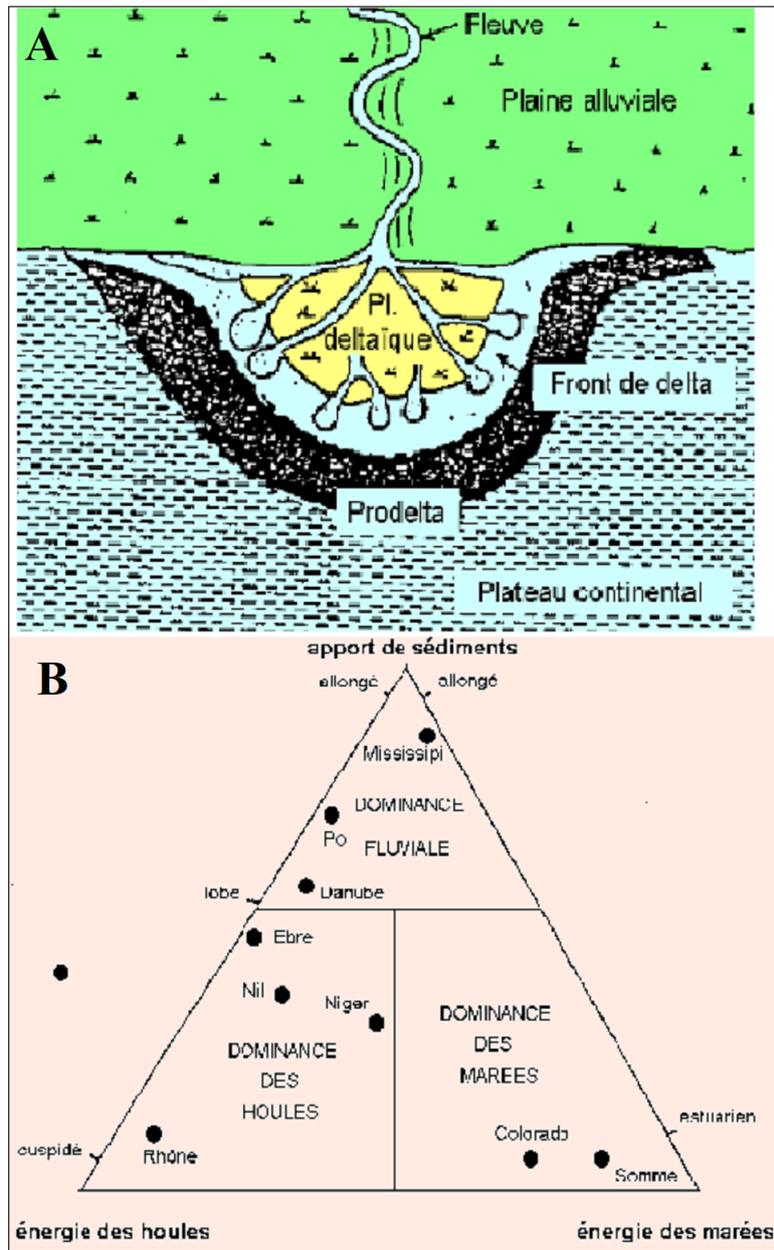


FIGURE 1.3 – A. Morphologie d'un delta. B. Classification des deltas d'après BEAUCHAMP (2005)

1.1 DÉFINITIONS DES CONCEPTS

Mais, dans l'emploi de tous les jours du mot delta, on désigne souvent la plaine deltaïque. Cette forme triangulaire n'est pas un critère de définition du mot "delta", c'est une entité s'inscrivant dans un géosystème comme l'atteste VERGER (1991) "*les deltas, constructions fluviales, sont d'abord déterminés par les conditions géomorphologiques, climatiques et hydrologiques de leurs bassins versants*". C'est une interface eau-terre.

Trois facteurs entrent en jeu dans la typologie des espaces deltaïques : l'action des vagues, l'action tidale et l'action fluviale (CARRÉ, 2001)(figure 1.3 B)

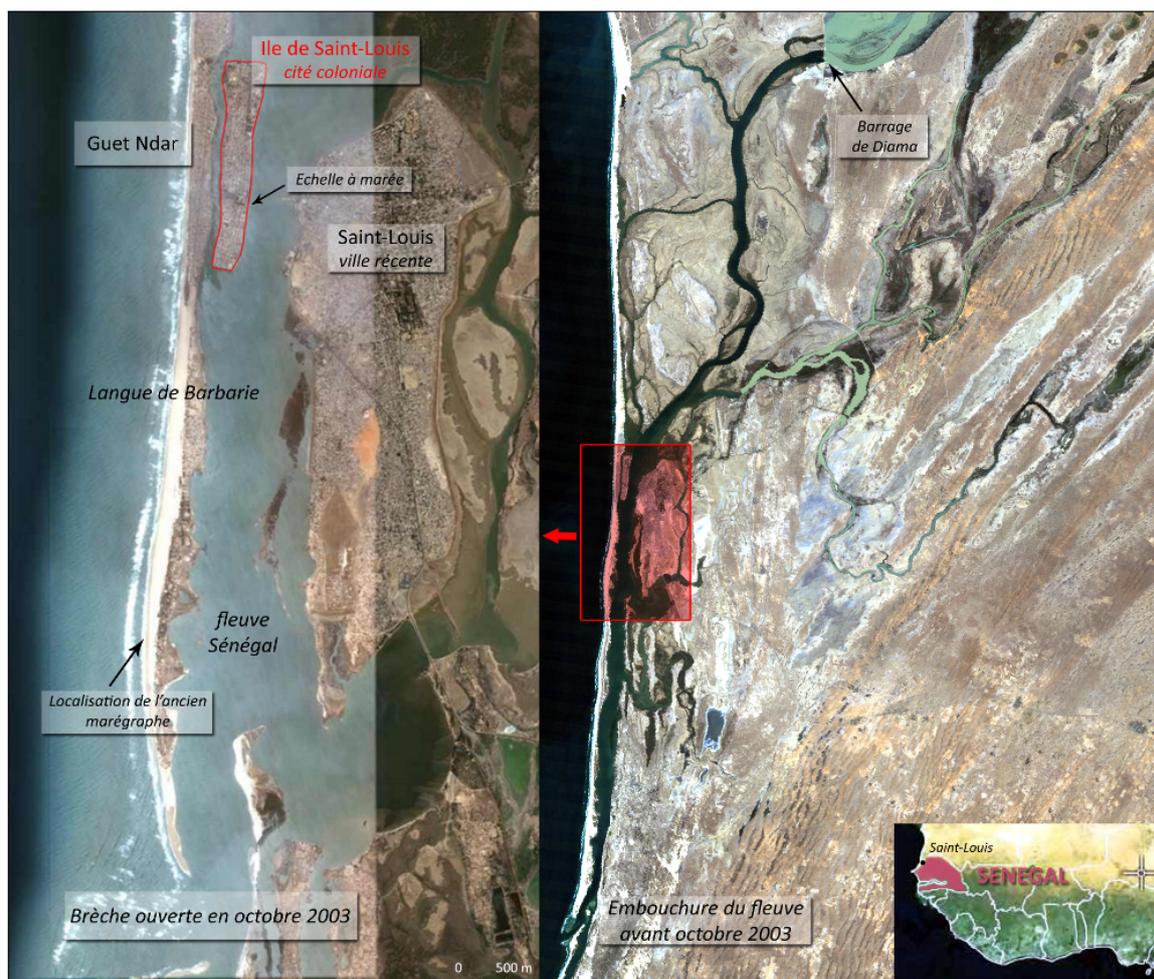


FIGURE 1.4 – L'embouchure du delta du Sénégal avant et après l'ouverture de la brèche (vue par satellite) P. DURAND et al. (2010)

Dans le cas des deltas à dominance de vagues : l'action des vagues se fait sentir sur le front du delta ; les sables sont remaniés et forment des cordons littoraux et des plages ; les particules fines sont dispersées vers le large. Les distributaires sont peu nombreux. Exemple : le Rhône, le fleuve Sénégal. Dans le delta du Sénégal, la faiblesse d'action fluviale (dû à la faiblesse des débits naturels) laisse la place à l'action des houles et de la marée, car incapable

de maintenir plusieurs embouchures (SY, 1995), ce qui assure la distribution des sédiments le long des rivages et des flèches littorales se développent, la mise en place d'une embouchure estuarienne au sud de la ville de Saint-Louis (Figure 1.4).

1.1.4. Superficie et surface

La superficie (acreage, area en anglais) d'après le *Glossaire de l'agriculture anglais / français*⁽¹⁾, désigne une surface, un territoire, un bassin, une zone ou région. On sous-entend dans cette définition que c'est une question d'échelle. La surface est la partie affleurante d'un objet et la superficie est une question géométrique. La surface agricole est un concept destiné à évaluer le territoire consacré à la production agricole. Elle est souvent de petites dimensions tandis qu'une superficie agricole est plus grande (on parle de superficies agricoles pour désigner l'ensemble des terres mises en valeur d'un territoire). En agronomie, la SAU (utilisé à partir de 1963 et qui a remplacé le terme superficie agricole utile) est un instrument statistique pour l'évaluation agricole (OCDE, 1999). Dans le cadre de notre étude, à l'échelle du système d'irrigation, on parle de Surfaces Non Exploitées (SNE), de Surfaces Exploitées (SE) et de Surfaces Abandonnées (SAB).

1.1.5. Stratégie et pratique

Une *stratégie* est la manière d'élaborer, de diriger et de coordonner des plans d'action afin d'aboutir à un objectif déterminé, programmé sur le court ou le long terme. Le concept de stratégie vient du langage militaire (FAGNANI, 1990). Selon le dictionnaire Littré⁽²⁾, la stratégie est « l'art de préparer un plan de campagne, de diriger une armée sur les points décisifs ou stratégiques, et de reconnaître les points sur lesquels il faut, dans les batailles, porter les plus grandes masses de troupes pour assurer le succès ». Les stratégies dans cette thèse désignent un ensemble d'actions coordonnées ou de conduites articulées entre elles en fonction d'un but ou pour arriver à un résultat précis (qu'elles soient élaborées par des individus, des familles ou des collectivités).

Le concept de *pratique* est utilisé en géographie sociale pour désigner le rapport de la société avec son espace. Les pratiques permettent de situer l'unité du vécu spatial de chaque individu (DI MÉO, 2014). Les pratiques s'inscrivent dans une logique individuelle. Les pratiques

(1). OCDE, 1999. *Glossaire de l'agriculture anglais / français*. OCDE. Paris. 600 p.

(2). LITTRÉ, 2019. *Stratégie - définition, citations, étymologie*. In *Dictionnaire Littré*.

de gestion, ici sont, par défaut, individuelles.

Cette analyse des concepts montre combien les termes gravitant autour de notre sujet sont polysémiques. Cette polysémie est liée aux différentes approches de chaque discipline qui donne une idée de son objet. La géographie elle, a la particularité d'être au milieu de toutes approches, elle est même « une absence de spécialisation ». La géographie intègre grandement la dimension humaine dans ces/ses concepts (des objets), car tout objet géographique a une dimension humaine et physique (COLY et al., 2003).

1.2. Cadre opératoire

Le cadre conceptuel établi, il est maintenant alors question d'entamer la première partie de la méthodologie qui est l'ensemble des méthodes, outils, techniques et procédures qui seront mis en œuvre pour la vérification des hypothèses de recherche. Aujourd'hui, la réflexion géographique doit engager une démarche méthodologique transversale et systémique, car l'objet d'étude en géographie, pris isolément et minutieusement traité perd tout son sens s'il n'est pas inscrit dans une démarche globalisante. C'est pourquoi notre approche doit engager un cadre alliant géographie physique (méthodes géomatiques) et géographie humaine et sociale (perceptions et pratiques sociales) (tableau 1.3).

Avant de parler des méthodes géomatiques et sociales pour répondre aux problématiques posées dans cette thèse de doctorat, nous parlerons ici, d'opérationnalisation des concepts qui gravitent autour de nos hypothèses de recherche et qui permettent de mieux comprendre la salinité et la salinisation des sols dans le delta du Sénégal. L'utilisation des indicateurs nous permet de mieux saisir la problématique sans l'élaboration d'une méthodologie. Il permet de montrer les liens entre les hypothèses, les variables et les indicateurs qui les matérialisent. L'indicateur construit un système d'informations autour de l'objet.

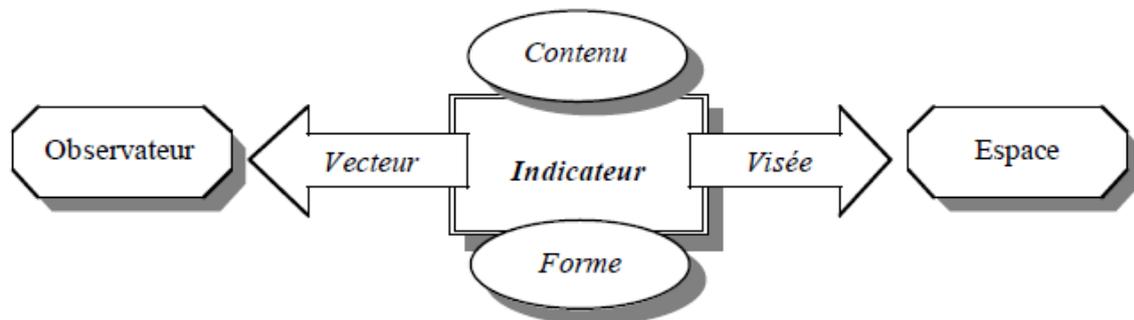


FIGURE 1.5 – Indicateur, objet et système d'information

1.2.1. L'objet d'étude

Les disciplines scientifiques peuvent partager des outils, méthodes et des stratégies cognitives, mais s'individualisent par l'objet. Et aucune science ne dispose d'objet propre, mais chaque discipline donne son point de vue son objet (COLY et al., 2003). La salinité est un objet qui fonde le statut scientifique de cette thèse. Elle est déterminée par sa spatialité⁽³⁾, sa constructivité⁽⁴⁾ et sa complexité systémique⁽⁵⁾ et est représentée par des indicateurs géographiques (tableau 1.3).

1.2.2. Les indicateurs de l'étude

Dans la famille des informations géographiques, on parle de signe, de variable, de donnée, de caractère d'observation sans mettre l'accent sur l'indicateur (COLY et al., 2003). Un indicateur remplit deux fonctions principales : la synthèse des nombreux paramètres normalement nécessaires pour rendre compte d'une situation ; la simplification de la compréhension et de l'interprétation des résultats pour l'utilisateur. L'indicateur montre et vise du « doigt » un objet géographique. Il est dans sa nature d'indiquer alors que celle de la variable est de varier, du caractère de caractériser, de la donnée d'être donné... L'indicateur montre, et place l'objet dans l'espace, et cette nature spatialisante qui fait de lui un outil éminemment géographique. L'indicateur renseigne un observateur, il relie l'objet spatial à un sujet observant l'espace.

(3). L'objet géographique est spatial, ce qui signifie par élargissement progressif du sens qu'il s'agit d'un lieu ou d'un ensemble de lieux avec des attributs, dont la localisation matérialisée de manière mathématique. Cela signifie aussi qu'il est là (la matérialité) et entretenant des relations fonctionnelles avec d'autres objets (la relativité)

(4). L'objet géographique est le fruit d'un construit, une création de procédures cognitives

(5). L'objet est composé de parties entretenant des relations complexes entre elles et avec son environnement.

Tableau 1.3 – Le choix des indicateurs de recherche

Hypothèses	Dimensions	Variables	Indicateurs
Hypothèse 1 : Influence du type de sol dans le processus de salinisation	— Naturelle	<ul style="list-style-type: none"> — Type de sol (<i>Hollaldé, Fondé</i>) — Géomorphologie — Topographie — Nappe phréatique 	<ul style="list-style-type: none"> — Carte des sols — Carte de salinité — Photo- interprétation — Percolation — Remonté capillaire — Hydrodynamique de la nappe salée — État de surface (SNE, SE, SAB)
Hypothèse 2 : Influence de l'axe hydraulique le plus proche	— Naturelle	<ul style="list-style-type: none"> — Distance et proximité — Hydrographie 	<ul style="list-style-type: none"> — Réseaux d'irrigation — Réseaux de drainage — Cartes de salinité — Photo- interprétation — Paramètres chimiques de l'eau — États de surface (SNE, SE, SAB)

Hypothèse 3 : Influence du nombre d'années de mise en culture	<ul style="list-style-type: none"> — Sociale — Anthropique 	<ul style="list-style-type: none"> — Type d'aménagement des superficies — Historique des aménagements 	<ul style="list-style-type: none"> — Cartes de salinité — Cartes des types d'aménagement — États de surface (SNE, SE, SAB)
Hypothèse 4 : La prise en compte des connaissances traditionnelles	<ul style="list-style-type: none"> — Sociale 	<ul style="list-style-type: none"> — Stratégies de gestion — Efficacité des stratégies de gestion 	<ul style="list-style-type: none"> — Perception — Pratiques culturelles

Sans l'élaboration des diverses méthodes utilisées, cette section permet de comprendre et de replacer le contexte de la salinité des sols à travers ses propres indicateurs. Cependant, ceci n'est qu'une pré-méthodologie car pour mieux répondre à problématique, une phase sérieuse de recherche documentaire et de terrain, couplée d'une phase pratique de traitement, s'impose.

1.3. La phase documentaire et de terrain

La phase documentaire et celle de terrain sont assez confondues, car le terrain principal de documentation est aussi celui de l'étude. Avec l'appui financier du Laboratoire CEDETE, nous avons pu, durant les trois premières années de cette thèse, effectuer chaque année des missions de collectes de données. Aussi, une convention signée par mes directeurs nous a permis d'effectuer un stage de recherche à la SAED. Cette phase importante s'est organisée autour de deux points : une phase de recherche bibliographique et une phase de collecte de données de terrain.

1.3.1. La recherche documentaire

Au début de ce travail, nous avons effectué une recherche documentaire qui a permis de vérifier qu’il existait une grande production scientifique sur le delta du Sénégal en général et sur la problématique de la salinité en particulier. Le delta du Sénégal fait partie des zones les plus visitées par les chercheurs en Afrique, néanmoins, la zone engendre toujours des contraintes quant à la récolte de données. Cette recherche documentaire concerne aussi une large production scientifique sur la problématique des deltas et/ou de la salinisation dans d’autres contextes. Nous avons commencé en France par la consultation de la bibliographie universitaire à la bibliothèque universitaire d’Orléans et dans d’autres plateformes de documentation universitaires françaises. Et une riche documentation a été acquise avec l’orientation de mes directeurs de thèse. Ensuite, à l’international, nous avons fréquenté au Sénégal, les bibliothèques universitaires des Universités Gaston BERGER de Saint-Louis (UGB) et Cheikh Anta DIOP de DAKAR (UCAD) et les archives de la SAED et celles de l’OMVS à Saint-Louis du Sénégal. Une grande variété de documents a été collectée sur la base de ressources documentaires de l’institut de Recherche pour le Développement (IRD) ([HORIZON / PLEIN TEXTES](#)). L’IRD, un acteur majeur de la science et du développement est très impliqué depuis des décennies dans la recherche-développement dans le delta du Sénégal. L’exploration de la bibliographie est synthétisée dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 – La recherche bibliographique de l’étude

Type de document	Apports sur la recherche (fort à faible)	Pourcentage dans la documentation
Thèses et mémoires	Faible	15%
Ouvrages généraux	Moyen	15%
Rapports de recherche	Fort	30%
Articles	Fort	40%

Cette recherche documentaire a fixé les fondements scientifiques de cette thèse. Elle s’est principalement déroulée lors des deux premières années et a été enrichie par d’importantes missions de terrain dans la zone d’étude.

1.3.2. Le travail de terrain

Le « terrain » est en quelque sorte une « obligation » toujours présente dans la recherche en géographie, car l'importance qui lui est donnée pour asseoir une recherche n'est plus à démontrer. Il en est de même des représentations sociales de l'espace (BAILLY et al., 2003) qui peuvent être approchées au moyen de questionnaires traités par des méthodes statistiques (GOELDNER-GIANELLA et al., 2010). Pour vérifier si oui ou non un sol est salé, il faut aller l'identifier *in-situ* ou interroger les populations. Dans cette étude, le travail de terrain est indispensable. Ce travail de terrain a débuté depuis la première année de cette thèse (2016). Il est structuré autour de deux étapes : la collecte de données tests pour les travaux de cartographie et les enquêtes sociales dans les villages auprès des agriculteurs. Le choix des villages enquêtés est fait selon la méthode d'échantillonnage stratifié. Ce type d'échantillonnage divise la population d'étude en sous-groupes d'intérêt homogènes (villages) selon certains critères (tableau 1.5). Les missions ont été effectuées à la fin de la saison sèche (entre avril et juin), période pendant laquelle la salinité dans sols est importante (GHERINA et al., 2008), car les surfaces irriguées soumis à une évaporation et l'apport des volumes diminué et une couverture végétale très faible, voire inexistante, dans certaines zones non cultivées.

Tableau 1.5 – Les critères de choix

Critère	Description	Appréciation
Accessibilité	la voie est en bon état, très proche du milieu urbain compte tenu de l'intensité élevée des activités de terrain	Bonne
	La voie est assez bonne, un peu éloigné du milieu urbain compte tenu de l'intensité élevée des activités de terrain	Assez bonne
Niveau de salinité	1500 à 250 μ S	Faible
	A partir de 3000 μ S	Forte
Système d'irrigation et de drainage	Où l'entrée et la sortie de l'eau sont permanentes	Bon
	Absence d'un réseau adéquat	Mauvaise

Ces variables d'intérêt (de stratification) doivent être simples à utiliser, faciles à observer, étroitement liées au thème de l'enquête. Ainsi les villages cibles ont été choisis en fonction de l'intensité de la salinité, l'accessibilité de la zone et l'existence de réseau d'irrigation et de drainage.

1.3.2.1. Les Enquêtes : entretiens et questionnaires

Ce sont des outils qui permettent d'établir une vue panoramique de nos objets de recherche, surtout si les données statistiques font défaut ou s'il n'existe pas de recherches antérieures ou bien pour vérifier ou compléter des informations déjà acquises. En effet, afin de satisfaire les besoins de notre second objectif de recherche, un questionnaire a été soumis aux diverses populations rencontrées, et ce, dans des localités différentes. Les questions sélectionnées concernent leur perception de la salinité (ressenti et indicateurs de salinité), les pratiques individuelles de gestion (agronomiques et hydrauliques) ainsi qu'à leur efficacité (Voir [Annexes](#)).

Tableau 1.6 – Liste des entretiens effectués

Cible	Localité	Nombre de personnes interviewées
SAED	Saint-Louis et Dagana	5
Paysans	Zone d'étude	37
Chef Organisation paysanne	Zone d'étude	3

Ensuite, nous avons réalisé des entretiens semi-directifs auprès des chefs d'exploitation, les conseillers agricoles, les autorités locales, sur leurs attentes quant aux politiques publiques pour la gestion de la salinité. Cette méthode d'entretien est le plus adapté à notre étude, car elle nous permet de laisser l'enquêté un espace assez large pour exposer son point de vue (BERTHIER, 2016). Nous avons posé des questions ouvertes leur permettant de répondre en toute liberté ce qui les a encouragés à s'exprimer et à donner davantage d'informations tout en veillant à les recentrer sur l'objectif initial.

1.3.2.2. Échantillonnage de sols

Pour optimiser le réseau d'échantillonnage, nous nous sommes servis de la couche cartographique d'occupation des sols des périmètres aménagés. La méthode d'échantillonnage utilisée est de type stratifié, car elle s'appuie sur les classes thématiques d'états de surfaces (MERING, 1991) basées sur les unités de paysages (UP) (MERING, 1987), déjà classifiées (Surfaces Exploitées (SE), Surfaces Abandonnées (SAB) et Surfaces Non exploitées (SNE)). Les points d'échantillonnage seront identifiés à partir du système « RANDOM » qui consiste à éparpiller au hasard un nombre considérable de points sur la zone d'étude. Dans ce type d'échantillonnage, chaque classe de salinité a une chance égale d'être incluse à l'intérieur de l'échantillon (LEGGE, 2001). Cette méthode permet d'obtenir un échantillon représentatif des points de salinité, car elle donne la même probabilité à toutes les classes de faire partie de l'échantillon. Chaque point échantillonné sera géoréférencé à l'aide d'un GPS de navigation de type Garmin.

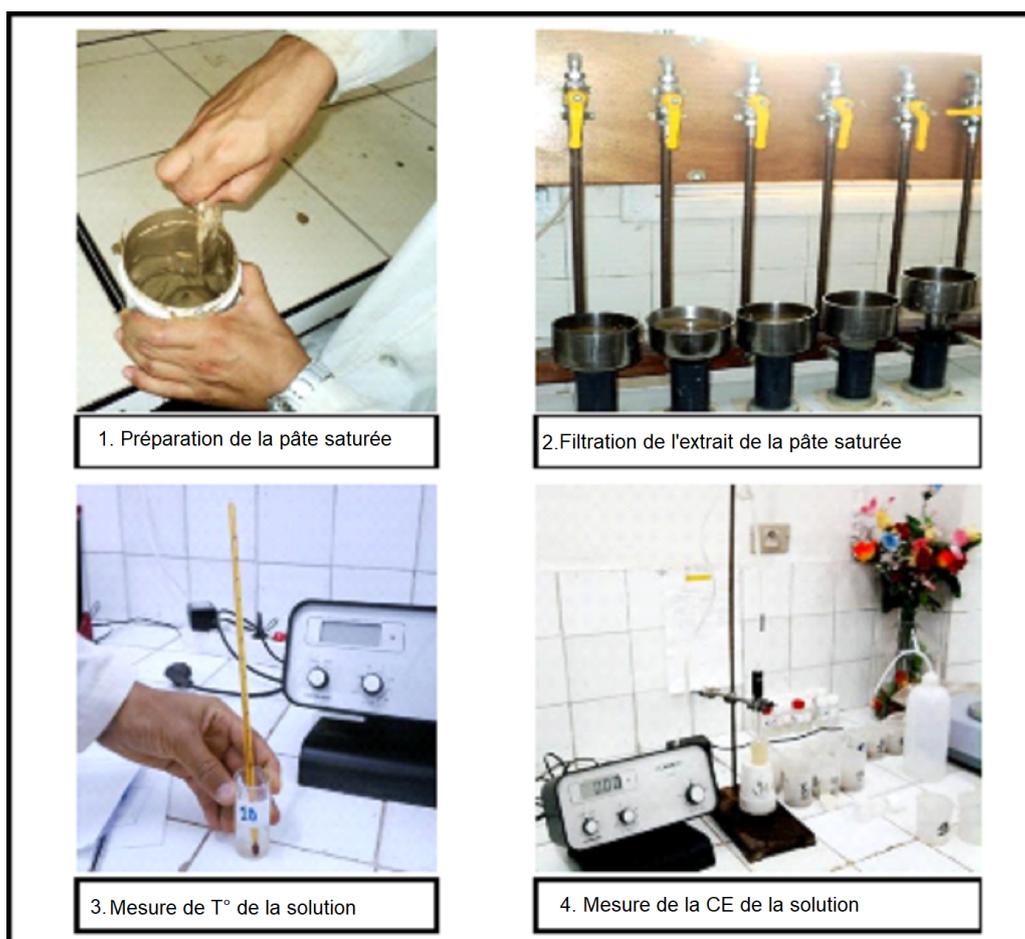


PHOTO 1.1 – Dispositif de la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (Source - NOOMENE (2011))

Ensuite au laboratoire, la conductivité est mesurée au moyen d'un conductivimètre électrique⁽⁶⁾, elle est déterminée à partir d'un extrait aqueux au 1/10 (15g de sol dans 150 ml d'eau distillée) (USSL, 1954). La salinité globale de la pâte saturée est ainsi déterminée par la mesure de la (CE) exprimée en dS/m et corrigée à une température 25 °C (figure 1.1). (Liste des points échantillonnés : Voir Annexes).

Deux tâches de cartographie seront mises en œuvre dans cette thèse. La première est une cartographie à grande échelle, à l'échelle du périmètre irrigué, sur une petite surface. Le choix de cette échelle se justifie d'abord par l'absence de moyens de pour payer au laboratoire l'analyse de données sur une grande surface. Il se justifie également par un besoin méthodologique, car interpoler un petit nombre de données sur une grande surface donne un résultat statistiquement « faux » d'où l'intérêt de l'utilisation des valeurs de réflectance en télédétection.

La deuxième est une carte à petite échelle, sur le Gorom-Lampsar. Avec l'aide de la télédétection, on procède à une généralisation cartographique des CE. Et la classification des sols du Gorom-Lampsar s'appuie sur le tableau 1.7.

Tableau 1.7 – Tableau de classification des sols salés J.-H. DURAND (1983)

Classes	Niveau de salinité	CE à 25 ° C μS/ cm	Effets sur le rendement
Classe 1	Non salé	> 500	Négligeable
Classe 2	Légèrement salé	500 – 1000	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe 3	Salé	1000 – 2000	Diminution des rendements de la plus part des cultures
Classe 4	Très salé	2000 – 4000	Seules les cultures résistantes au sel donnent des rendements satisfaisants
Classe 5	Extrêmement salé	> 4000	Seules quelques cultures donnent des rendements

(6). Mesure de conductivité indirecte devenue une référence pour le suivi spatio-temporel de la salinité du sol. Une autre possibilité de mesure par conductivimètre électromagnétique (mesure directe sur le sol salé) de moins en moins utilisée, car des problèmes d'humidité des sols et d'étalonnage de l'appareil peuvent influencer sur les résultats qui ne pourront pas faire l'objet d'analyse statistique contrairement à la méthode 1/5 (JOB et al., 1987).

1.3.3. État des lieux des connaissances sur les sols et la salinité

L'immensité de la publication sur le delta du Sénégal est telle qu'un état de lieux des connaissances sur toutes les portions du delta semble être tâche difficile même si les publications ont été toutes réalisées sur la totalité du delta, mais parfois sur chaque portion. L'analyse de la bibliographie existante sur le delta du fleuve Sénégal révèle :

- Une multitude de publications (thèses, rapports techniques de programmes internationaux, rapports de la SAED) sur la géographie du delta du fleuve Sénégal
- Peu d'ouvrages généraux spécifiquement sur la salinisation du fait de sa complexité d'étude.
- Deux principales vagues de publication sur les sols : de l'après-guerre jusqu'aux années 1980 et de l'après-barrage jusqu'aux années 2000.
- Depuis les années 2000, la production scientifique sur le delta s'est orientée vers les problématiques d'aménagement actuelles (essentiellement quelques ouvrages généraux, des rapports techniques des articles de revue et des thèses)

1.3.3.1. L'après seconde guerre mondiale

MAYMARD (1951) ébauche dès l'après-guerre une typologie des sols du delta ainsi de leur degré de salinité (figure 1.6). Les études de AUBERT (1949), LE BRUSQ (1980), MAYMARD (1960), MICHEL (1973), MOUGENOT (1982), MTIMET (1978) et TRICART (1955a) ont présenté les caractéristiques des sols du delta et mettent en exergue dans une très grande partie leurs caractéristiques physico-chimiques des transferts de la nappe. Elles confirment l'héritage salé du matériel du delta du fleuve Sénégal au sortir de la grande transgression marine du Nouakchottien, de 12000 ans BP à 2000 ans BP. DUBOIS (1963) propose une classification des sols du delta selon deux critères : la salinité et l'hydromorphie. Ces études ont aussi montré la distinction entre des sols argileux, contenant plus de 45 % d'argile, et des sols à dominante sablo-limoneuse, contenant néanmoins environ 25 % d'argile (figure 1.7).

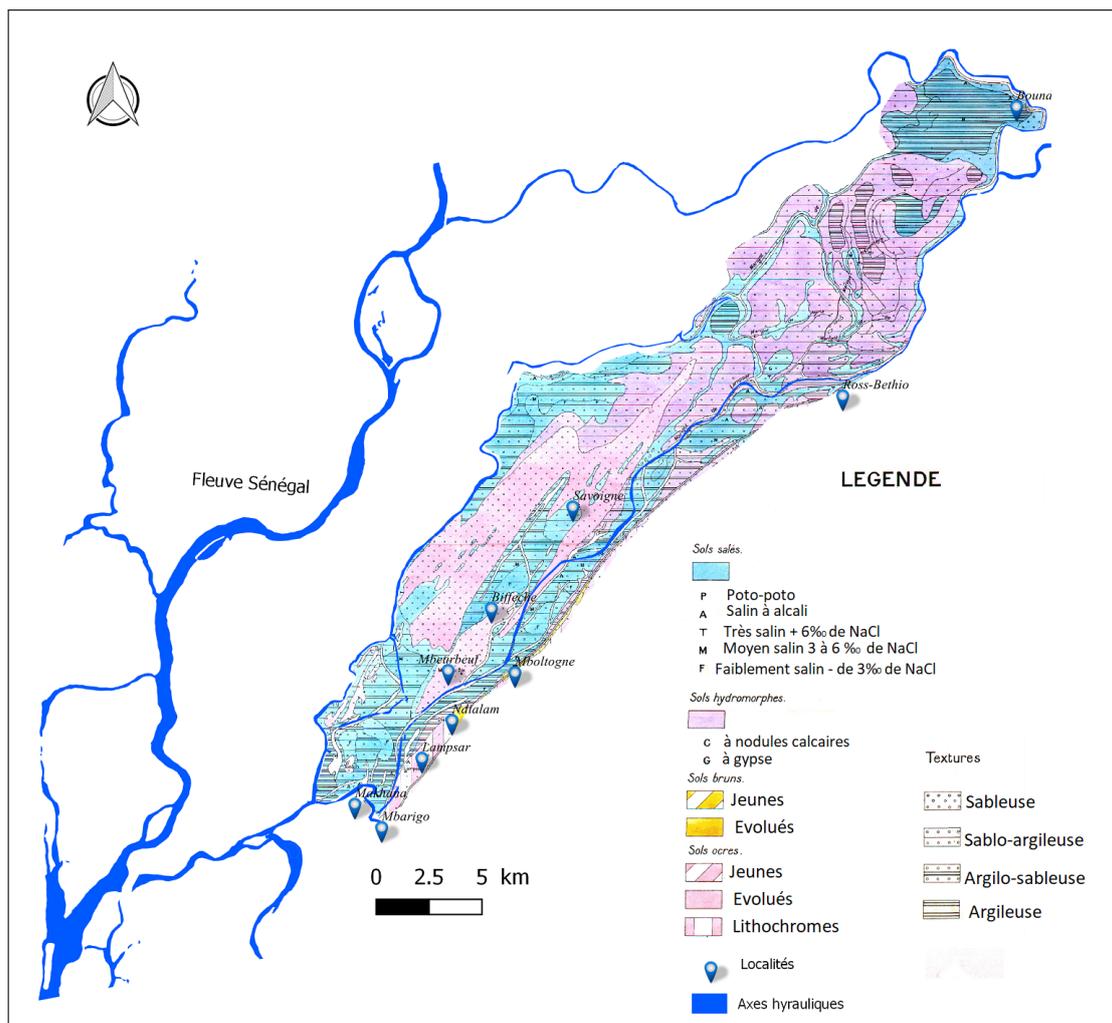


FIGURE 1.6 – Carte des sols salés l’axe Gorom-Lampsar - MAYMARD (1951) modifié - Source : IRD

Tous ces sols sont hydromorphes et présentent à une profondeur d’environ 1 m, sous un horizon argileux, une terrasse marine constituée de sables fins. Cette dernière caractéristique a pour conséquence un risque de salinisation de l’horizon de surface par remontée de la nappe située à plus d’un mètre de profondeur (DURANT, 1969 ; JOIN, 1982). Le niveau de la Capacité d’Échange Cationique (CEC) est fortement corrélé à la teneur en argile. Au plan chimique, la CEC est essentiellement saturée par du calcium et du magnésium en proportion égale, et la teneur en sodium échangeable est extrêmement variable (LE BRUSQ et LOYER, 1984).

Ces premières publications montrent que les sols du delta du fleuve Sénégal présentent une salinité chlorurée totalement saturée par du sodium en profondeur et partagée de façon égale entre sodium, calcium et magnésium en surface (figure 1.8).

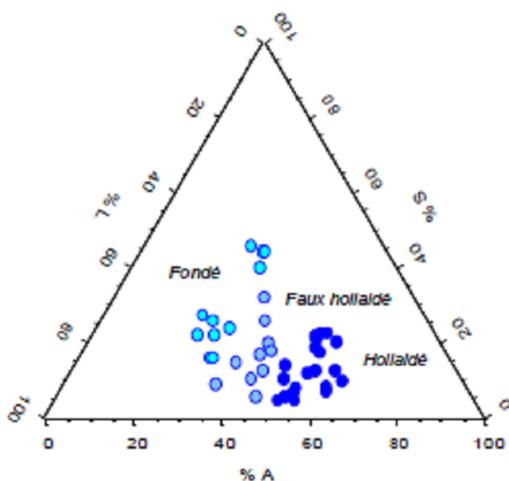


FIGURE 1.7 – La texture des sols dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal : À = Argile, L = Limon, S = Sable

(Source : POUSSIN et al. (2002))

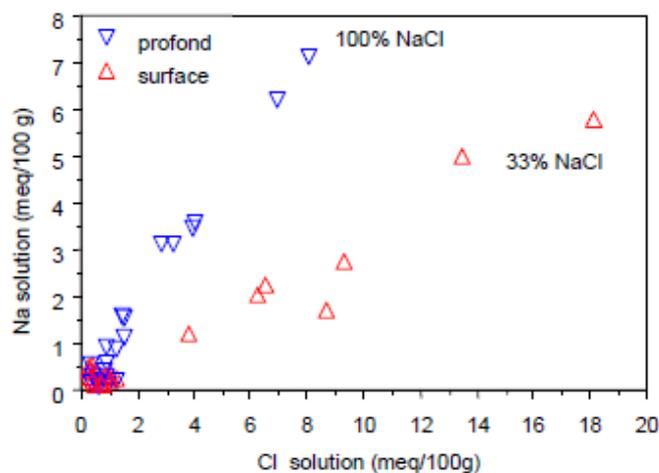


FIGURE 1.8 – Salinité chlorurée en surface et en profondeur dans les sols non cultivés

(Source : POUSSIN et al. (2002))

1.3.3.2. L'après barrages

Après la mise en service des barrages, la problématique de la salinisation prend une nouvelle forme, celle de la sodisation et une alcanisation dûes à la riziculture non drainée. La vague de travaux sur le delta se poursuit des années 1990 jusqu'aux années 2000, mais s'oriente plus vers les conséquences hydrologiques et agricoles des barrages. La présence de l'eau se traduit par une extensification des périmètres irrigués et un bouleversement des systèmes de culture, un bouleversement environnemental et un attrait de la population dans tout le delta.

Les études de LOYER (1989a) montrent très tôt les impacts des aménagements sur la dégradation des sols et sur les nappes phréatiques. Les travaux de CEUPPENS et al. (1997) et de DECKERS et al. (1996) révèlent que les systèmes de culture sont responsables de la dégradation rapide des sols du Delta et de la plupart des abandons des périmètres privés dont la plupart ne disposent pas de réseaux de drainage. Ceux de DIÈNE (1998) et de BOIVIN (1993) ont confirmé que la riziculture irriguée, en double ou simple culture, drainée ou pas, permet un desalement de l'horizon superficiel. En effet, en riziculture irriguée, la présence d'une nappe d'eau en surface, de concentration plus faible, permet l'évacuation latérale des sels et le blocage des remontées capillaires salines depuis la nappe salée profonde. Selon POITEVIN (1993) la salinité globale estimée au conductivimètre électromagnétique est de 7 à 10 fois plus élevée que celle des sols non aménagés. On constate des remontées salines dans presque tous les périmètres.

POUSSIN et al. (2002) ont confirmé que le lessivage des sels, après quelques années de non-

drainage, s'effectuait essentiellement dans la lame d'eau superficielle et ont montré l'effet d'un cycle « inondation-évacuation » avant la mise en place de la culture sur l'évolution de la salinité de l'horizon superficiel.

Toutes ces études reconnaissent que les sols du delta du fleuve Sénégal présentent une salure chlorurée-sulfatée d'origine marine ou lagunaire, essentiellement sodique et magnésienne, à laquelle peut se superposer une alcalinisation liée à une sodicité excessive et souvent due à une évolution secondaire (BOIVIN et al., 1998; DIÈNE, 1998; A. DIOP, 1998; LANDSBERG, 1999; LOYER, 1989b; LOYER et DIALLO, 1980; MANÉ, 1996; R. NDIAYE, 2004; SAED, 1993; WADE, 1998).

Cette phase de documentation et de terrain nous a permis de collecter toutes les données nécessaires à notre étude et d'élaborer une réflexion sur l'état de la production scientifique dans le delta du Sénégal. Elle est aussi la source d'informations traitables et analysables par la suite.

1.4. La géostatistique et la télédétection

La méthode classique de cartographie généralement utilisée consiste à déterminer, à partir de quelques mesures de la conductivité électrique (CE) sur extrait aqueux, la valeur moyenne de la salinité d'une unité pédologique ou d'une parcelle. Cependant, des travaux antérieurs sur la variabilité et les possibilités de cartographie numériques de la salinité révèlent que l'étude de la répartition spatiale des sels dans le sol par la mesure de la conductivité électrique (CE) sur extrait aqueux est difficile du fait de leur grande variabilité. De plus, la quantité de sel mesurée sur un échantillon ne peut pas être extrapolée à un grand volume de sol, la répartition spatiale des sels étant généralement très hétérogène (CEUPPENS et al., 1997). Or la cartographie des sols salés doit tenir compte de cette grande hétérogénéité d'où la nécessité de la télédétection qui offre une grande possibilité de cartographie (MOUGENOT et al., 1993). L'utilisation de celle-ci dans le suivi et l'identification des phénomènes éco-environnementaux tels que la salinisation des sols a connu un apogée ces dernières années. Les méthodes de traitement d'image satellitaire (par le biais d'indices néo-canaux et de classifications d'images) permettent de comprendre les processus de salinisation des sols, d'évaluer leurs étendues et localiser les zones vulnérables à la salinisation des sols. Cette étude permet également de mettre en œuvre les potentialités offertes par les données de télédétection pour voir un ensemble de cartes thématiques qui distinguent, localisent et évaluent les étendues des sols salins à la surface de la zone d'étude dans la région

du delta du Sénégal. L'utilisation de la télédétection et de géostatistique dans le suivi et l'identification des sols salés a connu un apogée ces dernières décennies. En effet, deux contraintes ont favorisé le recours à ces méthodes (d'abord la géostatistique et ensuite la télédétection). (1) D'abord, la salinité ne peut être mesurée de manière continue sur une surface puis que c'est un phénomène continu dans l'espace et qui connaît une grande variabilité conditionnée par plusieurs facteurs. (2) Ensuite, la cartographie géostatistique est limitée à une petite surface, car les méthodes géochimiques permettant l'analyse et la localisation des propriétés des sols salins sont extrêmement coûteuses ; donc recours vers la télédétection qui offre d'abord la possibilité d'une cartographie plus large, donc un découpage spatial plus important, ensuite grâce aux capteurs multi et hyper-spectraux elle nous permet l'identification des sols salés grâce aux méthodes de classification. Leur développement très récent, le coût élevé des images de très haute résolution, des licences onéreuses pour des logiciels spécialisés et des coûts énormes pour le matériel de collecte et d'analyse des données géochimiques peuvent généralement expliquer la faiblesse des études par télédétection et géostatistique sur les sols salés du delta du Sénégal.

1.4.1. La géostatistique : des méthodes de normalisation des données jusqu'aux méthodes d'interpolation

La mesure de la salinité ne peut pas se faire de manière continue dans l'espace, c'est-à-dire il est impossible d'évaluer, directement, en tout (X, Y) de l'espace, le degré de salinité. Alors, le recours à des méthodes d'interpolation statistique s'impose. La géostatistique offre à travers de logiciels spécialisés et de logiciels SIG, des possibilités d'interpolation par le biais de formules de statistiques spatiales. Basée sur la théorie des variables régionalisées, développée par MATHERON⁽⁷⁾ dans les années 1970, la géostatistique peut être définie comme une application de méthodes probabilistes à des variables régionalisées⁽⁸⁾ (WACKERNAGEL, 2004). Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées, telle est l'idée fondamentale de la géostatistique qui, à ses débuts était appliquée à l'étude des mines.

Dans ce travail, la géostatistique nous permettra :

(7). G. MATHERON, 1978. *Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités*. Fontainebleau, France : Ecole nationale supérieure des mines de Paris. 175 p.

(8). Une variable régionalisée peut être considérée comme déterministe et l'aléatoire y être introduit par l'échantillonnage.

- D'étudier la structure spatiale de la variable salinité (le variogramme)
- Et de cartographier, dans un premier temps, par krigeage les événements échantillonnés

1.4.1.1. La structure spatiale de la variable salinité

Le principal outil de la géostatistique est le variogramme. Il permet une description de la structure spatiale des données. Le variogramme est calculé selon la formule suivante :

FORMULE 1.1 – Calcul du variogramme

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_u(x_i) - Z_u(x_i + h))^2$$

Le variogramme est une fonction qui quantifie la corrélation spatiale entre deux variables aléatoires $Z(x_i)$ et $Z(x_i + h)$ (x_i et $x_i + h$ sont les localisations des échantillons de la variable Z_u) séparées dans la nature par une distance h (BOURGINE, 2018b). À la différence du semi-variogramme (qui renseigne l'autocorrélation spatiale basée sur la valeur de la variable $Z(x_i)$), le variogramme, lui se base sur la variance des distances entre les paires. La sommation est étendue à tous les couples de points $(x_i, x_i + h)$ distants de h . $N(h)$ représente le nombre de couples de points. La variance entre ces deux points est aussi une variable aléatoire dont on peut calculer la variance (elle devrait être plus petite lorsque les points sont rapprochés c'est-à-dire les valeurs se ressemblent plus en moyenne, et plus grande lorsque les points sont éloignés). La représentation graphique n'est rien d'autre que la représentation des variances en fonction des distances h . Cette variance est notée :

FORMULE 1.2 – Calcul de la variance des distances

$$\text{var}(Z(x + h) - Z(x)) = 2\gamma(h)$$

En terme général, pour de faibles distances, la corrélation est forte (variance plus faible) pour ensuite atteindre la valeur où il n'existe plus de corrélation spatiale, là où la variance ne grandit plus. On a donc atteint le palier (C_0+C) (figure 1.9). La distance à laquelle ce palier est atteint définit la portée (a). Le troisième terme définissant un variogramme est l'effet pépité (C_0). Il s'agit, à de très faibles distances, de l'existence de valeurs de variance différentes de zéro

(BOURGINE, 2018a; KHACHEBA, 2011; SOTO, 2005). Le variogramme peut être modélisé; on parle alors de variogramme théorique.

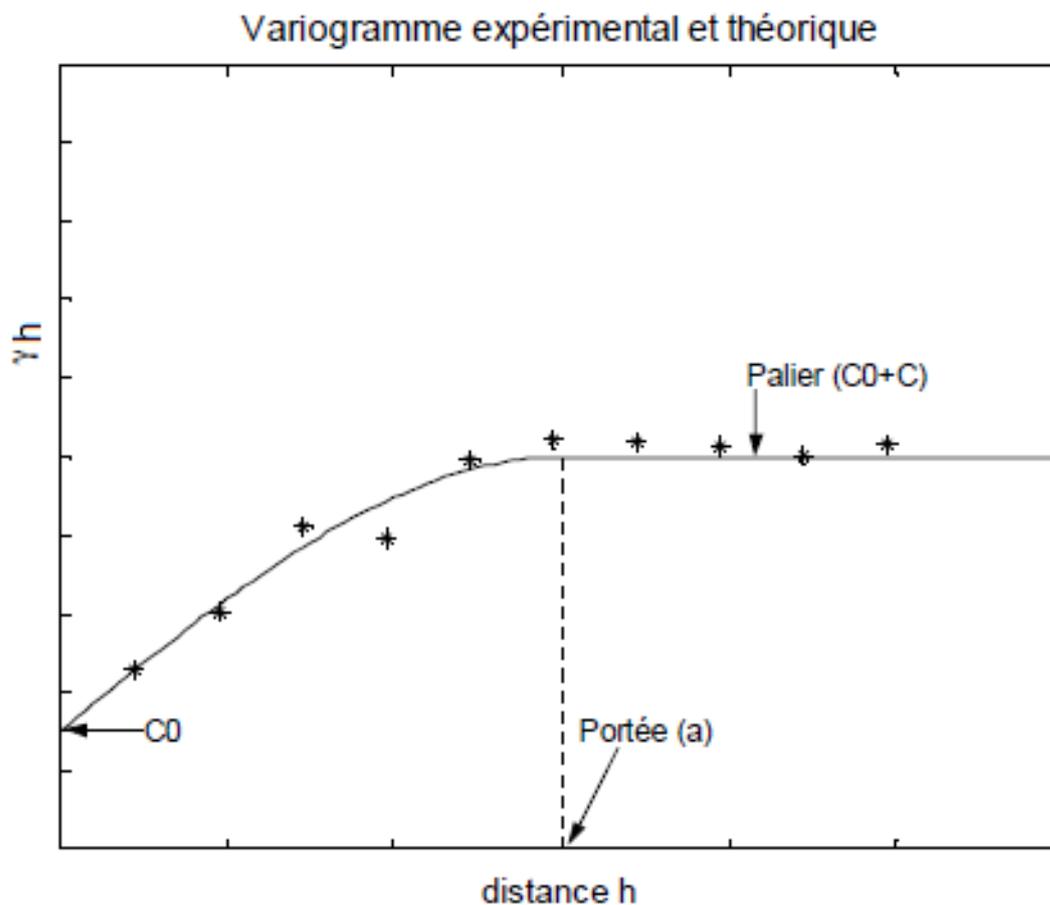


FIGURE 1.9 – Composantes du variogramme : portée (a), palier (C_0+C) et effet pépité (C_0). Variogramme expérimental (étoiles) et variogramme théorique (ligne continue) - (Source - WACKERNAGEL (2004))

Cet ajustement de modèles au variogramme expérimental permet de caractériser le comportement spatial du jeu de données ou de produire des cartes spatialisées par krigeage. Les modèles sont des expressions analytiques que l'on tente d'ajuster le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux (SOTO, 2005; WACKERNAGEL, 2004). Dans ce travail, le comportement de la distribution spatiale de nos données mesurées déterminera le modèle de variogramme qui sera appliqué avant la mise en œuvre de celles-ci dans le krigeage.

1.4.1.2. La cartographie par krigeage ordinaire

La géostatistique permet également la cartographie par krigeage des données mesurées et ajustées. Dans cette tâche, nous avons utilisé le Krigeage, méthode optimale, au sens statistique

du terme, d'estimation (GRATTON, 2002) et le type ordinaire, car il est mieux adapté à l'étude de variables stationnaires de moyenne inconnue comme c'est le cas de la salinité. Il existe 3 type de Krigeage : le krigeage simple, ordinaire et universel et le choix de l'utilisation d'une de ces trois méthodes implique que l'on connaisse la statistique des données d'entrée. Dans le cas de nos données de salinité, le krigeage ordinaire sera mise en œuvre, car le plus souvent utilisé dans les études d'estimation de la salinité des sols (ABBAS et al., 2013 ; ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL, 2014 ; BOIVIN et al., 1998 ; BOUAZIZ et al., 2011 ; DOUAOUI et al., 2006) Il s'agit d'affecter à partir de ces dernières, de nouvelles valeurs statistiques à tout couple (X,Y) de l'espace non mesuré. Le krigeage est développé à partir des années 1950 par le géologue sud Africain KRIGE.

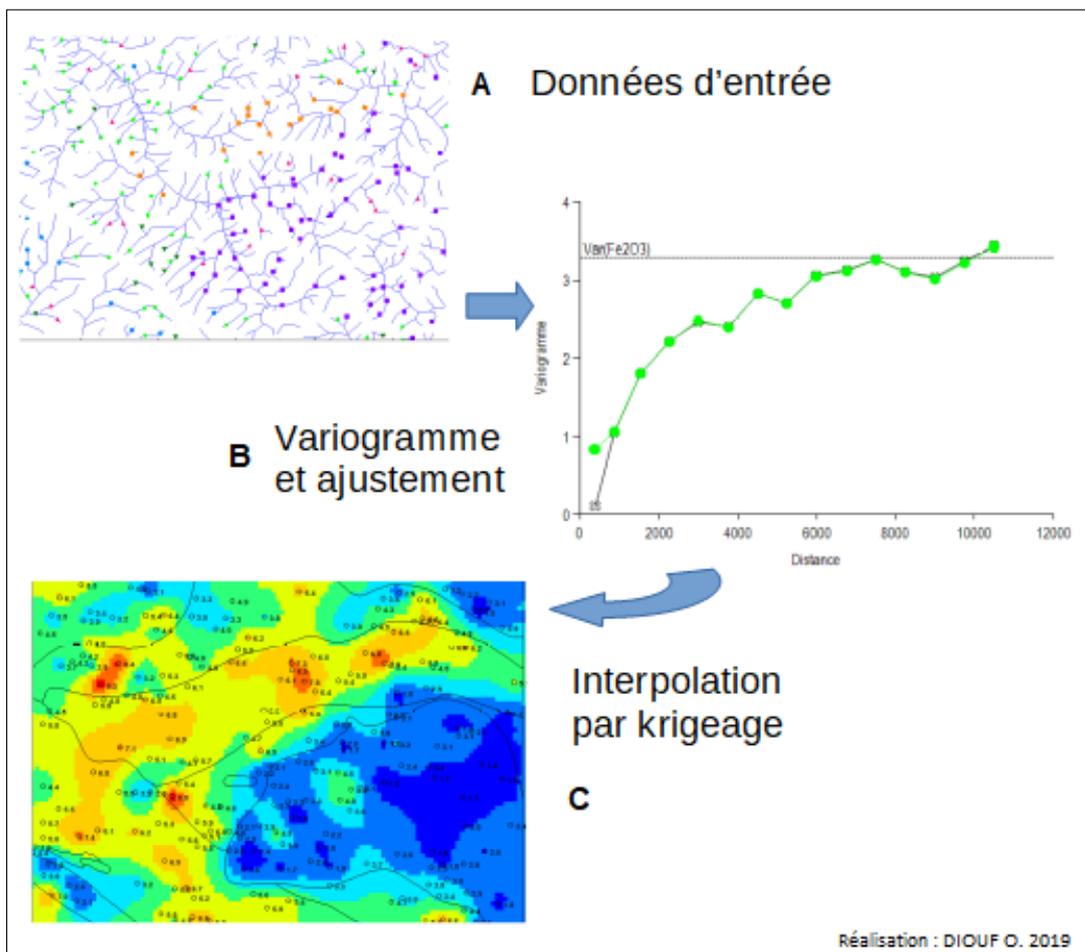


SCHÉMA 1.1 – Processus de traitement géostatistique **A.** Données ponctuelles localisées, **B.** Variogramme et ajustement des paramètres (modèle), **C.** Cartographie krigée

C'est une méthode d'estimation linéaire minimisant la variance d'estimation calculée à l'aide du variogramme. . L'introduction des paramètres du variogramme tiendra compte de deux

paramètres : le graphique (Q-Q plot)⁽⁹⁾, et le test de la normalité de la distribution⁽¹⁰⁾.

1.4.2. La télédétection spatiale

Le néologisme « remote sensing » fait son apparition aux États-Unis dans les années 1960, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne (KERGOMARD, 2003). Comme le GPS, la télédétection a émergé grâce à des besoins militaires (l'exemple du missile balistique "V2" développé par les Nazis dès 1938, le Spoutnik 1 de l'URSS en 1957). Le 23 juillet 1972, le lancement du satellite E.R.T.S.-1 (Earth Resources Technology Satellite)⁽¹¹⁾ marque les débuts de la télédétection spatiale. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarquées des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. Très vite la discipline a essaimé et parallèlement ses applications se sont multipliées dans de nombreux domaines de la météorologie et de la climatologie, de l'océanographie, de la cartographie ou de la géographie. Le programme Landsat depuis 1972, a lancé 7 satellites. Le lancement de LANDSAT 6 a échoué. Ces satellites suivent une orbite quasi-polaire et héliosynchrone à 920 km d'altitude pour LANDSAT 1 à 3, 705 km pour LANDSAT 4, 5, 7 et 8 avec une amélioration progressive de la résolution spatiale et radiométrique des images produites. Ensuite, les satellites SPOT, IRS, QUICKBIRD, ALOS, KOSMOS, IKONOS sont arrivés à partir de 1980. Cette diversité favorise d'abord la multiplication des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique et ensuite l'augmentation de la résolution spatiale de ces capteurs. Récemment en 2015, le programme COPERNICUS⁽¹²⁾ a lancé les satellites SENTINEL (1, 2 et 3) qui produit une répétition de données à l'échelle européenne, mais aussi sur une large partie du continent africain (couverture quasi complète du territoire Sénégalais).

D'après BOULAINÉ (1975) la pédologie est un des domaines de la connaissance dont

(9). Plus les points sont proches de la ligne droite (45 degrés) du graphique, plus les données de l'échantillon suivent une distribution normale

(10). Une distribution suit une loi normale si la moyenne et la médiane sont à peu près la même valeur; ce qui n'est pas le cas dans notre distribution

(11). Renommé plus tard Landsat 1, est le premier (d'une longue série) destiné à l'observation civile de la Terre et de ses ressources naturelles. La taille des images obtenues était de 185 km × 185 km avec une résolution au sol de 40 à 80 mètres. Landsat-1 était équipé d'un scanner multispectral (M.S.S., Multi-Spectral Scanner) couvrant quatre bandes de longueurs d'onde (0,5 – 0,6 µm; 0,6 – 0,7 µm; 0,7 – 0,8 µm; 0,8 – 1,1 µm) et du système R.B.V. (Return Beam Vidicon) couvrant le spectre de 0,5 à 0,75 micromètre (UNIVERSALIS, 2016).

(12). Le programme COPERNICUS est le volet européen du GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), un programme mondial d'observation de la Terre initié par l'UE, les États-Unis, le Japon et l'Afrique du Sud. Copernicus a lancé dans son programme ses satellites Sentinel, dont la première mission Sentinel-1A, dotée d'un imageur radar, a été lancée le 3 avril 2014, le second Sentinel 2A le 23 juin 2015 et Sentinel 3A lancé le 16 février 2016.

l'approche géographique est absolument nécessaire. Nécessaire et non seulement utile, car une approche directe de la connaissance du sol ne peut résulter que de l'étude du profil dans le paysage, et qu'il est difficile de dissocier cette connaissance du sol en un point donné et celle de son environnement géographique, et celle de la répartition de sols que nous réunissons, soit dans une unité conceptuelle, soit dans une unité cartographique.

La photographie aérienne qui a fait des progrès gigantesques dans le domaine militaire a mis en disposition des cartographes et des pédologues de documents exceptionnels qui ont permis une grande précision dans le tracé des contours des unités de sols. L'inventaire et la cartographie de ces unités de sol entamé en Europe dès 1900 avec l'exposition universelle de Paris par l'équipe de DOKHOUTCHAEV de la première carte nationale de la Russie. Ensuite, les grandes nations de service de cartographie commencèrent à se mettre en place (BOULAINÉ, 1997). Dans les pays européens de forte concentration humaine, l'inventaire des sols ne commença qu'après la Seconde Guerre mondiale. C'est le cas aussi des pays africains, qui au lendemain de la guerre et de la décolonisation, se sont engagés dans des politiques de développement agricole. Dans ce contexte l'expérience européenne et française va être reproduite en Afrique avec la grande avancée sur les études pédologiques et géomorphologiques comme ceux de BOIVIN et al. (1998) et MAYMARD (1955a) au Sénégal.

L'exploitabilité des produits satellitaires pour l'étude des sols débute dès les années 1970. En Afrique, deux préoccupations ont engendré l'utilisation de la télédétection pour l'identification des sols⁽¹³⁾ :

- la cartographie des zones dégradées : cartographie des sols à petite échelle et carte FAO au 1/5000000
- la quantification de l'érosion : modèles d'érosion des sols et modèles hydrologiques ;

Les grands travaux de mise en valeur, réformes agraires et périmètres irrigables, conquêtes de nouvelles terres de culture (BÈYE (1972), FAO et SEDAGRI (1970) et TRICART (1955a)), essais de l'identification et de la récupération des sols salés en milieu aride (ESCADAFAL (1989) et JOB (1992b)), la lutte contre l'érosion des sols (DUBUCQ (1986) et MOUGENOT et al. (1993)) etc. exigent des inventaires techniques, des surveillances périodiques et des perspectives sur

(13). En novembre 1965 la FAO, le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et l'UNESCO ont lancé un projet conjoint intitulé « évaluation mondiale de la dégradation des sols ». Un rapport collectif conclut que Landsat peut servir de base, avec les données terrain, à la légende de la carte mondiale FAO de dégradation des sols au 1/115000000. Des cartes, qui couvraient à peu près tous les types de climats, ont été réalisées : en Gambie, au Sénégal, Guinée et Sierra Leone, au Niger, Haute-Volta (Actuel Burkina Faso), Mali, et Nigeria (MOUGENOT et al., 1993).

l'évolution des terres, qui selon la bibliographie justifie l'utilisation de la télédétection. Aujourd'hui, la progression de la salinisation rend préoccupant le maintien d'une agriculture et nécessite une surveillance que la télédétection est susceptible de faciliter (M.-C. GIRARD et C. M. GIRARD, 2010). Les comportements spectraux des sols salés sont la résultante d'effets directs des sels eux-mêmes, lorsque ceux-ci forment des efflorescences à la surface du sol, et de leurs effets indirects, notamment la rugosité de surface, ou encore les groupements spécifiques et stress végétaux liés aux sols salés (MOUGENOT et al., 1993).

1.4.2.1. Principes de la télédétection appliquée à l'étude des surfaces naturelles

De façon théorique, la télédétection est définie comme une discipline permettant l'acquisition d'images, à distance, sur la surface de la Terre. De manière appliquée, elle est source d'informations utiles à l'observation, à l'analyse et à la gestion de l'environnement. L'objet de cette application est de distinguer des types de surface (en vue de leur cartographie) ou d'en mesurer certaines caractéristiques, à partir du rayonnement reçu par le capteur. En effet, rappelons que les capteurs embarqués à bord des satellites sont sensibles à l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique, en provenance de portions restreintes de la surface du sol et reçues dans un angle solide très restreint : la grandeur fondamentale en télédétection est donc la luminance (KERGOMARD, 2003). Cette luminance est perçue et interprétée différemment selon les différents domaines du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde supérieures à 4 μm (infrarouge « thermique » et micro-ondes), est réservée aux études de températures terrestres (température radiométrique) avec de très bonnes estimations et à la détection de matériau. Dans la gamme des longueurs d'onde inférieures à 3 μm , c'est à dire dans le domaine du spectre solaire (lumière visible et proche infrarouge), la luminance mesurée par le capteur représente la part du rayonnement solaire incident qui est réfléchi par la surface du sol, dans la direction du capteur (selon l'angle de visée du radiomètre), c'est à dire une réflectance (KERGOMARD, 2003 ; LILLSAND et al., 2014). Les surfaces naturelles ont une faible émissivité dans les domaines des grandes longueurs d'onde. Cependant, en domaine visible et infrarouge, ces surfaces naturelles ont une très bonne signature spectrale, mais néanmoins se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance selon la longueur d'onde (figure 1.10).

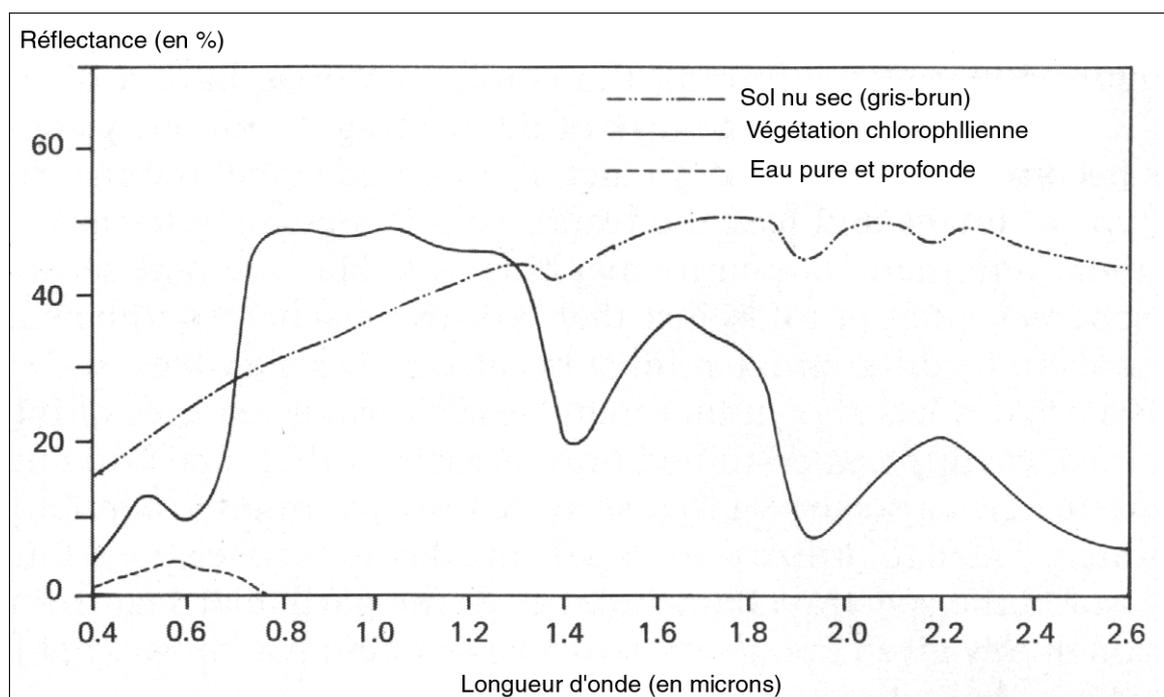


FIGURE 1.10 – Réflectances spectrales caractéristiques de trois grands types de surfaces naturelles d'après LILLSAND et al. (2014)

Cette même gamme de longueurs d'onde est également favorable à la détection des surfaces salines, car le sel a une forte réflectance dans les longueurs d'onde du visible au moyen infrarouge (ABBAS et al., 2013; AL KHAIER, 2003; ALLBED et KUMAR, 2013; DEMATÉ et al., 2004; FARIFTEH et al., 2006; MOUGENOT, 1993; TAÏBI, BALLOUCHE et al., 2007). Dans le visible, les effets des sels et de la dessiccation s'additionnent pour accroître la réflectance. La couleur exprime le comportement spectral d'une surface dans le visible (ESCADAFAL, 1989). Bref, toute la bibliographie consultée montre que les surfaces salines sont plus facilement détectables à partir des canaux du Visible (V) et du Proche-Infrarouge (PIR) ou (NIR) en anglais. Ces bandes spectrales permettent non seulement l'identification des surfaces salines, mais une discrimination des différentes classes de salinité. Cette discrimination (les travaux de ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL (2014) et MOUGENOT et al. (1993) par exemple) est faite au laboratoire afin de tracer le profil spectral de la classe de sol sur le terrain (figure 1.11).

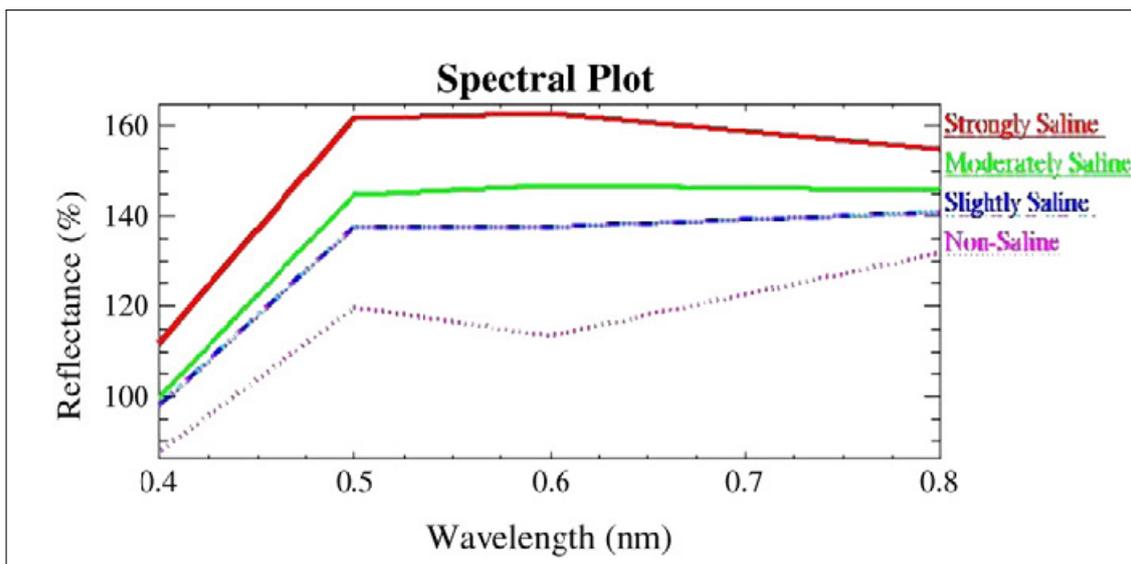


FIGURE 1.11 – Réflectance des différentes classes de salinité du sol
d'après ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL (2014)

Cette résolution spectrale favorable à la détection saline est importante, mais la résolution spatiale (la taille du pixel) est encore un paramètre indispensable pour une bonne discrimination des classes de salinité. C'est pourquoi il est important de bien choisir les images à traiter, car plus la résolution est bonne plus la discrimination est plus « nette ».

1.4.2.2. Le choix et l'acquisition des données optiques

La résolution spatiale de l'image est un facteur important à prendre en compte dans la cartographie et de l'évaluation de la salinité du sol. Du fait de multiples difficultés de collecte des données satellites de très bonne résolution et couvrant le continent Africain⁽¹⁴⁾, nous avons choisi d'utiliser les données du programme Sentinel pour la cartographie de la salinité, des SPOT et des LANDSAT pour les autres traitements. Ces données ont été collectées à partir du portail THEIA. Le pôle de données et de services surfaces continentales Theia a pour objectif d'accroître l'utilisation par la communauté scientifique et les acteurs publics de la donnée spatiale en complémentarité d'autres types de données, notamment les données *in situ* et aéroportées.

(14). Les programme Landsat couvre une bonne partie du Sénégal, mais la résolution (30 m) n'est pas suffisant pour une bonne cartographie de la salinité, Spot a une meilleure résolution, mais les images qui sont gratuites, soit ne couvrent pas toute la zone d'étude, soit ne sont pas récentes.

Tableau 1.8 – Données optiques disponibles sur THEIA

Satellite	Zone	Période	Accès	Disponibilité
Pléiades	Petites zones en France et ailleurs	2012-2017	Acteurs publics nationaux	ign
Spot 6/7	France et monde entier	2013...	Acteurs publics nationaux, Acteurs privés	geosud
Réflectance de surfaces Sentinel-2	France et autres zones dans le monde	2016 – Présent	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr
Réflectance de surface Landsat	Séries temporelles sur France et ROM-COM	Landsat 5-7-8 (2005 - présent)	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr
Réflectance de surface Spot 5 (Take 5)	150 sites dans le monde	8 avril - 8 sept 2015	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr
Spot World Heritage	Plus de 100 000 images dans le monde	1986-2010	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr
Spot 4 (Take 5)	45 sites dans le monde	Fév-juin 2013	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr
Rapid Eye, Spot 1-5	France	2005, 2011, 2013,...	Acteurs publics nationaux	ids.equipex-geosud.fr
Venus	110 sites dans le monde	A partir du lancement de Venüs	Tous utilisateurs	theia.cnes.fr

Il met à disposition des acteurs publics nationaux, des scientifiques (nationaux et internationaux, couverture quasi complète du territoire sénégalais (figure 1.12)), et des acteurs privés, des données et produits à valeur ajoutée issus de la télédétection par satellite. Il vise aussi à structurer la communauté scientifique nationale, à mutualiser les données image, les traitements et l'expertise scientifique, et à rendre visibles les réalisations nationales à l'échelle internationale (THEIA, 2017)

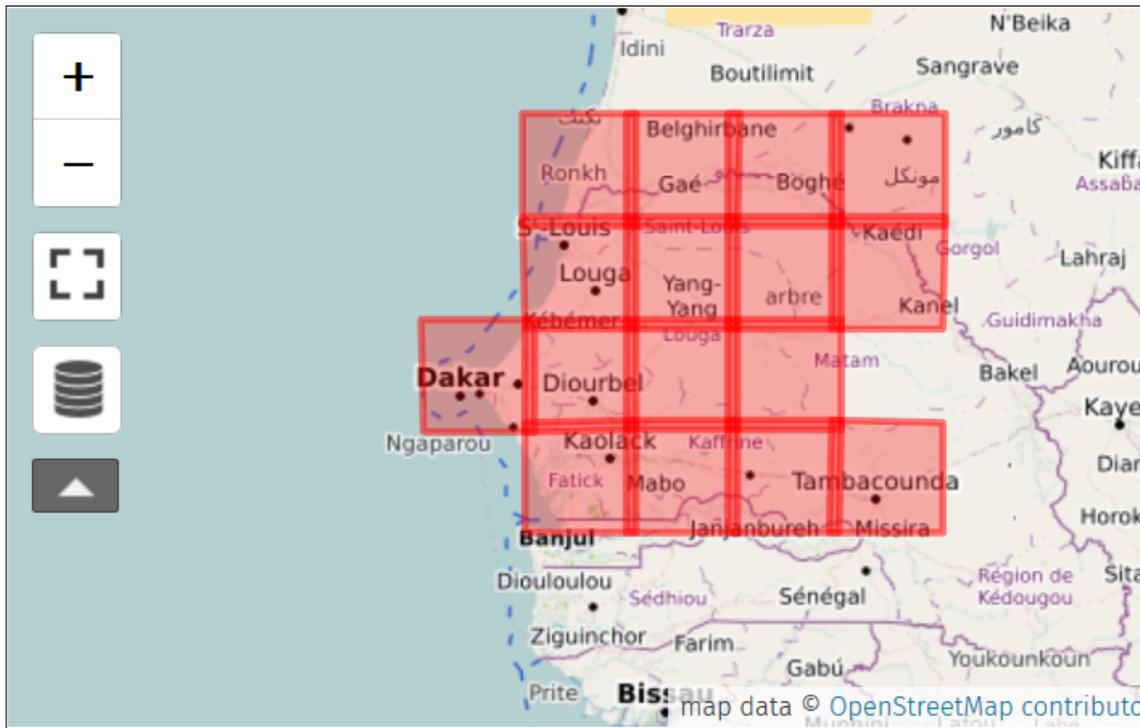


FIGURE 1.12 – Couverture de Sentinel niveau 2A sur le territoire Sénégalais (THEIA, 2017)

. Dans cette étude de salinité, nous exploités les données SENTINEL 2A surface réflectance (figure 1.13, tableau 1.9). Ces bandes sont reconnues très efficaces dans la cartographie du phénomène de salinité (ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL, 2014; DOUAOUI et al., 2006). Nous avons choisi dans cette étude des prises de vue du mois de mai 2018, coïncidant à la période de prise des échantillons de CE. C’est aussi durant cette période que la salinité atteint son maximum (géorisque salin). Le choix de cette période est utile également pour les tests de corrélation entre les indices néo-canaux et les mesures *in-situ*.

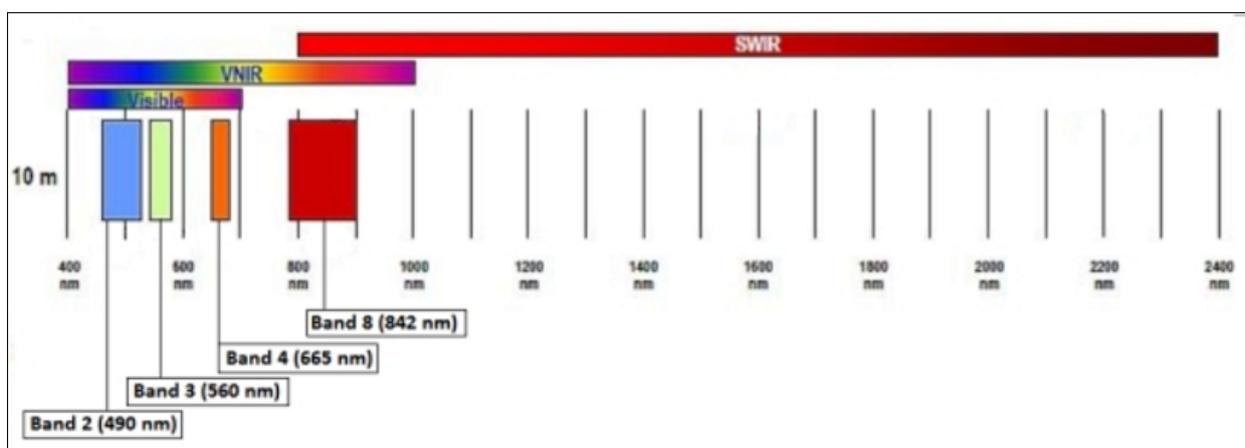


FIGURE 1.13 – SENTINEL-2 10m de Résolution Bands: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) et B8 (842 nm)

Tableau 1.9 – Les différentes bandes de SENTINEL 2 (Source - (CONGEDO, 2019))

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength [micrometers]	Resolution [meters]
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Dans ce travail, les indices (de minéralisation (SI et NDSI) et de Végétation (SAVI)) seront calculés à l'aide des bandes 2, 3, 4 et 8 (tableau 1.9). Ces bandes sont choisies dans nos traitements du fait de leur bonne résolution spatiale (10mX10m) permettant de faire une assez bonne discrimination d'éléments dans ce contexte de salinité.

1.4.3. Les systèmes d'information géographique (SIG)

Les SIG sont un système informatique permettant la saisie, le stockage, la gestion, l'analyse et la représentation graphique de l'information localisée (STEINBERG, 2003). C'est un outil d'aide à la décision grâce à ses fonctionnalités⁽¹⁵⁾ apparu dans les années 1960 pour répondre aux besoins croissants de l'utilisation des cartes pour la gestion des ressources naturelles. Pour les géographes, il ne s'agit cependant pas d'un outil de plus venant d'autres disciplines et que nous adoptons à nos besoins, mais, au contraire, d'une technologie et d'une méthodologie profondément enracinées dans la géographie même.

Comme l'analyse statistique est liée aux mathématiques, l'élaboration et l'usage des SIG sont propres à la géographie sans pour autant que notre discipline en puisse revendiquer l'exclusivité (PAEGELOW, 2004). Le SIG, par son caractère intrinsèquement géographique pourrait, sinon combler le fossé, mais au moins établir des passerelles entre les différentes géographies (humaine, physique,...), même si certains géographes essaient encore d'enfermer le SIG dans le prolongement de la géographie quantitative ; c'est un outil pour le géographe.

(15). Les différentes fonctionnalités d'un SIG : la Saisie, la Manipulation, la Gestion, Interrogation et Visualisation des données

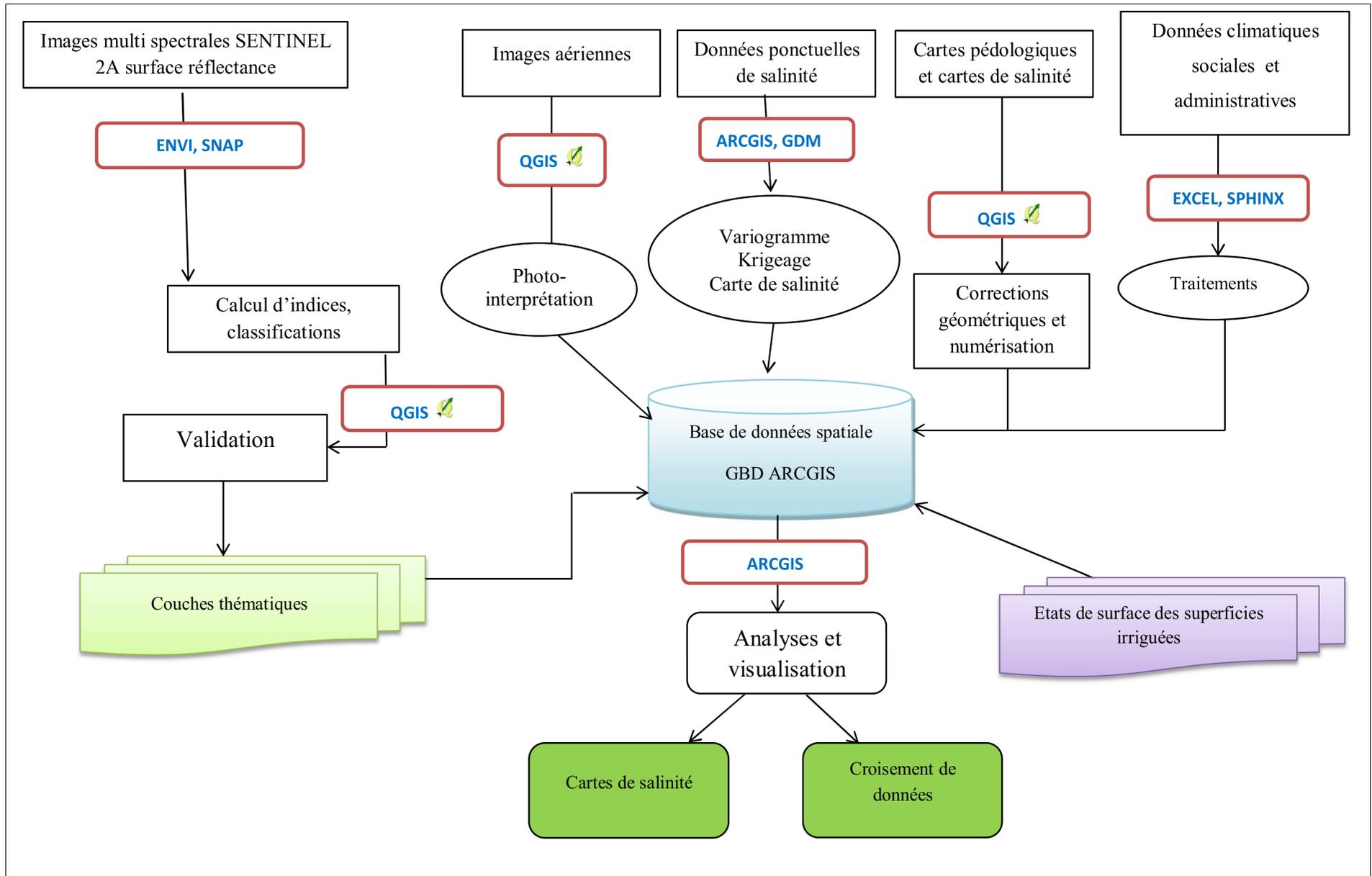


SCHÉMA 1.2 – Structuration des données dans le SIG de la thèse

ENCADRÉ 1.2 – Intérêts de la géomatique dans l'étude des phénomènes en géographie

Aujourd'hui, dans la phase d'émergence de la géomatique, il est sans conteste démontré l'utilité et l'extraordinaire diversité du traitement numérique de l'information géographique envisagé d'abord comme simple outil technique puis également comme concept et approche méthodologique pour appréhender l'espace, le temps et leurs propriétés géographiques dans des secteurs d'activité et de disciplines scientifiques très variés et, notamment, en géographie. Les méthodes et techniques d'acquisition, de traitement et de restitution de données sont-elles devenues indissociables, de nos jours, de la gestion environnementale de l'espace, mais également dans canevas méthodologique dans travaux de recherche en géographie.

Source : PAEGELOW (2004) : « Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective »

D'autres géographes expriment la crainte que le SIG renforce la dangereuse tendance qui consiste à travailler sans lien avec la réalité du terrain (FOTSING, 2005). En tant qu'outil pour la recherche scientifique qui a fait ses prouesses ces dernières années à travers de multiples publications⁽¹⁶⁾, les SIG constituent le moteur dans cette partie méthodologique (Schéma 1.2) puisque la télédétection et la géostatistique vont lui fournir les ressources nécessaires pour son fonctionnement : les données géographiques permettant ainsi de cataloguer toutes les données collectées, et de par ses capacités de superposition et visualisation cartographique vont permettre la production d'information pour la vérification de certaines hypothèses.

Conclusion du Chapitre 1

Ce chapitre a mis en place le cadre des concepts utilisés et la méthodologie de travail dans cette étude. Ces concepts diffèrent selon les disciplines qui en donnent chacune leur propre définition, celle de son objet d'étude. Celui-ci en géographie est systémique, donc sa définition et sa compréhension doivent engager plusieurs indicateurs. Elles doivent adopter une méthodologie transversale de géographie actuelle.

Ces concepts et méthodes donnent une meilleure compréhension de la théorie sur la zone d'étude.

(16). Une étude a été faite par FOTSING (2005), celle-ci montre que, dans la célèbre revue *Science Direct*, les articles faisant référence aux SIG sont passés de 34 avant 1991 à 1668.

LES COMPOSANTES NATURELLES DES TERRITOIRES DE L'EAU

Sommaire

2.1	Les composantes climatologiques	70
2.1.1	La circulation atmosphérique et océanique	70
2.1.2	Les températures et les pluies	72
2.1.3	L'insolation et l'évaporation	73
2.1.4	Les vents	74
2.2	Les composantes géomorphologiques	75
2.2.1	La période pré-Flandrienne	76
2.2.2	Le Nouakchottien	77
2.2.3	Le subactuel et l'actuel	79
2.3	Les composantes pédologiques	81
2.4	Les composantes d'hydrologie fluviale	83
2.4.1	Le cadre hydrogéographique	83
2.4.2	Le Régime fluvial	89
2.4.3	Les écoulements de surface	96
2.4.4	Les eaux souterraines	98
	Conclusion du Chapitre 2	99

Le territoire de l'eau du delta du fleuve Sénégal est une délimitation naturelle partagée entre le Sénégal (rive gauche) et la Mauritanie (rive droite) (figure 2.1). L'élément central de ce territoire est la ressource en eau, ressource qui s'avère hautement stratégique dans un espace doté d'une pluviosité faible, où l'absence quasi permanente d'eaux douces de qualité doit être compensée, alors même que les populations concernées sont importantes et en croissance rapide (KAMARA et al., 2012). Ce chapitre présente les composantes de la géographie physique du delta du Sénégal. Cette thèse de doctorat considère le delta du Sénégal comme un territoire à composantes naturelles (DEMANGEOT, 1994) : (le *Waal*⁽¹⁾ : terres riches et fertiles, la ressource en eau, les zones humides) sur lesquelles s'établissent plusieurs activités humaines, car les deltas constituent un type de milieu qui a toujours abrité de fortes densités de population de par ses richesses (FANCHETTE, 1997), et que le delta n'est territoire de l'eau que s'il y'a une appropriation humaine.

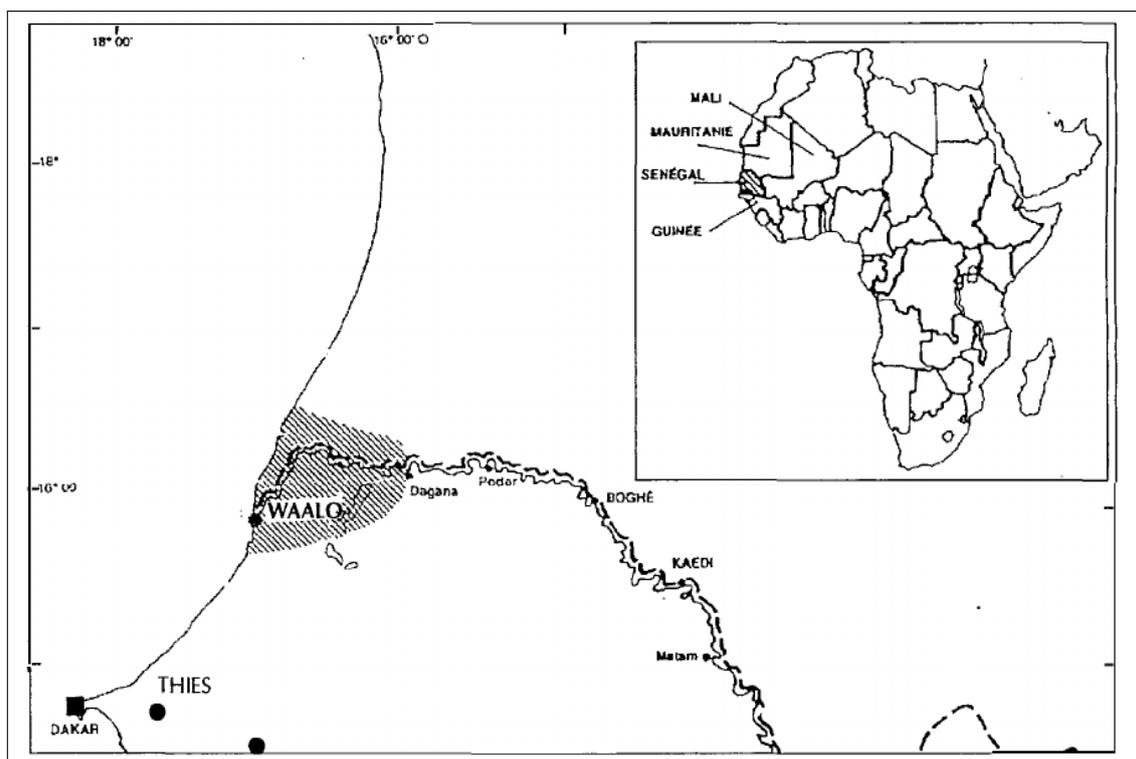


FIGURE 2.1 – Le *Waal* au Sénégal et en Afrique de l'Ouest d'après TOURRAND (2000)

Ces composantes physiques s'organisent autour de la ressource en eau, car du fait de sa rareté, elle conditionne sa valorisation puisque pour les hommes, c'est plus qu'une ressource

(1). Le *Waal* est le territoire naturel sur lequel s'est établi le delta. Il couvre une superficie de 8000km² à cheval sur les deux rives du Sénégal. Ce territoire a aussi une connotation anthropologique (*Waal* peut désigner le royaume du *Waal*) et agro-pédologique (*Waal* pour désigner les terres riches et fertiles du delta). Le delta est la partie centrale du *Waal*, mais de plus en plus dans le langage courant, le terme delta tend à remplacer le terme *Waal*.

(ZOUNGRANA, 2006) et plus encore sa gestion dans la tradition du delta du Sénégal se confond à celle des aménagements agricoles. Toutes ces composantes naturelles que nous allons présenter ont plus ou moins un lien direct ou indirect sur la salinisation, car elles peuvent être des facteurs de la pédogenèse et de typologie des sols.

2.1. Les composantes climatologiques

Le delta du Sénégal appartient au grand littoral Sénégalais⁽²⁾ caractérisé par deux grands secteurs côtiers, répartis de part et d'autre depuis la presqu'île de Dakar, aux caractéristiques morphologiques et hydro-sédimentaires différents, mais habités au Nord comme au Sud par les mêmes circulations atmosphérique et océanique qui conditionnent le climat littoral en général et deltaïque en particulier. (CORMIER SALEM, 2016; SAKHO, 2011).

Le climat, dans le contexte du delta du Sénégal, exerce son influence sur les sols au moment où ils sont libérés de la submersion. Cette submersion aujourd'hui contrôlée⁽³⁾ a permis de mettre en valeur d'énormes superficies de terres agricoles. Mais, pendant les périodes de retrait des eaux de submersion des parcelles irriguées ou dans les superficies abandonnées ou non exploitées, il se produit une évaporation très intense se caractérisant par un crevassement très poussé des sols argileux qui favorise une perméabilité donc, une capacité d'absorption d'eau et de limons énorme pendant les périodes de « re-crue ». Cette évaporation intense induit également une manifestation des solutions des sols qui amène la formation d'abondantes efflorescences salines.

2.1.1. La circulation atmosphérique et océanique

Comme dans toute la frange sahélienne de l'Afrique de l'Ouest, le déplacement du Front Intertropical (FIT) de convergence et des trois anticyclones (Açores, Libyen et Sainte-Hélène) gouvernent le climat du *Waalo* (LEROUX, 1980; ROCHETTE, 1974). Après les sècheresses des années 1970, le climat du delta du Sénégal est devenu un climat sahélo-saharien qui repose sur deux saisons par an : la saison sèche et la saison des pluies communément appelée *hivernage*

(2). Limité l'Ouest par l'océan Atlantique, le Sénégal présente un littoral de 700 km caractérisé par des côtes rocheuses (174 km environ), des côtes sableuses (environ 300 km) et des estuaires à mangrove sur environ 234 km (SAKHO (2011, p. 32)).

(3). La submersion dans le delta du Sénégal n'a pas été contrôlée avant 1964. Les systèmes de production reposaient sur l'arrivée de la crue pendant la saison des pluies (Juin-Octobre), et le retrait de celle-ci pendant la saison sèche. Depuis la création en 1964 de la digue de protection bordant lit mineur du Sénégal, l'irrigation se fait par maîtrise totale de l'eau.

2.1 LES COMPOSANTES CLIMATOLOGIQUES

selon les récits de la colonisation d'Afrique (A. DIAW, 1993 ; KAMARA, 2013 ; A. KANE, 1997 ; SY, 1995). Le FIT est soumis à des mouvements saisonniers et réguliers (TOURRAND, 2000).

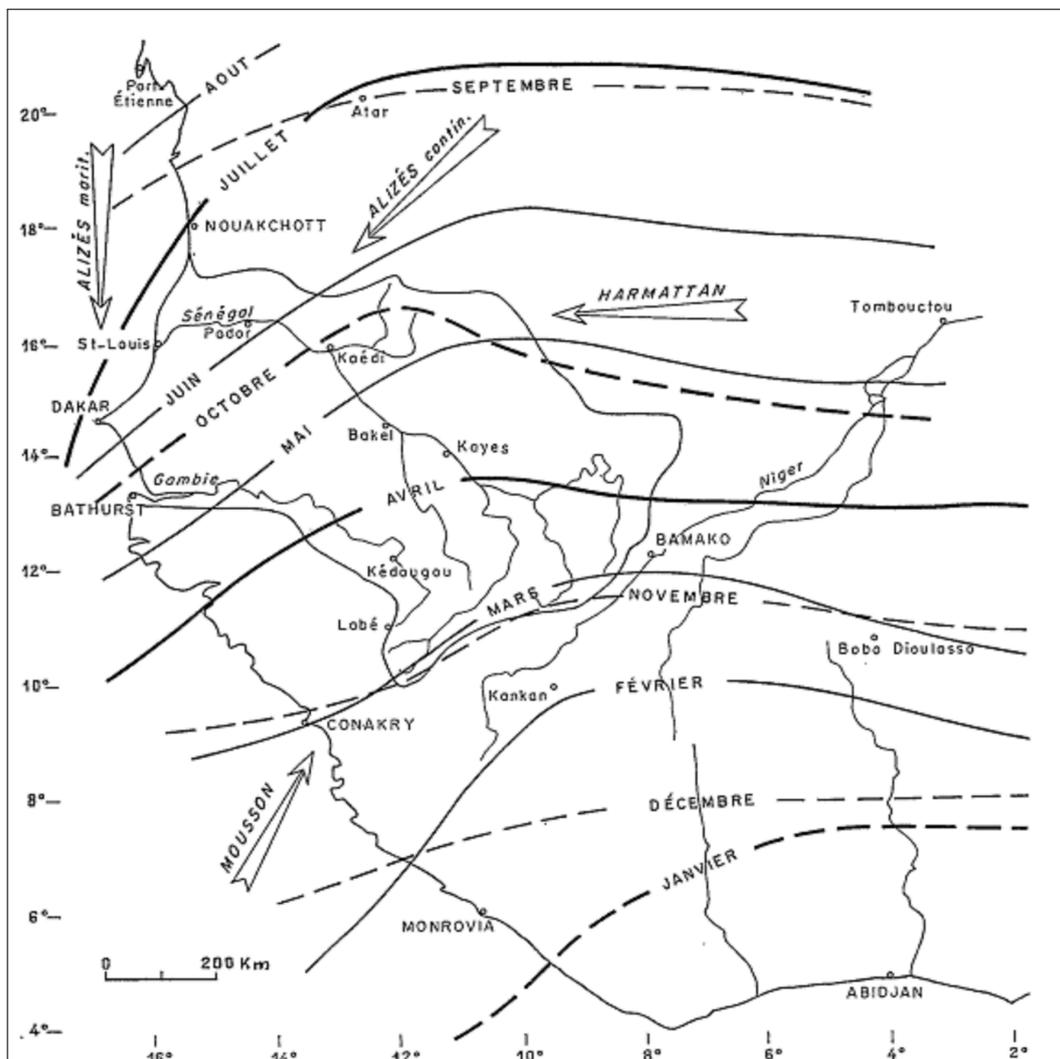


FIGURE 2.2 – Déplacement du FIT au cours de l'année d'après MICHEL (1973)

En saison sèche, il se trouve très au Sud, et le Sénégal est soumis au régime des alizés, vents de direction NE générés par l'anticyclone des Açores (Figure 2.2). Il s'agit de l'Harmattan. Ces vents provenant du Maghreb et du Sahara sont secs et chauds et sont responsables des températures extrêmes et des forts taux d'évaporation existant dans le delta et dans tout le Sénégal.

Comme la circulation atmosphérique, le climat littoral et du delta sénégalais est sous l'influence des courants marins généraux qui agissent tout le long de la côte ouest-africaine. Il s'agit du courant des Canaries, issu du grand tourbillon subtropical dans l'Atlantique nord, du courant de Guinée, du courant sud équatorial et du contre-courant équatorial (SAKHO, 2011). En saison sèche, des eaux froides et salées, proviennent du courant des Canaries, mais aussi

des upwellings (remontées d’eaux froides, riches en éléments nutritifs), circulent de décembre à avril. Les eaux tropicales chaudes et salées circulent de mai à juillet sous l’influence des flux de mousson.

En hivernage, le courant océanique de Guinée draine des eaux chaudes et dessalées. Le FIT, pendant cette période, gagne l’hémisphère nord et le Sénégal passe l’influence de Sainte-Hélène avec des vents dominants chauds et humides (OMVS, 2006; SALL, 2006). Dans ces conditions sahélo-sahariennes, la végétation n’est pas suffisante pour créer un effet de brise-vent, la sodicité des terres donnant une texture meuble et mobilisable par le vent, puis l’abandon de celles-ci par la riziculture (les sols sont nus), donc les flux ont tendance à déployer les particules fines vers les superficies aménagées créant ainsi de nouveaux problèmes.

2.1.2. Les températures et les pluies

La pluviométrie de la région est caractérisée par des pluies faibles, irrégulières, réparties sur une courte période (2 à 3 mois), entre fin juillet et fin septembre. Dans l’ensemble, les quantités et le nombre de jours de pluie diminuent du Sud au Nord.

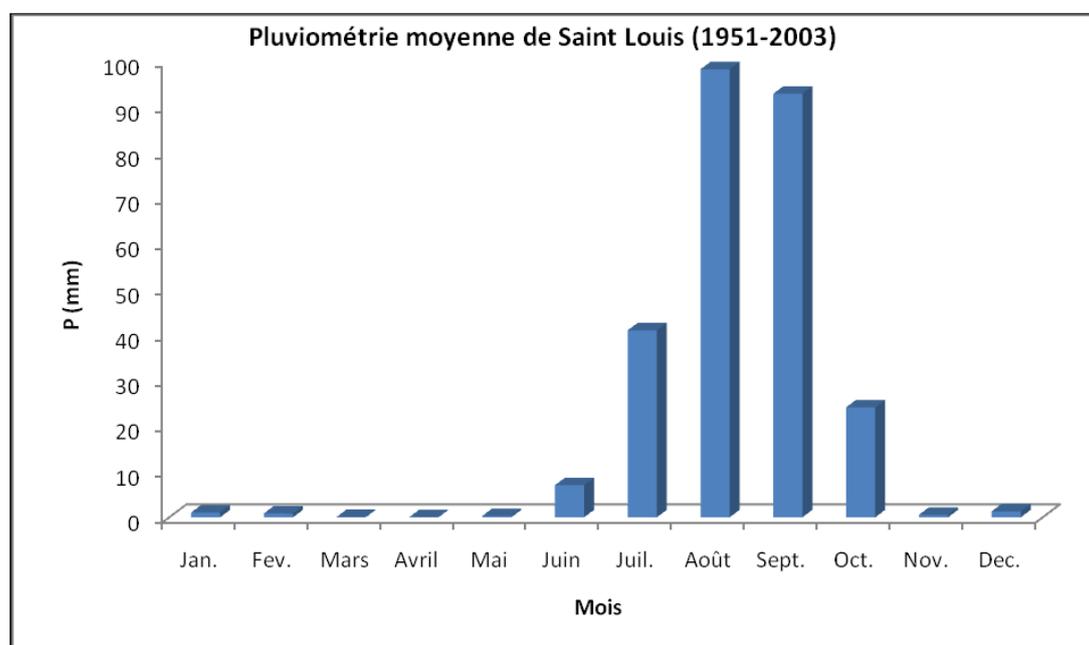


FIGURE 2.3 – Pluviométrie moyennes mensuelles de Saint Louis (1951–2003) - (Source : DAIH, 2009)

Les moyennes mensuelles sont de 200 – 300 mm dans le Delta (figure 2.3) et la basse vallée, 300 – 400 mm dans la moyenne vallée, 500 – 600 mm dans la haute vallée (OMVS,

2006).

Les températures varient selon les mois et les saisons. Et comme la pluviométrie, elles influent considérablement le calendrier culturel de la riziculture. Entre le mois de décembre et le mois de Mars, les températures minimales varient entre 14 et 18°. Et aux mois de Mai-Juin, un maximum peut être rencontré jusqu'à 45° dans le delta, mais à Saint-Louis les températures maximales atteignent rarement les 35° du fait de sa situation littorale.

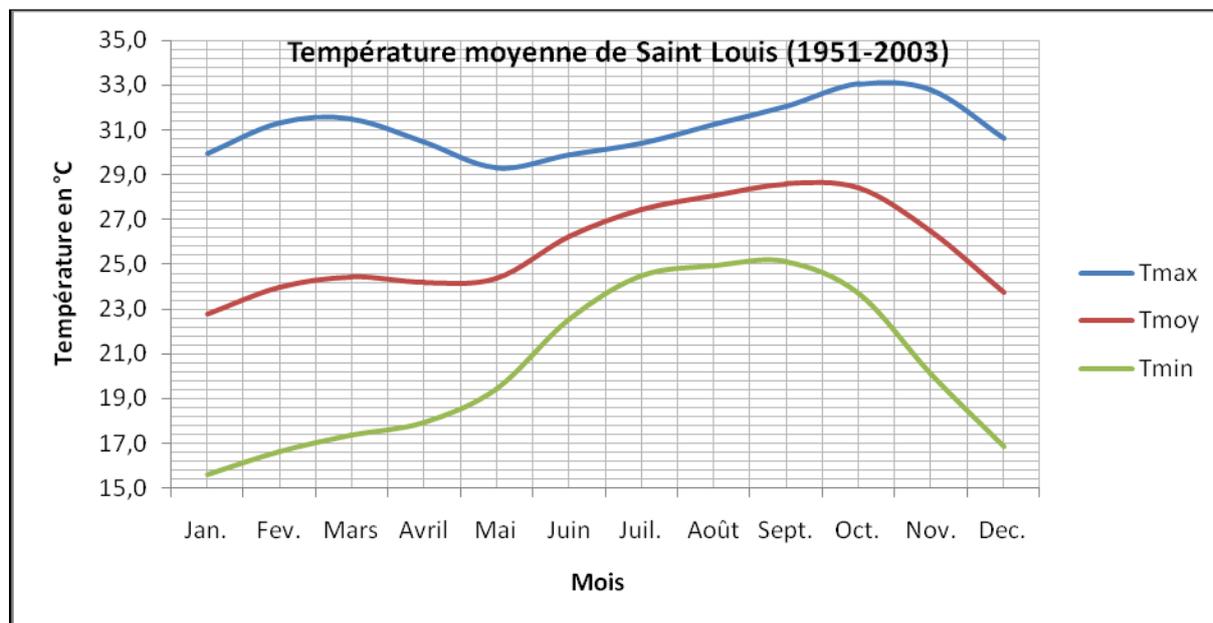


FIGURE 2.4 – Moyenne mensuelle des températures à Saint Louis (1951–2003) - (Source : DAIH (2009))

2.1.3. L'insolation et l'évaporation

L'insolation est une variable thermique très favorable au développement des cultures pratiquées dans le delta. Situé en zone sahélienne, le Delta du fleuve Sénégal enregistre des moyennes mensuelles d'insolation élevée. Les quantités reçues annuellement avoisinent 3000 heures soit 125 jours (CISSÉ, 2011).

L'évaporation suit le comportement de tous les éléments du climat dont elle peut être considérée comme étant une résultante avec toujours des valeurs faibles sur le littoral et assez élevées à l'intérieur. Elle est minimale en saison de pluies, ceci s'explique par la baisse des températures, l'humidité de l'air élevée et la faible insolation.

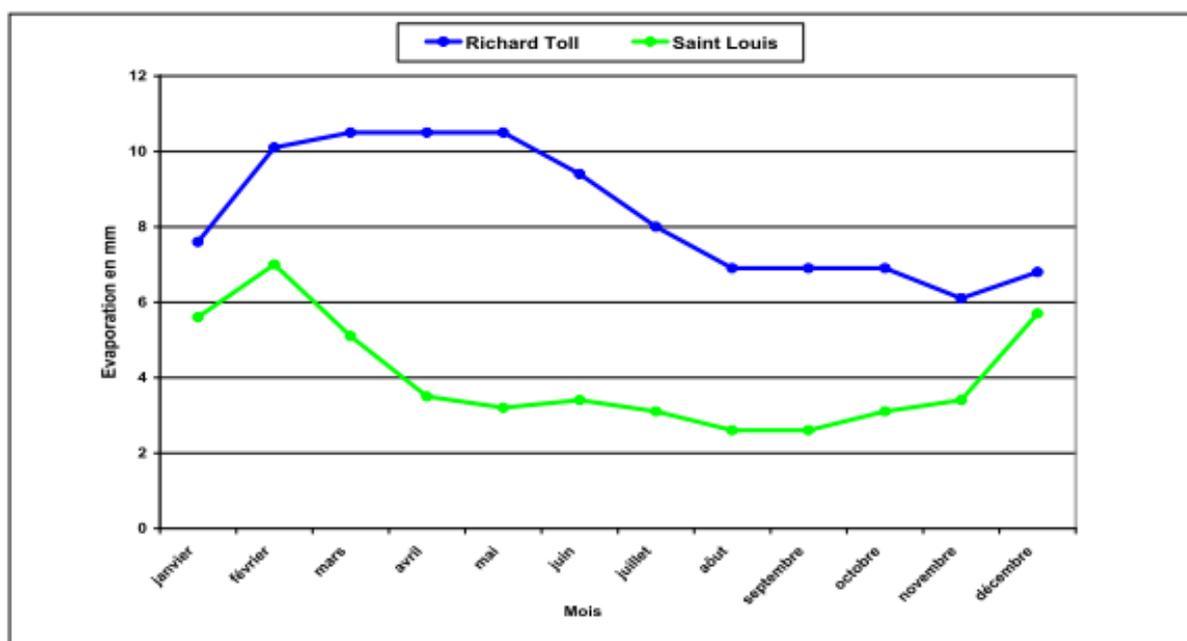


FIGURE 2.5 – Évolution mensuelle de l'évaporation à Saint Louis et à Richard Toll (1994 – 2005) SAED (2009)

2.1.4. Les vents

Trois types de vents balaient le Delta du fleuve Sénégal suivant le rythme des saisons (LEROUX, 1980). L'**Alizé maritime** : souffle de novembre à février pendant la saison sèche froide. Il est issu de la façade orientale de la cellule des Açores. C'est un vent frais et humide de direction Nord-est à Nord-Nord-est. La saison sèche est le cycle des vents chauds et secs chargés de poussière (continentaux) soufflant sur l'ensemble de la zone. Le véritable **harmattan** s'observe surtout de mars en juin. C'est un vent fort du secteur Est à Nord-Est. Il s'accompagne des températures maximales les plus élevées (42 à 46°C). Il est très néfaste pour les cultures irriguées et capable de diriger les particules de sels dans les superficies des dommages agricoles. La **mousson** intervient en hivernage et favorise l'arrivée des précipitations dans le delta. C'est un vent chaud et humide provenant de l'Anticyclone Sainte Hélène.

Les vents sont un facteur dont il faut tenir compte dans les calendriers des cultures irriguées, car ils ont des répercussions importantes dans les périmètres irrigués, les axes hydrauliques et les émissaires de drainage. Les risques d'échaudages et de perte totale des cultures sont surtout à craindre quand l'harmattan survient pendant les phases d'induction florale et de floraison. La moyenne et la haute vallée sont sous le régime de ces vents. Le Delta, en raison des influences océaniques, bénéficie du régime des alizés maritimes du Nord-Ouest dont l'humidité

adoucit le climat.

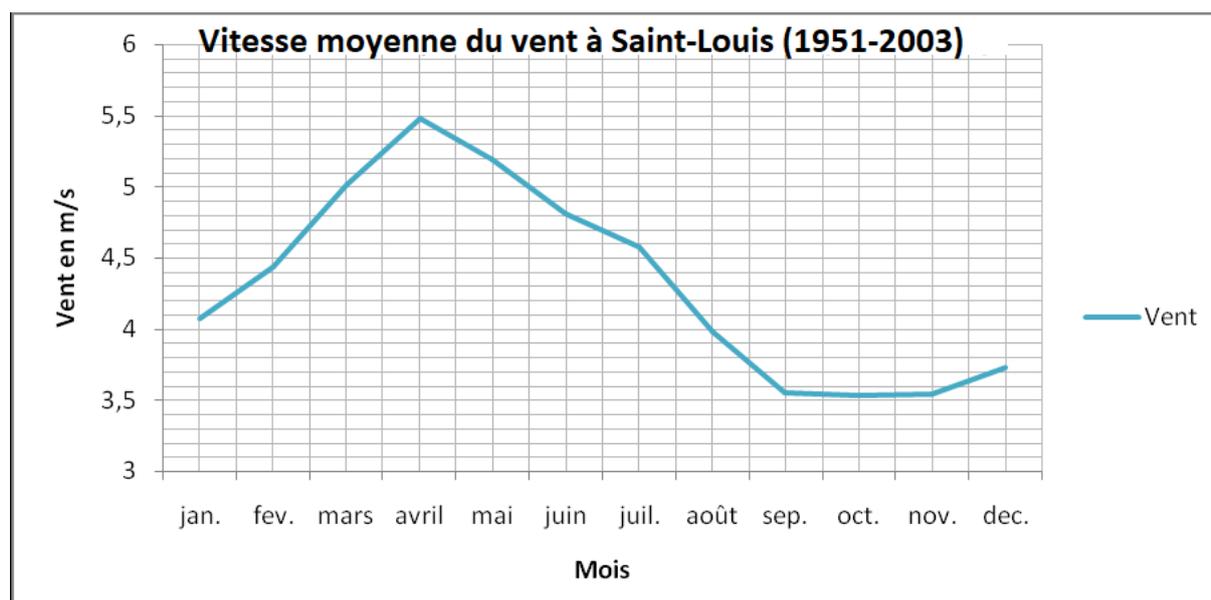


FIGURE 2.6 – Moyennes mensuelles du vent à Saint Louis (1951 - 2003) (Source : SAED (2009))

Tous ces paramètres climatiques sont très importants dans les pratiques agricoles dans ledelta du fleuve Sénégal , mais ils ne sont pas traités, analysés et utilisés dans les activités agricoles et ne font pas l'objet d'un suivi régulier et rigoureux de la part des responsables de la gestion de l'eau.

La prise en compte des composantes climatiques dans l'étude de la salinisation des sols est nécessaire, car ce sont des facteurs principaux de pédogenèse et antérieurement à la construction des barrages, le climat n'avait pu développer que des caractères morphologiques d'aridité : la faible différenciation des horizons pédologiques et la salinité.

2.2. Les composantes géomorphologiques

L'étude de la géomorphologie des terrains est liée aux grands travaux d'aménagement régional, principalement ceux de mise en valeur agricole. L'une des premières études géomorphologiques réalisées dans le delta est faite par TRICART ⁽⁴⁾ en 1954 à la demande de la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) ⁽⁵⁾. TRICART (1955b) a établi une carte géomorphologique au 1/50000ème comportant une notice descriptive des terrains. C'est un document d'un très

(4). J. TRICART, 1955a. « Aspects sédimentologiques du delta du Senegal ». In *Geologische Rundschau* 43.2, p. 384-397

(5). La mission d'Aménagement du Sénégal est devenue plus tard la SAED (Société d'Aménagement des eaux du delta et de la Falémé)

grand intérêt pour le pédologue, car il reconstitue l'origine des dépôts, leur localisation et leur salure. Il s'agissait donc de définir les types de milieux géomorphologiques, de préciser leur dynamique propre et de figurer leur extension, afin de guider des avant-projets. En fonction des recherches de TRICART, tel secteur devait apparaître comme favorable à une mise en valeur éventuelle, tel autre, au contraire, dans les conditions actuelles, comme non susceptible d'aménagement. Cette carte géomorphologique constitue un point de départ incomparable pour la reconnaissance de la région et des études géomorphologiques et pédologiques d'après les indépendances (les travaux de (FAO et SEDAGRI, 1970; MICHEL, 1973; SY, 1995).

Tous ces résultats ont permis de dresser la géomorphologie du delta du Sénégal depuis le continental terminal du tertiaire supérieur aux formations de cuvettes de limons et d'argile actuelles.

2.2.1. La période pré-Flandrienne

Au Tertiaire supérieur, le continental terminal d'origine détritique n'est pas affleurant dans la zone du delta, mais apparaît dans la vallée sous forme de glacis qui plonge sous les formations récentes (A. DIA, 1986; A. DIAW, 1993; A. NIANG, 1998). L'histoire géomorphologique du delta du Sénégal est relativement récente. Elle se situe entre la période de régression pré-flandrienne (ogolienne) et la période Subactuel (20.000 – 2000 BP) même si dans les écrits les phases antérieures à sa mise en place sont négligées. Cette phase antérieure commence d'abord au Pléistocène par l'affleurement de cuirasse en plateau sur de faibles étendues des rives du lac de Guiers (A. KANE, 1997; MICHEL, 1973; TRICART, 1955a), ensuite pendant l'Holocène par l'édification sur son emplacement actuel de l'erg des dunes rouges (GAUCHER, 1966; TRICART, 1955a). Ce massif dunaire au relief puissant s'est constitué pendant une période de régression alors que la mer se trouvait à une côte sensiblement plus basse que son niveau actuel et il s'étendait à tout le delta. Ensuite, une période de transgression s'en est suivie, la transgression Ouljienne qui amènera la mer dans les espaces inter-dunaires et constitua un golfe sur l'emplacement actuel du delta.

Entre la fin de la Pléistocène et le début de l'Holocène une période régression débuta, la régression pré-flandrienne, avec une extension généralisée du régime des cuvettes salées dues à l'assèchement du climat, cuvettes où se déposèrent en abondance des évaporites, chlorures et sulfates et parmi ces derniers le gypse (MONTEILLET et al., 1993). Jusqu'à la transgression flandrienne, aucun delta n'a existé sur l'emplacement actuel du delta du Sénégal (TRICART, 1955a). La région a été tour à tour, une zone d'épandage, golfe marin, champ de dunes.

2.2.2. Le Nouakchottien

Le Nouakchottien correspond à la transgression ⁽⁶⁾ *flandrienne* (du nom de la Flandre où elle a eu ses effets les plus visibles) est l'épisode où, depuis le Pléistocène récent, à la fin de la dernière glaciation de Würm, c'est-à-dire il y a environ de 19000 ans, la glace des inlandsis a fondu et entraîné une remontée planétaire du niveau de la mer (d'environ 100 m).

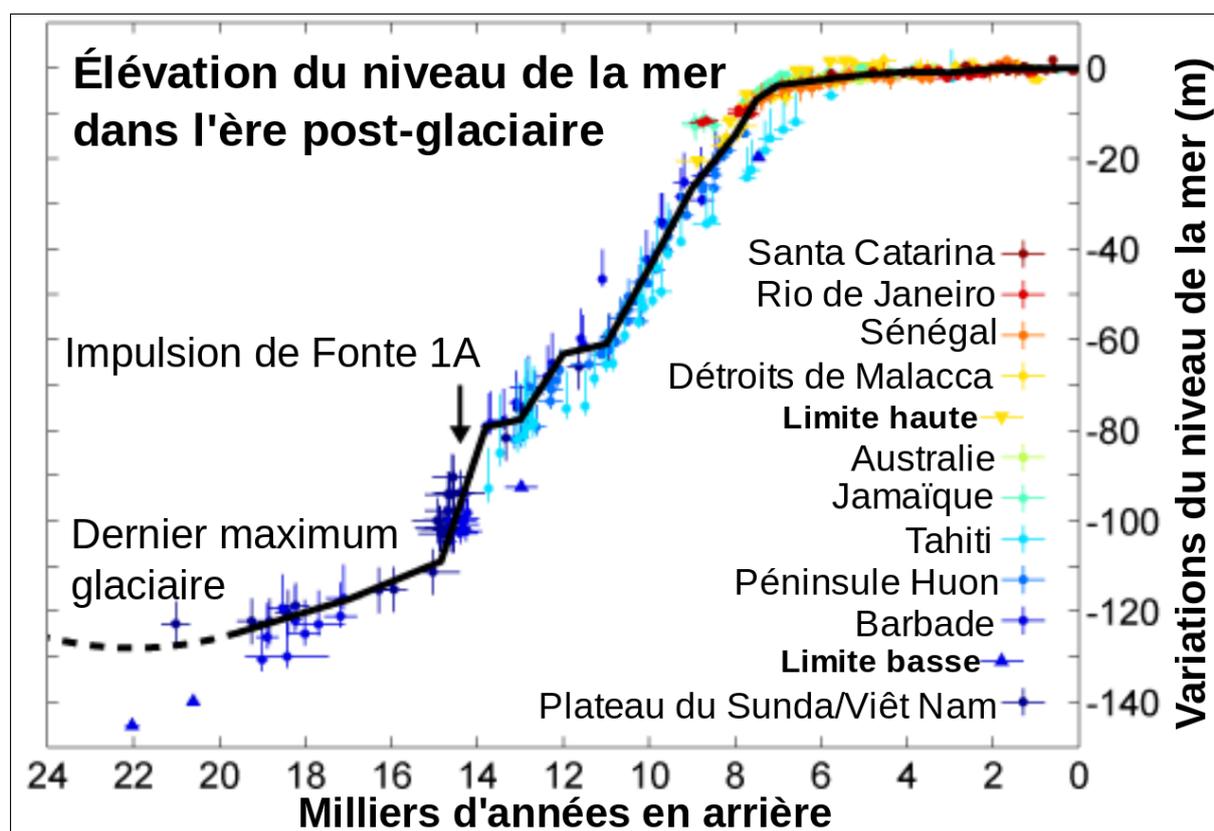


FIGURE 2.7 – Variations mondiales du niveau de la mer au cours de la transgression flandrienne. Les dates sont indiquées en BP : « avant présent », soit 1950 année de référence - Source www.wikipedia.org

Toutefois, l'eau n'est pas montée de manière régulière. Il y a eu succession de transgressions et régressions. Au cours de la dernière phase de cette transgression *flandrienne*, « l'océan est remonté jusqu'à 3,50 m au-dessus du niveau actuel comme l'attestent les cordons littoraux fossilisés sous les dunes littorales actuelles (GAUCHER, 1966; TRICART, 1955a).

C'est lors de cette transgression Nouakchottienne 6800 à 4500 ans BP, qu'a commencé de se mettre en place l'actuel delta du Sénégal. Le delta du fleuve Sénégal est un delta digité en « patte d'oie » analogue à celui du Mississippi. Il est alors constitué par un ensemble de bras

(6). Les transgressions provoquées par une élévation de quelques mètres du niveau de la mer par rapport au niveau actuel expliquent le phénomène des plages suspendues, formées parfois de cordons de galets fossilisés, visibles par exemple le long des littoraux GUILCHER (1954)

et de lagunes, et séparé de la mer par un cordon littoral que le fleuve coupait perpendiculairement par plusieurs estuaires (MICHEL, 1973). Vers 2000 BP, le maximum de la transgression *flandrienne* fait que le niveau marin était proche de l'actuel.

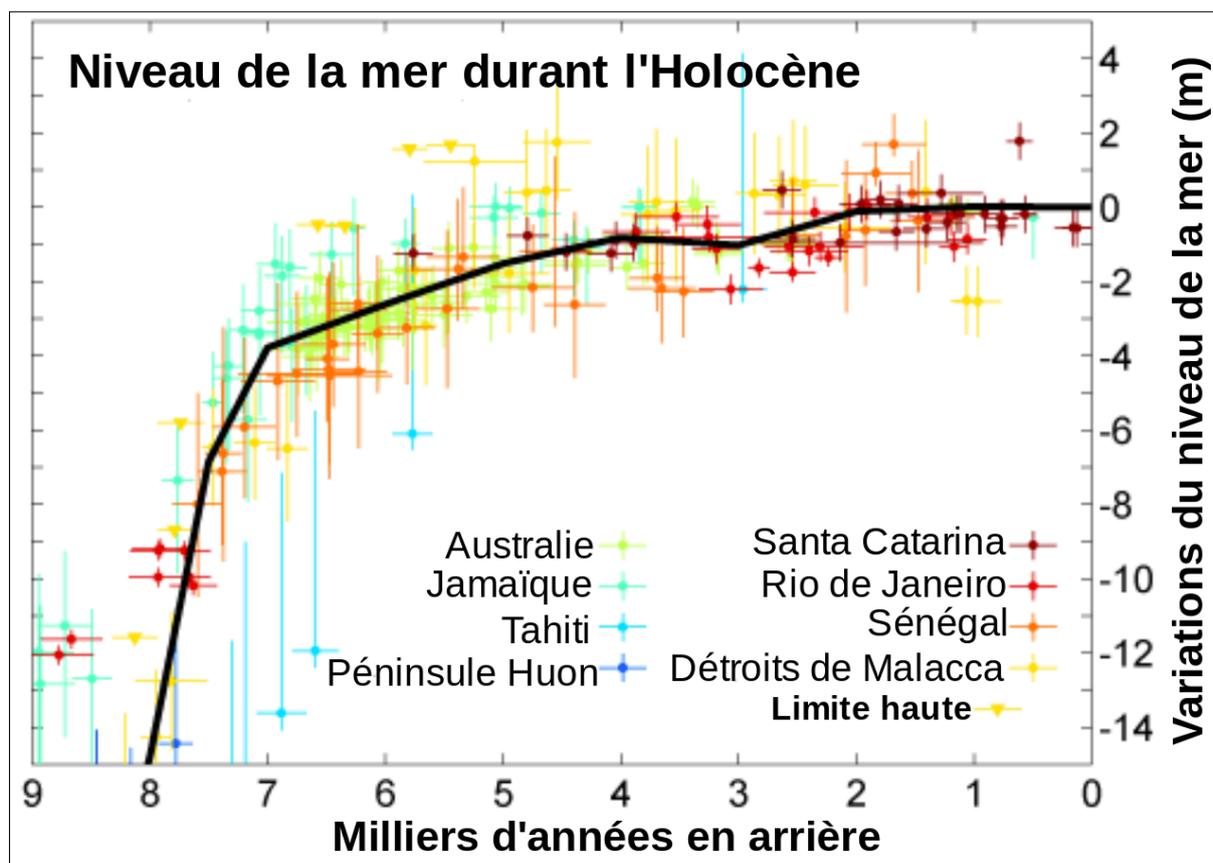


FIGURE 2.8 – Variations mondiales du niveau de la mer au cours de l'Holocène, (-6000 à +2000 par rapport à JC, ici)- Source www.wikipedia.org

Les eaux du fleuve et de ses défluent s'écoulaient entre les levées dunkerquiennes, digues naturelles qu'elles avaient construites en alluvionnant latéralement. Les sédiments de ces levées constituent une importante source de sel, car incorporé aux alluvions, remonte en surface sous l'effet d'une puissante évaporation. Entre celles-ci se trouvaient des lagunes dont l'eau est plus ou moins salée et dans lesquelles pouvait se déposer soit une *slikke* d'origine marine, soit du limon d'origine fluviale. Au cours des crues ces levées pouvaient être percées et les eaux pénétrant dans les lagunes, y déposèrent des alluvions sous forme de petits deltas que TRICART appelait deltas de rupture. La transgression *flandrienne* s'est achevée, le niveau marin s'est stabilisé. De la sorte, le colmatage alluvial a repris l'avantage et un delta s'est édifié progressivement dans la lagune. En somme, les principaux ensembles morphologiques du delta étaient : les levées, les lagunes, les deltas de rupture, les plages, et les bras du fleuve et de ses défluent. Cette

morphologie était sensiblement différente de celle actuelle, mais certaines analogies se retrouvaient : les parties basses des formations de cuvettes ouvertes à la sédimentation (GAUCHER, 1966).

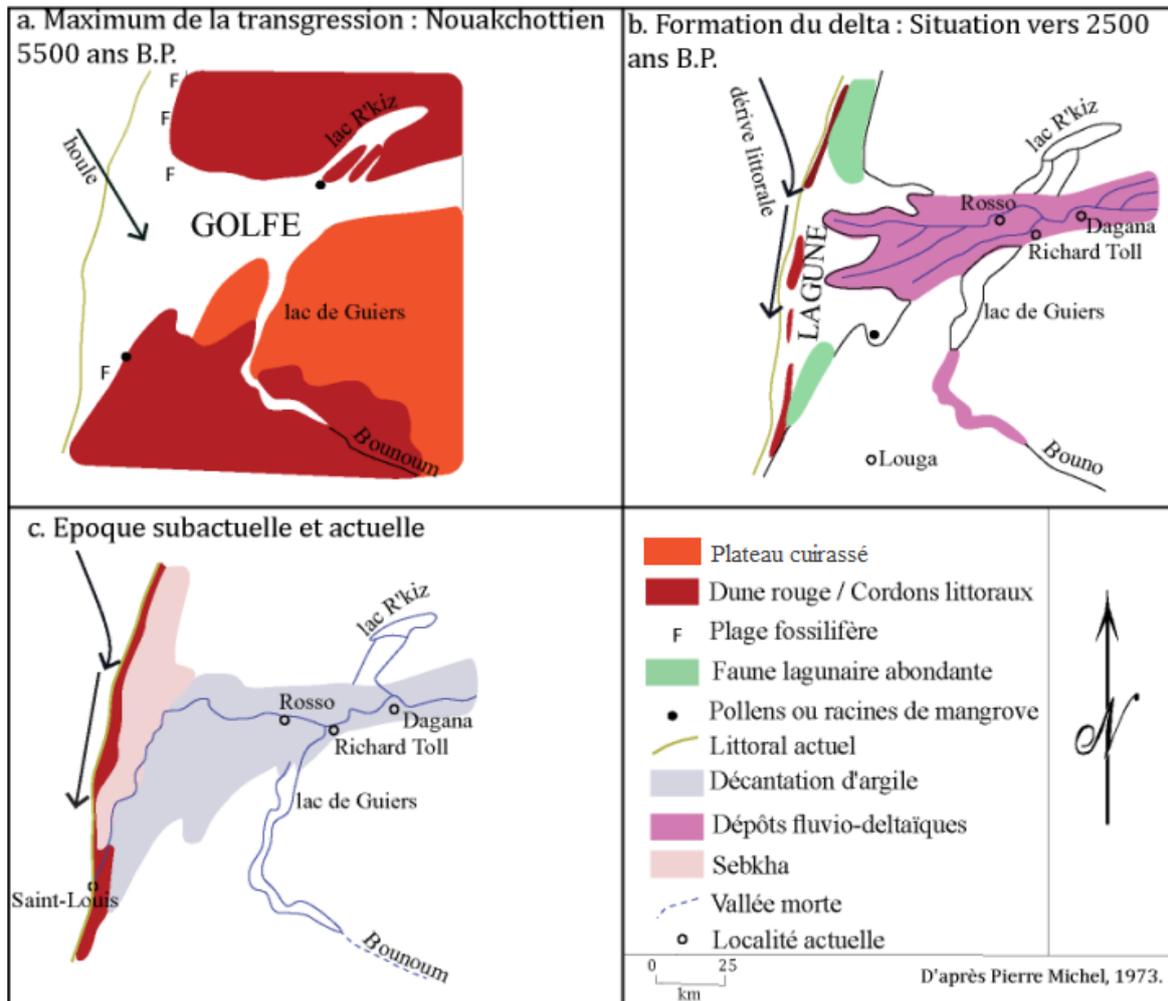


FIGURE 2.9 – Les phases de formation du delta du Sénégal d’après MICHEL (1973). (Source : KAMARA (2013)) mise à jour.

2.2.3. Le subactuel et l’actuel

La dernière période géomorphologique du delta est celle du Subactuelle, une petite régression post-flandrienne qui amena la mer au niveau 0. C’est la période pendant laquelle le fleuve a infléchi son cours vers le sud pour envahir le complexe des dunes rouges à Saint-Louis transformant ainsi le régime du delta en régime d’estuaire (SY, 1995). Le fleuve Sénégal longe alors la langue de Barbarie qu’il ne peut plus couper perpendiculairement. Le delta du Sénégal est un vrai delta, mais n’est plus fonctionnel. La dynamique actuelle du delta est régie par les agents morphodynamiques (le vent, l’eau) qui érodent les levées dunkerquiennes. En effet, le

2.2 LES COMPOSANTES GÉOMORPHOLOGIQUES

cumul des années sèches depuis 1968 a placé le delta du fleuve Sénégal dans un milieu sub-aride. Les vents efficaces, leurs fréquences et leurs intensités exercent un important travail de déflation pendant la saison sèche. Ce phénomène se traduit par une mobilisation constante des débits solides éoliens.

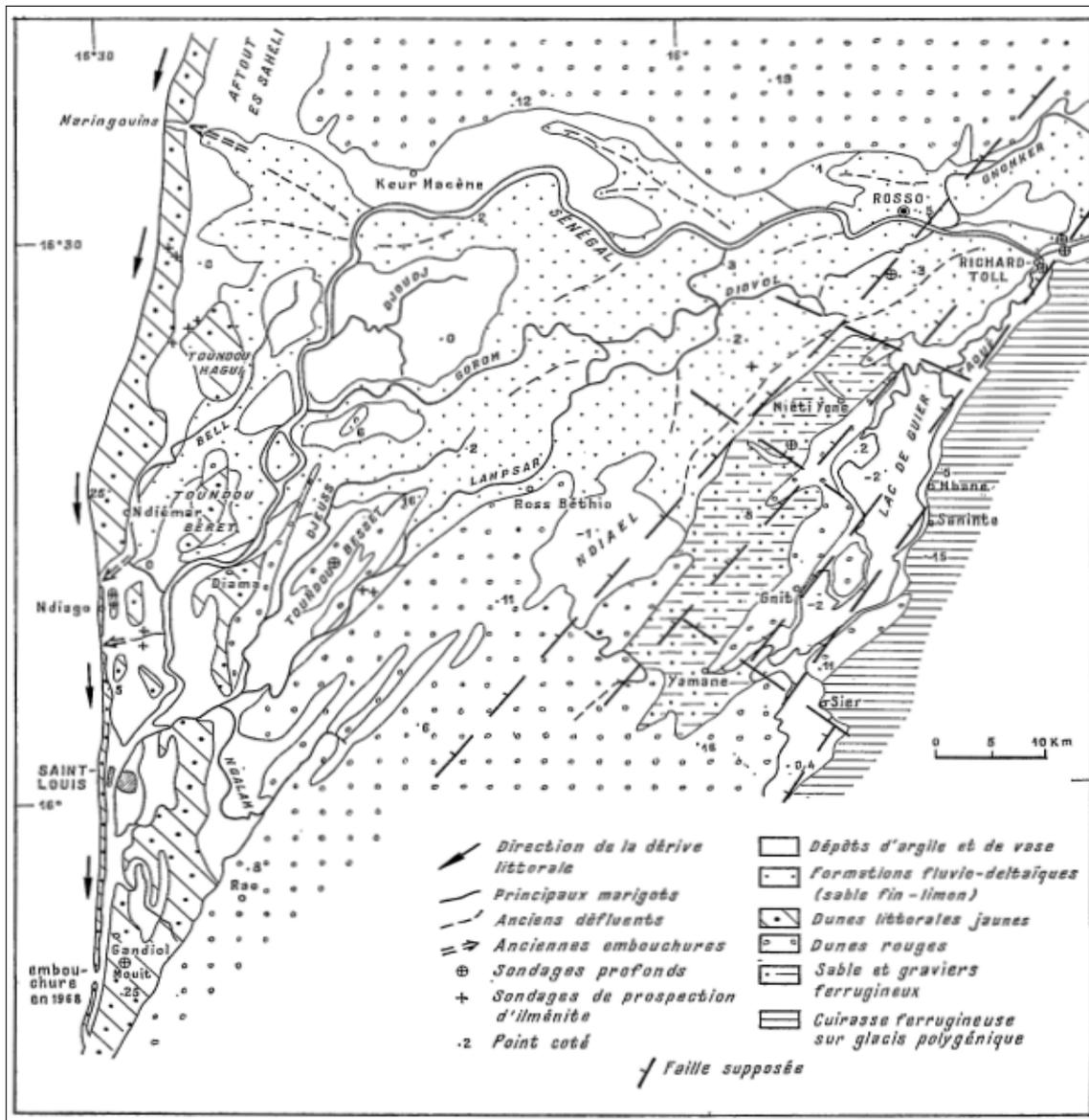


FIGURE 2.10 – Croquis géomorphologique - (Source : MICHEL (1973))

Les actions anthropiques dues aux aménagements hydroagricoles, aux charges pastorales, etc., jouent un rôle fondamental dans la reprise des phénomènes éoliens dont l'efficacité est accentuée par la remontée capillaire des sels incorporés dans le matériel deltaïque. La dynamique éolienne actuelle constitue donc une contrainte face aux aménagements hydroagricoles, obéissant à plusieurs facteurs (climatiques, topographiques, pédologiques, biogéographiques et anthropiques) (SY, 2008).

Cette évolution paléogéographique et cette dynamique actuelle du delta ont fourni à la fois le cadre et la matière aux processus de pédogénèse qui ont formé les sols (SY, 1995). Elles créent également un géosystème difficile à mettre en valeur où le sel gêne la végétation naturelle et cultivée. Aujourd'hui, l'inventaire et la cartographie des unités pédologiques dans le delta se basent sur les unités géomorphologiques différentes (sebkhas, levées, deltas de rupture, mangrove, dunes...) de même que la typologie pédologique.

2.3. Les composantes pédologiques

Aujourd'hui, le delta (comme dans le Gorom-Lampsar (sous-section 5.1.5)) se présente sous la forme d'une vaste étendue de zones basses (de 0 à 5 m) enserrée dans l'erg de dunes et complétée par un jeu complexe de dépôts fluviaux marins et éoliens qui sont liés au développement d'un réseau anastomosé de défluent (A. DIAW, 1993). Ces unités naturelles peuvent être regroupées en deux catégories suivant la physiographie du paysage et la catégorisation des sols dans le delta en dépend :

- Les massifs de dunes qui représentent les seuls éléments de relief de la zone, des sols dunaires peu évolués parsemées par une végétation arbustive et sont à vocation pastorale.



PHOTO 2.1 – Les dunes rouges du *Jeeri* - (Cliché M. DIAW (2008))

— Les zones basses d'origine essentiellement marine et fluviale sur lesquelles se sont établis les sols fertiles du *Waal* (sols sur sebkha, sols sur les levées fluviodeltaïques ou delta de rupture, sols de mangrove (ROCHETTE, 1974).

Ces unités morphopédologiques ont évolué suivant les facteurs de morphogénèse actuels (climat, végétation, temps...).

Les unités pédologiques du delta du Sénégal sont tributaires de ces grandes unités morphopédologiques, et la carte des sols établie par FAO et SEDAGRI (1970), montre que les sols sont affectés par les sels, conséquences de la mise en place du delta. On distingue 4 grands types de sols classés en fonction de leur texture et de leur structure (SAED, 2009) :

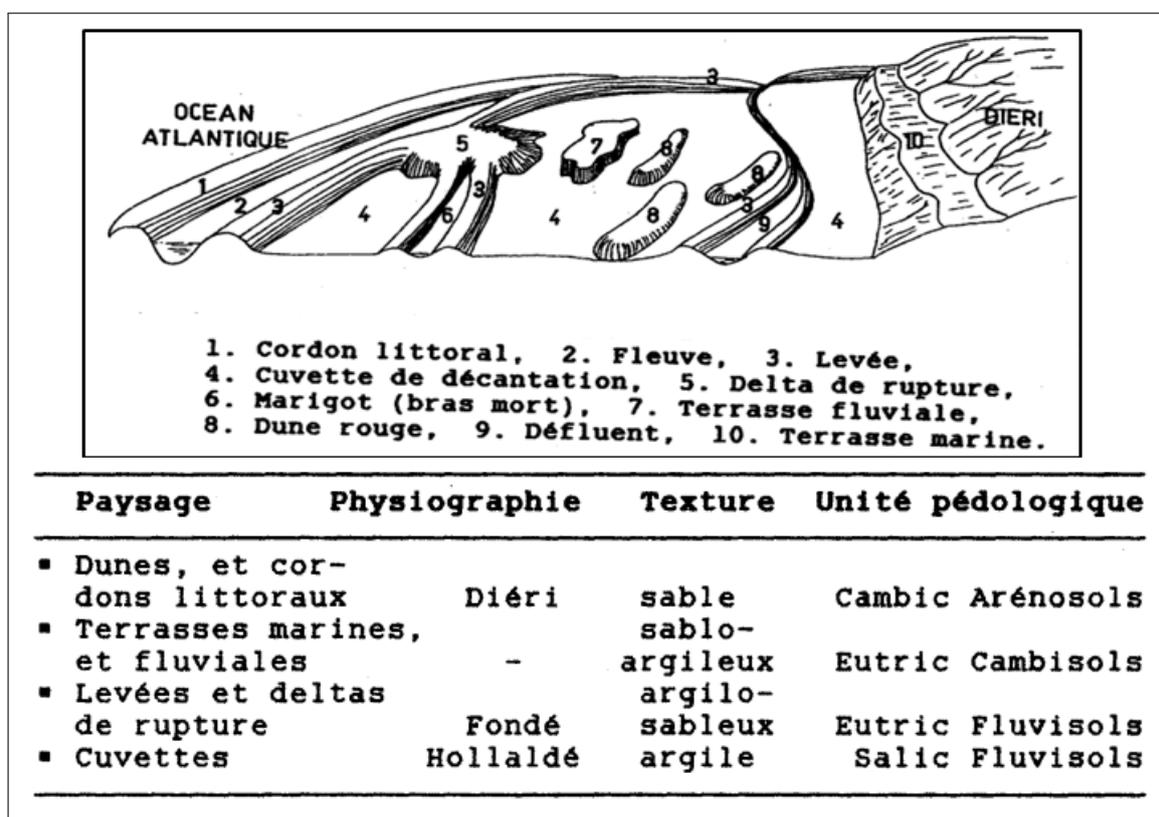


FIGURE 2.11 – Les héritages géomorphologiques - (Source : GAUCHER (1966))

— Les sols *Hollaldé* sont argileux, on les retrouve dans les cuvettes de décantation. Ce sont des sols lourds avec une teneur en argile d'environ 66 %. Ils sont formés par l'accumulation de dépôts fluviaux lors de la décantation des eaux de crue. Ils se caractérisent par une faible perméabilité, donc une bonne réserve en eau utile (bonne capacité de rétention). Ils sont plus aptes à la riziculture (le riz étant une plante aquatique) malgré le caractère difficile du travail du sol.

— Les faux *Hollaldé* sont des sols argilo-limoneux renfermant entre 10 et 35 % d'argile

qu'on rencontre principalement dans les levées fluvio-deltaïques. Ce sont les sols hydromorphes peu évolués. La texture est de moyenne à équilibrée de même que la teneur en matière organique (MO), la fertilité et la perméabilité.

- Les sols *Fondé* sont situés sur les bourrelets de berge. Ce sont des sols limoneux peu évolués d'apports hydromorphes. Ils sont favorables à toutes les cultures sauf le riz. La fertilité du sol est aussi contrôlée par le taux en matière organique.
- Les sols sableux non salés du *Jeeri* ne sont jamais atteints par la crue et reposent sur un substrat argileux.

Il est clair dans ce cadre pédologique que la composante hydrologique est le principal facteur de cette typologie. Les conditions hydrologiques naturelles confèrent aux sols leurs propriétés salines et la submersion artificielle assure le maintien de l'eau sur les terres agricoles.

2.4. Les composantes d'hydrologie fluviale

2.4.1. Le cadre hydrogéographique

Le fleuve, le bassin, la vallée et le delta

Le fleuve Sénégal, long de 1750 km, est formé, dans son bassin supérieur, de la réunion de deux rivières, le Bafing (principal affluent du Sénégal) et le Bakoye, dont la confluence se situe à Bafoulabé (Mali) à 1055 km de l'embouchure (figure 2.12). Il prend sa source dans le Fouta-Djalon en Guinée, traverse la partie occidentale du Mali, forme ensuite la frontière entre la Mauritanie et le Sénégal, se jette dans l'océan Atlantique, à environ 25 km en aval de Saint-Louis du Sénégal, par un estuaire modifié depuis 2003 par l'ouverture d'une brèche⁽⁷⁾ pour faire face aux risques d'inondation (KAMARA, 2013 ; C. KANE, 2010 ; MIETTON et al., 2008). Les conséquences à long terme (écologiques, économiques, sociales) de cette brèche sont encore très peu connues, notamment dans un contexte de fluctuations climatiques dans la région du bassin du fleuve Sénégal (systèmes hydrologique et marin artificialisés) (KAMARA, 2013 ; A. KANE, 1997). Toutefois, du fait de l'ouverture de cette brèche artificielle, l'île de la langue de barbarie est menacée, ce qui entraîne en 2012 l'ouverture de nouvelles brèches en amont de cette dernière contribuant à accélérer des réponses de la nature.

(7). En octobre 2003, la ville de Saint-Louis menacée par les eaux du fleuve Sénégal allait vivre l'une des pires histoires de ses inondations. Dans ce contexte de risque imminent, un canal de délestage dont l'objectif était de protéger Saint-Louis des inondations, appelé aussi brèche, fut ouvert sur la Langue de Barbarie, un mince cordon littoral qui sépare Saint-Louis de la mer.

Le fleuve Sénégal a un bassin hydrographique ⁽⁸⁾ (figure 2.12) de près de 300.000 km². Le fleuve est découpé en un ensemble de bassins versants ou bassins versants élémentaires ⁽⁹⁾ (onze au total), globalement à écoulement non pérenne (ALBERGEL et al., 1996), dont ceux du delta du Sénégal et des vallées « mortes » du Ferlo ⁽¹⁰⁾. À l'amont puis à l'aval de Kayes, il est rejoint en rive droite par deux affluents de moindre importance, la Kolinbiné et le Karakoro. Il reçoit ensuite en rive gauche les apports la Falémé, avant d'atteindre la ville de Bakel. Cette station marque la limite aval du bassin versant supérieur du fleuve, qui culmine à 1.330 d'altitude dans sa partie sud.

À partir de Bakel, le fleuve Sénégal quitte son haut bassin pour entrer dans son cours inférieur, habituellement désigné « vallée ». Il prend le nom éponyme de Sénégal et il sert alors de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie, sur près de 800 km. À hauteur de Richard-Toll, limite entre la vallée du fleuve et son delta, communiquent deux dépressions : le lac R'kiz en rive droite et le lac de Guiers en rive gauche plus artificialisé et qui est la principale source en eau potable de la ville de Dakar. À partir de Mbagam, situé un peu en amont de Rosso, commence le delta là où les bras du Sénégal affectent une forme sensiblement triangulaire. De son lit principal se détachent en rive gauche de nombreux bras, notamment. Le fleuve lui-même continue son parcours vers l'ouest, puis dévié par le cordon littoral, il s'infléchit vers le sud avant de se jeter dans la mer au Gandiol par une embouchure instable.

(8). « Le bassin hydrographique, employé plus largement, pourrait, sans dimension, regrouper les notions de bassin d'alimentation et de bassin versant ». (TOUCHART, 2007).

(9). « Le bassin versant est élémentaire et donc de petite taille... un bassin versant élémentaire peut ne pas connaître d'écoulement concentré linéaire permanent ». (TOUCHART, 2007).

(10). Le Ferlo est une zone sylvo-pastorale semi-désertique du nord-est du Sénégal, principalement constituée de savane arbustive et arborée très ouverte et périodiquement soumise à des feux. Elle doit son nom à un petit cours d'eau, le *Ferlo*.



FIGURE 2.12 – Le bassin hydrographique du fleuve Sénégal - (Source : [Wikipedia](https://fr.wikipedia.org/))

La vallée alluviale est une zone agroécologique qui s'étend de Bakel à St-Louis. Cette zone est limitée au Sud par la zone sylvo-pastorale⁽¹¹⁾ du *Ferlo* et le bassin arachidier⁽¹²⁾.

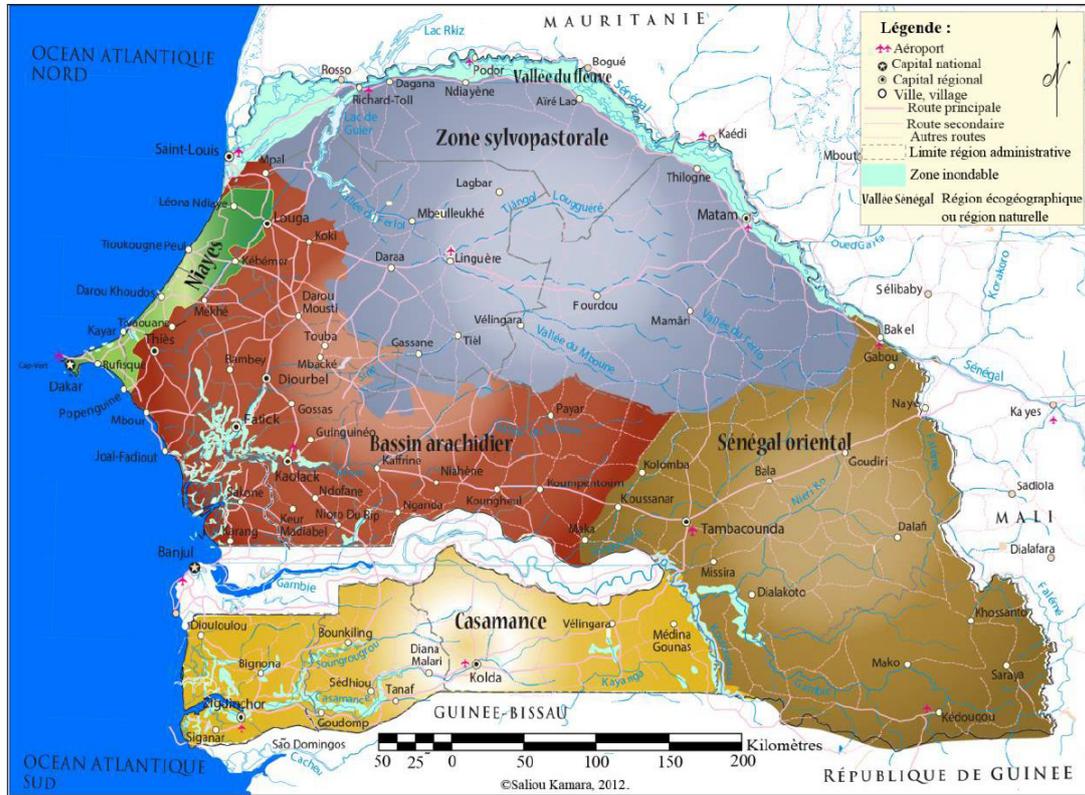


FIGURE 2.13 – Zones éco-géographiques du Sénégal - (Source : Centre de Suivi Écologique (CSE))

À partir de cette station (**Bakel**), la vallée progresse dans une plaine alluviale de 10 à 20 km de large, souvent inondée en période de crue (ZANTE, 1994). En formant de nombreux méandres, il parcourt alors une distance de 800 km environ et une dénivellée d'une douzaine de mètres jusqu'à son embouchure dans l'océan Atlantique, avec une pente moyenne très faible de l'ordre de 0,0015% en basses eaux (BADER, 2015). Ces terroirs sont aussi depuis les années 1970, le terrain d'expérience de petits périmètres agricoles dont l'irrigation est permise par une ou plusieurs motopompes grâce auxquelles sont pratiquées des cultures conseillées par la SAED qui voit ainsi son champ d'action s'étendre au delta du delta (WEIGEL, 1981).

(11). Cette zone agroécologique, domaine de prédilection de l'élevage, abrite 22 à 30 % du cheptel national de bovins et petits ruminants avec des systèmes de production organisés suivant un mode extensif transhumant (disponibilité en pâturages et en points d'eau) Source : www.isra.sn

(12). La zone du bassin arachidier est une zone écogéographique qui couvre le centre ouest du pays. Il possède une longue tradition de cultures vivrières et arachidière sous pluie sur des sols ferrugineux tropicaux. En concentrant près de 60% de la population rurale, la zone fournit l'essentiel de la production agricole avec l'arachide comme principale spéculation. Source : www.isra.sn

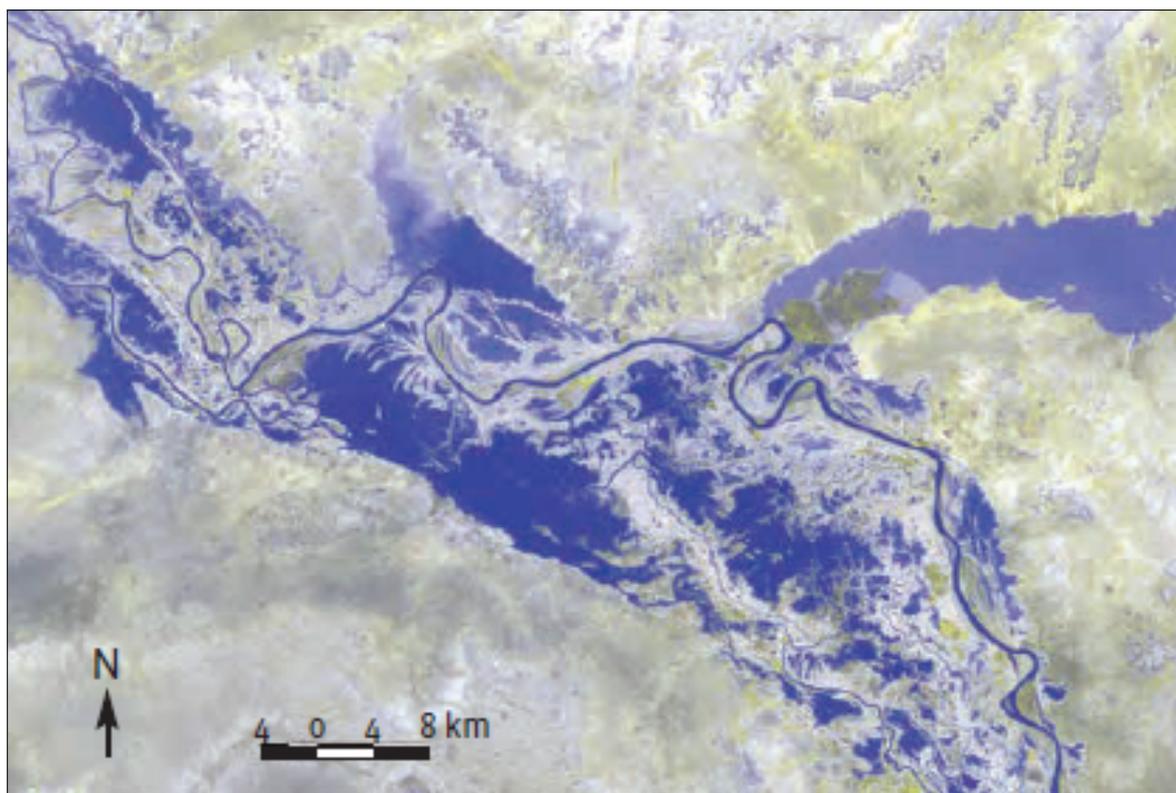


FIGURE 2.14 – Inondation du lit majeur du fleuve Sénégal dans la région de Kaédi, en période de crue (vue satellitaire) - (Source : BADER, BELAUD et al. (2015))

La vallée du Sénégal est formée de trois régions : Saint-Louis (Départements de Saint-Louis, Dagana et Podor), Matam (Départements de Matam et Kanel) et Tambacounda (Département de Bakel) soient 34% du territoire national. Du point de vue géographique, on distingue trois grandes zones hydro-écologiques :

- La haute vallée située en amont de Bakel qui s'étend sur les 50 km situés le long du fleuve Sénégal jusqu'à la frontière malienne et la rive gauche de la Falémé ;
- La moyenne vallée qui se développe de Bakel à Podor ;
- La basse vallée incluant le Delta, le territoire qui s'étend de Podor à l'embouchure du fleuve.

La vallée est le domaine de la forêt de gonakié (*Acacia nilotica*) qui se développe sur les sols *Hollaldé* et de la savane arbustive dans la zone du *jeeri* qui n'est jamais inondée. Il y a une absence de strate herbacée tandis que le delta est occupé par des espèces halophiles (*Tamarix*). Le delta du fleuve Sénégal est une zone écogéographique située au NE du pays, au climat sahélien, situé essentiellement dans le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. La région s'étale entre les latitudes 16° et 14°4 Nord et les longitudes 15°30 et 16°30 Ouest et couvre une superficie d'environ 6400 km², soit 120.000 ha de terres.

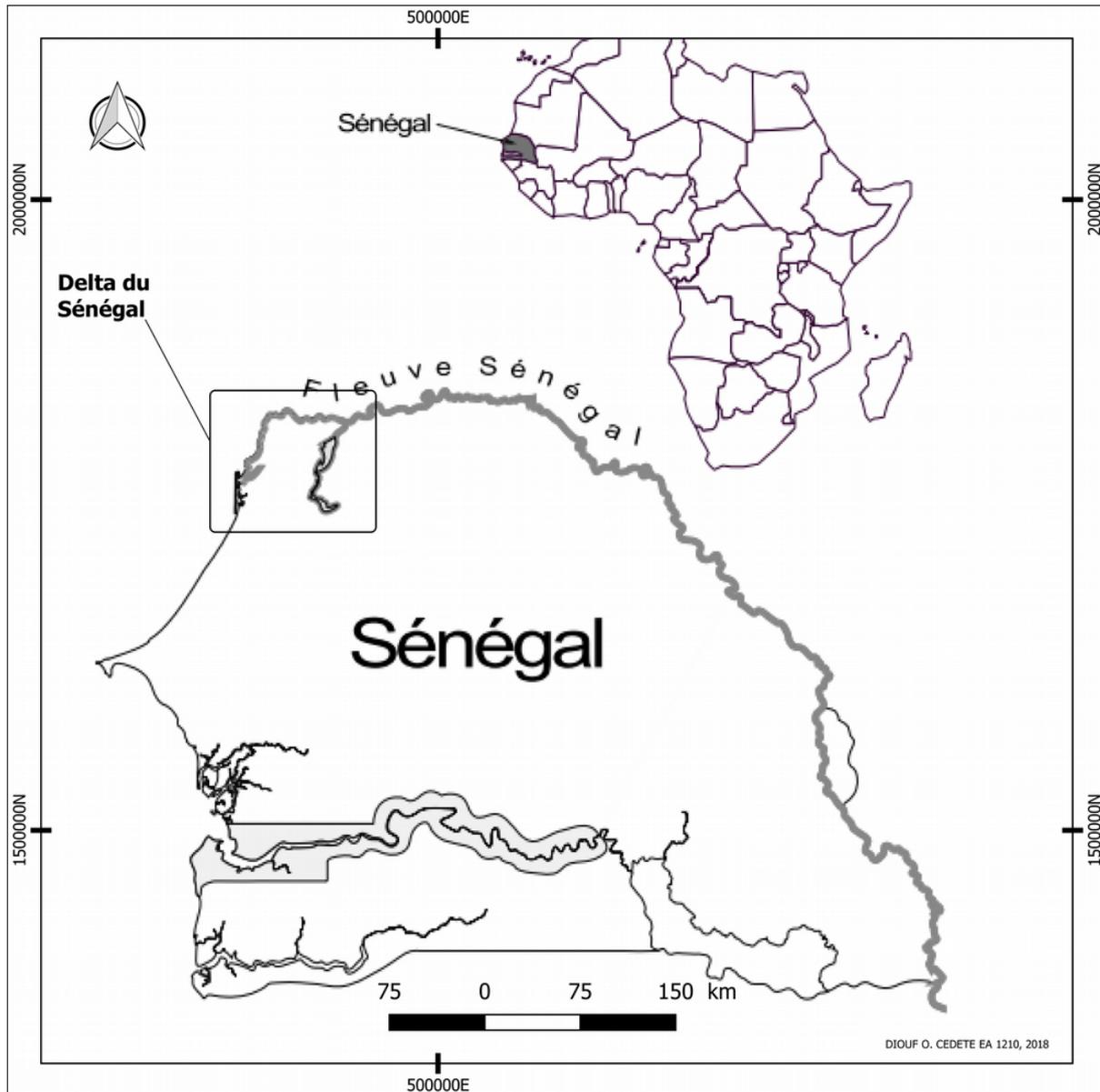


FIGURE 2.15 – Situation du delta du Sénégal

C'est un secteur peu élevé ne dépassant pas les 2 m IGN, formé de cuvettes et de formations fluvio-deltaïques. Ces caractéristiques ont très tôt suscité des enjeux économiques déclinés en projet d'aménagement permettant une mise en valeur hydroagricole. Le delta du Sénégal est partagé entre le Sénégal au nord et la Mauritanie au sud. Il n'occupe que 3% de la superficie totale du bassin versant réel du fleuve Sénégal, alors que le Ferlo occupe près de 9% de la superficie totale de la vallée du Sénégal (KAMARA, 2013; A. NIANG, 1998).

2.4.2. Le Régime fluvial

FRÉCAUT (1982) et TOUCHART (2003) ont classé le Sénégal dans les régimes fluviaux tropicaux humides qui suivent le rythme pluviométrique saisonnier en mimant avec un faible décalage la répartition des précipitations sur les zones amonts d'alimentation. Dans le bassin supérieur du Sénégal, du Fouta Djallon, où le Sénégal prend sa source, à la station de Bakel, on distingue trois régimes hydrologiques caractéristiques : le régime tropical de transition, le régime tropical pur et le régime sahélien (FRÉCAUT, 1982). Les eaux des marges semi-arides ont un bilan hydrologique contrasté et un régime à deux temps, la succession d'une saison sèche et d'une saison des pluies rythme l'hydrologie de surface (TOUCHART, 2003).

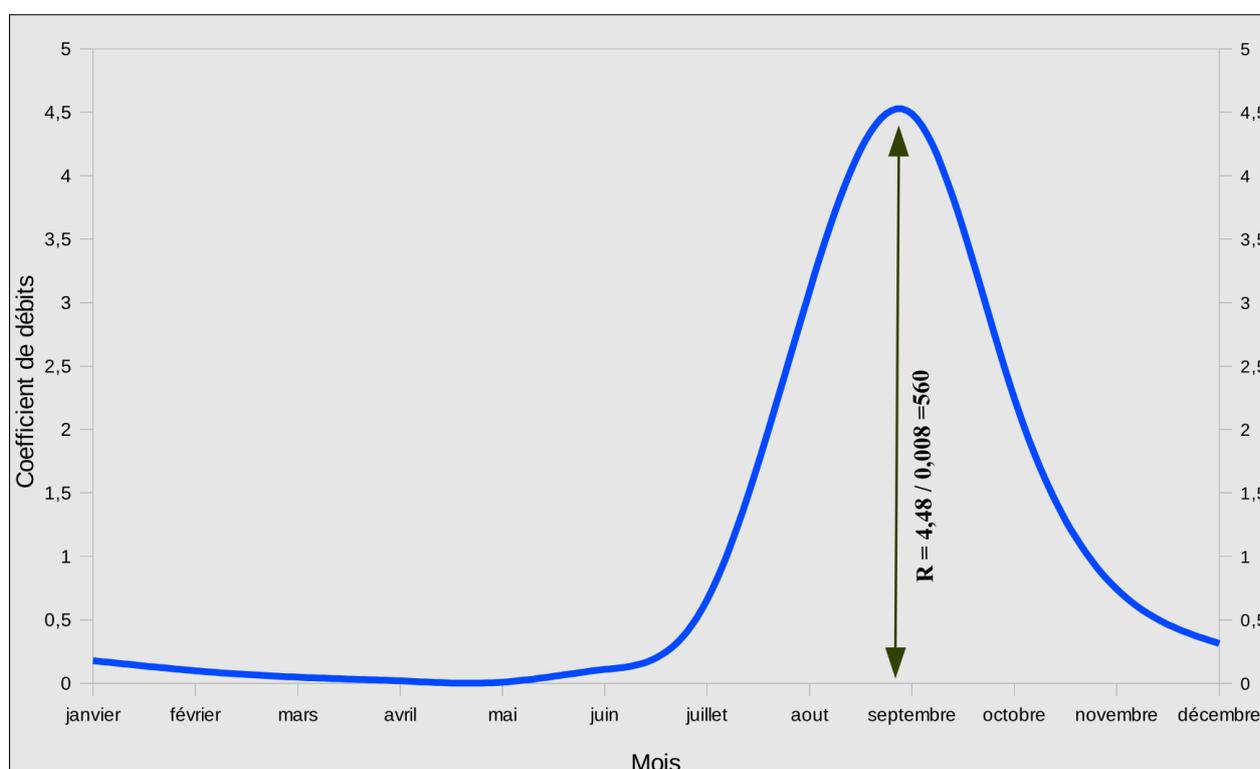


FIGURE 2.16 – Coefficients de débits moyens mensuels (1952-1984) du fleuve Sénégal à Bakel - (Source de données : SAED (2009))

D'après TOUCHART, la situation étant différente au-dessus de l'océan où la régularité des alizés offre un contraste saisonnier beaucoup plus faible. C'est le cas du delta du Sénégal. Les pluies s'étalent sur neuf mois au sud (mars à novembre) et sur cinq mois au nord (juin à octobre), mais ce sont les mois de juillet à septembre qui constituent sur l'ensemble du bassin le cœur de la saison des pluies. Le mois d'août, est partout le plus pluvieux, donnant en moyenne plus de 20% des précipitations annuelles au sud et plus de 30% au nord du bassin (BADER, 2015 ; GAC et A. KANE, 1986).

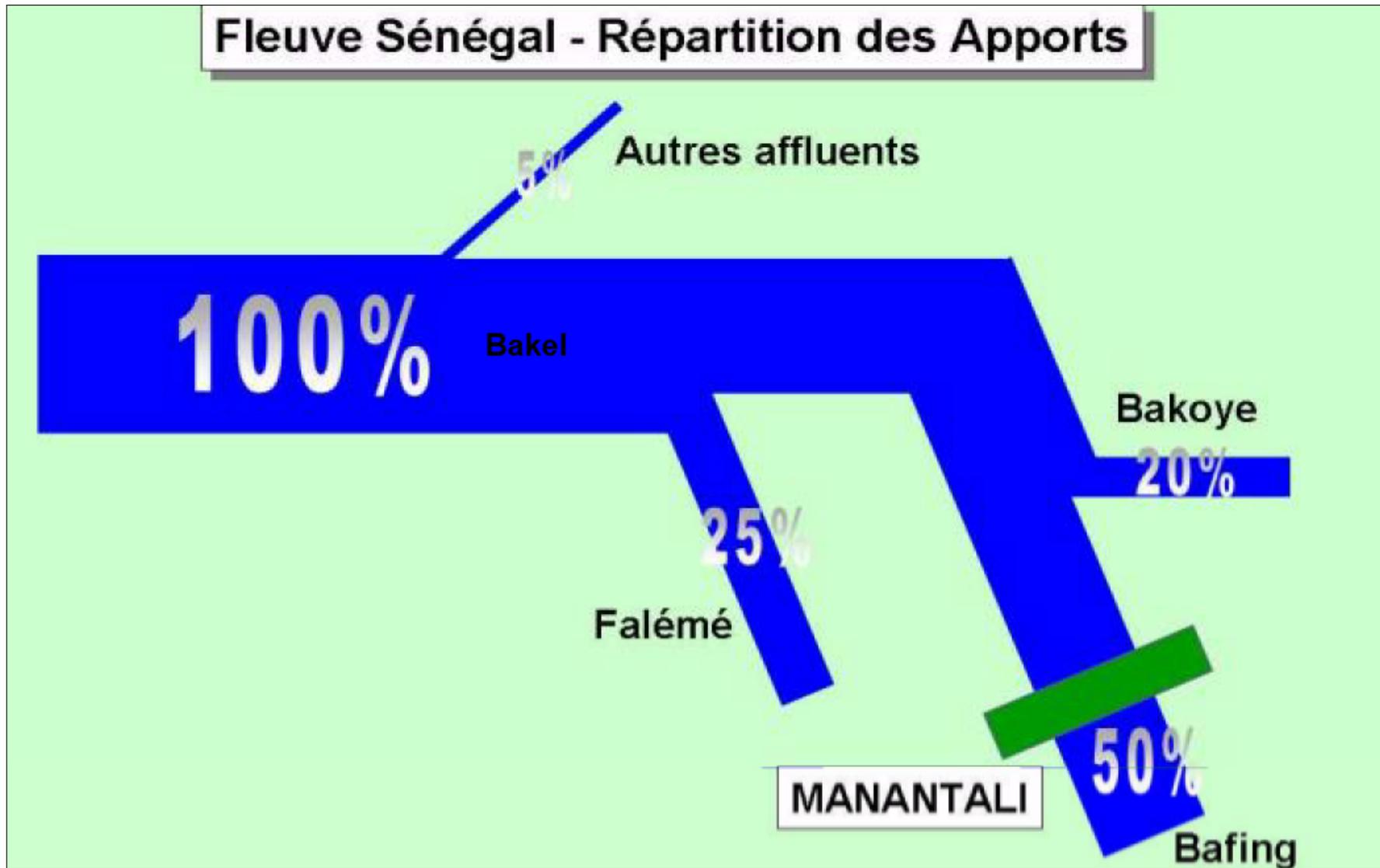


SCHÉMA 2.1 – Répartition des apports d'eau sur le bassin versant du Sénégal - (Source : DGPPE (2016))

La répartition des apports d'eau (schéma 2.1) dans bassin a une très grande influence dans les débits observés sur le fleuve Sénégal puisque l'essentiel des débits du Sénégal provient du haut bassin (Bafing, Falémé et Bakoye), par le fleuve lui-même et ses principaux affluents (Bafing et Bakoye). Cependant, les apports en aval de Bakel sont pratiquement négligeables.

L'accroissement des débits d'amont en aval est représenté schématiquement sur la figure 2.17. Les trois pics montrent les grands débits annuels observés sur le fleuve Sénégal et générés par les affluents dans le haut bassin. Jusqu'en 1984 (avant barrages), on constate clairement que la majorité des écoulements est concentrée sur trois mois (août à octobre) sur l'ensemble du bassin et que les débits en contre-saison (février à juin) restent très faibles. Jusqu'à cette période, le bassin du Sénégal connaît cette série de saisons sèches, mais à partir de 1987 le barrage de Manantali va jouer son rôle de régulateur de débits et de générateur de crue artificielle. Depuis l'achèvement de la construction de deux ouvrages hydrauliques; le barrage régulateur et hydraulique de Manantali au Mali et barrage an-tisel de Diama, le fleuve a complètement changé de régime hydrologique (BADER, 1994; A. DIAW, 1993; MONTEILLET et al., 1993; TAÏBI, BALLOUCHE et al., 2007).

Les impacts des changements immédiats du milieu modifient le régime des écoulements, mais si ceux-ci sont progressifs dans le temps, les répercussions ne sont pas toujours perceptibles de manière très nette (VIRAMONTES et al., 2002). Contrairement au delta du Sénégal, dès juillet 1987, le barrage de Manantali influence de façon permanente l'écoulement à toutes les stations situées à l'aval (tableau 2.1 et figure 2.17). Dans la partie estuarienne du fleuve, l'influence du barrage de Diama, qui provoque un rehaussement du niveau vers l'amont, est ressentie jusqu'à Boghé et Guédé (figure 2.18).

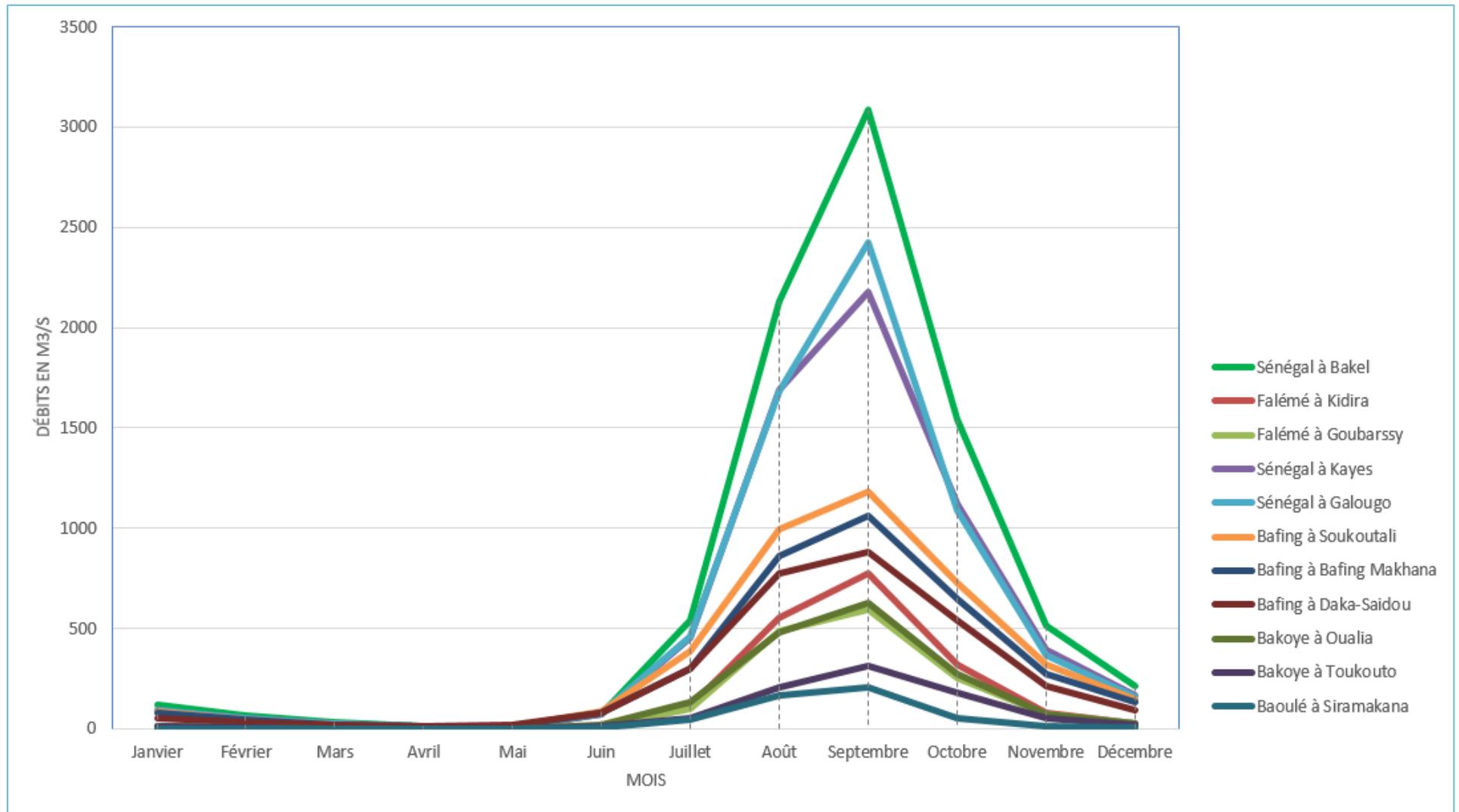


FIGURE 2.17 – Débits moyens mensuels des différents affluents du fleuve Sénégal 1952-1984 - (Source : A. DIAW (1993))

Tableau 2.1 – Débit moyen interannuel écoulé aux principales stations hydrométriques du Sénégal (de mai 1950 à avril 2012). BADER (2015)

Cours d'eau	Station (aval)	Qo : Module interannuel	Débit Spécifique	Station Amont	Q : Module intrannel	Débit spécifique	Q/Qo	Régime analysé
Bafing	Balabori	183	15,8	Salouma	15	18,8	0,08	Naturel
				Sokotoro	36	20,5	0,20	
				Bebele	73	20,9	0,40	
				Bebele + Sokotoro + Salouma	123	20,5	0,67	
	Soukoutali	297	10,7	Balabori	183	15,8	0,62	Naturel
				Boureya	226	15,3	0,76	
				Daka Saidou	234	14,9	0,79	
				Bafing Makana	273	12,4	0,92	
Dibia	297	8,9	Soukoutali/Manantali	279	10,0	0,94	Observé	
Falémé	Kidira	133	4,6	Moussala	42	0,32	naturel	Naturel
				Fadougou	76	8,2	0,57	
				Gourbassy	108	6,3	0,81	
Bakoye	Oualia	113	1,3	Siramakana	44	0,8	0,39	Naturel
				Toukoto	62	3,7	0,54	
				Toukoto + Siramakana	106	1,4	0,94	
Sénégal	Galougo	429	3,3	Oualia	114	1,3	0,27	Observé
				Dibia	297	8,9	0,69	
				Dibia + Oualia	412	3,5	0,96	
	Kayes	455	2,9	Galougo	429	3,3	0,94	Observé
				Gouina	436	3,4	0,96	
	Bakel	606	2,8	Kidira	134	4,6	0,22	Observé
				Kayes	455	2,9	0,75	
				Kayes + Kidira	589	3,2	0,97	

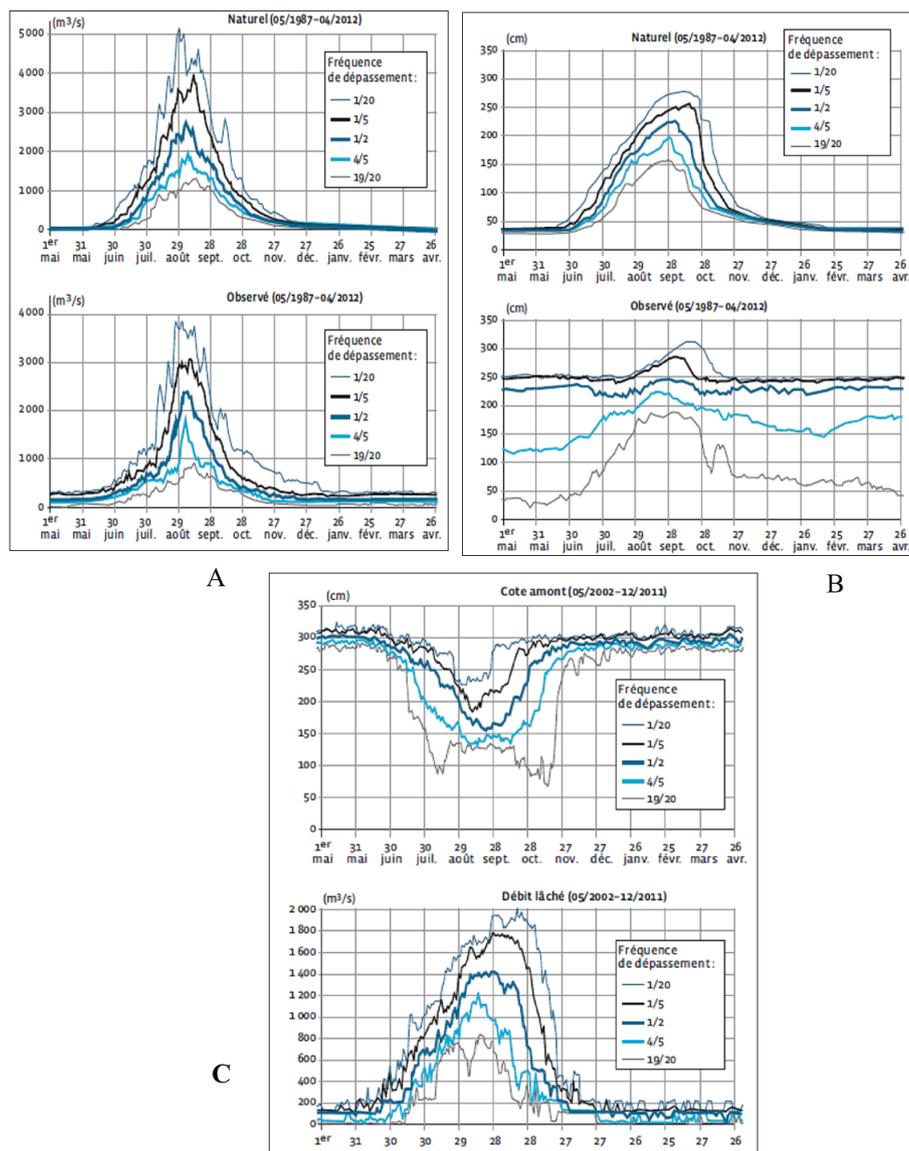


FIGURE 2.18 – **A.** La station de Bakel ; **B.** La station de Rosso dans le bassin inférieur ; **C.** La station de Diam dans le delta - (Source BADER (2015))

Et depuis ces différentes dates, les écoulements dans les zones concernées résultent à la fois de l'aléa climatique et de l'influence des ouvrages (BADER, 2015 ; GAC et A. KANE, 1986). En effet, depuis cette période, le régime d'écoulement observé entre ces deux ouvrages diffère sensiblement du régime naturel qui aurait été observé sur la même période sans aménagement, et ce dans la partie aval du bassin versant. La description des régimes d'écoulement porte essentiellement sur les débits pour le bassin du Sénégal supérieur et sur les niveaux d'eau pour la vallée à l'aval de Bakel. Les stations hydrométriques (Bafing, Falémé. . .) dans le haut bassin connaissent un régime d'écoulement naturel (tableau 2.1) (les crues apparaissent souvent sur ces bassins dès le mois de juin et culminent la plupart du temps entre fin août et mi-septembre).

ENCADRÉ 2.1 – Généralités sur les régimes d'écoulement du Sénégal - (Source : BADER (2015))

Certaines caractéristiques des écoulements naturels sur le bassin du fleuve Sénégal découlent directement du régime des pluies et concernent l'ensemble du bassin.

- **Forte saisonnalité.** Aux crues, générées entre juillet et octobre par la mousson annuelle sur le bassin supérieur, succède un régime de tarissement qui dure pendant toute la saison sèche et se termine souvent par une quasi-annulation des débits. La période allant du mois de mai au mois d'avril de l'année suivante est retenue pour définir l'année hydrologique sur l'ensemble du bassin.
- **Forte zonalité des apports.** Du fait de l'orientation quasiment est-ouest des isohyètes sur le bassin, la production d'écoulement diminue globalement du sud vers le nord. La partie sud-ouest du bassin, drainée par la Falémé et surtout le Bafing, est la plus arrosée et la plus productive. À l'inverse, la partie nord ne produit que des apports au fleuve assez négligeables à l'aval de Bakel.
- **Forte irrégularité interannuelle.** Sur la période 1903-2012, le volume annuel écoulé dans le Sénégal à Bakel varie entre 7 et 43 km³, soit du simple au sextuple. Succession de périodes excédentaires et déficitaires. Avant 1970, les écoulements sont, la plupart du temps, excédentaires par rapport à la moyenne de mai 1903 à avril 2013. Seules quelques années déficitaires sont alors observées, se succédant lors de deux épisodes secs survenus dans les décennies 1910 et 1940, ou de façon isolée. À partir de 1970 s'installe une sécheresse qui est remarquable par sa durée, puisqu'elle perdure globalement jusqu'à aujourd'hui malgré l'apparition de quelques années excédentaires isolées dans la décennie 1970 et surtout depuis la décennie 1990. Le déficit d'écoulement est très sévère pendant le paroxysme de la sécheresse, centré sur la décennie 1980.

D'autres caractéristiques des écoulements naturels concernent spécifiquement la vallée du fleuve à l'aval de Bakel. En plus du régime des pluies à l'amont, elles découlent directement de la topographie de cette zone, particulièrement plate et peu pentue :

- **Inondation d'un vaste lit majeur en période de crue**
- **Influence marine très étendue en période d'étiage.**

Source : BADER (2015) : *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal*

2.4.3. Les écoulements de surface

Le système hydrologique de la rive gauche du delta du Sénégal en dehors du complexe Taouey-lac de Guiers-vallée du Ferlo est constitué par un ensemble de défluent dont le fonctionnement est intimement lié à la crue du fleuve Sénégal : avant toute intervention les eaux de crue submergeaient chaque année une grande partie du delta. En effet le Delta du fleuve Sénégal est arrosé par un dense réseau hydrographique et assez complexe qui comprend l'artère principale du fleuve Sénégal, dans sa phase terminale, le lac de Guiers et le système Gorom-Lampasar plus connu sous le nom de l'axe Gorom-Lampasar. Cet axe traverse le Delta en diagonal et assure l'irrigation de milliers d'hectares aménagés le long de son cours, l'approvisionnement en eau des populations riveraines, de la ville de Saint Louis. Le réseau hydrographique du Delta est dominé, en dehors du bras principal du fleuve, par le système Gorom-Lampasar qui comporte plusieurs entités hydrologiques (figure 2.19) (CISSÉ, 2011 ; A. DIA, 1986 ; A. KANE, 1997 ; PHILIPPE et al., 1997 ; SALL et A. KANE, 1993).

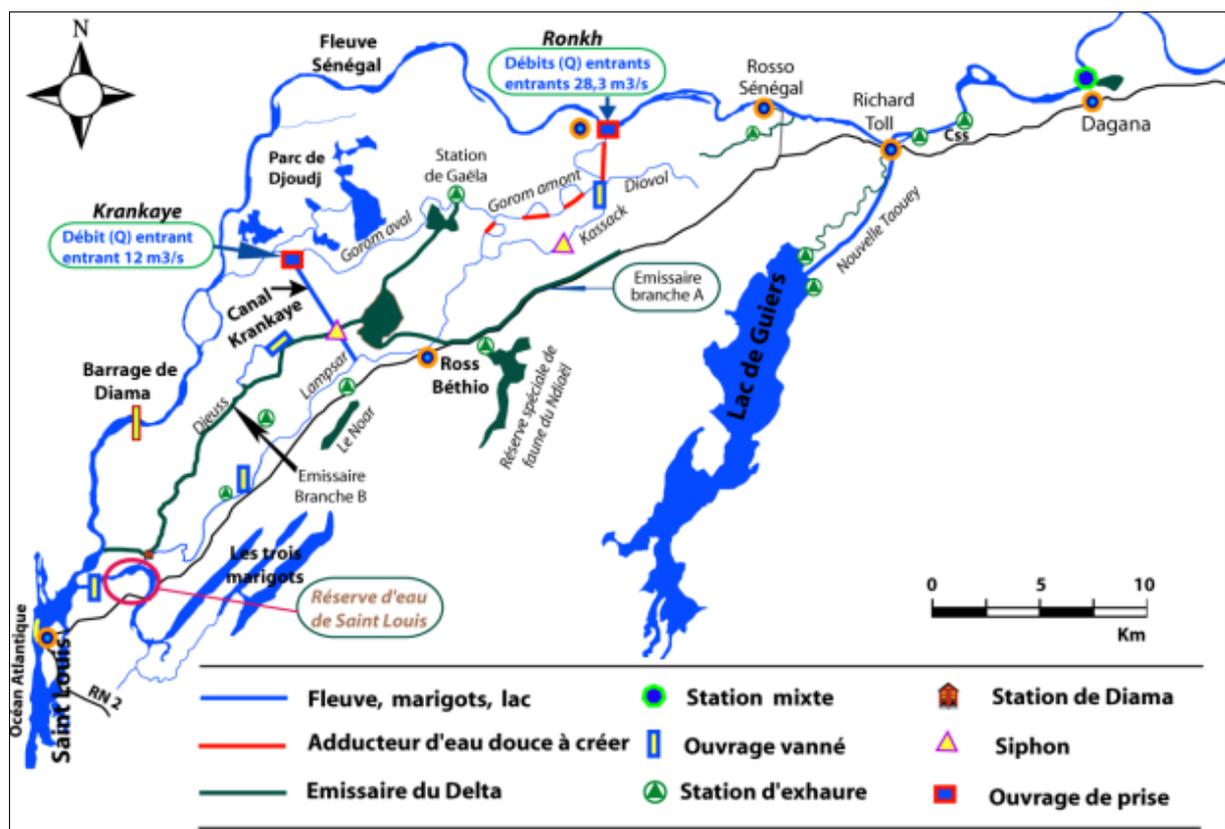


FIGURE 2.19 – Réseau hydrographique du Delta du fleuve Sénégal - (CISSÉ (2011))

2.4.3.1. Le Gorom amont

Il est alimenté par la prise de Ronkh comprenant une station de pompage et un ouvrage hydraulique gravitaire. Il coule jusqu'au village de Boundoum Barrage sur une distance de 25 km. C'est un marigot à section transversale très variable, au cours tantôt sinueux, tantôt rectiligne. La largeur entre 20 et 40 m varie peu, une partie est envahie par les végétations aquatiques envahissantes malgré les efforts d'entretiens effectués périodiquement. Le Gorom amont assure l'irrigation de près de 4000 ha bruts.

2.4.3.2. Le Gorom aval

Ce marigot part du village de Boundoum Barrage, traverse le Parc national des Oiseaux de Djoudj (PNOD) avant de se jeter dans le fleuve Sénégal par l'intermédiaire de l'ouvrage G sur une distance de 31 km. Le Gorom aval est composé d'un bief unique. Sa largeur moyenne est de l'ordre de 60 m. Avec la modification de l'écosystème créé par les aménagements hydro-agricoles de la SAED, le Gorom aval a été isolé du Gorom amont par le barrage de Boundoum pour servir de collecteur des eaux de drainage du périmètre de Boundoum.

2.4.3.3. Le Lampsar

Le Gorom amont dévié, sur sa gauche, donne naissance au marigot de Lampsar avec lequel ils forment l'axe Gorom Lampsar. Le Lampsar s'étend du pont Boundoum à la réserve de Saint Louis où il se jette dans le fleuve Sénégal en aval du barrage de Diama sur une longueur de 70 km. Le marigot dessine un parcours orienté du nord vers le sud du pont Boundoum à Ross Béthio.

2.4.3.4. Le Djeuss

Il part du Gorom aval et par l'intermédiaire de la dépression du Krankaye, il est adducteur d'eau d'irrigation, mais sert de réserve pour l'épandage des eaux de drainage des cuvettes du Lampsar. Le Djeuss était alimenté par l'aval (Lampsar) puis par l'amont (déversements du Gorom aval) au village de Keur Ali. En hautes eaux, les ouvrages de Dieg et de Thieng assuraient également l'inondation dans les cuvettes du Djeuss. Il s'écoule parallèlement au Lampsar avec qui il entre en confluence au Nord de la ville de Saint-Louis.

2.4.3.5. Le Ngalam

Le Ngalam est alimenté par le Lampsar ; il s'écoule vers le sud-est de la réserve de Saint Louis sur une distance de 6 km. Il est très large dans sa partie aval à la confluence du Lampsar et présente une capacité importante à cet endroit. Le Ngalam reçoit périodiquement les eaux de renouvellement de la réserve d'eau de Saint-Louis par l'intermédiaire du pont de Ndiaoudoune sur la route nationale 2.

2.4.3.6. Le Kassak

Le Kassack est alimenté par le Gorom amont à partir du pont Diambar. Il s'écoule du nord-est au sud-ouest, parallèlement au Gorom amont, sur une distance de 20 km, avant d'entrer en confluence avec le Lampsar à pont Demba. Le chenal, qui constitue la limite entre les cuvettes de Kassack sud, est séparé en deux biefs à la suite de son franchissement par le drain du Ndiaël. Le Kassack est alimenté en amont par le Gorom amont et en aval par le Lampsar.

2.4.4. Les eaux souterraines

Le cadre hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal est liée son histoire géomorphologique qui a laissé à l'état fossile d'importantes quantités de sels solubles, ce qui explique la nature salée des eaux souterraines. Ces dernières font l'objet d'un suivi particulier depuis la mise en service des barrages.

Dans le Delta du fleuve Sénégal, la nappe phréatique est très salée. La salinité élevée des nappes est d'origine marine. La transgression marine Nouackhotienne (5500 BP) avait pénétré jusqu'à Bogué (MICHEL, 1973). Avant la construction du barrage anti sel de Diama (1986), l'influence marine se faisait sentir très profondément à l'intérieur de la vallée, la langue salée avait atteint Podor en 1983 (A. KANE, 1997). Le suivi des aquifères (figure 2.20) se fait de manière continue par la SAED et montre une tendance commune pour tous les piézomètres suivis. L'irrigation a joué un rôle déterminant dans l'alimentation de la nappe (CEUPPENS et al., 1997) .

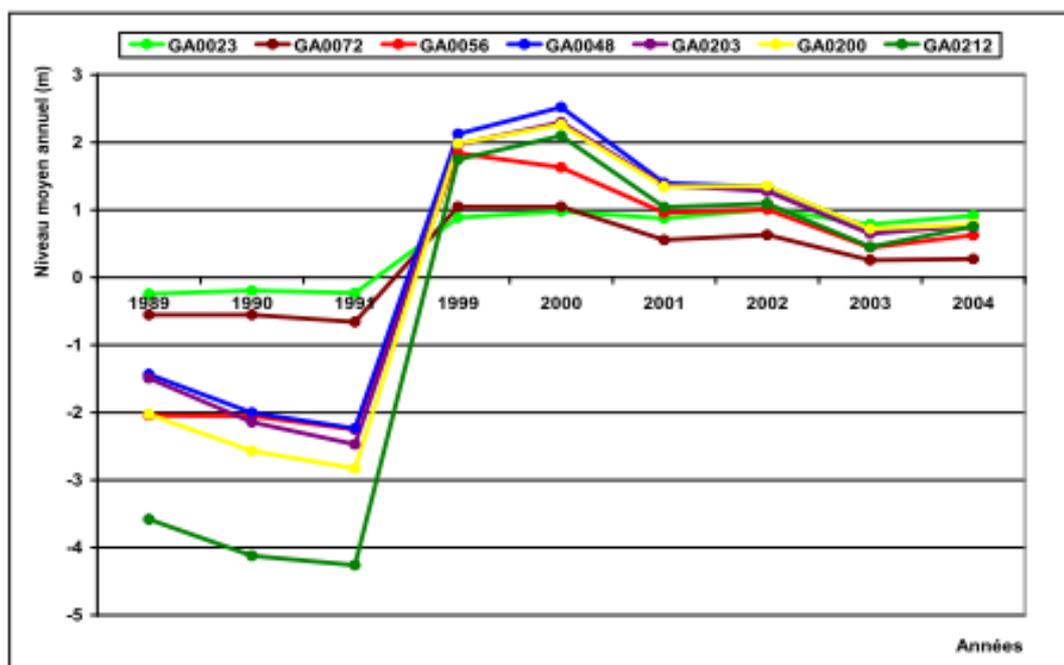


FIGURE 2.20 – Évolution des moyennes annuelles du niveau piézométrique dans le Delta
-(SAED, 2009)

Conclusion du chapitre 2

Ces composantes naturelles font du delta du Sénégal un milieu semi-aride particulier dans lequel l'eau est la composante principale. Le climat conditionne les précipitations dans le bassin du fleuve Sénégal caractérisé par un régime fluvial tropical humide (FRÉCAUT, 1982; TOUCHART, 2003) et le régime perturbé par les aménagements hydrauliques. Dans le delta les écoulements de surface dominés par le système Gorom-Lampsar qui abrite une nappe mise en place par le passé géomorphologique du delta.

Le delta fait partie du grand littoral sénégalais. Cette zone de transition entre l'océan atlantique et la bordure continentale du Sénégal long de 400 km, est soumise à deux ensembles de processus, les processus continentaux et marins. Le delta constitue la décharge des processus continentaux. Le phénomène de la salinité des sols n'est pas uniquement un fait propre au delta du Sénégal, il concerne toute la frange littorale incluant les deltas des fleuves du Sine-Saloum ⁽¹³⁾ et de la Casamance ⁽¹⁴⁾.

L'ensemble de ces composantes naturelles a permis la naissance d'écosystèmes deltaïques et terrestres riches et variés.

(13). Le delta du Sine-Saloum est formé par la confluence de deux fleuves, le Sine et le Saloum. C'est également un bras de mer laissant entrer l'eau salée de plus en plus profondément dans les terres, car le débit des deux fleuves est assez lent.

(14). C'est le delta d'un long fleuve de 300 km : le fleuve Casamance, la source de vie de la région méridionale du Sénégal qui porte son nom.

LE DELTA : DES ÉCOSYSTÈMES REMARQUABLES ET EN PROFONDES MUTATIONS DANS UN MILIEU SAHÉLIEN

Sommaire

3.1 Les zones humides	101
3.1.1 Le lac de Guiers	103
3.1.2 La réserve de Ndiaël et les marigots de Saint-Louis	106
3.1.3 Les parcs nationaux	106
3.1.4 Les mangroves estuariennes	109
3.2 Dynamique des écosystèmes du delta du Sénégal	110
3.2.1 La période sèche de l'avant-barrage	113
3.2.2 L'après-barrage	114
Conclusion du Chapitre 3	115

L'héritage géomorphologique du delta du Sénégal, les caractéristiques climatiques et hydrologiques c'est aussi la présence d'écosystèmes littoraux et terrestres. Le lac de Guiers, le parc de Djoudj, la réserve de Ndiael, les marigots de Saint-Louis, les mangroves estuariennes... répondent aux définitions générales sur les zones humides et celles données par l'UNESCO et la loi française sur l'eau de 1992 (BARTOUT, 2006)⁽¹⁾.

(1). L'UNESCO définit dans son programme Man And Biosphère (MAB) la zone humide comme étant « toute zone de transition entre des systèmes terrestres et aquatiques, où la nappe phréatique est proche de la surface du sol ou dans laquelle cette surface est recouverte d'eau peu profonde, de façon permanente ou temporaire ». En France, ces prérogatives ont été reprises par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui stipule que sont considérés comme zones

3.1. Les zones humides

Le terme « zone humide » (« *wetland* » en anglais, « terre humide » pour les Canadiens), largement utilisé vers la fin des années 1960 et apparu pour la première fois aux États-Unis au début du XVII^{ème} siècle, est un concept purement écologique, mais avec des implications importantes en hydrologie.

Les zones humides, selon GRAMOND et al. (2005), sont caractérisées par la présence continue ou temporaire, en surface ou à très faible profondeur, d'eau douce à salée, par la prédominance d'une phytocénose hydrophile et/ou hygrophile et par la permanence d'un substrat hydromorphe, des zones où les précipitations excèdent l'évaporation potentielle selon le *Glossaire International d'hydrologie* (UNESCO (1992)). **La convention de Ramsar** les définit comme des étendues des marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres, des terrains exploités ou non ; des zones habituellement inondées ou gorgées d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire selon **la loi française sur l'eau de 1992**. Le *Dictionnaire des sciences de l'environnement* (PARENT, 1991) et le *Dictionnaire essentiel d'écologie*, (TOUFFET, 1982) les définissent comme des milieux où le plan d'eau se situe au niveau de la surface du sol ou à proximité et inondées en permanence ou régulièrement. Bref, autant de définitions pour ne montrer la présence importante de l'eau.

Dans le delta du Sénégal, la présence de l'eau de façon permanente dans ce milieu où la moyenne pluviométrique est d'environ 300 mm/an lui confère une particularité reconnue à l'échelle internationale (Ramsar⁽²⁾, MAB⁽³⁾...). Ces conventions internationales, instruments pratiques de gestion de la diversité biologique, relatives aux zones humides amènent le Sénégal à faire preuve d'engagement politique réel, car les zones humides continentales ou littorales sont d'une grande richesse et de plus elles doivent pouvoir accueillir différentes catégories de touristes et ainsi faire profiter les populations locales de retombées financières liées à ces acti-

humides tous « les terrains exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire. »

(2). La Convention de Ramsar, officiellement Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, aussi couramment appelée convention sur les zones humides.

(3). Le Programme sur l'Homme et la biosphère (MAB) est un programme scientifique intergouvernemental visant à établir une base scientifique pour améliorer les relations homme-nature au niveau mondial lancé au début des années 1970.

3.1 LES ZONES HUMIDES

vités (NDAO, 2012 ; TRÉCA et al., 1996). Ces zones humides permettent de maintenir sur place les populations, de gérer de manière intégrée et profitable les ressources naturelles, de promouvoir l'éducation et la sensibilisation aux problèmes liés à l'environnement. Elles sont source d'alimentation pour les agriculteurs et les pasteurs et siège d'une grande biodiversité.

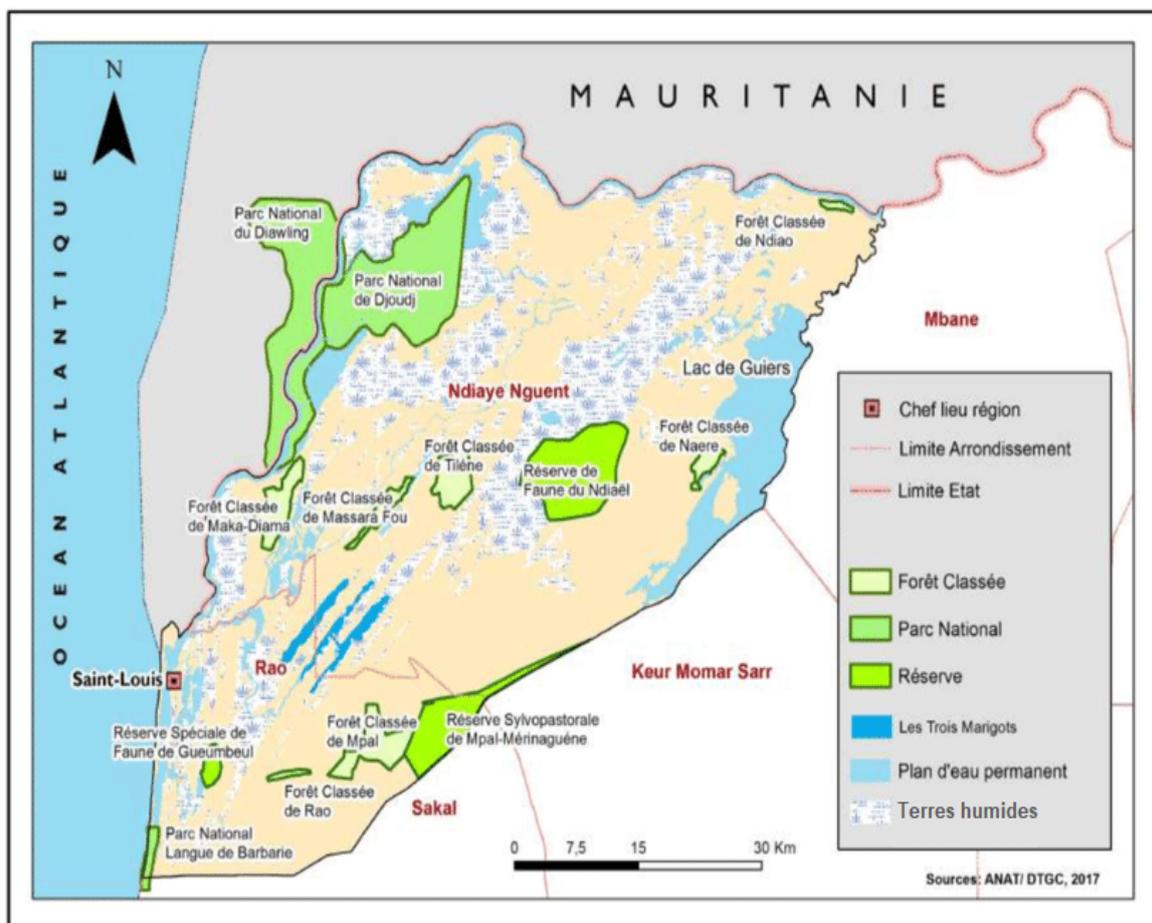


FIGURE 3.1 – Carte des zones humides du delta - (Source : SYLLA et al. (2017)) - modifié

Outre leurs fonctions économiques et sociales, les zones humides participent à la régulation du débit des cours d'eau avec une atténuation des crues, une prévention des inondations et un soutien d'étiage. Leur capacité de stocker et de restituer progressivement de grandes quantités d'eau permet l'alimentation des nappes souterraines et superficielles. En favorisant l'épuration grâce à leur riche biocénose, elles participent à la préservation de la qualité de l'eau. Malgré toutes ces potentialités offertes par ces zones humides, aujourd'hui elles sont sujettes à des menaces qui suscitent l'attention internationale : la péjoration climatique, la pression démographique, le drainage des eaux chimiques (exemple du lac de Guiers qui reçoit les eaux usées des agrobusiness environnants), la salinisation des sols, l'érosion des terres, la colonisation par

les végétaux envahissants comme le *typha australis*. Les surfaces des zones humides du delta du Sénégal diminuent, et celles qui demeurent sont globalement dégradées. Cette dégradation se traduit, en amont de Diama, par des phénomènes d'eutrophisation et une homogénéisation des écosystèmes ; en aval de Diama, on constate une augmentation de la salinité et un assèchement périodique de zones anciennement inondées (OMVS, 2006). Les grands barrages, en régularisant les débits et les crues, a en effet profondément modifié les conditions d'inondation dans la vallée et par là même occasion l'alimentation en eau des zones humides naturelles ; le barrage de Diama, en empêchant les remontées d'eau salée dans le fleuve, supprime en outre les variations de salinité, parfois source d'équilibre et de diversité écologique.

3.1.1. Le lac de Guiers

Les plans d'eau jouent un rôle majeur dans les écosystèmes même si les dynamiques écologiques, mais aussi sociétales à leur égard sont longtemps restées dans l'ombre (BARTOUT, 2016 ; BARTOUT et TOUCHART, 2013) et dans les zones arides et semi-arides comme celle du delta du Sénégal, ce sont des territoires très convoités à plusieurs niveaux.

Le lac de Guiers est un lac endoréique à émissaire, car la topographie n'est pas favorable à une alimentation. Ces types de lacs se trouvent dans des régions où le problème de manque d'eau se pose (...). Or ces lacs représentent une extraordinaire réserve à la fois quantitative et qualitative⁽⁴⁾, puisque l'existence d'un émissaire leur confère en général une eau douce (TOUCHART, 1996). Dans le cas du lac de Guiers, le Taouey constitue l'émissaire depuis le fleuve Sénégal. Cet écosystème lacustre sahélien, à drainage réversible, se situe dans une zone humide où la baisse des précipitations moyennes ne représente pas problème humain (TOUCHART, 1996). Ces conditions hydrologiques favorisent le maintien d'une pluriactivité (activité piscicole, agricole et pastorale, agrobusiness) autour de la ressource en eau, la présence d'une faune et d'une flore, des espèces d'oiseaux et des réserves de biosphère (la réserve de TOCC-TOCC⁽⁵⁾) d'importance internationale. Ce lac alimente les dépressions de la « vallée morte » du *Ferlo* rarement inondée et sur laquelle se développent les activités pastorales des Peuls (parcours de bétail et points d'eau)(COLY, 1992 ; COLY, 2006). Depuis quelques années le développement des aménagements tertiaires et de l'agrobusiness dans les périphéries du lac impactent sur les modes

(4). Dans le cas du delta du Sénégal, le lac de Guiers est une importante source d'eau pour l'irrigation et pour l'alimentation en eau potable.

(5). C'est une réserve naturelle qui s'est établie sur une partie du lac de Guiers dont la principale mission est d'accompagner les populations locales à mener des politiques de protection et de conservation des ressources.

d'occupation des sols. Aussi, faut-il noter que la politique hydraulique a transformé le système pastoral des Peuls en système agropastoral (un pasteur devient un agropasteur)⁽⁶⁾, favorisant une sédentarisation de ceux-ci autour du lac. En effet, l'espace agricole est convoité de manière croissante sur les rives du lac de Guiers (figure 3.2).

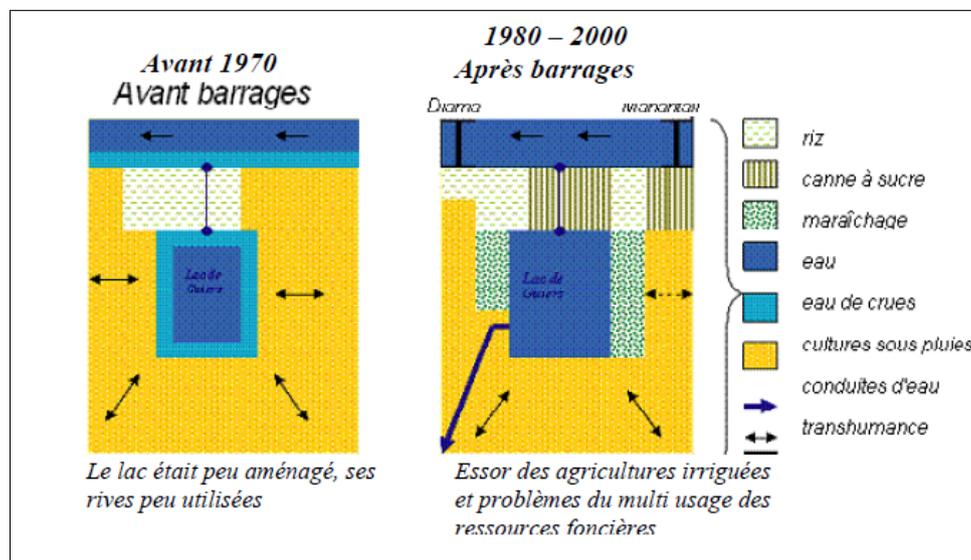


FIGURE 3.2 – Recomposition spatiale autour du lac de Guiers entre 1970 et 2010 - (Source : MAR et al. (2006))

Aujourd'hui, dans cette région humide à grande vocation agropastorale, les enjeux en matière d'occupation et d'utilisation du sol (traité entièrement à l'échelle du delta en section 3.2) sont importants à cerner pour une meilleure gestion de l'environnement. Sur le lac de Guiers, la dynamique spatiale des types d'occupation du sol entre 1973 et 1988 (avant l'édification des barrages) et entre 1988 et 2010 (après les barrages), représentée sur la figure 3.3, est marquée par des changements sur présence de la steppe herbeuse en 1973-1988 et exploitations agricoles et de la végétation aquatique en 1988-2010. Aujourd'hui, la problématique de la gestion du lac de Guiers pose les questions d'évaluation de la disponibilité en eau, de sa distribution entre différents usages, de la préservation et de l'amélioration de sa qualité, de l'interaction entre l'eau et la terre agricole. Compte tenu de la situation actuelle du développement des surfaces irriguées autour lac (en particulier les agrobusiness, et des agro-industriels), la question sur la qualité de l'eau (F. COGELS et al., 1981) et de la salinité des sols se pose, car d'énormes quantités d'eau de drainage sont déversées dans le lac de Guiers.

(6). J.-F. TOURRAND, 1989. « "Un pasteur devient un agropasteur : Etude de cas dans le delta du fleuve Sénégal ». In. RESPAO. ACCRA, p. 1-19.

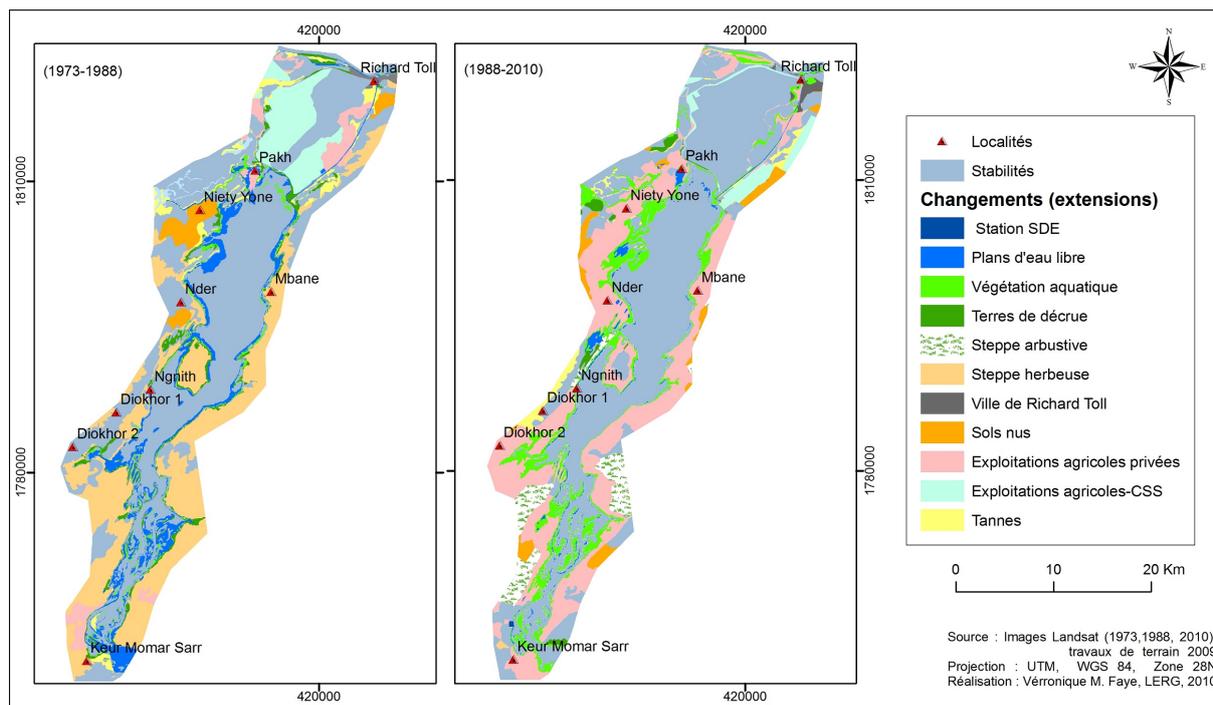


FIGURE 3.3 – Changements de l’occupation du sol dans la zone du lac de Guiers avant- et après-barrage - (Source : V. FAYE et al. (2016))

ENCADRÉ 3.1 – Lacs d’Aleg et de Mâl : des zones humides essentielles

Les deux lacs occupent de vastes dépressions endoréiques. Le lac d’Aleg serait une relique de l’ancienne vallée du fleuve Sénégal comme le lac de R’Kiz et le lac de Guiers. Cette vallée est obstruée aujourd’hui vers le nord par des dunes continentales et reçoit au sud l’oued Ketchi qui alimente le lac à partir d’un bassin versant de 3 800 km². Son fonctionnement étant essentiellement pluvial, sa superficie varie avec l’importance des précipitations. Au cours de son extension maximale il atteint 7000ha (6500 en 1969, 1400 en 1987). Le lac de Mâl est plus modeste, avec un bassin versant estimé à 1250 km² et une superficie maximale de 3500 ha. Son fonctionnement est complètement artificialisé depuis la création d’un barrage hydroagricole réalisé en 1962 qui a divisé la dépression en deux bassins séparés par une digue. Par leurs valeurs écologiques, ces deux zones humides constituent des sites majeurs dans cet espace de transition entre le Sahara et le Sahel. Cela se vérifie particulièrement pour les oiseaux pour qui elles sont un lieu de passage, de repos saisonnier, de résidence ou de reproduction. Qu’il s’agisse de migrateurs paléarctiques ou d’afro-tropicaux.

Source : BALLOUCHE et al. (2007) : « Protection et gestion intégrée de zones humides sahéliennes de Mauritanie »

3.1.2. La réserve de Ndiaël et les marigots de Saint-Louis

La réserve du Ndiaël se présente sous la forme d'une grande zone dépressionnaire humide servant de refuge à plusieurs espèces d'avifaune (oiseaux migrateurs, etc.). Elle fait partie de la grande Réserve de Biosphère Transfrontalière du Delta du Fleuve Sénégal (RBTDFS)⁽⁷⁾ (Lô et al., 2016). Créée en 1965, la Réserve a été déclarée zone humide d'importance internationale et enregistrée comme site de la Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (couramment appelée Convention de Ramsar ou encore Convention sur les zones humides). Les trois marigots au Sud constituent une source d'eau qui se déverse dans la cuvette en période de crue. Ces trois marigots, alimentés par la crue du fleuve, sont aussi d'importantes sources d'eau pour la réserve et les activités humaines autour. À la suite des épisodes de sécheresse, le marigot dénommé « Nyeti Yoone »⁽⁸⁾ qui servait de chenal d'alimentation en eau de la dépression du Ndiaël, à partir du lac de Guiers a été délibérément obstrué dans le but de favoriser l'alimentation convenable en eau des périmètres agricoles du Delta. Ceci a provoqué un assèchement progressif de la réserve, avec pour conséquence la perturbation de ses fonctions écologiques et d'accueil des oiseaux migrateurs. Ainsi, l'effet combiné des facteurs naturels et anthropiques a entraîné une forte détérioration de la réserve aboutissant à la remise en cause de son statut de zone humide d'importance internationale. Par conséquent, elle a été inscrite dans le « *Registre de Montreux* »⁽⁹⁾. Aujourd'hui, d'importantes politiques de mise en eau ont été menées pour permettre la reprise des fonctions écologiques et économiques de cette réserve.

3.1.3. Les parcs nationaux

3.1.3.1. Le parc national des oiseaux de Djoudj

Troisième réserve ornithologique du monde créée en 1971, classé au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1981, le parc national des oiseaux de Djoudj (PNOD) préserve une grande richesse ornithologique. C'est un biotope de zone humide à eaux douces et saumâtres dans une savane sahélienne d'une superficie de 16000 ha.

(7). Créée par l'UNESCO, la RBTDFS regroupe les zones humides et les réserves naturelles du delta du Sénégal (rives gauche et droite). Ce programme vise la gestion intégrée des ressources naturelles en conciliant diversité biologique, développement économique et maintien des valeurs culturelles. C'est aussi un territoire où la participation citoyenne est vivement encouragée.

(8). En langue Wolof, Nyeti Yoone signifie 3 chemins

(9). Registre des zones humides menacées de disparition.

Tableau 3.1 – Avantages et problèmes du parc de Djoudj à Saint-Louis - (Source : TRÉCA et al. (1996))

	Avantages	Problèmes
statut, gestion	Protection d'un écosystème unique, reconnaissance des efforts du Sénégal par les pays du Nord. Plan de gestion	Zone favorable à la riziculture et à la pêche
Impact sur la faune	Zone d'hivernage indispensable pour de nombreux oiseaux européens ou asiatiques, conservation de la biodiversité	
Actions humaines	Aménagements favorables à certaines espèces d'oiseaux	Pressions humaines, dérangements, braconnage, divagation de troupeaux
Effets des grands aménagements (digues, barrages de Diama et de Manantali)	Disponibilité d'eau en abondance, augmentation des superficies inondées (en dehors du parc aussi), augmentation de la capacité d'accueil des oiseaux	Dessalement des eaux, envahissement de la végétation (typhas), comblement des lacs et marigots par dépôts d'alluvions, problèmes de santé (bilharziose)
Effet du climat		Sécheresse, comblements des lacs et marigots par dépôts éoliens
Finances	Tourisme en augmentation en 1996, 7200 visiteurs : apports de devises pour le pays	Difficultés financières au niveau du parc
Recherche scientifique	Station biologique	
Éducation environnementale	Accueil d'élèves, d'autorités administratives et politiques, des collectivités locales	
Collectivités locales	Quelques retombées financières	Problèmes d'espace



PHOTO 3.1 – Vue sur le paysage du parc du Djoudj (Source : www.saintlouisdusenegal.com)

Entre novembre et mai, des oiseaux migrateurs fuyant le froid européen, des échassiers et plusieurs espèces de canards viennent y nicher. Il y a aussi des mammifères, des reptiles, des chacals, des singes, des hyènes et des gazelles. Historiquement, le PNOD n'était pas une zone vierge. Déjà au départ, des communautés de pêcheurs, éleveurs, et artisans wolofs et maures y vivaient et ont été déguerpies lors de l'érection de l'espace en parc. La plupart de ces populations se sont réinstallées tout autour du parc en fondant un chapelet de villages le ceinturant. C'est une grande zone d'attraction touristique qui génère d'importantes retombées financières.

3.1.3.2. Le parc national de Diawling (PND) en Mauritanie

Le Parc National du Diawling est une aire protégée créée dans le but de reconstituer une biodiversité détruite par une péjoration climatique sévère et par la mise en place de 2 grands barrages (figure 3.4, traité à l'échelle du delta en section 3.2) sur le fleuve Sénégal. En effet, la Mauritanie, comme tout le Sahel, a été soumise à une sécheresse sévère qui a eu de graves conséquences environnementales et socio-économiques avec le développement de processus de dégradation des milieux et de profondes mutations des modes de mise en valeur agricole de ces zones.

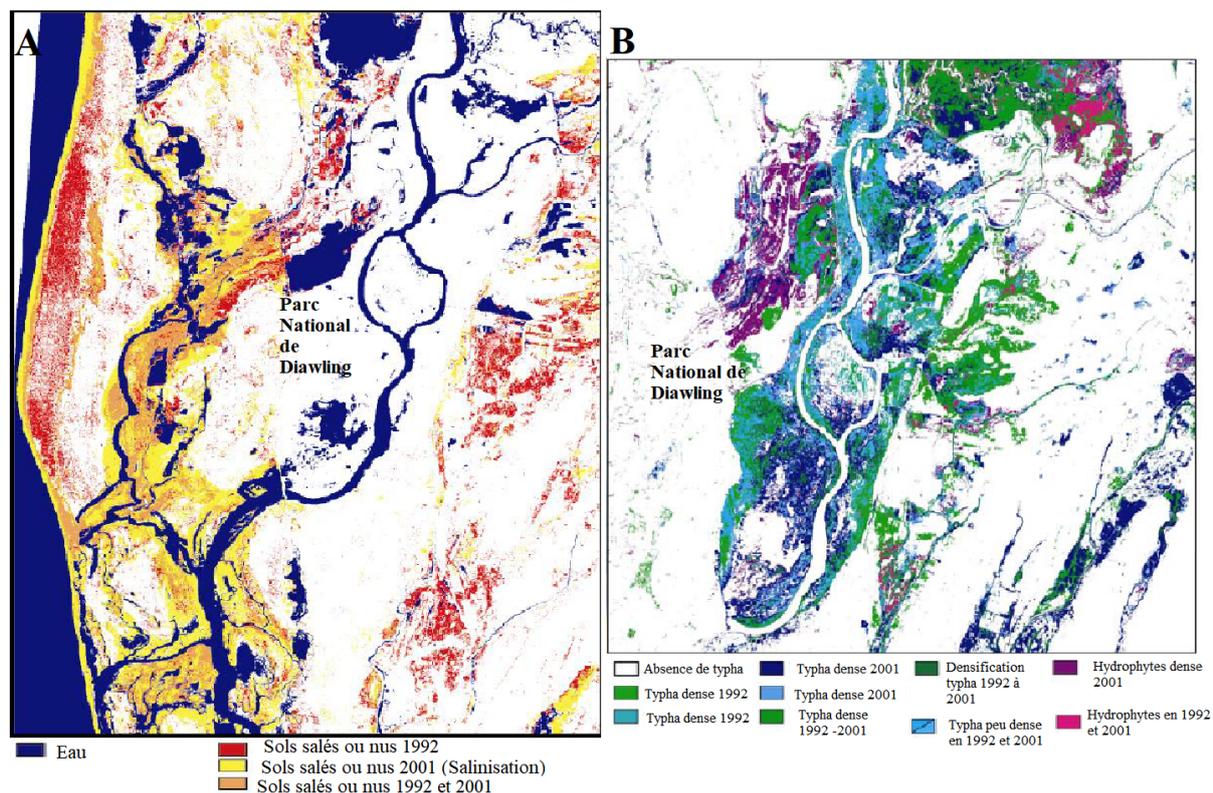


FIGURE 3.4 – **A.** Salinisation des terres **B.** Prolifération des plantes aquatiques dans le PND entre 1992 et 2001- (Source : TAÏBI, GASSANI et al. (2006))

La restauration des écosystèmes a été accompagnée par la reconstitution des pâturages, du potentiel halieutique et faunique et des formations végétales favorisant notamment la cueillette. La présence de l'eau en relative abondance et la richesse de ces écosystèmes expliquent la très forte attractivité de ces régions et leur double fonction de zone de pâturage et de culture. La création du PND a permis une restauration des écosystèmes du bas delta et s'avère globalement réussie avec, sur plan environnemental, la remise en eau des plaines inondables entraînant le retour d'une biodiversité riche et une bonne régénération de la végétation tant sur les dunes que dans les bassins d'inondation, ainsi qu'un bon potentiel halieutique marqué par l'indicateur du retour notable d'une riche faune ornithologique. Cette régénération a favorisé le retour des activités liées à ces écosystèmes et qui avaient disparu avec leur dégradation.

3.1.4. Les mangroves estuariennes

La mangrove se localise dans l'estuaire où l'influence des eaux marines intervient. Elle est divisée en deux parties : la mangrove à *Rhizophora* et la mangrove à *Avicennia*. La mangrove à *Rhizophora* occupe la partie régulièrement submergée par les eaux (la slikke) (BERTRAND, 1994; M. A. TOURÉ, 2018). Ce type est appelé la mangrove rouge et est souvent mélangé avec

d'autres espèces.

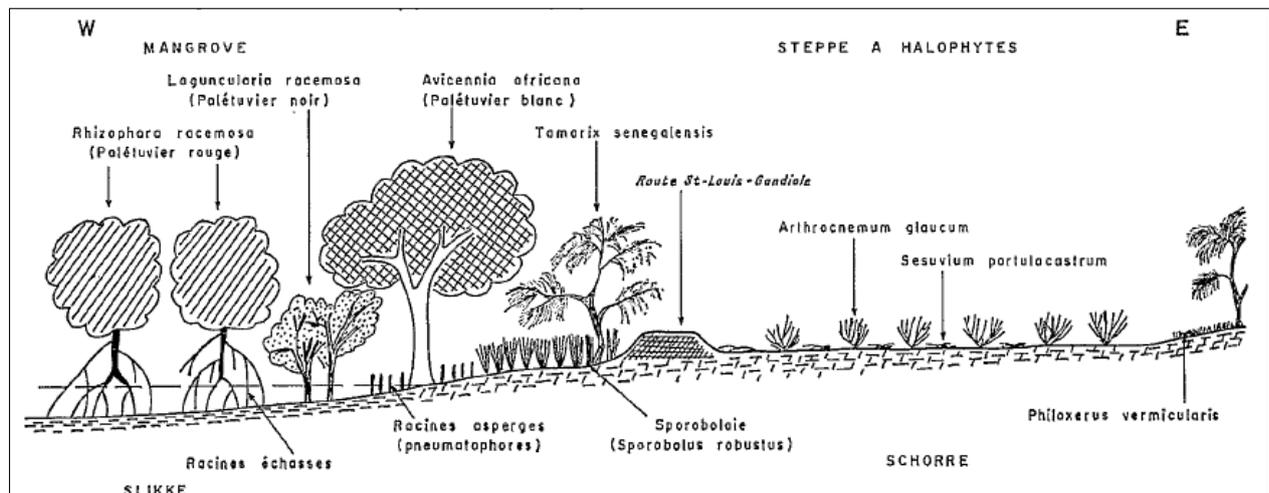


FIGURE 3.5 – Mangrove et la steppe à halophyte entre Saint-Louis et Gandiole (Source : MICHEL (1973))

La mangrove à *Avicennia africana* ou palétuvier blanc, elle est envahie par les eaux lors de la marée haute. *Avicennia africana* s'adapte aux fonds vaseux asphyxiants et à la salinité. Leurs racines, pneumatophores (croissent verticalement hors de la vase leur permettent de respirer. Aujourd'hui, l'évolution des vasières actuelles est modifiée depuis la mise en service du barrage antisel de Diama. Le régime en slikke (submersion par la marée) qui le caractérisait pendant la majeure partie de l'année est réduit sur la partie aval du barrage de Diama. Sur ces vasières de même sur certaines cuvettes inondées par l'eau salée se développent des sols très salés à alcalis.

3.2. Dynamique des écosystèmes du delta du Sénégal

Ces territoires naturels du delta du fleuve Sénégal ont connu de profondes mutations. Ces dernières sont déterminées par les actions humaines et surtout par la variabilité climatique. Ces transformations ont connu plusieurs situations depuis les années 1970.

D'abord, la variabilité climatique est déterminée par celle des paramètres du climat (précipitation, température, vitesse du vent, humidité relative et évaporation.). L'importance de ces paramètres varie en fonction des latitudes terrestres. Dans le domaine sahélien, la pluviométrie est l'élément climatique le plus probant. À elle seule, elle détermine l'évolution de l'environnement du milieu. Ce paramètre explique l'évolution des surfaces d'occupation des sols dans le delta depuis l'après-guerre jusqu'à la période post barrages. Toute la région du sahel a connu une sécheresse pluviométrique de 1970 à 1985 (tableau 3.2).

Tableau 3.2 – Déficit pluviométriques dans le Sahel (1952, 1972 et 1985) SY (2008) et M. A. TOURÉ (2018)

	1952*	1972**	1985***	Normale (1961-1990)	Normale (1981-2010)
Louga	865 mm	156 mm	220mm	302 mm	330 mm
Matam	603 mm	175 mm	354 mm	231 mm	360 mm
Podor	366 mm	110 mm	139 mm	216 mm	221 mm
Saint-Louis	427 mm	152 mm	261 mm	256 mm	251 mm

*L'année 1952 est celle sur laquelle on retrouve plus de données sur notre secteur d'étude

**L'année 1972 coïncide aux périodes des grandes sécheresses.

** L'année 1985 précède la mise en eau des barrages

On constate que les années 1972 et 1985 sont déficitaires dans tout le delta du Sénégal même si certaines stations comme Sain-Louis et Matam sont au-dessus la normale. Cependant, la période 1981 – 2010 est marquée par le retour des pluies avec la hausse des totaux pluviométriques annuels. Ils passent de 221,5 mm à 243,8 mm (dans le delta) (M. A. TOURÉ, 2018).

Ensuite à partir de la mise en eau des barrages, la présence de l'eau en relative abondance et la richesse de ces écosystèmes entraînent la très forte attractivité de ces régions et leur double fonction de zone de pâturage et de culture. C'en est suivi une dynamique secondaire de l'occupation des sols. En effet, le bas Delta a ainsi connu un fort accroissement de salinité avec l'interruption des inondations annuelles et donc de la recharge des nappes, favorisant la remontée d'un biseau salé et les phénomènes d'ascension capillaire des eaux salées superficielles. La combinaison de la sécheresse, de la salinisation des terres et des eaux, de la disparition des crues et de l'inondation prolongées en amont du barrage de Diama, ont considérablement appauvri la flore de la plaine alluviale, certaines espèces végétales ayant totalement disparu (TAÏBI, GASSANI et al., 2006), la végétation aquatique prolifère sur les bords des cours d'eau à cause à l'absence d'entrée saline (DIOUF, 2015; TAÏBI, BALLOUCHE et al., 2007). Ces différentes phases vont être mises en évidence par cartographie des différentes unités écosystémiques (Eau, dunes et terres salées, champs de culture, végétation aquatique et végétation continentale).

Dans cette étude, deux phases sont définies en fonction de l'évolution du climat pour caractériser la dynamique du milieu. Entre 1951 à 1969, du fait de l'absence d'images datant de

cette période, ne nous permet pas de représenter l'état des écosystèmes. La première de 1970 à 1984, marquée par une longue période de sécheresse et une forte anthropisation du milieu. Et la deuxième, de 1990 à 2010 caractérisée par un retour de la pluviométrie et l'avènement des inondations dans le milieu d'étude. Dans ce diagnostic, l'analyse de couverture végétale permet de mettre en exergue l'impact de la variabilité climatique. Le choix des images à traiter est fondé sur la résolution spatiale et la disponibilité (tableau 1.8).

Tableau 3.3 – Liste des données traitées

Satellite	Résolution spatiale	Date	Nombre de bandes
Landsat 1	60 m	Oct. 1972	4
Landsat 5	30 m	Oct. 1984	7
Spot 2	10 m	Oct. 1990	4
Spot 5	10 m	Nov. 2010	5

Nous avons utilisé des images à haute résolution telle que les images en mode multispectral de SPOT et de LANDSAT (tableau 3.3), dont la résolution est suffisante pour cartographier avec précision les contours des grandes unités de la couverture du sol aux échelles moyennes.

Tableau 3.4 – Les résultats de la qualité de la classification par l'Indice de Kappa (IK) et la Précision d'En-semble (PE)

Années	1972	1984	1990	2010
Précision d'ensemble	80,0 %	96,5 %	96,4 %	98,6
Kappa Coefficient	0,79	0,94	0,95	0,97

La scène LANDSAT étant plus grande que la scène SPOT, nous avons choisi d'analyser les images LANDSAT pour réduire le nombre de scènes à traiter et garantir l'homogénéité des résultats cartographiques. L'intérêt de l'utilisation de la télédétection dans l'étude des changements d'occupation des sols dans les milieux côtiers et deltaïques est mis en évidence dans les

études d'ANDRIEU et al. (2008) et ANDRIEU et al. (2010) sur l'évolution des surfaces végétales dans le littoral du delta du Saloum dans le sud du Sénégal.

La matrices de confusion montre de faibles taux d'erreurs entre les classes. Ils excèdent très rarement 10 % (tableau 3.4). Cela traduit de la bonne classification des différentes unités choisies. En effet, l'évaluation des résultats à partir des matrices de confusion nous permet de constater que les indices Kappa et les mesures d'exactitude indiquent que les classifications sont de bonne qualité.

3.2.1. La période sèche de l'avant-barrage

Les années 1970 sont marquées par une sécheresse très aigüe. La répartition des écosystèmes dans le delta en Octobre 1973 montre la prédominance des terres salées et/ou non exploitées (figure 3.6). Elles correspondent à la quasi-totalité des terres du *Waal* dans la partie nord (les levées et cuvettes), centre (alentours des marigots) et ouest (dans l'estuaire) du delta. La baisse des pluies entraîne une baisse de la végétation continentale. Les traces de végétation se trouvent dans le lit du fleuve, les principaux défluent et les lacs et dans les dépressions du PNODE. Les zones de cultures quant à elles, couvrent une infime partie des terres.

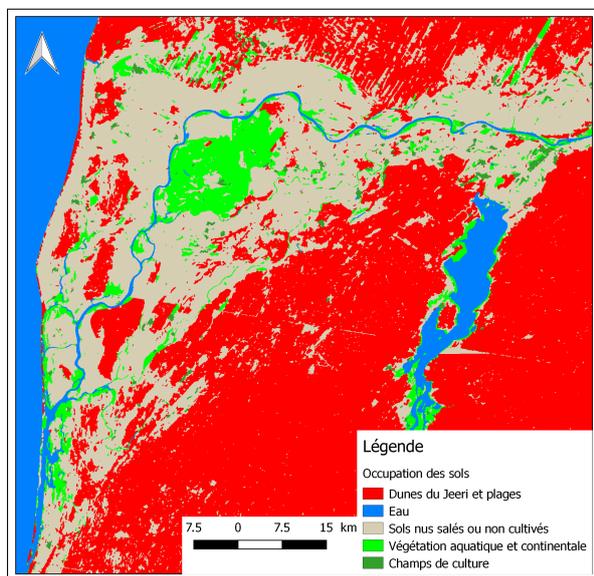


FIGURE 3.6 – Cartographie des écosystèmes en 1973

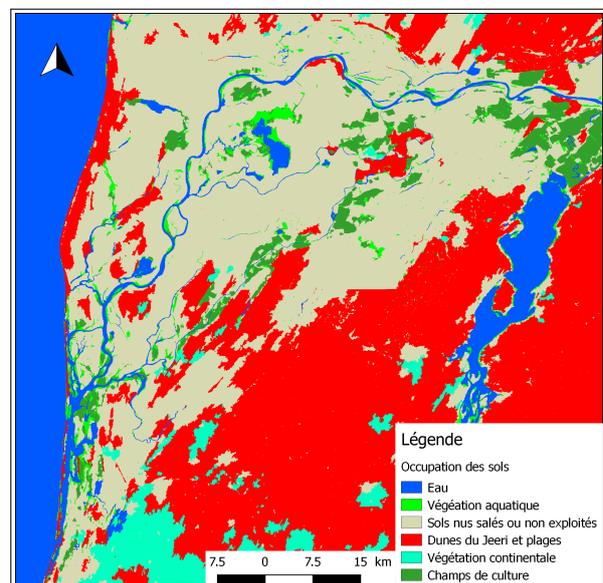


FIGURE 3.7 – Cartographie des écosystèmes en 1984

Les années de sécheresse se sont écoulées, le retour de la pluviométrie se fait ressentir dans un premier temps dans le *Jeeri* avec la présence de quelques taches de végétation sur les dunes (figure 3.7). L'augmentation des débits du fleuve Sénégal favorise aussi une augmentation

des superficies agricoles et des surfaces en eau. Avant la mise en eau du barrage de Diama, des superficies agricoles ont commencé à être aménagées le long du Gorom-Lampsar et du Djeuss.

3.2.2. L'après-barrage

La persistance de la sécheresse pousse les autorités des pays riverains du fleuve Sénégal à mettre en place le barrage de Diama dans le delta, afin de retenir les eaux plus longtemps. Les années qui ont suivi ont vu une régénération de la végétation (aquatique et continentale) et des champs de culture, une présence quasi totale de l'eau dans les plaines du *Walo* et une diminution des superficies de sols nus.

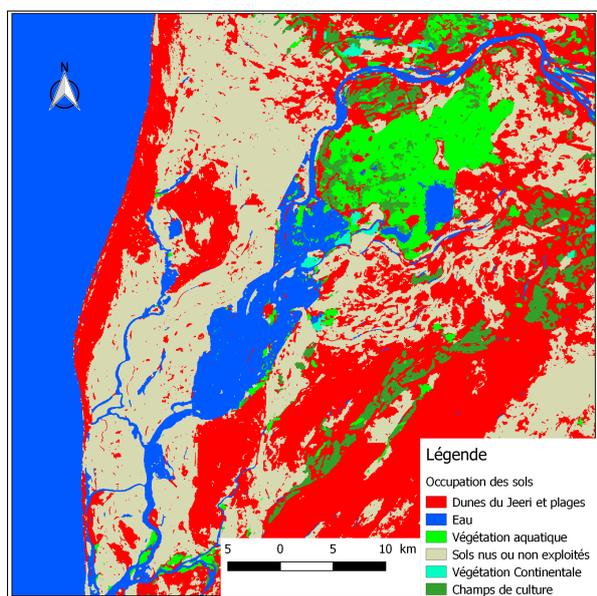


FIGURE 3.8 – Cartographie des écosystèmes en 1990

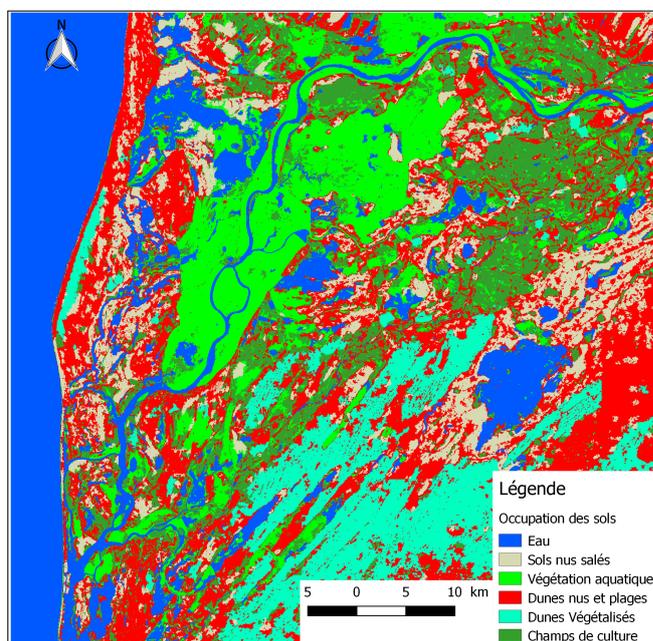


FIGURE 3.9 – Cartographie des écosystèmes en 2010

En 1990 la diminution de la langue marine salée entraîne un développement d'une végétation aquatique sans précédent sur les dépressions du PNOD et encore plus important en 2010 sur l'amont du barrage de Diama (Figures 3.8 et 3.9). Les dunes sont devenues boisées dans le *Jeeri* et ce grâce à la hausse des totaux pluviométriques annuels. Les superficies agricoles, à partir de 1990 ont commencé à s'accroître du fait de la disponibilité de l'eau d'une part et d'autre part du fait de la libéralisation du secteur agricole auparavant géré par la SAED. Ceci a eu comme conséquence le développement important des périmètres entre 1990 et 2010 notamment les périmètres privés dans le Gorom-Lampsar.

Conclusion du chapitre 3

Les écosystèmes humides en domaine sahélien, des milieux particulièrement riches et fortement attractifs dans un contexte semi-aride, sont donc soumis à de fortes pressions (climatiques et anthropiques) qui se sont accrues au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, générant des dégradations intenses des milieux et des activités (TAÏBI, GASSANI et al., 2006).

La préservation de ces espaces littoraux et deltaïques, dans le contexte d'une gouvernance partagée et durable, est un enjeu crucial. Dans ce contexte, disposer de cadres d'analyse opérationnels est une exigence éthique, mais aussi un défi scientifique (CORMIER SALEM, 2016). Ces cadres d'analyse font naître de nouveaux concepts dans la gouvernance des zones humides. Les « services écosystémiques », concept qui a connu un succès indéniable, s'accordent à reconnaître que conserver la disponibilité des services offerts par la biodiversité est vital. C'est dans ce cadre qu'ont été créées les réserves de biosphères transfrontalières (figure 3.10).

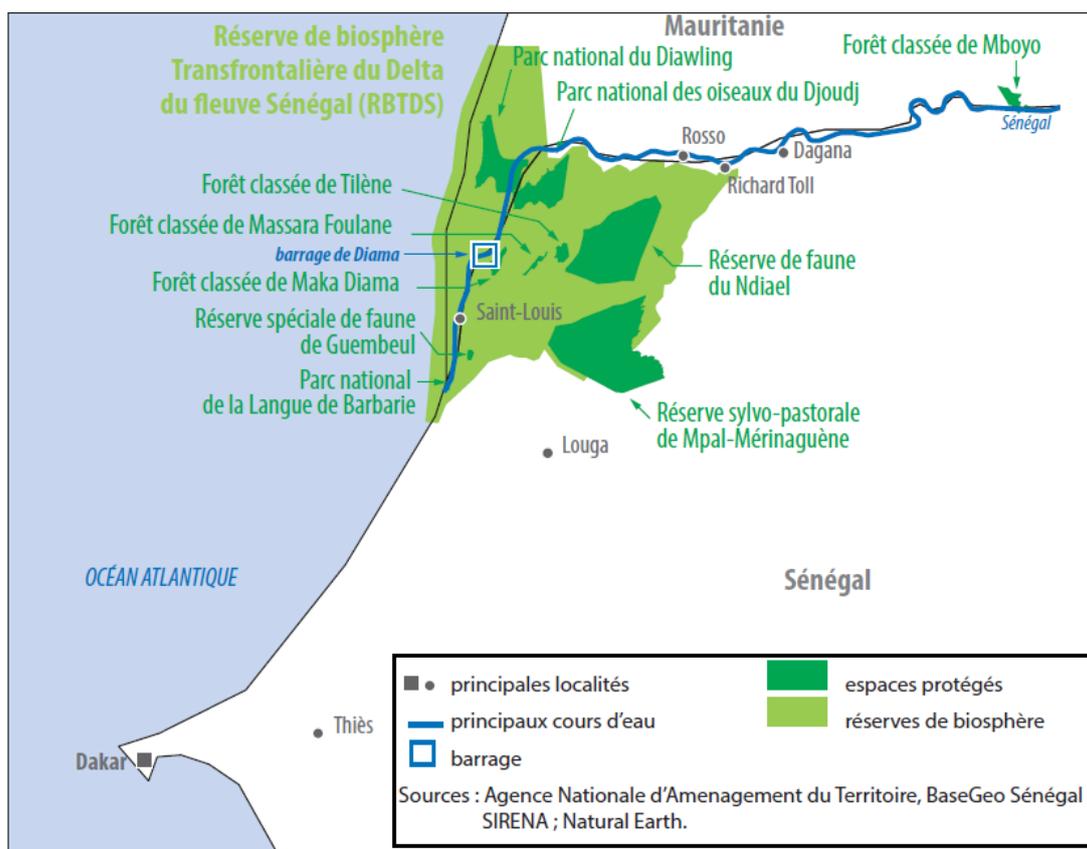


FIGURE 3.10 – Réserves de biosphère du Delta Sénégal (Source : CORMIER SALEM (2016))

Dans quelle mesure les communautés qui vivent et exploitent ces espaces auront-elles la capacité d'enrayer ces processus et favoriser une régénération des milieux et des activités no-

tamment agricoles ? Pour répondre à ces questions et dans une approche intégrée, multiscalaire, comparative et participative des deltas et des Aires Marines Protégées, le PATEO⁽¹⁰⁾, mène aujourd'hui des études sur la gestion de ces espaces transfrontaliers (CORMIER SALEM et al., 2016).

(10). PATEO « Patrimoines et Territoires de l'eau » est un laboratoire mixte international (LMI) basé à l'Université Gaston Berger de Saint Louis au Sénégal et associe des partenaires de la sous-région ouest-africaine, à savoir la Mauritanie, le Sénégal, la Guinée-Bissau et la Guinée (www.pateo.ird.fr).

LE PROCESSUS DE TERRITORIALISATION DE L'EAU DANS LE DELTA DU SÉNÉGAL

Sommaire

4.1	Processus de mise en valeur des territoires	118
4.1.1	Le peuplement	118
4.1.2	Le commerce avant l'agriculture	119
4.1.3	Les acteurs et les stratégies de la territorialisation hydraulique	120
4.2	Conséquences anthropologiques, environnementales et socioéconomiques de la mise en valeur du delta	128
4.2.1	Un modèle de production traditionnel ébranlé par les aménagements hydroagricoles	128
4.2.2	La « bataille » autour des ressources naturelles : les litiges fonciers et les conflits hydropolitiques	129
4.2.3	L'après-barrages aux résultats mitigés : des conséquences socioéconomiques et environnementales partagées	131
	Conclusion du chapitre 4	135

Le territoire de l'eau selon ALEXANDRE et al. (2004) se définit comme une réponse spatialisée à un besoin local par la mobilisation de savoirs, de pratiques et de techniques, en un temps t, à travers un processus finalisé de production de la ressource pour des usages déterminés, propre au territoire hydraulique. Pour BARTOUT et TOUCHART (2017), « le territoire de l'eau comprend une dimension naturelle, mais aussi socialisée de l'espace par l'entremise de l'identité, du vécu, du paysage, des projets ou du risque », car l'eau est l'objet central dans l'organisation et l'appropriation de l'espace, dans la construction des représentations collectives et individuelles ou encore dans la structuration des relations sociales et économiques des sociétés locales, comme le témoignent les études de BETHEMONT et al. (2003) dans la vallée du Sourou au Burkina Faso, de BERTONCIN et al. (2009) dans la vallée du Sénégal ou encore de BLANCHON (2009) en Afrique du Sud. L'application de l'approche par territoires de l'eau aux espaces sahéliens renvoie à l'appropriation du territoire par l'hydraulique. La transformation du milieu par l'hydraulique et la mise en valeur des territoires enclenchent un processus de territorialisation (BERTONCIN et al., 2009; FAGGI et al., 1990; TURCO, 1986) qui met en scène de nombreux acteurs (ZOUNGRANA, 2006). Le territoire acquiert alors un nouveau statut, celui de concept opératoire aussi bien dans le domaine de l'aménagement du territoire que dans celui de la gestion de l'eau (GHIOTTI, 2006).

Dans le delta du Sénégal, l'enjeu de cette gestion dépasse le cadre strict des territoires hydrologiques (bassin versant, plaine d'inondation, etc.) et topographiques du delta. Cette section est consacrée aux processus d'acquisition des territoires de l'eau ⁽¹⁾ et du territoire de l'eau du delta du Sénégal par les populations.

4.1. Processus de mise en valeur des territoires

4.1.1. Le peuplement

La population humaine constitue une pesanteur anthropologique dans la genèse des territoires de l'eau du delta du Sénégal. Ce dernier qui offre des conditions naturelles jugées plus

(1). On parle de « territoires de l'eau », car on connaît les limites de la production de l'eau, mais on ignore les limites de sa consommation. Aussi, sur un même espace, les territoires sont successifs ; le territoire a la capacité à s'étendre et à se modifier (ALEXANDRE et al., 2004), et/ou de « territoire de l'eau » car le fait que le delta ait une identité fait de lui un territoire de l'eau qui permet lui-même d'être subdivisé en plusieurs territoires.

favorables au développement hydroagricole (S. M. SECK, 2009), est aujourd'hui un milieu fortement instable à plusieurs points de vue (M. A. TOURÉ, 2018). À ce titre, l'objectif final de l'étude de sa pédologie et de sa géomorphologie est de maîtriser l'ensemble des phénomènes physiques qui président à l'évolution du milieu, car le delta a été et reste toujours un haut lieu de convergence des populations agropastorales (CORMIER SALEM, 1998 ; SY, 1995).

L'assèchement progressif du Sahara et l'existence d'une longue période sèche s'étendant du XII^{ème} siècle au XVI^{ème} siècle expliquent en grande partie la lente descente des populations vers la vallée du Sénégal (SANTOIR, 1998). Alors, le fleuve constitua un axe de pénétration dans tout l'ouest du Sahel (DESCROIX, 2003c). L'histoire du delta est aussi l'histoire d'une civilisation hydraulique héritée de la civilisation du Nil ⁽²⁾. La maîtrise de l'eau douce a bouleversé la dynamique de localisation des flux migratoires qui se localisent désormais, autour des axes hydrauliques et routiers. Dans cet espace, l'évolution du milieu humain est fortement liée à la territorialisation hydraulique et aux dynamiques économiques. Des systèmes de production traditionnels naissent en fonction des territoires ethniques et des milieux agropédologiques (JAMIN et al., 1986).

4.1.2. Le commerce avant l'agriculture

"Au XVI^{ème} siècle, s'étaient établis les Français après les Portugais à l'embouchure de fleuve Sénégal où existaient des escales pour faire transiter la gomme et les esclaves vers les cités marchandes implantées à l'aboutissement de réseaux transsahariens. Au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, c'est un foyer de renaissance de l'islam. Le fleuve a constitué un objet spatial majeur dans cette traite : limite des royaumes, zone commerciale, voie de navigation et ressource en eau" (BRUCKMANN, 2017). Les exploitations agricoles étaient tournées vers ces escales où le commerce devint une importante source de troubles et de désorganisation ⁽³⁾ des États riverains. "Alors jusqu'au XIX^{ème} siècle, ce milieu n'a connu que la « caravane » et la « caravelle ». On songea dès lors à faire autre chose que du commerce " (S. M. SECK, 1986b).

L'exploitation historique de la mise en valeur du delta, favorable à ce travail, remonte à l'époque coloniale. Avec les premiers essais agronomiques sous forme de « jardins pépinières

(2). Sur le plan humain, des égyptologues défendent l'origine nilotique des populations de la vallée du fleuve Sénégal. Ils se basent principalement sur l'analyse des correspondances entre civilisation nilotique et civilisations africaines à partir des peintures rupestres, des mythes de fondation, de l'oralité, du faciès physique, des traditions agraires, du thème de l'eau (hydronymie) et de ses significations ontologiques et théologiques (KAMARA, 2013)

(3). La théocratie musulmane qui supprime le pouvoir des Peuls tente de s'opposer aux ingérences extérieures et à la traite atlantique

» réalisés en 1802 (A. DIAW, 1993) , même si ces essais ont échoué. Ceci suscita le plan de colonisation agricole du delta du Sénégal. Cette logique de mise en valeur, un système fortement engagé par les autorités, se poursuit jusqu'à nos jours. Les aménagements hydroagricoles demeurent encore une problématique.

4.1.3. Les acteurs et les stratégies de la territorialisation hydraulique

4.1.3.1. Le delta du Sénégal comme œuvre de la colonisation française

L'histoire du delta⁽⁴⁾ du Sénégal remonte en 1802 avec la publication du plan de colonisation agricole du bassin du fleuve Sénégal. Cette étude a été revue et corrigée en 1822, pour faire l'objet d'une expérimentation avec le jardin d'essai de Claude RICHARD à Richard-Toll⁽⁵⁾ dans le haut delta du fleuve Sénégal (A. DIAW, 1993 ; KAMARA, 2013 ; A. KANE, 1997). L'esclavage, faut-il le rappeler, est aboli à partir de 1850, ce qui a justifié une phase de stagnation, favorisant la sédentarisation. Après la guerre, l'insuffisance du riz pousse l'administration coloniale à entreprendre un projet rizicole de grande envergure. La population du *Waaloo* étant décimée par la guerre, la traite et la famine, l'absence de bras constituait un handicap sérieux à la réalisation du projet. De plus, le delta est situé dans une zone faiblement peuplée, de 1 à 5 habitants au km² (BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ, 1999) pour l'ensemble de la vallée (estimations de 1951) : cela signifiait une participation faible des populations et a expliqué des migrations organisées avec des villages pionniers d'ouvriers agricoles ; on assista alors au début de la territorialisation hydraulique à travers une série d'organisations pour la gestion des aménagements hydroagricoles se succède⁽⁶⁾.

Les premiers aménagements et introduction de la riziculture irriguée (1938 – 1964)

Les autorités coloniales vont définir un plan de développement hydro-agricole du delta prévoyant l'aménagement de 50.000 ha et la production de 80.000 tonnes de riz paddy (S. M. SECK, 2009). Les premières opérations d'introduction de la riziculture irriguée vont démarrer

(4). Le delta au sens agricole et des aménagements hydroagricoles du terme

(5). Richard Toll (en langue locale Wolof champ de Richard) doit son nom au jardinier Richard qui entreprit en 1824, dans cette zone, la première expérience d'irrigation du bassin du fleuve Sénégal sous le Gouverneur Baron Roger.

(6). a). Les premières études complètes sur les conditions hydrographiques du fleuve Sénégal seront conduites de 1892 à 1908 avec la publication des Instructions nautiques du fleuve entre Saint-Louis et Kayes ; b). Les premières études d'aménagement par l'Union Hydroélectrique Africaine (UHA) sont conduites entre 1925 et 1930 ; c). La création, en 1934, de la Mission d'Études et d'Aménagement du fleuve Sénégal (MEAF) ; d) ; la création, en 1938, de la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal (MAS) ; e) en 1959 la MAS devient un organe commun de mise en valeur du fleuve au service des trois États autonomes.

à partir de 1946 sur les bords du lac de Guiers avant de s'étendre au cœur du Delta. De 1946 à 1956, la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS) réalise, en maîtrise complète de l'eau, le casier rizicole de Richard Toll, couvrant 6.000 ha au nord-ouest du Lac de Guiers (S. M. SECK, 1986b). La réserve d'eau douce du lac, protégée de l'invasion de la langue salée par un pont barrage construit en 1947 sur la Taouey, est utilisée pour l'irrigation (BELIÈRES et A. KANE, 1993). Vers les indépendances ce projet de Richard a connu un échec. Le champ des aménagements va alors se déplacer à l'Ouest vers l'intérieur du bas delta où commencent les premiers aménagements en exploitation paysanne et réalisés en submersion contrôlée⁽⁷⁾. Ce modèle de submersion contrôlée va se généraliser dans tout le delta grâce à une politique publique volontariste de l'État du Sénégal.

(7). Il s'agit d'une technique primaire consistant simplement à endiguer les cuvettes naturelles d'inondation pour les protéger de la crue et à contrôler le niveau d'entrée de l'eau par un ouvrage vanné établi sur le marigot ou le canal adducteur

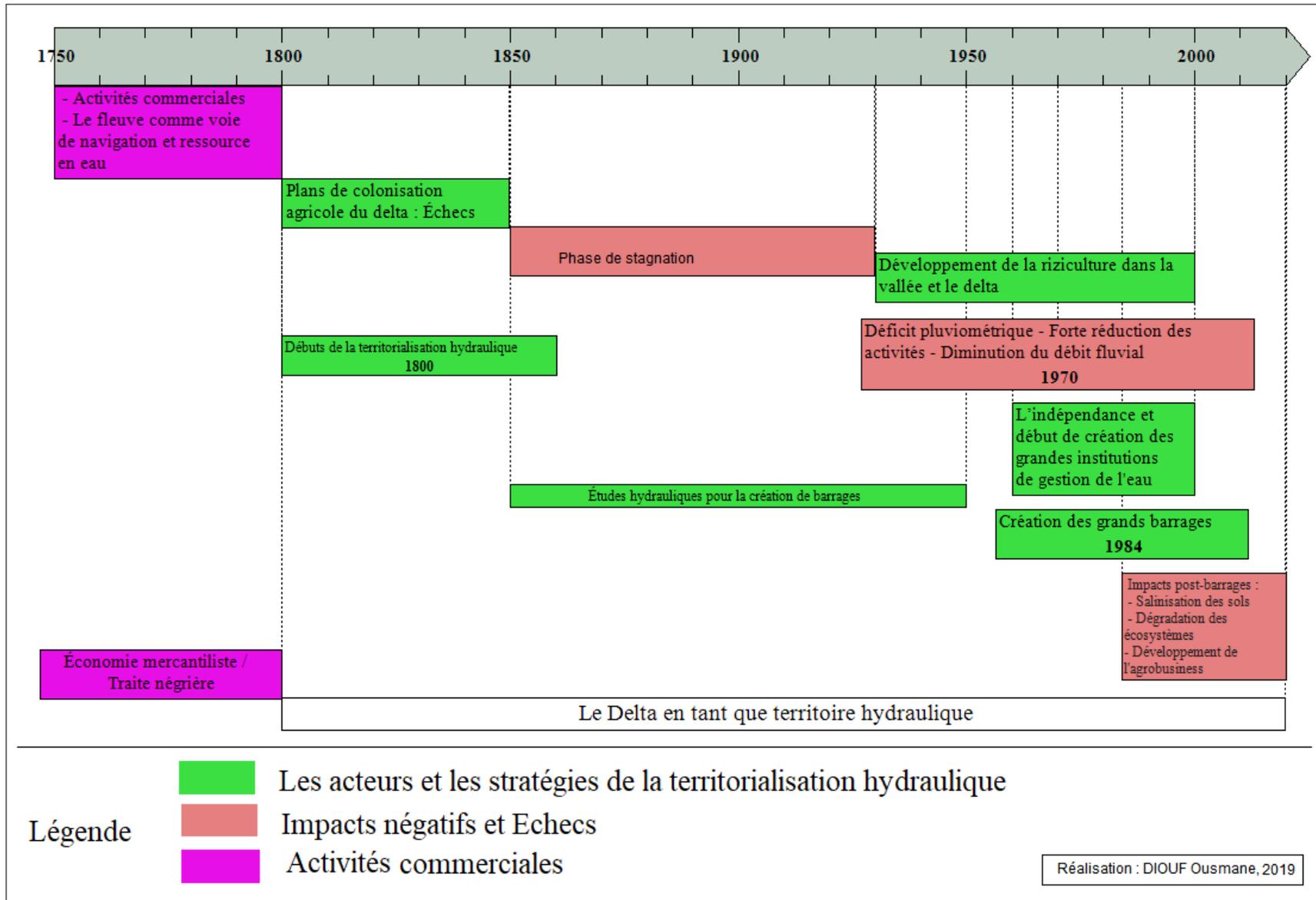


SCHÉMA 4.1 – Chronologie des événements majeurs dans le delta du Sénégal

4.1.3.2. L'État dans la dynamique de colonisation agricole du delta : l'époque post-indépendance

L'intérêt pour la mise en valeur du delta va se renforcer à l'indépendance en reprenant le projet colonial avec d'une part, une option de colonisation agricole et de peuplement de la zone et d'autre part, une intervention massive de l'État à travers de grandes sociétés publiques (BARRETEAU, 1998 ; CISSÉ, 2011 ; SÈNE, 2008).

À partir de 1960, la phase de développement de la riziculture irriguée stimule l'explosion urbaine de l'agglomération de Richard-Toll. L'arrondissement de Ross-Béthio, centré sur l'axe Gorom-Lampsar, constitue la zone la plus impliquée dans l'activité hydroagricole au Sénégal ; l'évolution rapide de sa population est liée à ce secteur d'activité. Avant 1976, les moyens de communication étaient peu performants, notamment pendant la période d'avant 1960. Cette orientation se doublait d'une volonté politique de limiter la marginalisation de cette partie nord du pays et de mieux l'intégrer dans la politique nationale de développement qui privilégiait alors le bassin arachidier⁽⁸⁾ et les régions côtières du centre ouest du pays.

Les aménagements en submersion contrôlée et l'installation de la riziculture (1964 – 1972)

L'organisation autonome du Delta (OAD) a été ainsi créée en 1960 pour réaliser les aménagements et encadrer les populations en relayant la MAS qui continuait à intervenir dans le domaine des études et des grosses infrastructures, en réalisant notamment en 1964, la digue de ceinture du Delta (84 km) pour protéger l'ensemble des cuvettes rizicultivables (S. M. SECK, MAGRIN et al., 2009). Elle est équipée d'ouvrages pour le contrôle de la submersion dès l'arrivée de la crue et permet la protection des cuvettes. Parallèlement, il était créé l'organisation autonome de la vallée pour y développer l'irrigation en submersion contrôlée. Dans le delta, la MAS et l'OAD vont être remplacées en 1965 par la SAED. Cette société dotée de moyens matériels et humains importants va être chargée d'une triple mission : aménager pour la riziculture 30.000 ha en 10 ans, organiser le peuplement et la colonisation agricole du Delta et enfin, former et encadrer les paysans (S. M. SECK, 2009). À cet effet, et à la faveur de la loi sur le domaine national votée un an plus tôt, les terres irrigables du Delta vont être soustraites du contrôle des communautés rurales et classées en 1965 en zone pionnière gérée par la SAED (BELIÈRES, JAMIN et al., 2013 ; A. KANE, 1997 ; T. D. NIANG, 2017). La SAED aménage de

(8). Zone écogéographique au centre du pays, sous culture pluviale, dont la spéculation principale produite est l'arachide

toutes pièces les terres du delta et était responsable des aménagements entièrement financés sur ressources publiques et à partir de prêts extérieurs. Ainsi un contrat standard de mise en valeur était signé entre elle et chaque coopérative agricole (BONNEFOND et al., 1981 ; S. M. SECK, MAGRIN et al., 2009). Les paysans qui n'avaient aucune tradition hydraulique étaient encadrés et assistés par la société d'État qui intervenait à tous les niveaux du processus d'aménagement et de production. Elle se chargeait également des études, des réalisations et de l'entretien des aménagements, de la formation des paysans, de la définition et de la vulgarisation des techniques d'exploitation ; elle assurait aussi la commercialisation, le transport, l'usinage du paddy et le recouvrement du crédit (S. M. SECK, 1986a). Au cours de cette période, les objectifs visant le peuplement du delta et l'introduction de la riziculture irriguée ont été atteints. Mais, les résultats en termes de production demeuraient faibles ; la contribution à la satisfaction des besoins nationaux étant insignifiante.

Cependant, malgré les efforts de l'État et l'omniprésence de la SAED, la mise en valeur du Delta va progresser beaucoup plus lentement que prévu avec des déboires importants au niveau des performances agroéconomiques impliquant des conséquences structurelles et socioéconomiques sans précédent.

4.1.3.3. Des projets hydrauliques pour la maîtrise de l'eau et des projets hydroagricoles pour accroître la production

Après l'indépendance, les États riverains du Sénégal continuent à chercher le meilleur cadre de collaboration pour la gestion des eaux du fleuve⁽⁹⁾. L'OMVS est ainsi l'aboutissement d'un long processus de tentatives pour la maîtrise et l'exploitation rationnelle des ressources du fleuve Sénégal et de sa vallée. La construction d'aménagements hydrauliques, surtout en Afrique sahélienne et soudanienne, a pour objectifs principaux : une régularisation du débit, la production d'énergie hydroélectrique, l'amélioration de la navigation, la satisfaction des besoins agricoles, la satisfaction de l'alimentation en eau potable de la population (SALOMON, 2006). Pour remédier aux conditions climatiques défavorables, à la réduction dramatique des écoulements et au caractère aléatoire de la ressource en eau, alors que l'eau constitue la principale contrainte en zone semi-aride, elle est synonyme de vie, elle intervient dans la plupart

(9). **a)** La création en 1963, du Comité Inter-États, regroupant la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal ; **b)** L'Organisation des États riverains du Sénégal (OERS) a été créée en 1968 par la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal ; **c)** Après le retrait de la Guinée de l'OERS et suite aux sécheresses du début des années 1970, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal créent l'OMVS, le 11 mars 1972 à Nouakchott. Le 02 juillet 2005, la Guinée a adhéré à l'Organisation, adhésion finalisée le 17 mars 2006 à Bamako

des activités humaines sous forme de ressource utilisable ou comme facteur de production et à la demande pressante d'une population en forte croissance et qui en a été pendant longtemps privée, d'importants travaux d'aménagements ont été réalisés.

Depuis des décennies, de grands programmes d'aménagements ont été développés dans le bassin du fleuve Sénégal par la construction d'ouvrages principaux pour maîtriser l'eau :

1. D'abord en 1964, en vue de protéger les terres du delta du biseau salé, on procéda à l'édification de la digue périphérique sous l'impulsion de la Mission d'Aménagement du Sénégal (MAS). La digue s'étire sur 84 km de Dakar Bango à Richard-Toll (début du contrôle de la submersion)
2. Le barrage en terre provisoire de Kheune (1983 et 1984),
3. Le barrage antisel de Diama à l'aval, mis en eau depuis novembre 1985 et situé à 50 km de l'embouchure, a été conçu pour arrêter la remontée des eaux marines dans l'estuaire et créer un réservoir d'eau douce dans la basse vallée ;
4. Le barrage de Manantali mis en service en 1988. Il constitue un réservoir de stockage de l'eau dans le haut bassin, permet le laminage des fortes crues, à moyen ou long terme l'irrigation de 375.000 ha de cultures, et le soutien de la crue du fleuve afin d'optimiser les cultures traditionnelles de décrue (A. KANE, 1997).
5. Un vaste réseau de canaux d'irrigation et de canaux de drainage dans le but de se libérer des contraintes naturelles et de maîtriser le développement.

Ces ouvrages ouvrent ainsi la voie à une mise en valeur sous de nouvelles formes, du delta et de la basse vallée ainsi que localement, le rétablissement progressif ou la réhabilitation des écosystèmes avec le développement d'une couverture végétale. La politique des grands barrages a été le choix officiel, somme toute réaliste, même si la controverse n'a pas manqué autour du sujet. Mais, quelle autre politique aurait été susceptible dans le contexte sahélien actuel de modifier radicalement le régime naturel du fleuve Sénégal pour une gestion efficace des ressources en eau et renverser de façon irréversible le processus de dégradation progressive de l'environnement physique et même humain du delta et de la basse vallée du fleuve Sénégal ? (A. KANE, 1997).

Cette dynamique se poursuit au cours des années de sécheresse avec les programmes de maîtrise totale de l'eau⁽¹⁰⁾. En effet, pour apporter une solution au caractère aléatoire de la pro-

(10). L'irrigation par maîtrise totale de l'eau permet un véritable contrôle des apports d'eau à la parcelle, mais permet aussi de palier aux difficultés de protection des crues, de drainage des eaux.

duction rizicole sur les cuvettes aménagées, et faire face au bilan hydrologique déficitaire, la SAED va réaliser, à partir de 1972, des aménagements tertiaires⁽¹¹⁾. Petit à petit, les aménagements secondaires seront transformés en aménagements tertiaires. L'irrigation par submersion contrôlée sera abandonnée en 1978 (BELIÈRES, JAMIN et al., 2013). À partir de 1974, les périmètres irrigués villageois (PIV) se développent dans la vallée pour lutter contre la sécheresse. Ce sont des aménagements de petite taille (20 à 25 ha) réalisés sur les bourrelets de berge. Ils sont équipés d'un groupe motopompe et d'un réseau d'irrigation (BELIÈRES et A. KANE, 1993 ; S. M. SECK et LERICOLLAIS, 1986). C'est à partir de cette date que la SAED⁽¹²⁾ a vu son aire d'action étendue à l'ensemble de la rive gauche.

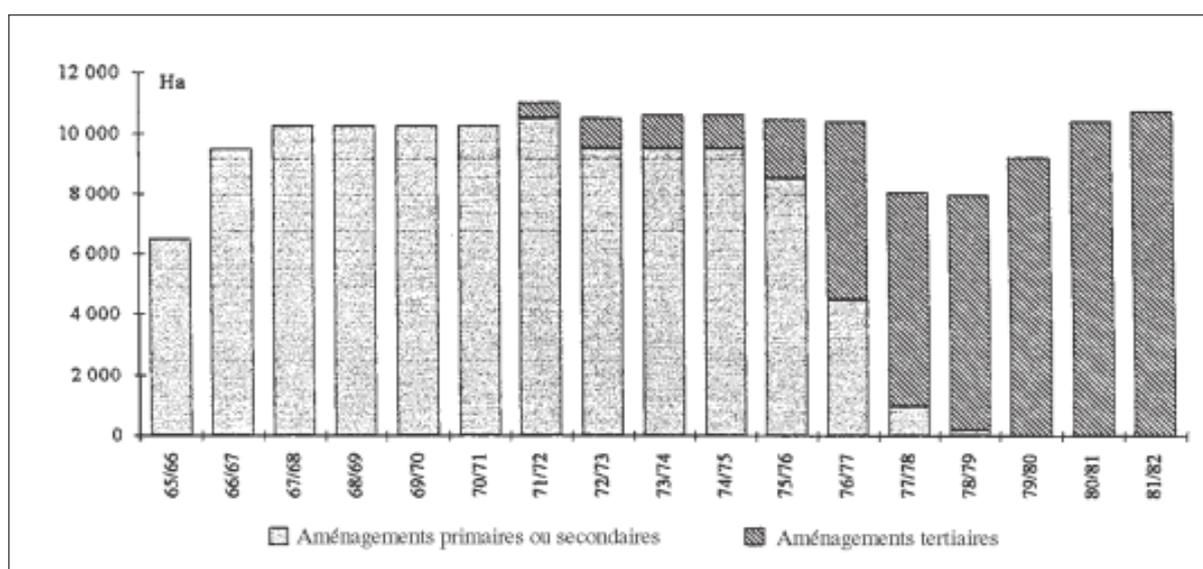


FIGURE 4.1 – Évolution des superficies aménagées selon le type d'aménagement (1965 – 1982) Source : BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ (1999)

En 1981, elle devient une société nationale, industrielle et commerciale par actions avec pour mission le développement rural intégré des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé.

Les aménagements intermédiaires, une synthèse des grands et petits aménagements

Dans les années 1980, les études et évaluations⁽¹³⁾ mettent l'accent sur le coût très élevé des grands aménagements et les difficultés d'exploitation et de gestion pour des résultats jugés insuffisants. Les périmètres irrigués villageois au contraire sont moins coûteux et obtiennent de

(11). Dans ces types d'aménagement, la maîtrise est obtenue par des unités de pompage en tête de réseau, permettant d'irriguer quel que soit le niveau de la crue, par un cloisonnement dense grâce à un réseau de diguettes qui limitent les dénivelés et par un réseau de canaux d'irrigation et de drainage hiérarchisé qui permettent la réalisation dans de bonnes conditions des pratiques hydrauliques : irrigation et drainage

(12). Son appellation est devenue Société d'aménagement et d'exploitation des terres du delta du fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé.

(13). Les rapports de la SAED

meilleurs résultats et un taux de mise en culture supérieur à celui des grands aménagements. Parmi les arguments avancés pour expliquer ces meilleurs résultats figurent la participation des producteurs à la réalisation des aménagements et leur responsabilisation au plan de sa gestion.

Sur la base de ce constat, des périmètres d'un type nouveau seront conçus, les périmètres intermédiaires. Ils visent à combiner les avantages des grands aménagements (fiabilité et qualité de l'aménagement, taille des parcelles permettant la mécanisation) et ceux des PIV (coûts réduits, participation des bénéficiaires à la réalisation, autogestion paysanne des réseaux et des équipements). L'initiation de ce projet accorde une place importante aux aspects humains et sociaux considérés dès le départ comme partie intégrante des aménagements.

À partir de 1982, on assiste à une stagnation des superficies. Il n'y aura plus d'important programme d'aménagement de grands périmètres hydroagricoles sur financement public dans le delta. Ce dernier vit dans l'attente de la réalisation et de la mise en service des grands barrages qui doivent permettre le développement des superficies par une amélioration de la disponibilité en eau. La SAED réalisera néanmoins quelques aménagements de type PIV destinés aux villages des zones qui ne disposent pas de terres dans les grands périmètres, et notamment ceux du bas Lampar. Cette période est marquée par l'adoption, en 1984, de nouvelles orientations en matière de politique agricole (connues sous l'appellation de Nouvelle Politique Agricole) qui visent la libéralisation des échanges et des conditions de production ; le désengagement de l'État s'accompagnant d'une responsabilisation des producteurs et de l'incitation du secteur privé. Et à partir de 1987, c'est une nouvelle période qui débute dans l'histoire de l'aménagement du delta (BELIÈRES et A. KANE, 1993). Le désengagement progressif de l'État, une grande disponibilité en terre, un large accès aux financements de la Caisse Nationale de Crédit Agricole du Sénégal (CNCAS) et une ressource en eau abondante avec la mise en service des barrages vont constituer des conditions favorables pour un développement très rapide des aménagements hydroagricoles privés. Ce sont des aménagements construits sans étude topographique et pédologique préalable. Il n'y a pas de drainage, l'eau quitte la parcelle par évaporation, infiltration ou écoulement vers des zones basses.

Cette mise en place du territoire hydraulique du delta du Sénégal a engendré d'énormes conséquences anthropologiques (conflits fonciers et hydropolitiques), environnementales (impacts sur les écosystèmes sahéliens), et socioéconomiques (augmentation des superficies irriguées).

4.2. Conséquences anthropologiques, environnementales et socioéconomiques de la mise en valeur du delta

Les aménagements hydroagricoles ont modifié la dynamique des espaces économiques du delta (espace pastoral, espace rizicole, espace écologique, etc.) en offrant de nouvelles possibilités de mise en valeur et de développement, en réduisant la dépendance des populations et des activités aux aléas hydroclimatiques (sécheresse, étiage prolongé).

4.2.1. Un modèle de production traditionnel ébranlé par les aménagements hydroagricoles

Le delta du Sénégal a une longue histoire traditionnelle et sa mise en valeur a engendré d'énormes conséquences au lendemain de la sécheresse des années 1970 jusqu'à nos jours. En effet, ce « nouvel ordre » hydroagricole a buté sur des pesanteurs anthropologiques anciennes (SANTOIR, 1994 ; SCHMITZ, 1993). L'aménagement du delta du Sénégal s'organise d'abord autour de la ressource en eau et aujourd'hui, c'est l'ère d'une hydraulique moderne qui engendre des changements énormes (SALOMON, 2006) (conflits d'usage autour de la ressource foncière et hydraulique et le déplacement de l'élevage deltaïque depuis le Nord vers le *Ferlo* dans le *jeeri*, les parcours des pasteurs transformés en agropasteurs (TOURRAND, 1989)), mais qui se heurte néanmoins au maintien d'une organisation politique et territoriale et l'emplacement des superficies aménagées respecte bien les limites traditionnelles (SCHMITZ, 1986). Cette hydraulique se trouve au centre de territoires complexes qui se sont mis en place au cours de différentes phases historiques qui ont contribué à la structuration du géosystème deltaïque. Les nouvelles conditions du milieu entraînent une déstructuration – restructuration socioanthropologique inscrite dans le cadre de rapports (sociaux, psychologiques, géographiques, etc.) avec la terre, avec l'eau, avec l'espace, avec le temps, etc. qui renvoient à des relations entre et dans les groupes ethniques spécifiques (KAMARA, 2013). Ces rapports complexes à l'espace ne peuvent être organisés, dans un cadre moderne, qu'en prenant en compte les structures anciennes fortement bouleversées par la modernisation hydraulique. Ces structures traditionnelles restent, pourtant, solidement ancrées dans le delta du Sénégal. Le développement socioéconomique de la région ne peut se faire sans la prise en compte de ces structures anthropologiques qui se projettent sur le territoire et qui l'organisent pour partie, ce qui, en retour, a des conséquences sur son

fonctionnement au jour le jour.

4.2.2. La « bataille » autour des ressources naturelles : les litiges fonciers et les conflits hydropolitiques

Depuis le début des années 1980, l'aménagement et la mise en valeur du delta sont marqués par une politique de désengagement⁽¹⁴⁾ de la SAED et de libéralisation de l'économie avec une responsabilisation accrue des organisations de producteurs (BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ, 1999 ; S. M. SECK, 2009). Cette politique s'accompagne d'une modification du régime foncier. La zone pionnière du delta est déclassée⁽¹⁵⁾ et les terres reversées dans les zones de terroirs (décret 87 – 720 du 4 juin 1987) pour être gérées par les communautés rurales, collectivités locales administrées par un conseil rural élu (BELIÈRES, JAMIN et al., 2013). La ressource est maintenant disponible pour tout ce qui souhaiterait pratiquer une activité agricole (les terres sont affectées par le conseil rural et les affectations ont été faites sans supports d'information et d'analyse, sans carte de référence ou de moyens adéquats de vérification sur le terrain, ni formation spécifique).

Aujourd'hui, pour pallier cette situation les collectivités territoriales ont conçu des plans d'occupation et d'affectation des sols (POAS) dans lesquels les SIG jouent un rôle fondamental avec les bases de données relationnelles permettant de supprimer les affectations multiples de terres. L'absence de repérage précis des sites sur le terrain a conduit à affecter un même terrain à plusieurs demandeurs, entraînant des nombreux litiges fonciers (S. M. SECK, 2009) d'abord entre familles sénégalaises dans le delta et entre le Sénégal et la Mauritanie dont l'histoire est principalement celle des relations entre un fond de populations « noires », autochtones, et des migrations de populations « blanches », d'origine berbère, puis arabe, venues du Nord (SANTOIR, 1998).

Le piège ethnique de crise Sénégal-mauritanienne

La maîtrise de l'eau constitue un élément essentiel de pouvoir. Pour l'Afrique, c'est un enjeu stratégique et les grandes manœuvres pour son contrôle ont déjà commencé depuis les

(14). Le désengagement de l'État s'inscrit dans un cadre plus large de libéralisation de l'économie nationale liée aux politiques d'ajustement structurel consécutives au programme de redressement économique et financier instauré en 1979 et soutenu par le FMI. Dans le secteur agricole, la libéralisation s'est traduite par une nouvelle politique agricole (NPA), en 1984,

(15). Le régime foncier qui prévalait au Sénégal était celui du droit « hache » et de « feu ». Appartenaient les terres à tous ceux qui les avaient exploitées en premier. En 1964, l'État du Sénégal engage une réforme foncière, toutes les terres, y compris celles du delta, sont détenues par l'État. Dans le delta il les a classées en 1965 en zone dite « pionnière » pour les aménager.

indépendances. Le problème, c'est qu'un fleuve (grand ou petit) traverse souvent des frontières, quand il ne les délimite pas lui-même (SALOMON, 2006). Des conflits peuvent dégénérer à cause de l'eau : c'est le cas du Nil (entre l'Égypte, le Soudan et l'Éthiopie), le cas du Zambèze (entre le Zimbabwe et la Zambie) et du Sénégal entre le Sénégal et la Mauritanie.

La réforme sénégalaise foncière qui accompagne le désengagement de l'État pose également le problème de la frontière⁽¹⁶⁾ puis que l'attribution des terres privilégie le cadre national. Et, comme se trouvaient des peuls noirs en Mauritanie et des Maures (arabes) au Sénégal, ce conflit sera vite traduit en une guerre ethnique entre les deux nations. Les incidents se multiplièrent entre le Sénégal et la Mauritanie en 1987 – 1988, car les territoires villageois enjambent la frontière constituée par le lit mineur du fleuve jusqu'à aboutir aux tragiques événements d'avril et de mai 1989 qui ensanglantèrent les villes de Mauritanie et du Sénégal et en particulier les deux capitales, Nouakchott et Dakar (DESCROIX, 2003c ; SCHMITZ, 1993). L'État Mauritanien procéda à l'expulsion des Sénégalais vivant sur la rive gauche, mais aussi les Peuls « noirs » de nationalité mauritanienne. Les pouvoirs d'État des deux rives ont joué un rôle d'arbitre, soit à travers la SAED soit à travers la police, face à ce conflit qui est à présent loin d'être seulement hyropolitique. De nombreux éleveurs peuls ont perdu leur cheptel, les boutiquiers maures du côté du Sénégal ont vu leurs marchandises saccagées et leurs biens hypothéqués. Les deux pays ont frôlé la guerre. La solidarité arabe et Maghreb a joué dans l'alliance des nations comme le Koweït avec la Mauritanie (S. M. SECK, 2009). La France colonisateur des deux pays à l'époque, malgré une implantation de son armée sur le territoire sénégalais, resta neutre à ce problème. Les États unis, selon des informations⁽¹⁷⁾ parues à l'époque, auraient fourni des armes et autres équipements à l'armée sénégalaise, mais refusèrent de s'immiscer dans l'affaire.

Ce conflit prend fin quelque mois après son éclatement suite aux déclarations du Secrétaire américain adjoint aux affaires africaines qui soutient que le Sénégal n'a pas juridiction sur le fleuve et ne saurait y prétendre (LESERVOISIER, 1995). Le litige en suspens et la réouverture des frontières effectuée, mais cela n'empêche pas jusqu'à nos jours des relations frontalières tendues entre les deux pays.

Ce conflit a montré que les limites du géosystème deltaïque du Sénégal ne sont pas faciles

(16). Le fleuve Sénégal constitue une frontière naturelle entre le Sénégal et Mauritanie, mais les peuples Peuls et maures habitent en symbiose sur les deux lits

(17). S. M. SECK, 2009. « Changements institutionnels et difficultés de développement hydroagricole dans le Delta du fleuve Sénégal : nouvelles dynamiques et recompositions autour de l'irrigation ». In *Organisations paysannes et développement local : leçons à partir du cas du Delta du fleuve Sénégal*. Italie : Harmattan, p. 32-52.

à tracer, et qu'en tout cas ce n'est pas le fleuve Sénégal lui-même. Ce conflit, conséquence de la mise en valeur du delta du Sénégal, est abordé selon divers angles (politique, socioéconomique), mais quelle qu'en soit la conclusion, le problème était d'ordre ethnique, lié à l'esclavage arabe. Les séquelles de cet esclavage étant un facteur à prendre en compte dans ce conflit « hydropolitique ».

4.2.3. L'après-barrages aux résultats mitigés : des conséquences socioéconomiques et environnementales partagées

Le contexte d'avant-barrages n'est en aucun cas à idéaliser. Le milieu naturel oppose alors à un développement durable des contraintes graves : une grande variabilité climatique (grands écarts de pluviosité, et dans l'ampleur, la hauteur et la durée de la crue), une fragilité des sols vis-à-vis de la salinisation (remontées de la nappe phréatique salée dans les terres du delta et du biseau salé dans le fleuve), une difficile maîtrise de l'eau à cause de la platitude du relief et la nécessité d'ouvrages complexes et coûteux pour assurer aussi bien la protection contre les inondations que l'apport des eaux d'irrigation ou l'évacuation des eaux de drainage (MIETTON et al., 2008).

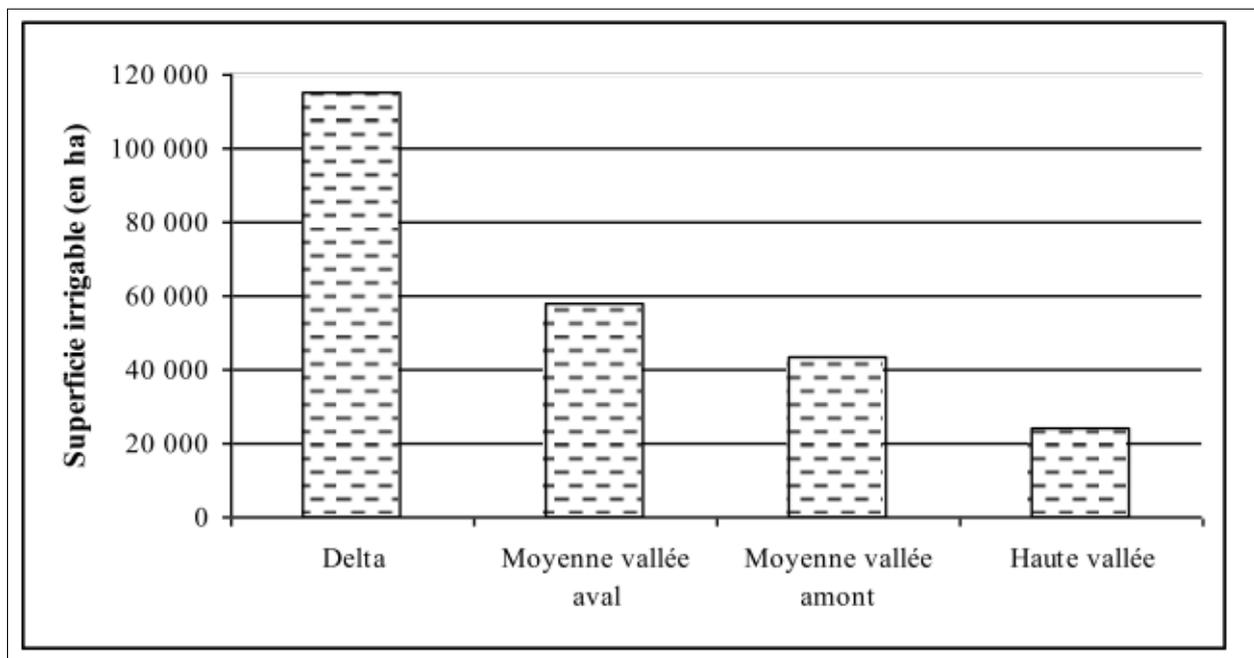


FIGURE 4.2 – Les potentialités irrigables du bassin du Sénégal - (SAED, 2009)

Cette situation est grandement préoccupante lors des années de sécheresse. L'OMVS se fixa alors pour objectif prioritaire de réduire la dépendance alimentaire, des trois pays concernés

par la création de barrages. Le premier gros avantage de la mise en valeur du bassin du Sénégal est la disponibilité des ressources naturelles (eau et sol) pour les populations locales. Les études hydrauliques complétées par recherches et tests agronomiques définissent dès le début des années 1970, les orientations pour le développement d'une riziculture irriguée, le delta est le point central de cette riziculture, car plus potentiellement rizicultivable (figure 4.2).

Malgré la croissance des superficies irriguées, les objectifs de production et d'autosuffisance en riz sont encore loin d'être atteints dans le delta même si le bilan est, partout jugé macro-économiquement positif⁽¹⁸⁾ en comparaison avec le contexte d'avant barrages.

À côté des avantages certains acquis pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau douce, il faut surtout souligner l'émergence de difficultés nouvelles, tant écologiques que socioéconomiques et sanitaires. Le fonctionnement hydrologique connu antérieurement dans la basse vallée et le delta a profondément évolué pendant ces dernières années sous les effets d'aménagements de plus en plus élaborés (A. KANE, 1997). Ces conséquences ont été rapidement mises en évidence par des travaux postérieurs aux barrages comme ceux de BARUSSEAU et al., 1993. Avec l'endiguement des deux rives sur plus de 100 km, le phénomène inondation-exondation des plaines inondables n'existe plus et on constate une modification profonde des milieux. L'inondation partielle étant artificialisée et liée à l'ouverture temporaire d'ouvrages, les cycles de la végétation sont désormais désaisonnalisés et s'adaptent aux arrivées d'eaux (TAÏBI, BALLOUCHE et al., 2007).

- L'absence de recharge de la nappe superficielle par les eaux douces dans l'ancienne plaine d'inondation favorise la remontée d'un biseau salé et les phénomènes d'ascension capillaire des eaux salées superficielles.
- La période après barrage a également été marquée par une recrudescence de maladies hydriques dans toute la vallée avec un accroissement du nombre de personnes atteintes (paludisme, bilharziose urinaire et intestinale)(O. FAYE, FONTENILLE et al., 1995; O. FAYE, GAYE et al., 1998; HANDSCHUMACHER, HERVÉ et al., 1992; SOKHNA et al., 2004 et enquêtes).
- La retenue du barrage est marquée par la prolifération d'hydrophytes envahissantes, notamment *Typha Australis* (DIOUF, 2015; MIETTON et al., 2008; TAÏBI, GASSANI et al., 2006).

(18). L'agriculture irriguée, avec 125 000 ha actuellement aménagés en grands périmètres; l'alimentation en électricité des trois capitales est assurée par Manantali (MIETTON et al., 2008)

4.2 CONSÉQUENCES ANTHROPOLOGIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET SOCIOÉCONOMIQUES DE LA MISE EN VALEUR DU DELTA

- L'évacuation des eaux de drainage pose partout un problème avec le développement sans précédent des aménagements hydroagricoles. (MIETTON, 1993).
- Des problèmes de pollution des eaux de surface par les produits phytosanitaires utilisés dans les périmètres rizicoles.

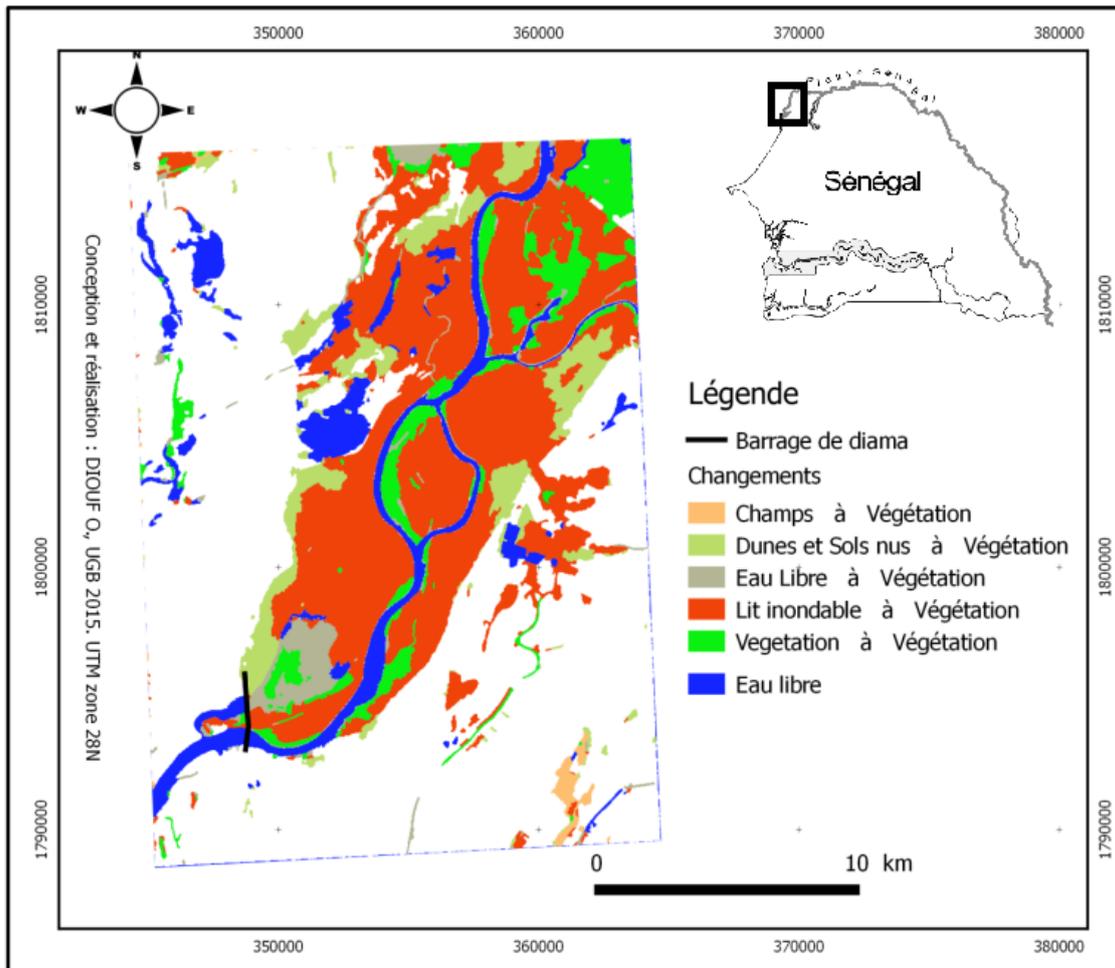


FIGURE 4.3 – Dynamiques des écosystèmes du delta entre 1985 et 2015 - DIOUF (2015)

Parmi cette série d'impacts, la salinisation a rendu fragiles les terres du delta. On sait que la protection contre ce risque exige un réseau de drainage bien conçu, à double fonction : d'une part, maintenir à un niveau suffisamment profond (au moins 70 cm)⁽¹⁹⁾ le toit de la nappe salée afin d'éviter un contact hydraulique entre cette dernière et la lame d'eau recouvrant la rizière ; d'autre part, évacuer complètement, à certaines périodes, cette lame d'eau afin d'éviter que les parcelles ne fonctionnent comme des bassins de concentration des sels dissous dans l'eau d'irrigation. Ce qui n'est pas le cas dans les périmètres de notre d'étude.

(19). M. MIETTON et al., 2008. « Le delta du fleuve Sénégal Une gestion de l'eau dans l'incertitude chronique ». In *Incertain et Environnement* 11-2005, p. 321-336.

4.2 CONSÉQUENCES ANTHROPOLOGIQUES, ENVIRONNEMENTALES ET SOCIOÉCONOMIQUES DE LA MISE EN VALEUR DU DELTA



PHOTO 4.1 – Lac de sel sur une surface agricole abandonnée - (Cliché DIOUF, O, 2018)



PHOTO 4.2 – Eaux de drainage sur une surface agricole abandonnée - (Cliché DIOUF, O, 2018)

ENCADRÉ 4.1 – Le milieu naturel et sa dégradation

Afin de parvenir à une maîtrise totale de l'eau, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (O.M.V.S.) a établi un vaste programme de développement des cultures irriguées, surtout de la riziculture, fondé sur la construction de deux barrages. Le barrage « antisel » de Diama dans le delta, à 27 km en amont de Saint-Louis, a été terminé fin 1985 : le grand barrage-réservoir de Manantali, dans le haut bassin en amont de Kayes au Mali, a été achevé en 1989. Leur mise en service progressive se répercute déjà sur les processus hydrodynamiques et sédimentologiques et elle modifie encore le façonnement de cette grande vallée alluviale et l'estuaire du fleuve. Les impacts seront plus importants et plus durables.

Source : BARUSSEAU et al. (1993) : *L'après-barrages dans la vallée du Sénégal*

Conclusion du chapitre 4

Le passé précolonial, colonial et postcolonial a mis en place un territoire de l'eau inabouti. L'histoire de la mise en valeur du delta du Sénégal a permis de mettre en exergue les différents problèmes institutionnels, anthropologiques et socioéconomiques qu'il connaît. Entre les premiers aménagements agricoles des années 1800 et les dernières réalisations hydrauliques, le delta du Sénégal a connu plusieurs étapes mettant en œuvre les différentes composantes du processus de territorialisation hydraulique : les objectifs de l'irrigation, les stratégies (les politiques) et les ressources (eau et terre).

Ce processus de mise en valeur a ébranlé un modèle de production traditionnel, mais se heurte à des structures anthropologiques solidement ancrées. Il est aussi à l'origine de litiges fonciers et de conflits autour de la ressource en eau dont la disponibilité a engendré de bonnes conséquences sur le plan économique et social, mais aussi des conséquences environnementales très négatives comme la salinité dans les systèmes irrigués.

CONCLUSION PARTIELLE

Cette contextualisation du territoire hydraulique est d'une grande importance dans cette thèse de doctorat, car elle constitue le socle de la réflexion de l'étude de la salinité des sols dans le territoire hydraulique du delta du Sénégal.

L'élaboration de la discussion conceptuelle a non seulement permis de replacer les principaux termes utilisés dans le contexte de la salinité, mais elle a permis également de mieux saisir la géographie physique du delta du Sénégal. Comme toute recherche, le cadre opératoire et méthodologique a permis de mettre en évidence les différents outils utiles pour l'atteinte de nos objectifs de travail. En effet, l'utilité des outils géomatiques n'est plus à démontrer en géographie.

Les composantes physiques et les potentialités écosystémiques ont permis la mise en place d'un territoire hydraulique sahélien, où la disponibilité continue de l'eau constitue le rêve de tout sahélien.

La genèse du territoire hydraulique du delta du fleuve Sénégal a engagé des conséquences socioéconomiques et environnementales y compris la salinité des terres agricoles. La présence de l'eau dans le delta du Sénégal est une panacée au plan agricole et économique, mais dans certains territoires c'est une contrainte de mise en valeur. Dès lors, le delta du Sénégal se présente comme un territoire hydraulique inabouti, « un territoire salé » de l'eau aux problématiques multiples dont notamment la salinisation des terres.

Deuxième partie

Géographie des « territoires salés » de l'eau

INTRODUCTION PARTIELLE

Le delta du fleuve Sénégal est une délimitation naturelle où l'eau a toujours été présente au cœur des enjeux d'aménagement. L'appropriation et la transformation du territoire du delta par l'hydraulique a enclenché un processus de territorialisation de l'eau. Les politiques de mise en valeur agricoles menées dans la vallée et le delta ont mis en place un territoire de l'eau inabouti dans lequel la salinité des sols en est une cause mais également une conséquence. Dans cette thèse, le concept de « territoire salé » de l'eau désigne le territoire « salé », la salinisation des sols, et les difficultés de mises en valeur agricoles qui traînent depuis l'époque coloniale (manque de maîtrise technique de l'irrigation, insuffisance dans la gestion et la gouvernance de l'eau...).

Cette partie présente la géographie des « territoires salés » de l'eau.

- Le point de départ (5) est l'estimation spatiale de la salinité par le biais de la cartographie et il s'agira ensuite, sur la base de ces résultats, d'étudier les paramètres (déclinées en hypothèses) qui justifient les taux de salinité des sols dans les périmètres du Gorom-Lampsar .
- Dans un second chapitre (6), il sera question de mettre en exergue les résultats des travaux effectués sur le terrain d'étude et de répondre à la dernière question de recherche, ces résultats mettent en évidence les différentes pratiques de gestion individuelle de la salinité des sols dans la logique du territoire hydraulique perçu.
- Et dans un dernier chapitre (7), nous essayerons de dresser quelques perspectives d'aménagement et de gestion durable des ressources dans le delta. La salinisation des sols est aussi une question de gestion et de gouvernance de l'eau dans le delta du Sénégal, nous proposerons ainsi quelques perspectives d'aménagement qui pourront être utiles pour aboutir à un territoire de l'eau complet et abouti, « désalinisé ».

CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ DES SOLS DANS LE GOROM-LAMPSAR

Sommaire

5.1	Le territoire hydraulique du Gorom-Lampsar	140
5.1.1	Situation du Gorom-Lampsar dans le delta du Sénégal	140
5.1.2	Justification du choix de la zone d'étude	142
5.1.3	Les aménagements hydroagricoles	144
5.1.4	La population	149
5.1.5	Les sols	151
5.2	Cartographies de la salinité	153
5.2.1	Les données géochimiques	153
5.2.2	Cartographies Krigées	156
5.2.3	Les indices néocanaux	158
5.2.4	Cartographie à petite échelle cartographique	162
5.3	Discussion des résultats	173
	Conclusion du chapitre 5	175

Dans ce chapitre, on rentre dans le cœur de la thèse ; il sera question de présenter et de discuter les premiers résultats de l'analyse cartographique de la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar et de la vérification des 3 premières hypothèses posées en amont dans l'introduction. Nous présenterons les caractéristiques particulières du territoire de l'eau du Gorom-Lampsar , dans un premier temps. Nous tenterons d'avancer des réponses cartographiques, qualitatives et quantitatives sur ce phénomène.

5.1. Le territoire hydraulique du Gorom-Lampsar

5.1.1. Situation du Gorom-Lampsar dans le delta du Sénégal

L'axe Gorom-Lampsar (figure 5.1) se situe dans le delta du fleuve Sénégal, entre 16° et $16^{\circ} 30'$ de latitude nord et 16° et $16^{\circ} 30'$ de longitude ouest, en domaine sahélien. Il est constitué par trois défluent majeurs du fleuve, le Gorom au nord, le Lampsar à l'est et le Djeuss à l'ouest. Cet axe, de direction nord-est-sud-ouest, s'étire sur environ 95 km de Saint-Louis à Ronq, villages qui limitent notre terrain d'étude.

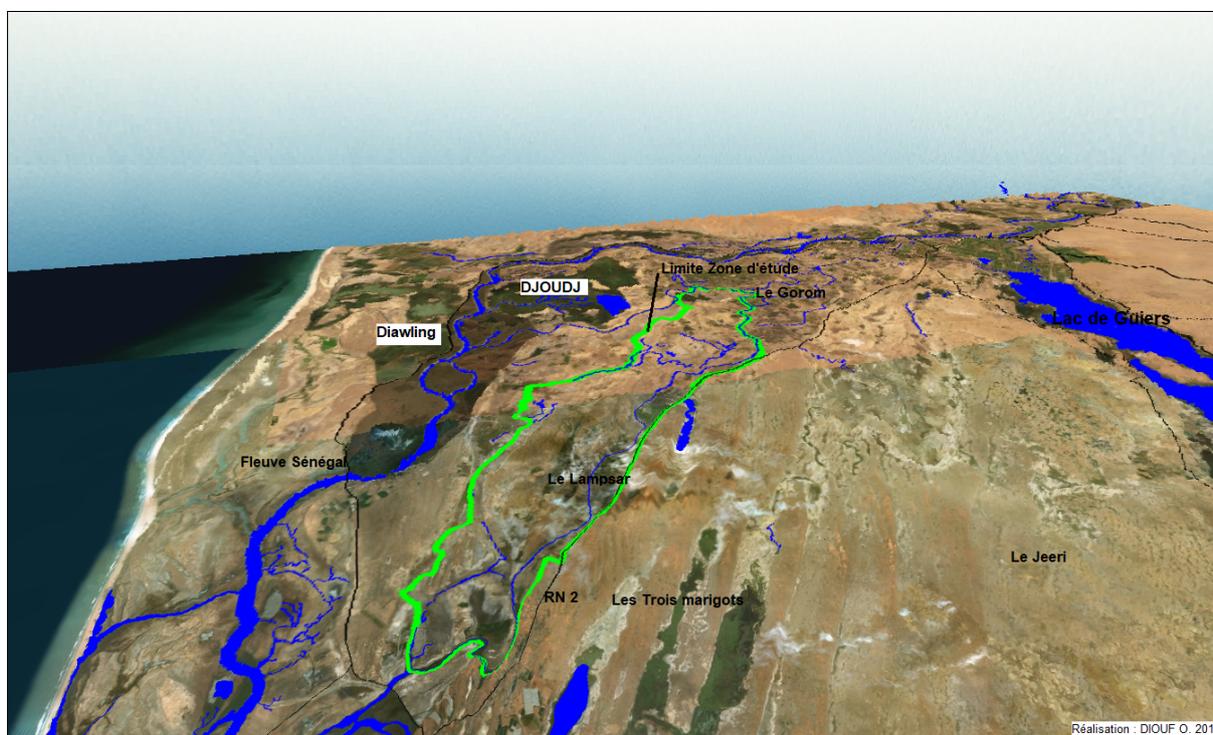


FIGURE 5.1 – Situation du Gorom-Lampsar dans le delta

5.1 LE TERRITOIRE HYDRAULIQUE DU GOROM-LAMPSAR

L'axe Gorom-Lampsar s'inscrit dans cette zone basse du delta du fleuve Sénégal, caractérisée par une topographie plane, inondable à l'état naturel. Sa partie aval est limitée par la réserve de Bango circonscrite par la route nationale, la route de Diama et la digue de Bango. Le Gorom amont qui va de Ronkh à Boundoum Barrage alimente un potentiel agricole d'environ 4000 ha, le Lampsar qui va de Boundoum à Saint Louis, un potentiel d'environ 10000 ha et le Kassack 4000 ha. Le Gorom aval qui part de Boundoum au parc de Dioudj domine quelques 3000 ha (B. FAYE, 2009).

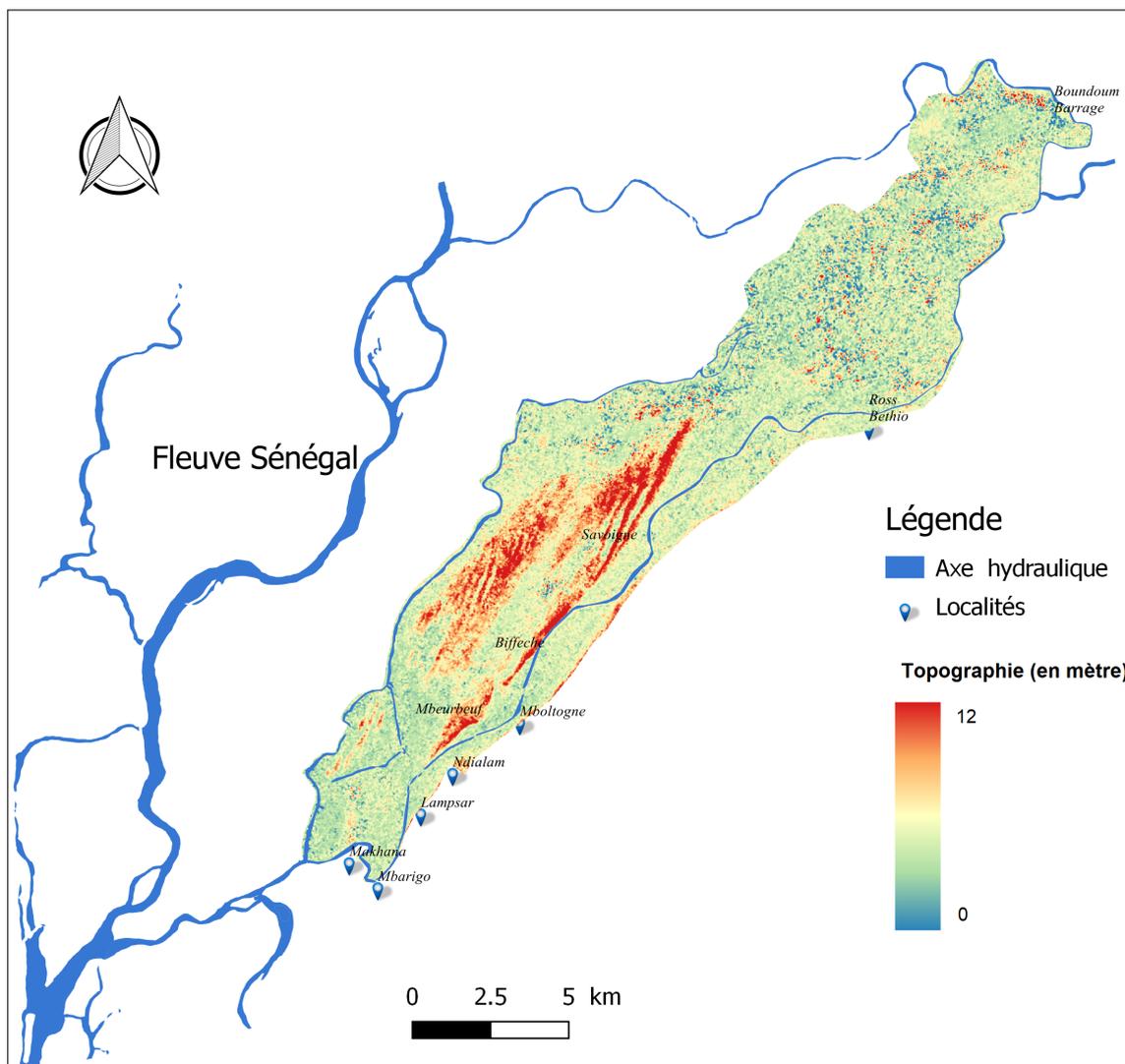


FIGURE 5.2 – Topographie du Gorom-Lampsar

Les dépôts fluviodeltaïques couvrent des superficies importantes, dont la monotonie n'est interrompue localement que par des dunes, des levées et des cuvettes (figure 5.2) (PHILIPPE, 1993), ce qui lui confère ses nombreuses aptitudes culturales.

5.1.2. Justification du choix de la zone d'étude

Le choix de cette étude sur l'axe Gorom-Lampsar se justifie par le fait que ce secteur a été l'un des premiers périmètres irrigués dans le delta ; ce qui s'est traduit incontestablement par un attrait de la population. Le Gorom-Lampsar connaît aussi une multiplication des aménagements hydroagricoles dont la progression actuelle s'accélère sans précédent, elle constitue une zone de très grande importance dans les politiques étatiques d'autosuffisance alimentaire dont le riz constitue le moteur principal (tableau 5.3). Le secteur du Gorom-Lampsar héberge la quasi-totalité des PIP et des PIV présents dans le delta et il chevauche les trois zones géographiques du delta (le haut delta, le delta central et le bas delta) aux caractéristiques pédologiques et agroéconomiques différentes. Le choix de cette partie de terrain se justifie également par le fait que la gestion de l'eau et des aménagements dans les PIV et PIP soit un réel problème du fait que les actions de la SAED soient surtout centrées au niveau des grands aménagements publics. Avec la mise en eau du barrage de Diama, c'est le secteur agricole le plus proche de la ressource et ses axes hydrauliques présentent des avantages de mise en valeur, mais aussi des inconvénients (tableau 5.2 et 5.1) tous pris en compte dans le choix de la zone d'étude.

Tableau 5.1 – Fonctions actuelles des axes hydrauliques du Gorom-Lampsar - (Source B. FAYE (2009))

Axe hydraulique	Source	Fonctions actuelles
Gorom Amont	Fl.Sénégal à Ronkh	Irrigation
Gorom Aval	Fl.Sénégal - Ouvrage G	Irrigation
Lampsar	Gorom à Boundoum	Irrigation/AEP St-Louis
Kassack	Gorom Amont	Irrigation
Diovol	Kassack	Irrigation
Djeuss amont	Fl.Sénégal - Ouvrage H	Drainage et Irrigation
Djeuss aval	Djeuss amont	Irrigation/AEP St-Louis
Ngalam	Lampsar	AEP et écologie

Cette dualité avantages/contraintes hydrauliques est secondée, dans le souci d'une bonne gestion de l'eau, par l'inexistence de statuts ni de règles régissant le mode de prélèvement de l'eau. De plus, la quantification de ces prélèvements est quasi impossible, car il n'y a pas de fiches de pompage pour les Groupes Moto Pompe (GMP).

L'axe Gorom-Lampsar, comme le delta, avait alors, avant le démarrage des aménagements hy-

drauliques, une vocation essentiellement pastorale. Il est devenu, depuis quelques années le champ d'un effort continu d'aménagement agricole et de riziculture en submersion contrôlée. Cette évolution de l'environnement de l'axe Gorom-Lampsar est de deux ordres :

- elle est hydraulique par la création de petits barrages (bien avant la construction de Diama), de stations de pompage et d'ouvrages vannés ;
- elle est aussi d'ordre démographique par une augmentation de la population locale. En effet, l'axe Gorom-Lampsar a été le siège d'une densification du peuplement suivant deux logiques. La première est issue de la volonté des autorités gouvernementales de valoriser le delta par les aménagements et l'installation d'un peuplement allochtone. La seconde est liée, d'une part à la nécessité pour les habitants du *Jeeri* de se rapprocher des marigots pour leurs besoins en eau, d'autre part leurs intérêts ont été guidés par la possibilité d'accéder à la culture irriguée grâce à l'aménagement des cuvettes (PHILIPPE, 1993).

Tableau 5.2 – Atouts et contraintes des axes hydrauliques - (Source SAED (2009))

Atouts	Contraintes
<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Disponibilité de la ressource en eau tout au long de l'axe ; <input type="checkbox"/> Permet l'irrigation de plus de 20 000ha pour une meilleure gestion de l'eau ; <input type="checkbox"/> Réseau hydrographique existant ; <input type="checkbox"/> Réseau d'adduction d'eau potable (Réserve de Bango, Station d'AEP de Ronkh) ; <input type="checkbox"/> Aisance d'installation de GMP. 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Réseau d'adducteurs en mauvais état ; <input type="checkbox"/> Nécessité du pompage pour la mobilisation de la ressource au niveau secondaire <input type="checkbox"/> Nécessité de curage et de faucardage régulier pour la stabilisation du niveau de l'eau ; <input type="checkbox"/> Réseau menacé à cause de l'envahissement des végétaux aquatiques (typha australis, phragmites australis) ; <input type="checkbox"/> Difficultés d'estimer les quantités d'eau prélevées ; <input type="checkbox"/> La maintenance nécessite d'engins mécaniques.

Les atouts hydrauliques ont permis le développement d'aménagements hydroagricoles, l'ensemble des ouvrages (digues, canaux, stations de pompage, motopompes...) permettant toutes les phases de distribution (remplissage, entretien et vidange) et le contrôle du niveau d'eau dans les cuvettes, afin d'assurer une croissance régulière du riz.

5.1.3. Les aménagements hydroagricoles

5.1.3.1. Les aménagements hydrauliques

À partir de 1884, la mise en service des barrages de Dakar-Bango, Ndiaoudoun, Makhana et Keur Samba Sow permet la constitution de la réserve d'eau douce de Saint Louis. Il s'agit d'ouvrages vannés. L'alimentation de cette réserve pouvait se faire par l'amont, mais aussi par l'aval, lorsque les eaux de crue du fleuve atteignaient Saint Louis. On fermait les vannes, au moment du retrait des eaux fluviales, afin d'éviter l'intrusion d'eau marine. Progressivement, d'autres barrages, en terre ou en dur, sont construits sur des défluent : Boundoum, Diambar, Demba Diowar, Keur Samba Sow (A. FAYE, 1990; PHILIPPE et al., 1997).

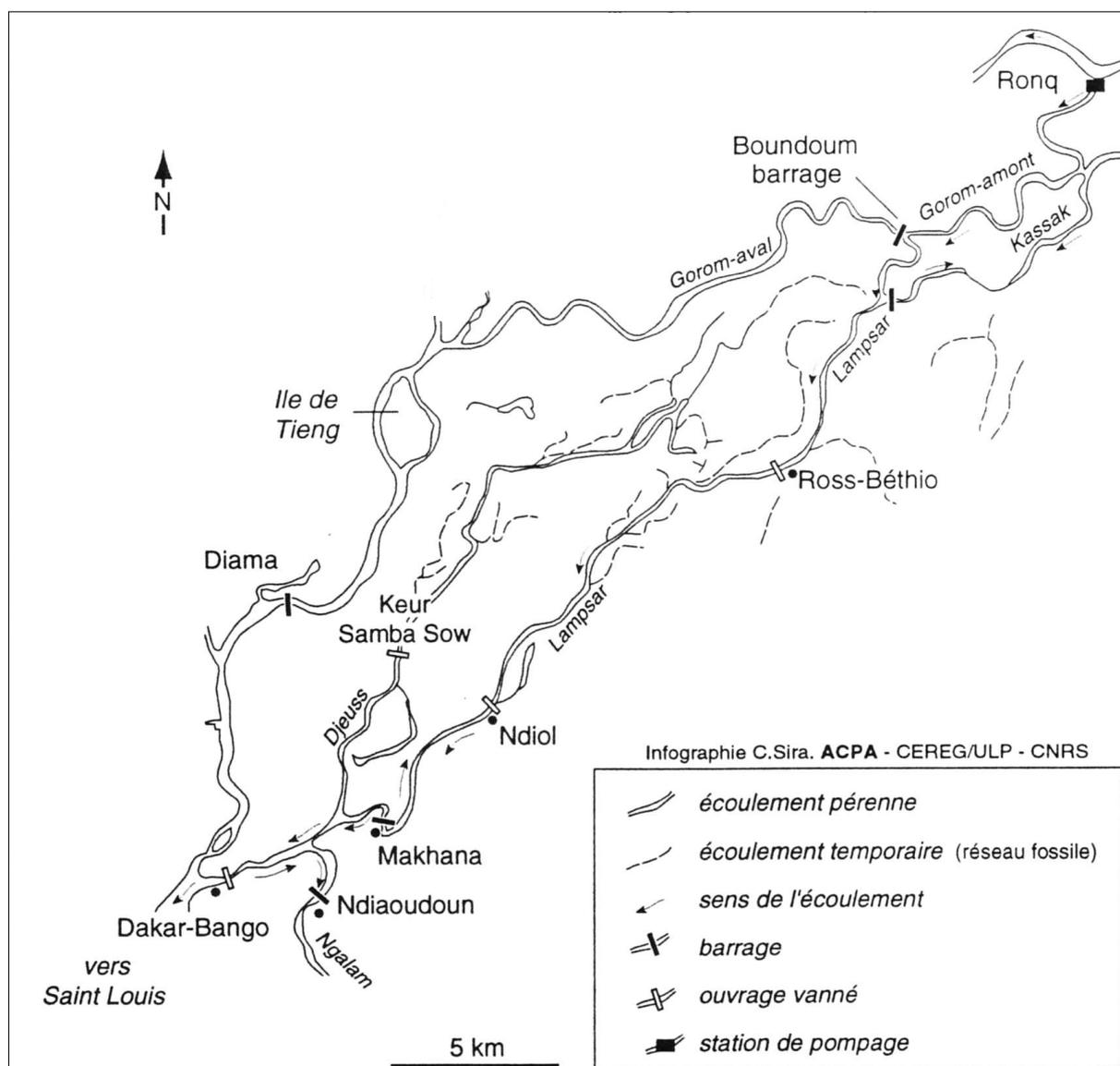


FIGURE 5.3 – Réseau hydrographique et ouvrages hydrauliques du Gorom-Lampsar d'après PHILIPPE et al. (1997)

Après les indépendances, la construction de la digue périphérique en 1964 contrôle l'entrée des eaux de crue dans toute la partie sénégalaise du delta ; ce qui entraîne la construction d'ouvrages à vannes à des cotes qui permettent de moduler les écoulements des chenaux naturels et l'alimentation des cuvettes. L'axe Gorom-Lampsar reçoit presque exclusivement son alimentation du fleuve Sénégal. Les faibles pluies qui tombent dans le bassin ne représentent pas un complément hydrique suffisant, du fait d'une forte évaporation. Pour enrayer les contraintes liées à cette dépendance vis-à-vis du fleuve et dans le but d'aménager la zone en vastes périmètres irrigués, de nombreux ouvrages tels que barrages, digues et stations de pompage ont été édifiés, contribuant ainsi à artificialiser le fonctionnement de l'axe. La zone est alimentée en tête par un ouvrage mixte composé d'un système gravitaire de 20 m³/s et d'une station de pompage de 8.6 m³/s soit un débit fictif continu de 28.6 m³/s (A. FAYE, 1990). Le système gravitaire est utilisé selon les conditions amont (niveau d'eau assez suffisant dans le fleuve) et aval (bon écoulement hydraulique dans l'axe c'est-à-dire des passages d'eau continus sans obstacles majeurs). La station de pompage de Ronkh est mise en fonction à chaque fois que le système gravitaire ne permet plus une alimentation en eau suffisante (DAIH, 2009).

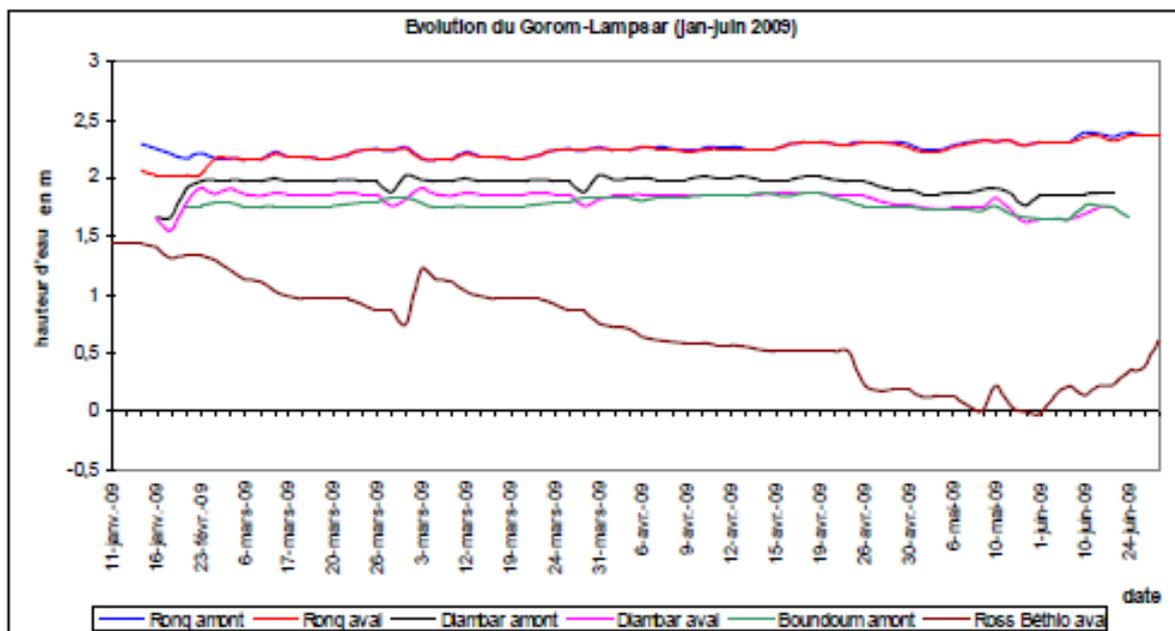


FIGURE 5.4 – Suivi des cours d'eau du Gorom-Lampsar (SAED, 2009)

Aujourd'hui, le constat est que le débit délivré par le système gravitaire ne dépasse guère 18 m³/s (B. FAYE, 2009). En plus de cette situation, les superficies emblavées augmentent de plus en plus du fait de nombreux GMP offerts par l'État dans le cadre du programme d'autosuffisance en riz. Le suivi des prélèvements est fait par la SAED avec l'exploitation des données des

tholimèdes de Ronkh et des échelles limnimétriques du Pont Diambar de Boundoum et de Ross Béthio. Pour l'année 2009, le niveau des cours d'eau est pratiquement constant à la différence de Ross Béthio où le niveau d'eau est passé de 1,43 m à $-0,02$ m et de manière progressive. Une situation qui peut s'expliquer les nombreux prélèvements en amont de Ross Béthio (figure 5.4).

5.1.3.2. Les aménagements agricoles

Dans la plaine du Gorom-Lampsar coexistent deux systèmes de production (figure 5.5). Sur les rives du Gorom et du Lampsar, domine un système de production caractérisé par la grande exploitation. Ces grands aménagements hydroagricoles créés entre 1975 et 1985 (figure 5.5) sont le produit d'une forte bonification qui complexifie leur fonctionnement (S. DIA, 2012).

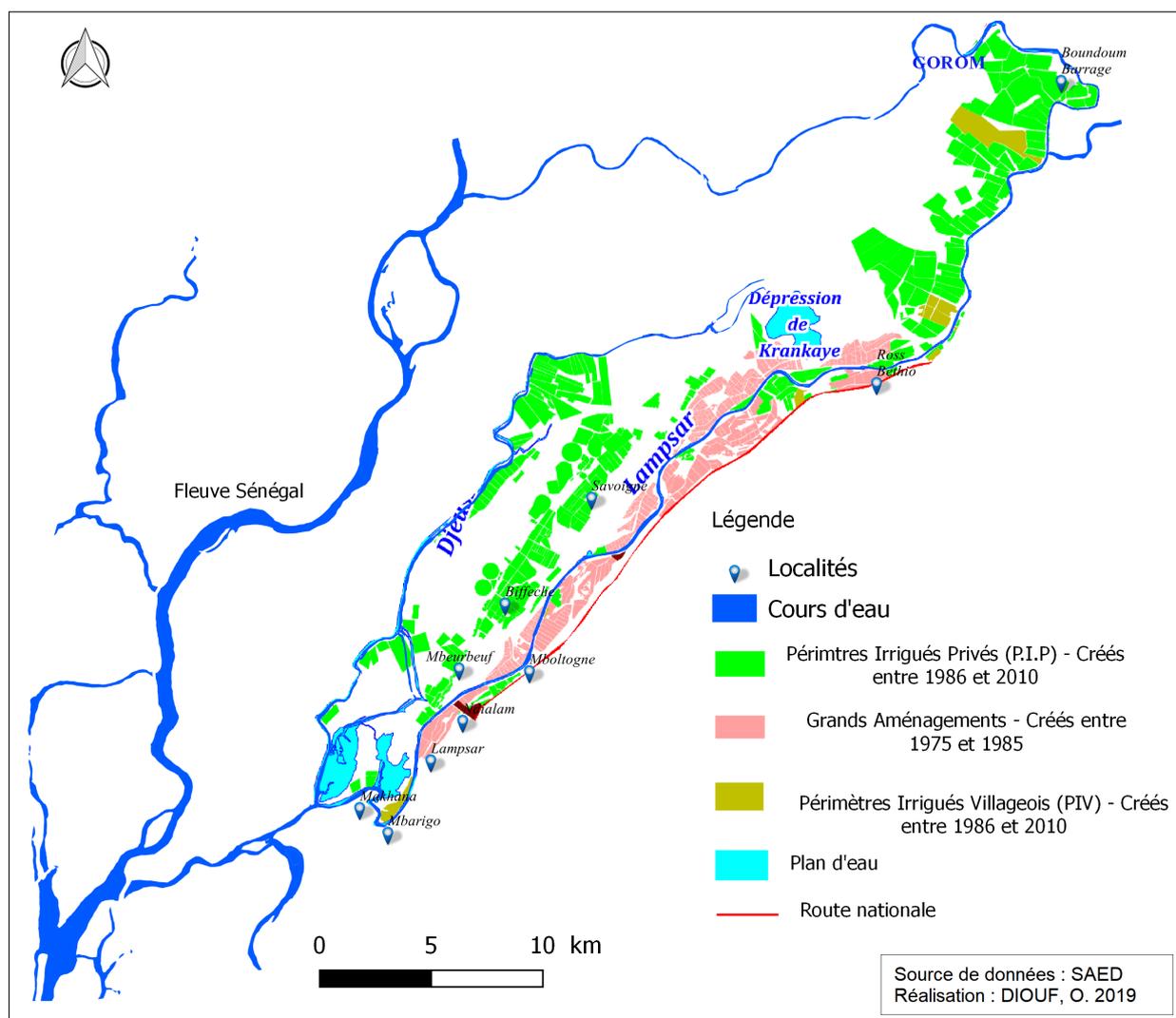


FIGURE 5.5 – Typologie des aménagements agricoles dans le Gorom-Lampsar et leurs périodes d'aménagement

Pour optimiser celui-ci et assurer la rentabilité des gros investissements, la SAED a dès le départ organisé les producteurs en groupements et sections villageoises. À l'opposé de ces grands, on retrouve les PIP (Périmètres Irrigués Privés) et les PIV (Périmètres Irrigués Villageois) (figure 5.1), créés entre l'après-barrage et les années 2010. Ils se caractérisent par la faiblesse des superficies et par le faible niveau de capitalisation. Ceux sont des aménagements sommaires généralement sans système de drainage. La différence entre ces deux types d'aménagement réside dans leurs modes de gestion. Les PIV sont gérés par un village ou un groupe de village par contre les PIP sont gérés par des privés soit individuellement ou généralement des organisations de GIE. Ils comportent des GMP installés en bordure d'une source d'eau aisément accessible qui peut être soit le fleuve, soit un défluent, soit un canal d'irrigation d'un GA, voire un ancien défluent recevant des eaux de drainage. Nous remarquons que les PIV représentent 27% des aménagements alors que les PIP 73% ce qui s'explique du fait que les PIV ont tendance à être abandonnés au profit des PIP dont la gestion est plus aisée (B. FAYE, 2009).

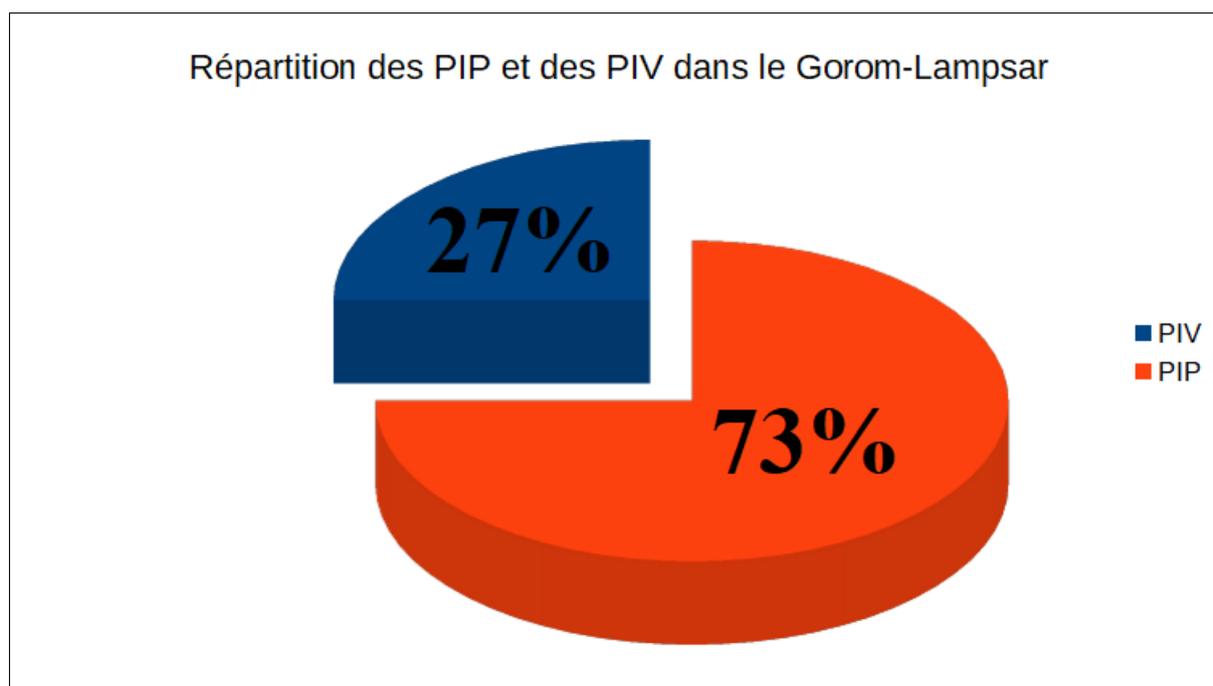


FIGURE 5.6 – Répartition des Périmètres Irrigués Privés (PIP) et des Périmètres Irrigués Villageois (PIV) dans le Gorom-Lampsar (Source - Enquêtes)

De ce fait, les PIP contiennent généralement un nombre de personnes restreint et la prise de décision dans le cadre des politiques de gestion de l'eau devient plus facile. D'après les enquêtes auprès des agriculteurs dans PIP et les PIV seuls 10% des aménagements ont un système de drainage contre 90%. Généralement, ce sont des drains de moindre qualité qui ne répondent pas aux normes de la SAED sans compactage. Une telle situation qui s'explique par les coûts

des aménagements qui sont élevés d’une part et d’autre part ces aménagements sont faits de sorte qu’un système de drainage est quasi inexistant, car pas d’études préalables. Le réseau hydraulique est composé de canaux à terre compactée de façon sommaire dont l’entretien est fait annuellement. Ce sont des canaux d’amenée pour le transport de l’eau au niveau des parcelles. Celles-ci sont faites de diguettes construites à la niveleuse sans compactage et dont le planage est irrégulier. La réfection de ces canaux se fait annuellement et la maintenance se fait sans l’intervention de la SAED (stratégies individuelles). Une étude faite par B. FAYE (2009) montre que cause du problème de drainage et de salinité des sols un certain nombre de superficies mises en valeur ont été abandonnées. D’après B. FAYE (2009) 59.5% des producteurs ont des parcelles abandonnées après semis variant de 0.5 à 15 ha. Les superficies abandonnées représentent 5.54% de la superficie totale. Ceci est le résultat des arrêts de pompage pour desservir les producteurs en aval d’une part d’autre part par l’état de salinité des sols.

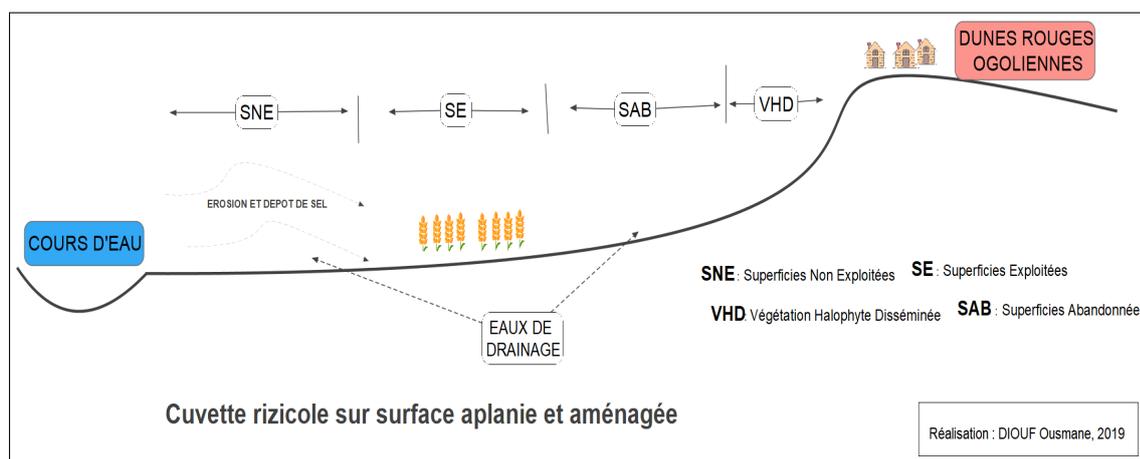


SCHÉMA 5.1 – Configuration d’un PIP ou PIV

Les PIP sont confrontés à de graves problèmes de maîtrise de l’eau (irrigation et drainage) et en raison de leur caractère privé et surtout de leur faible contribution dans la production totale de riz, la SAED n’a jamais déployé dans cet espace un fort effort d’encadrement des producteurs ; ce qui complique depuis des années la situation de gestion de la salinité. L’analyse agroéconomique de ces aménagements montre la prédominance de la riziculture dans les systèmes irrigués, car cultivé avec une lame d’eau permanente, elle s’adapte mieux dans cette zone en plus les sols sont plus ou moins argileux et par conséquent nécessite une évacuation de ses eaux usées. Nos enquêtes montrent producteurs du Gorom-Lampsar cultivent du riz par contre 40% cultivent de la tomate et 30% cultivent de l’oignon. La culture des céréales est pratiquée par seulement 1% des paysans.

Tableau 5.3 – Les différentes spéculations de zone d'étude

- (Source : Enquêtes)

Spéculations	Fréq.
Riz	100%
Tomate	40%
Arachide	3%
Oignon	30%
Céréales	1%
Gombo	20%
Patate douce	3%

Le développement de ces aménagements depuis les années 1960 a pour conséquence non seulement la multiplication des périmètres irrigués (PIP et PIV), mais aussi ceci s'est accompagné d'une croissance de la population le long de l'axe Gorom-Lampsar.

5.1.4. La population

En 1960, la densité de population au centre du delta, entre le fleuve et le lac de Guiers, était alors inférieure à 1 hab./km² (SAED, 1984). Vers les années 2000, le long de l'axe Gorom-Lampsar, on compte entre 30 et 60 hab./km². Les villages s'égrènent le long de la Route Nationale 2 et des défluent ; mais la présence des marigots apparaît plus déterminante que celle de la route : au-delà de Ross-Béthio, le long du Gorom amont, la distribution préférentielle de la population s'écarte de l'axe de circulation (PHILIPPE et al., 1997). Les travaux de cette dernière montrent une augmentation de la population suivant des rythmes contrastés durant plusieurs phases (figure 5.7) :

- 1960 – 1976 correspond à une phase de fort accroissement de la population, phase au cours de laquelle les villages prennent leur physionomie actuelle. Le taux de croissance moyenne annuel pour l'ensemble du secteur est de 9,2% par an. C'est également la période pendant laquelle s'installent des villages neufs : Boudoum est, Kassak nord et Kassak sud.
- 1976 – 1990 : l'augmentation de la taille des villages est bien moindre par rapport à la période précédente. La croissance est ralentie avec un taux moyen annuel qui n'est plus que de 1,54% par an.

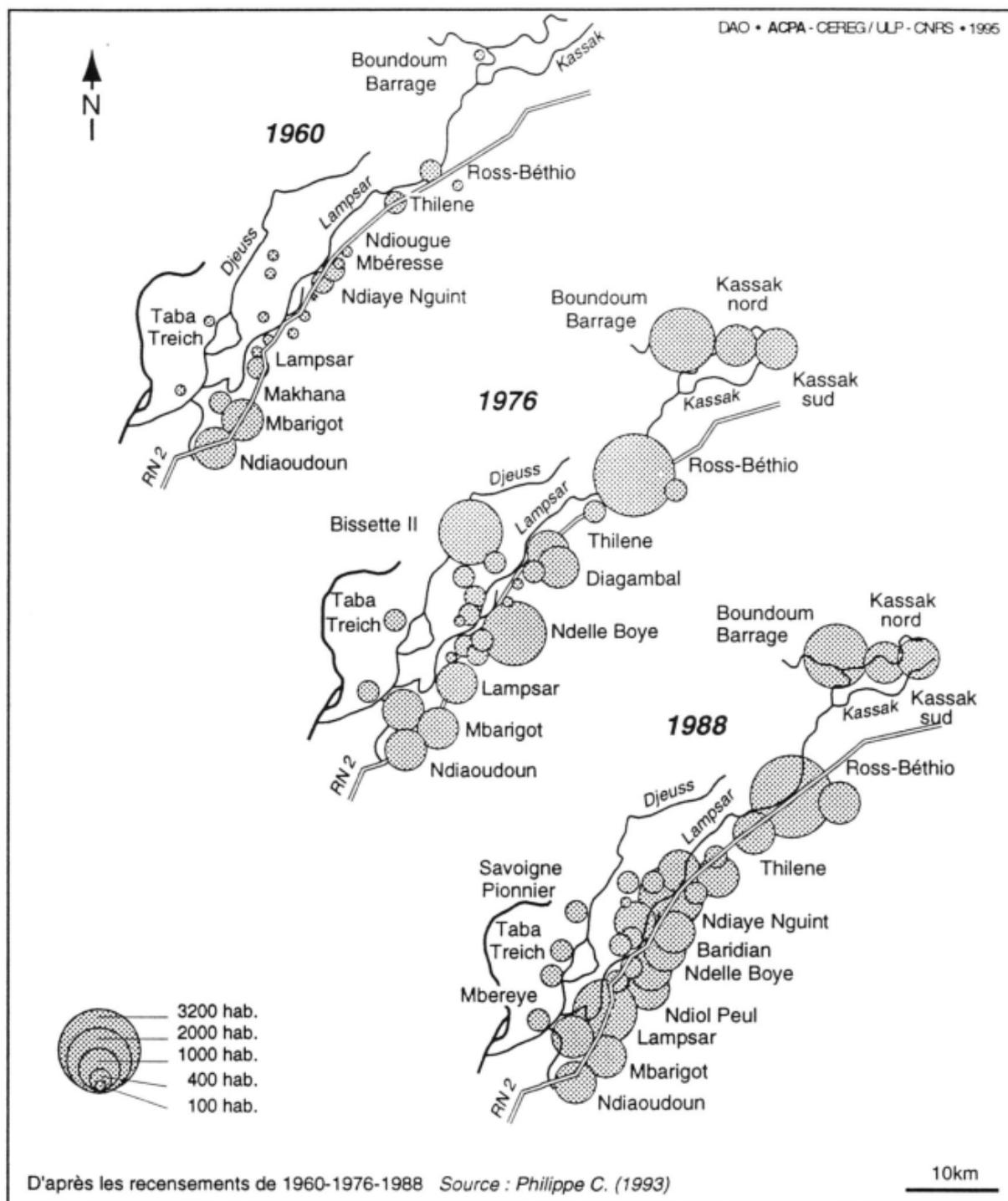


FIGURE 5.7 – Évolution de la population dans le Gorom-Lampsar entre 1960 et 1988 - (Source : PHILIPPE (1993))

A partir de 1990 le rythme de croissance de la population s'est ralenti du fait d'une part, du retour des conditions pluviométriques normales dans le *Jeeri* favorisant la reprise d'agriculture sous pluie et les activités pastorales, d'autre part la présence de l'eau dans toute la région redirige les dynamiques migratoires vers le haut delta et la haute vallée. Aujourd'hui, la popu-

lation du Delta est estimée à environ 60000 habitants. La densité se chiffre à 13,7 habitants au km², mais les zones de forte concentration humaine se localisent le long de la route nationale 2, ou à proximité des grands axes hydrauliques. Les répartitions ethnique et socioprofessionnelle semblent obéir à un tropisme des axes hydrauliques. La majorité Wolof (60 % de la population) se concentre dans les gros bourgs de l'axe Gorom-Lampsar et s'adonne essentiellement à l'agriculture. Les Peuls (35 %) et les Maures (4 %) se localisent dans la vallée du Djeuss, pour l'essentiel, alliant activités d'élevage et d'agriculture.

5.1.5. Les sols

L'analyse des sols du delta du fleuve Sénégal a été dans la section 2.3 (Composantes pédologiques du delta du Sénégal). On retrouve les mêmes unités pédologiques dans le Gorom-Lampsar. Dans le cadre de cette étude sur la salinité nous retrouvons dans le Gorom-Lampsar en majorité trois principaux types de sols dans cuvettes : Les *Hollaldé*, les *Faux-Hollaldé* et les *Fondé* avec une très faible portion et du sable sur les dunes sur lesquels on a moins d'activités agricoles.

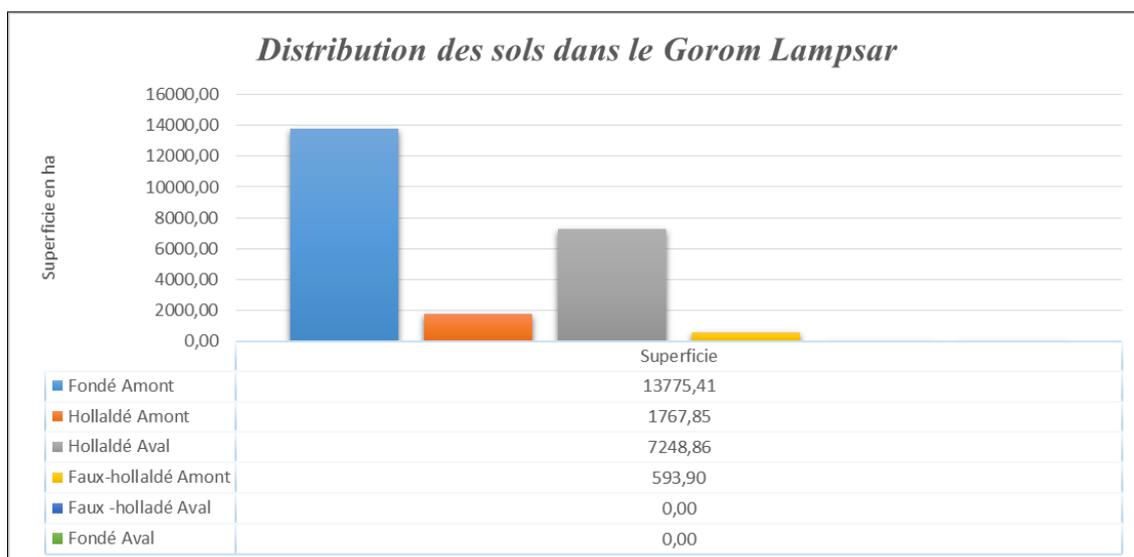


FIGURE 5.8 – Statistiques des types de sols dans le Gorom-Lampsar

On constate une distribution amont-aval des deux types de sol liée sans doute à la morphogénèse. Les *Hollaldé* se localisent en aval vers l'exutoire du Lampsar dans le Ngalam entre Savoigne et Makhana, les *Fondé* quant à eux s'étalent de Savoigne Mboundoum en amont du Lampsar (figure 5.9). Tous ces sols disposent d'un excellent potentiel de fertilité lié au dépôt des limons apportés par le fleuve et aussi de matières organiques se déposant en milieu lacustre

à faible profondeur (MBAYE et al., 2010). Ces sols ont aussi une capacité de drainage très faible. L'évacuation de ces sels par percolation est insuffisante la zone racinaire du sol est de plus en plus salée conduisant à une baisse du rendement de la culture. Pour éviter ce phénomène, des systèmes de drainage profond peuvent être utilisés, mais cela nécessite des investissements colossaux (WADE, 1998). Les sols de type *Fondé*, plus légers (caractérisés par une percolation de 4 à 5 mm/j) sont aptes à évacuer les sels contenus dans l'eau d'irrigation par drainage interne (CEUPPENS et al., 1997).

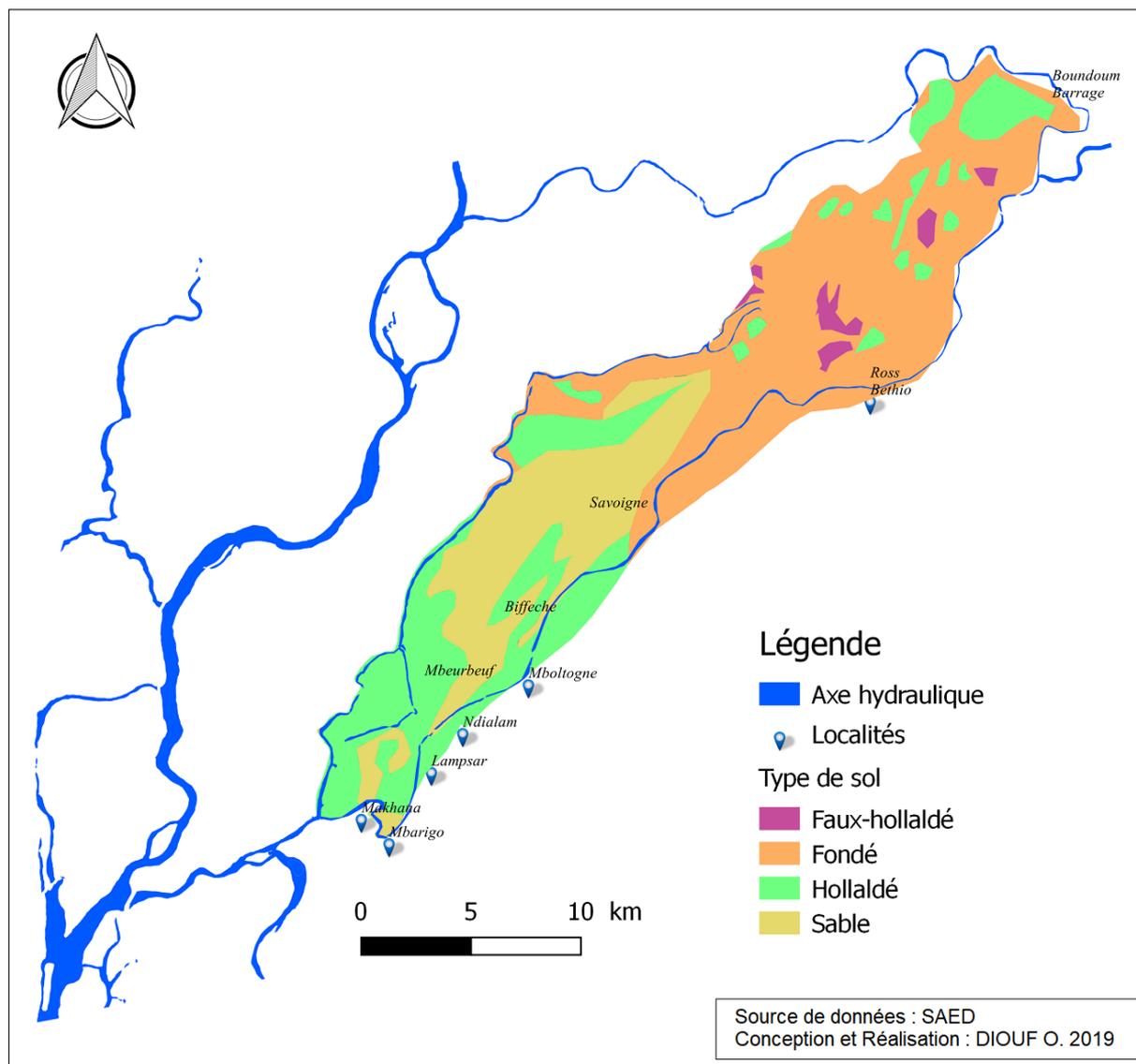


FIGURE 5.9 – Les types de sols dans le Gorom-Lampsar

Ces éléments de contexte du territoire de l'eau du Gorom-Lampsar permettent de mieux comprendre les particularités de la zone d'étude par rapport au reste du delta et bien replacer le problème de la salinité dans un ensemble qui celui de la mise en place d'un territoire hydrau-

lique. La connaissance au préalable de la répartition de la salinité est une condition nécessaire au maintien d'une agriculture irriguée durable dans le delta du fleuve Sénégal (BARBIÉRO et al., 1999).

5.2. Cartographies de la salinité

Pour cartographier les sols salés des périmètres du Gorom-Lampsar, nous nous baserons sur l'organigramme suivant (5.10) qui donne plus de détails sur la méthodologie spécifique de cartographie.

La méthode première utilisée pour la cartographie des sols salés consiste à déterminer, à partir de quelques mesures de *CE* sur extrait aqueux, la valeur moyenne de la salinité d'une parcelle (USSSL, 1954).

Néanmoins, la répartition spatiale des sels dans le sol par la mesure de *CE* est difficile du fait de la grande variabilité. En plus de cela, la quantité de sel mesurée sur un échantillon ne peut pas être extrapolée à un grand volume de sol, la répartition spatiale des sels étant généralement très hétérogène, d'où l'utilisation des moyens de spatialisation plus sophistiqués (télédétection). La dynamique spatiale et temporelle des sols salés, particulièrement en zone semi-aride ou aride, nécessite un suivi au sol facilité par la télédétection aérienne et satellitaire (MOUGENOT et al., 1993). La télédétection est un outil de quantification en relation avec les différents constituants des états de surface et leur organisation. L'effet du constituant « sel » sur la réflectance est représenté dans les longueurs d'onde du visible au moyen infrarouge (400 – 2500 nm) (AL KHAIER, 2003 ; MOUGENOT, 1993). Les modèles statistiques de prédiction sont également aujourd'hui de plus en plus utilisés dans le domaine de cartographie des sols salés.

5.2.1. Les données géochimiques

Il s'agit des prélèvements de sols (sous-section 1.3.2.2) qui sont analysés au laboratoire avec la méthode 1/5 (USSSL, 1954). Dans ce travail, trois sites tests (figure 5.11) ont été identifiés sur le Gorom-Lampsar, tous présentant dans caractéristiques agricoles similaires. L'une des hypothèses d'entrée de cette thèse est qu'il existe une très bonne corrélation entre les états de surface MERING (1991) et les niveaux de salinité. La géostatistique a été appliquée à ces données de terrain, mais une phase de prétraitement a été faite afin de les normaliser. En effet, il est important de comprendre la distribution des données d'entrée géostatistique avant d'appliquer

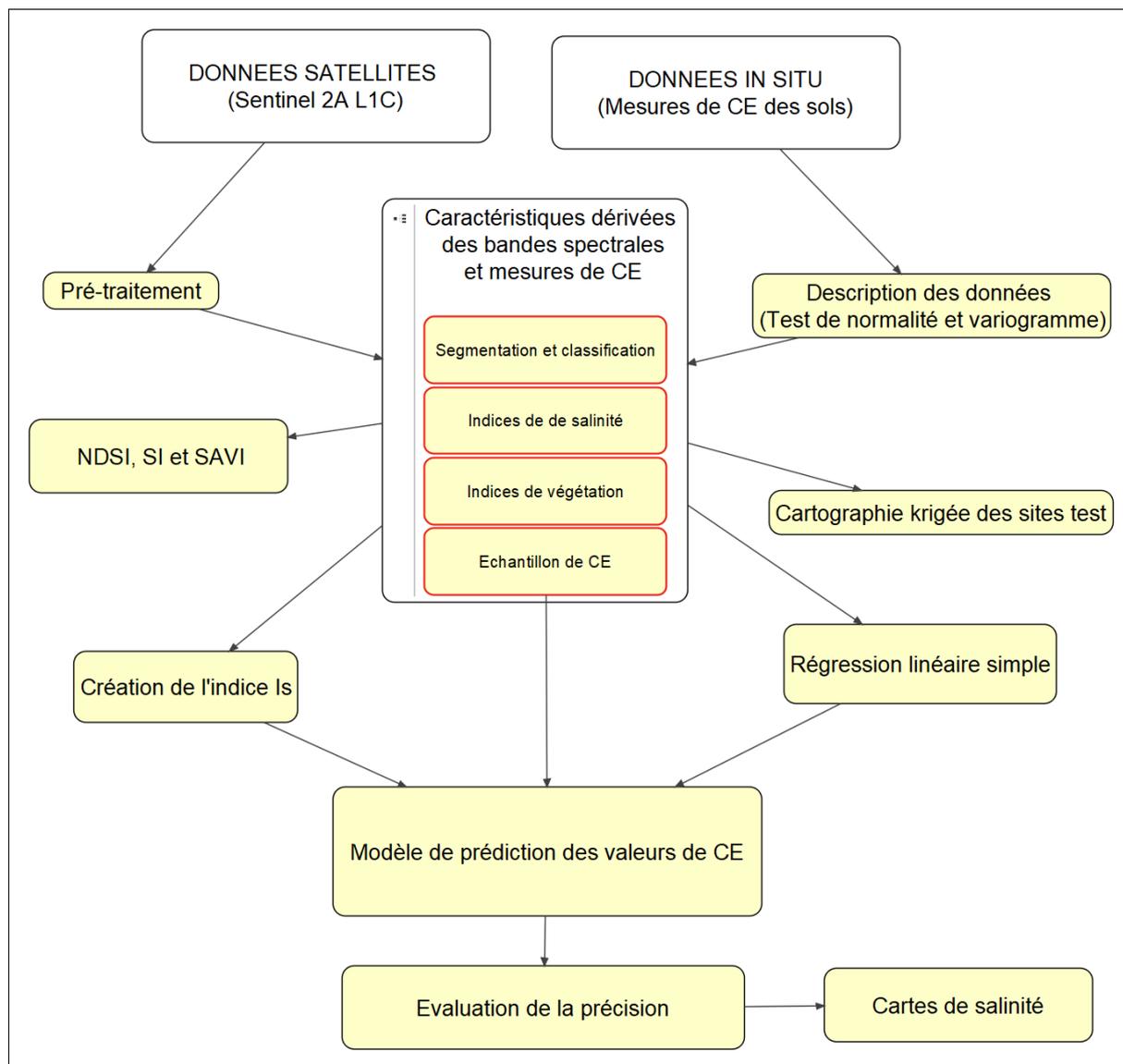


FIGURE 5.10 – Organigramme de la méthodologie proposée pour cartographier la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar .

une interpolation.

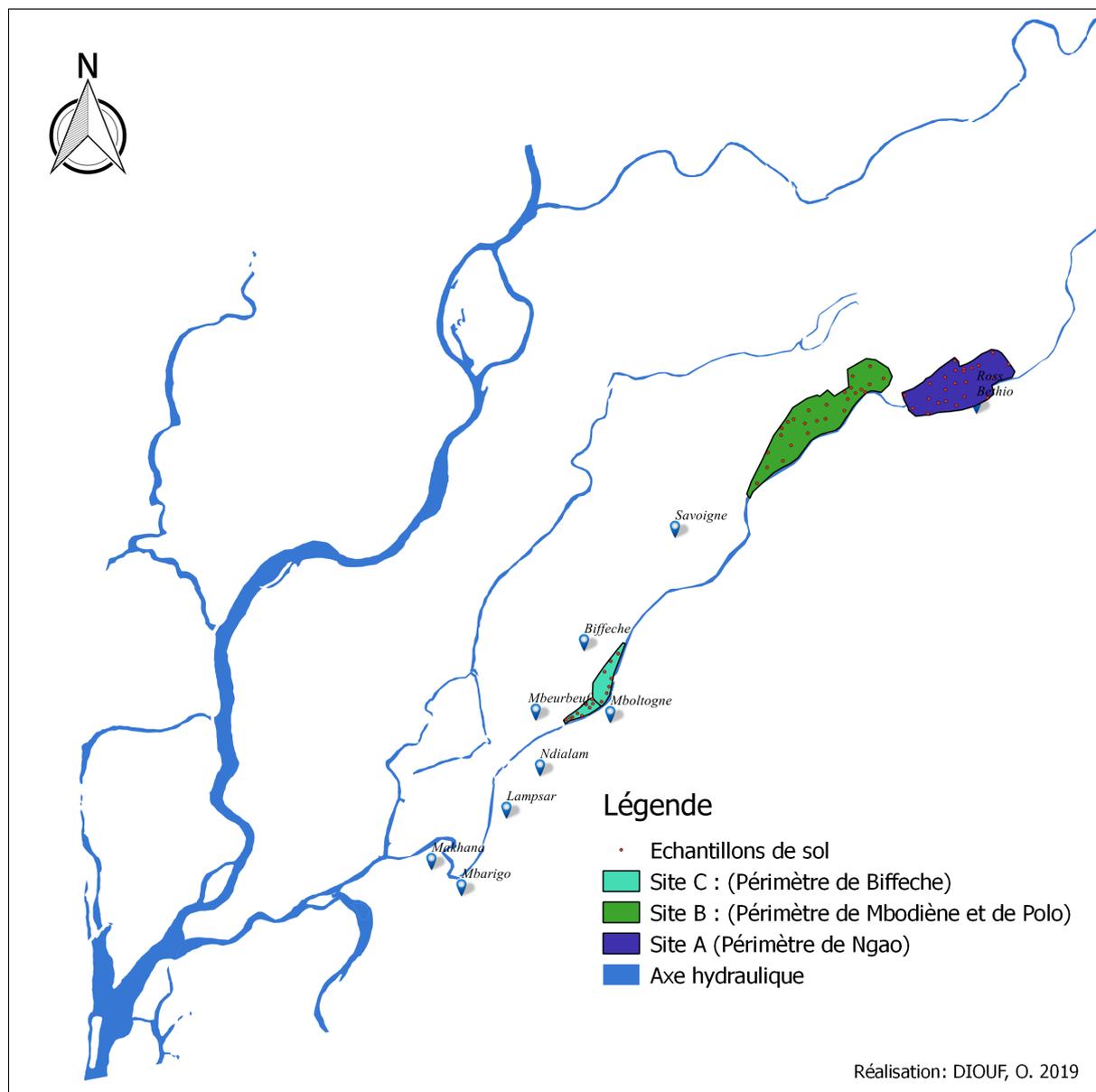


FIGURE 5.11 – Les sites tests de l'étude

Dans nos différents sites, la distribution statistique montre la présence d'un nombre relativement faible de points d'échantillonnage présentant de petites valeurs de concentration de CE (figure 5.12). Ceci est lié aux conditions d'accès des points de prélèvements qui s'avèrent plus faciles d'accès dans les superficies non exploitées. Aussi une très grande variabilité des valeurs de CE est notée, ce qui implique des tâches de normalisation ⁽¹⁾. Pour le Q-Q plot, plus les points sont proches de la ligne droite (45 degrés) du graphique, plus les données de l'échantillon suivent une distribution normale.

(1). Une distribution suit une loi normale si la moyenne et la médiane sont à peu près la même valeur; ce qui n'est pas le cas dans notre distribution

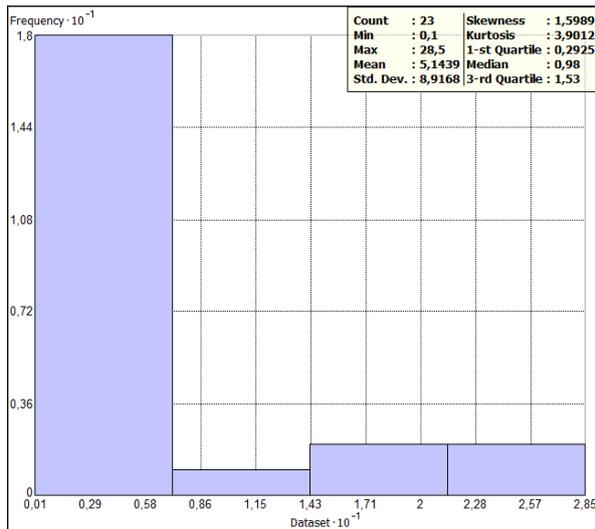


FIGURE 5.12 – Histogramme des données

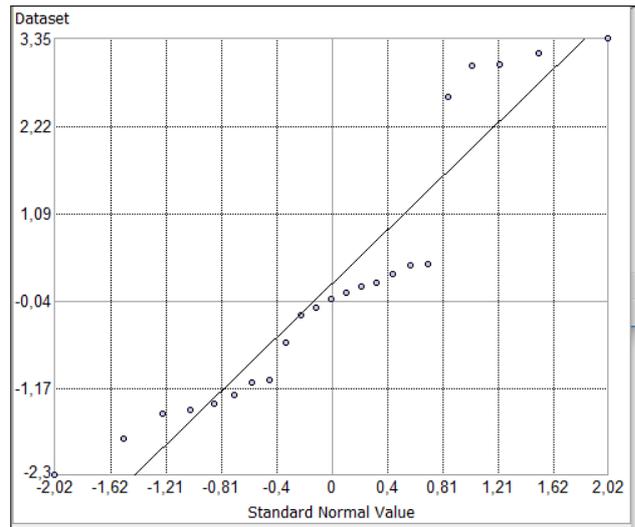


FIGURE 5.13 – Q-Q plot des données

Ici, le principal écart par rapport à cette ligne se produit à de faibles et de très fortes valeurs de concentration de CE (figure 5.13). Alors, l'introduction des paramètres du variogramme tiendra compte de ces deux paramètres. (figure 5.14).

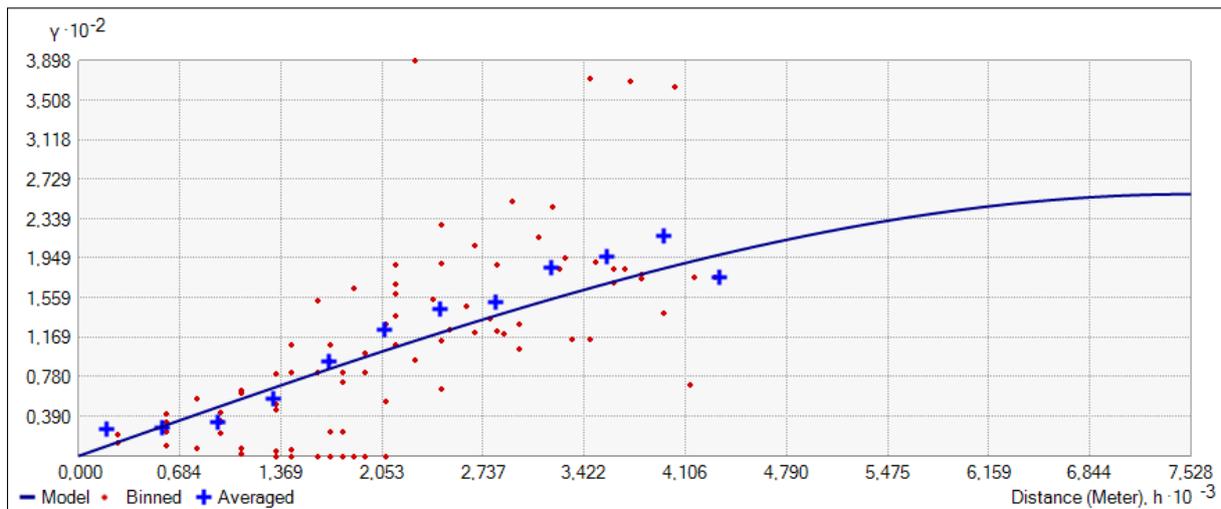


FIGURE 5.14 – Variogramme après introduction des paramètres

5.2.2. Cartographies Krigées

La cartographie obtenue montre, sur l'ensemble des 3 sites, une salinité des sols très importante sur les superficies non exploitées. (figures 5.15, 5.17 et 5.19). Ceci correspond aux photographies aériennes (figures 5.16, 5.18 et 5.20) aux surfaces nues non exploitées ou abandonnées parfois des dépressions salées réceptrices d'eau de drainage.

5.2 CARTOGRAPHIES DE LA SALINITÉ

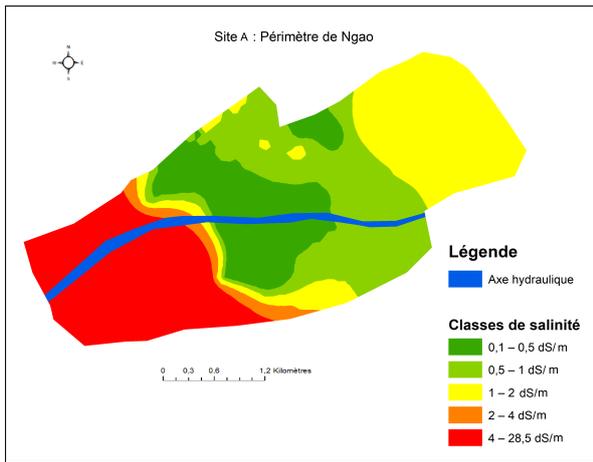


FIGURE 5.15 – Distribution spatiale de la salinité - site A

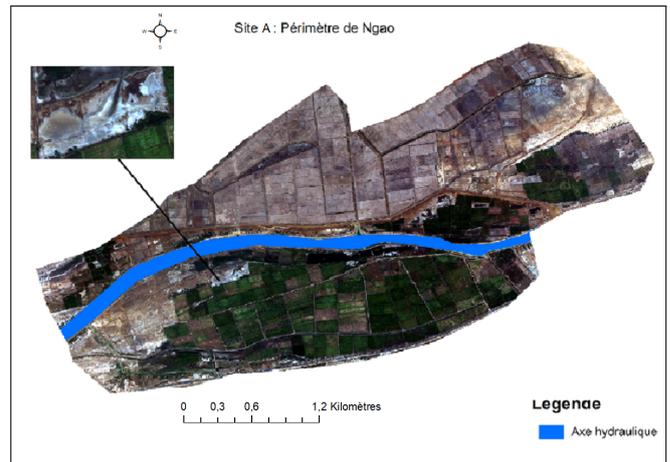


FIGURE 5.16 – États de surface agricole - Site A

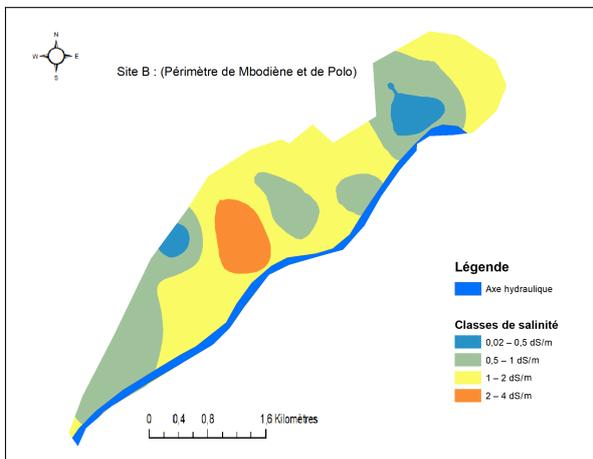


FIGURE 5.17 – Distribution spatiale de la salinité - Site B

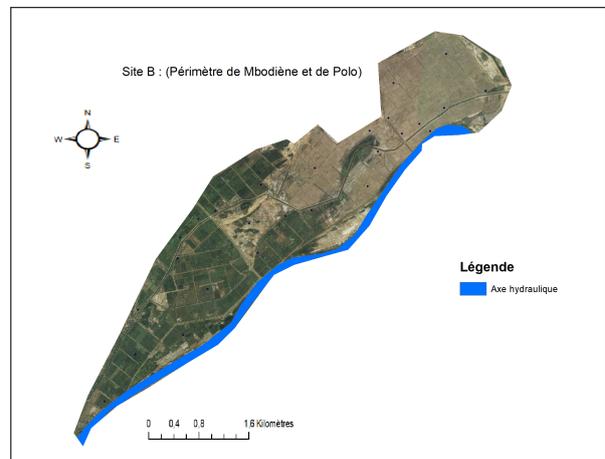


FIGURE 5.18 – États de surface agricole - Site B

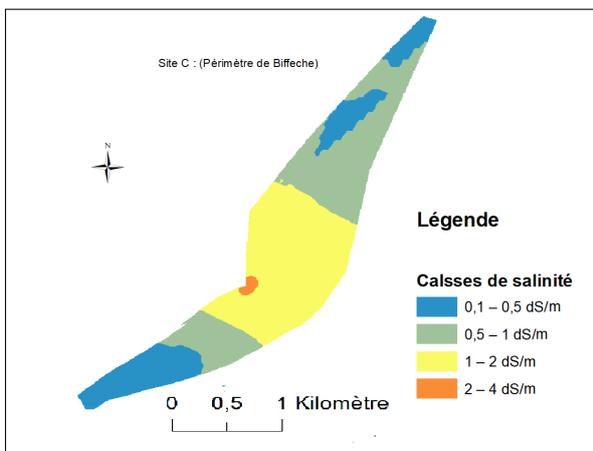


FIGURE 5.19 – Distribution spatiale de la salinité - Site C

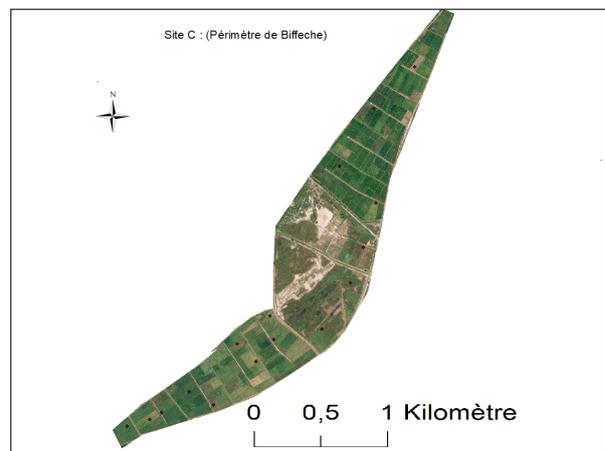


FIGURE 5.20 – États de surface agricole - Site C

Ces images montrent que les 3 sites tests présentent des sols en majorité salés et moyennement salés (figure 5.21). Le site « A » présente 27% sur surfaces extrêmement salés. Ceci est dû au fait que cette partie du périmètre est située sur une dépression réceptrice d'eaux usées ce qui se traduit par des niveaux de salinité élevés (> 20 dS/m) (Efflorescences salines visibles sur l'image aérienne (figure 5.16)).

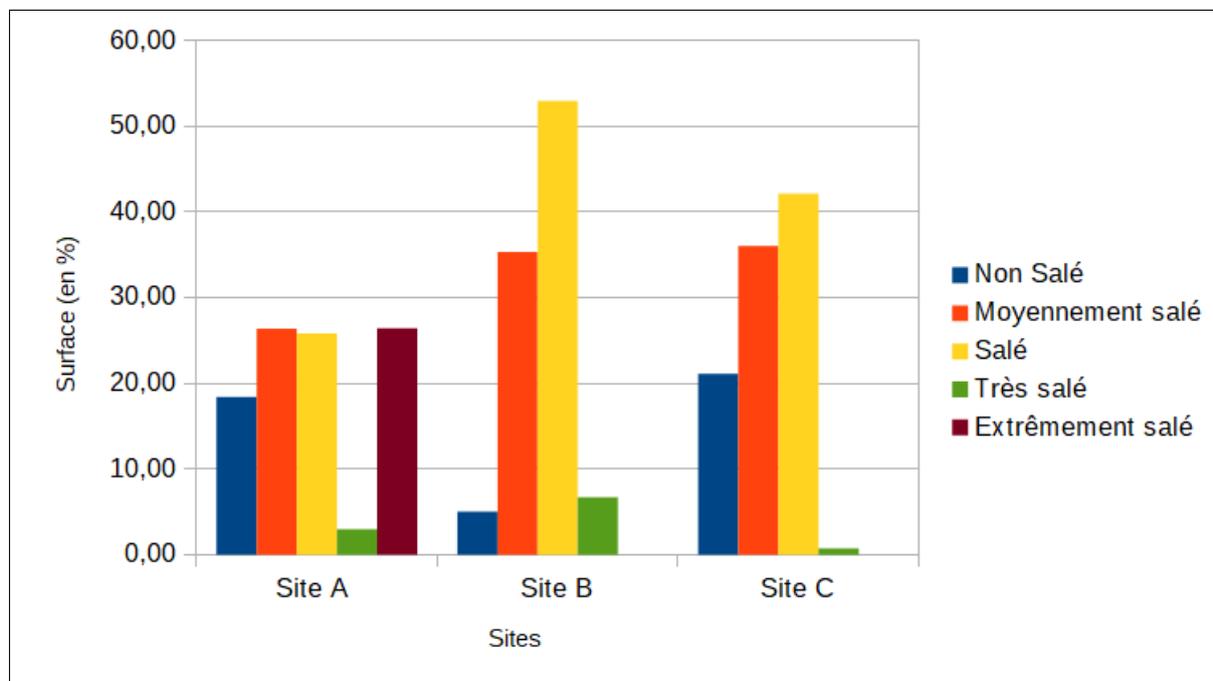


FIGURE 5.21 – Distribution des niveaux de salinité dans les trois sites d'étude

5.2.3. Les indices néocanaux

Dans la littérature, une vingtaine d'indices de salinité a été établie. La précision de ces indices quant à la cartographie de la salinité dépend grandement de la résolution spatiale des images utilisées et des canaux sélectionnés. Parmi ces indices, le NDSI (ABBAS et al., 2013) et le SI (DOUAOUI et al., 2006) sont reconnus les plus efficaces dans les études de salinité dans les milieux arides (ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL, 2014). Selon ALLBED, KUMAR et ALDAKHEEL (2014) et BENCHALAL et al. (2009), il existe une très bonne corrélation entre la salinité et les indices de végétation connues. Le « Soil Adjusted vegetation Index » (SAVI) montre avec une assez bonne estimation les surfaces très salées à extrêmement salées (ALHAMMADI et al., 2008). Cependant, le SAVI reste très limité dans le contexte d'une très bonne couverture végétale.

Tableau 5.4 – Les indices utilisés

Indice de salinité	Formule	Référence
Normalized Differential Salinity Index	$NDSI = \frac{R-PIR}{R+PIR}$	(KHAN et al., 2005)
Salinity Index	$SI = \sqrt{G \times R}$	(DOUAOUI et al., 2006)
Soil Adjusted vegetation Index	$SAVI = \frac{PIR-R}{PIR+R+L} \times (1 + L)$	(HUETE, 1988)

La résolution spatiale de l'imagerie satellitaire est un facteur important à prendre en compte dans la cartographie et de l'évaluation de la salinité du sol. L'utilisation récente des données du satellite Sentinel de COPERNICUS a connue une avancée importante ces trois dernières années, à travers un ensemble d'outils et de logiciels (SNAP)⁽²⁾, des produits et une expertise de l'utilisation de ces produits, disponibles sur THEIA (Données et services pour les surfaces continentales). Cette plateforme offre également des formations sur l'utilisation des produits de SENTINEL dont nous avons bénéficié à l'entame de cette de doctorat avec l'appui financier du laboratoire CEDETE (Centre d'Études Pour le Développement des Territoires et de l'Environnement), qui nous a permis d'avoir la prise en main de ces outils pour le traitement de nos données.

L'utilité des indices dans l'étude de la salinité des sols a été confirmée par les études de ALHAMMADI et al. (2008), de BOUAZIZ et al. (2011), de FAN et al. (2012). Les trois indices sélectionnés ont été mis en œuvre dans le « *band math* » de SNAP et le résultat 5.22 montre une appréciation assez différence de chaque indice sur la salinité.

(2). Sentinel Application Platform : Logiciel libre destiné au traitement des images de télédétection, principalement les données Sentinelles.

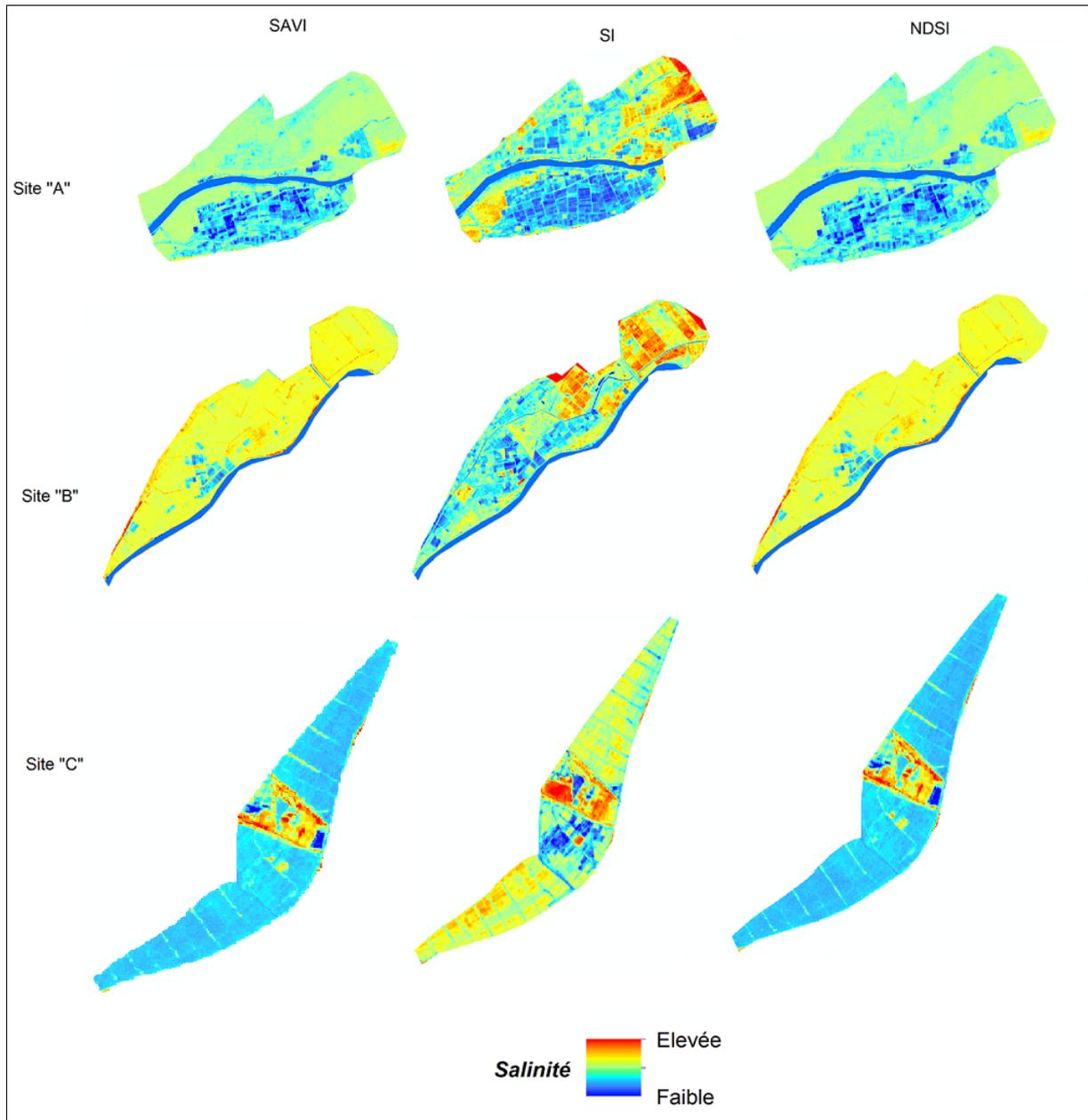


FIGURE 5.22 – Les indices de salinité sur les trois sites

Pour voir de la plus ou moins grande corrélation entre les données CE et les indices de salinité, nous avons procédé au ré-échantillonnage de leur valeur de pixel « *raster value* » dans Arcgis. Un point a été attribué à chaque pixel, puis par affectation de valeur dans *spatial analyst*, nous avons transféré les valeurs sous forme de table sur laquelle seront appliqués les tests de corrélation statistique (tableau 5.5).

Tableau 5.5 – Coefficients de corrélation entre les valeurs CE et les indices calculés

Sites		Variables		
		SAVI	SI	NDSI
À (Périmètre de Ngao)	CE(dS/m)	-0,45*	0,70***	0,44*
B (Périmètre de Mbodiène Polo)	CE(dS/m)	-0,20 ^{ns}	0,47**	0,34 ^{ns}
C (Périmètre de Biffèche)	CE(dS/m)	-0,01 ^{ns}	0,65**	0,30 ^{ns}

Significativité : * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns = non significatif .

Cette analyse montre que la corrélation entre la salinité du sol et les indices sélectionnés est différente entre les trois sites. Le SI montre une très bonne corrélation sur l'ensemble des trois sites. En effet l'indice SI est calculé par sur des bandes Green (2) et Red (3), qui présentent les meilleures différences de comportements spectrales des trois états de surfaces agricoles (figure 5.23). Le SAVI est faiblement corrélé aux valeurs de CE en raison de la densité de la couverture végétale, tandis que les indices de salinité du sol étaient plus fortement corrélés aux valeurs de la CE. Le SI qui présente les meilleurs résultats constitue dans ce contexte le meilleur indicateur de salinité des sols.

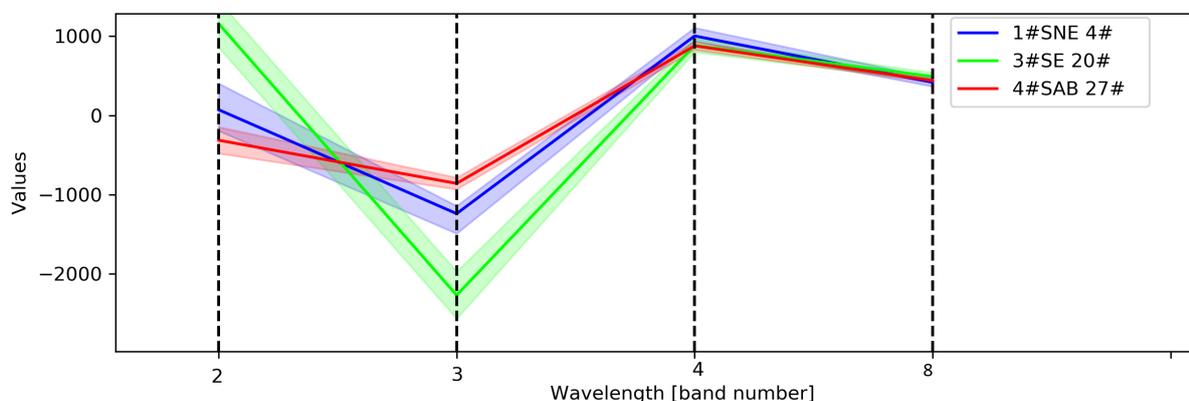


FIGURE 5.23 – Signatures spectrales des différents états de surfaces

Il ressort de cette analyse que la validité des indices varie selon les conditions environnementales, les sols types, et de couvert végétal et sa densité, en gros, selon les états de surfaces. Cette analyse cartographique à grande échelle montre que la salinité dépend des états de surface agricoles⁽³⁾. On délimite, sur notre d'étude terrain et sur les images, des états de surface défi-

(3). L'état de surface, ici, est caractérisé par l'observation sur le terrain et par les mesures *in-situ* (MERING (1991))

nis par leur comportement spectral (MERING, 1991). Trois classes peuvent ainsi être retenues (les Surfaces Exploitées (SE), les Surfaces Non Exploitées (SNE) et les surfaces Abandonnées (SAB)) (tableau 5.6).

Tableau 5.6 – Description des états de surface

Classes	Descriptions	\bar{x} CE dS/m
SE (Surfaces Exploitées)	Parcellaires agricoles mis en valeur abritant de une végétation (forte ou faible); allées et limites des parcelles visibles.	0,49
SNE (Surfaces Non Exploitées)	Surfaces agricoles dépourvues de végétation; limites entre les parcelles visibles sur l'image.	1,78
SAB (Surfaces Abandonnées et dépressions salées)	Sols nus souvent avec efflorescences salines visibles; absence de limites visibles sur le terrain.	13,91

5.2.4. Cartographie à petite échelle cartographique

5.2.4.1. Démarche méthodologique

Cette cartographie repose sur la classification des états de surface précités sur laquelle vont être appliquées des valeurs de l'indice de SI qui présente dans ce cas d'étude le meilleur indicateur de salinité, et les données de salinité terrain. Depuis la grande échelle cartographique du périmètre agricole, nous allons produire la carte de salinité sur tous les périmètres du Gorom-Lampsar (figure 5.26).

5.2.4.2. Classification des états de surface

Tout d'abord, la classification des états de surfaces repose l'imagerie satellitaire avec une automatisation partielle du traitement, mais demeure centrale notre intervention lors de l'analyse et de l'interprétation (MERING, 1989). La classification mise en œuvre est dite « orientée objet »⁽⁴⁾ et repose d'abord sur la photo-interprétation de l'image satellite. L'atteinte de l'objectif de cartographie dépend non seulement des caractéristiques radiométriques de l'image, mais aussi des caractéristiques des objets (forme, relief, couleur, densité de la végétation, rapport

(4). La classification orientée objet est basée sur l'idée que l'importante information sémantique nécessaire à l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans les pixels individuels, mais dans des images-objets significatives et leurs relations mutuelles (THI-THANH-HIÊN, 2010)

sol/végétation). Cette approche de classification orientée objet se base sur les zones d'image homogènes, c'est-à-dire les objets sur l'image, au lieu des pixels individuels. La création des objets est effectuée par une segmentation d'image qui peut se faire à différentes échelles. Les objets sont classifiés par les règles basées sur l'expertise humaine (THI-THANH-HIÊN, 2010).

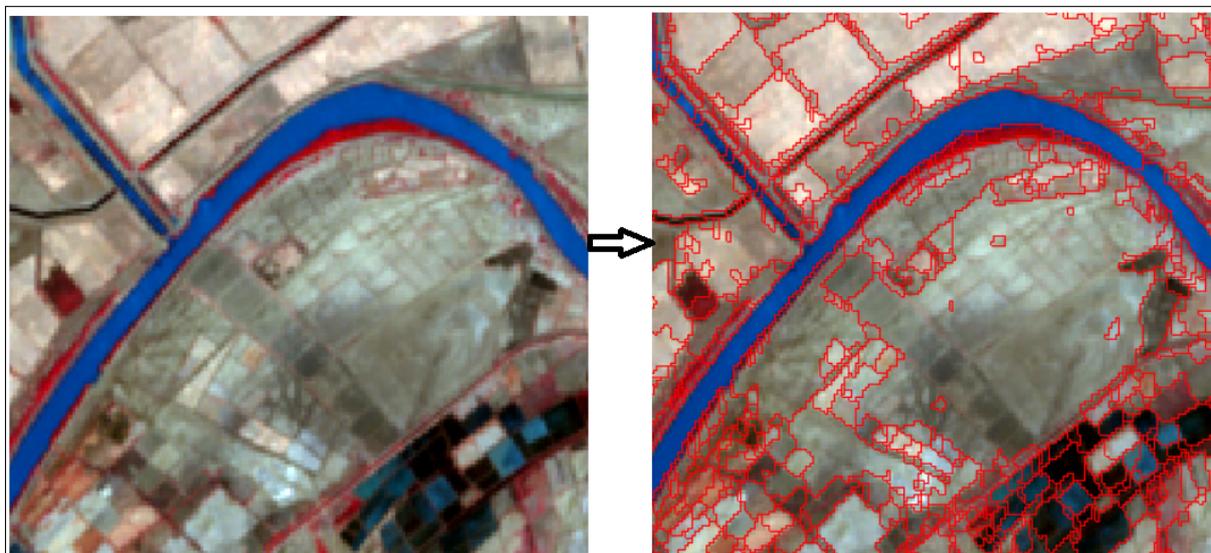


FIGURE 5.24 – Segmentation de l'image en régions élémentaires

La photo-interprétation et la numérisation de la photo aérienne actuelle permettent de déceler les différents états de surface agricoles. Il s'agit dans cette tâche d'identifier les 3 catégories de surfaces dans les périmètres du Gorom-Lampsar. Dans nos différentes missions de terrain, nous avons identifié des indicateurs de délimitation qui sont les limites des surfaces irriguées matérialisées sur le terrain par les allées et murs en terre séparant les parcelles. Le schéma delta de la figure 5.1 nous renseigne aussi sur l'organisation des périmètres irrigués. Un autre élément qui apparaît sur la photo aérienne est la distinction entre surfaces irriguées qui porte une végétation et surfaces non irriguées dont soit le sol est nu, soit les efflorescences salines sont visibles. La distinction entre SNE et SAB⁽⁵⁾ s'identifie sur la photo aérienne par les limites des parcelles

Le résultat de cette classification est une carte thématique montrant les différents états de surface agricoles des périmètres du Gorom-Lampsar (figure 5.25).

(5). Les SAB trouvent leur justification au vu de la perception humaine, car du point de vue physique aucune distinction ne peut être faite entre SNE et SAB, mais dans la perception humaine une SAB trouve son sens. Nous y reviendrons dans la partie suivante de cette thèse

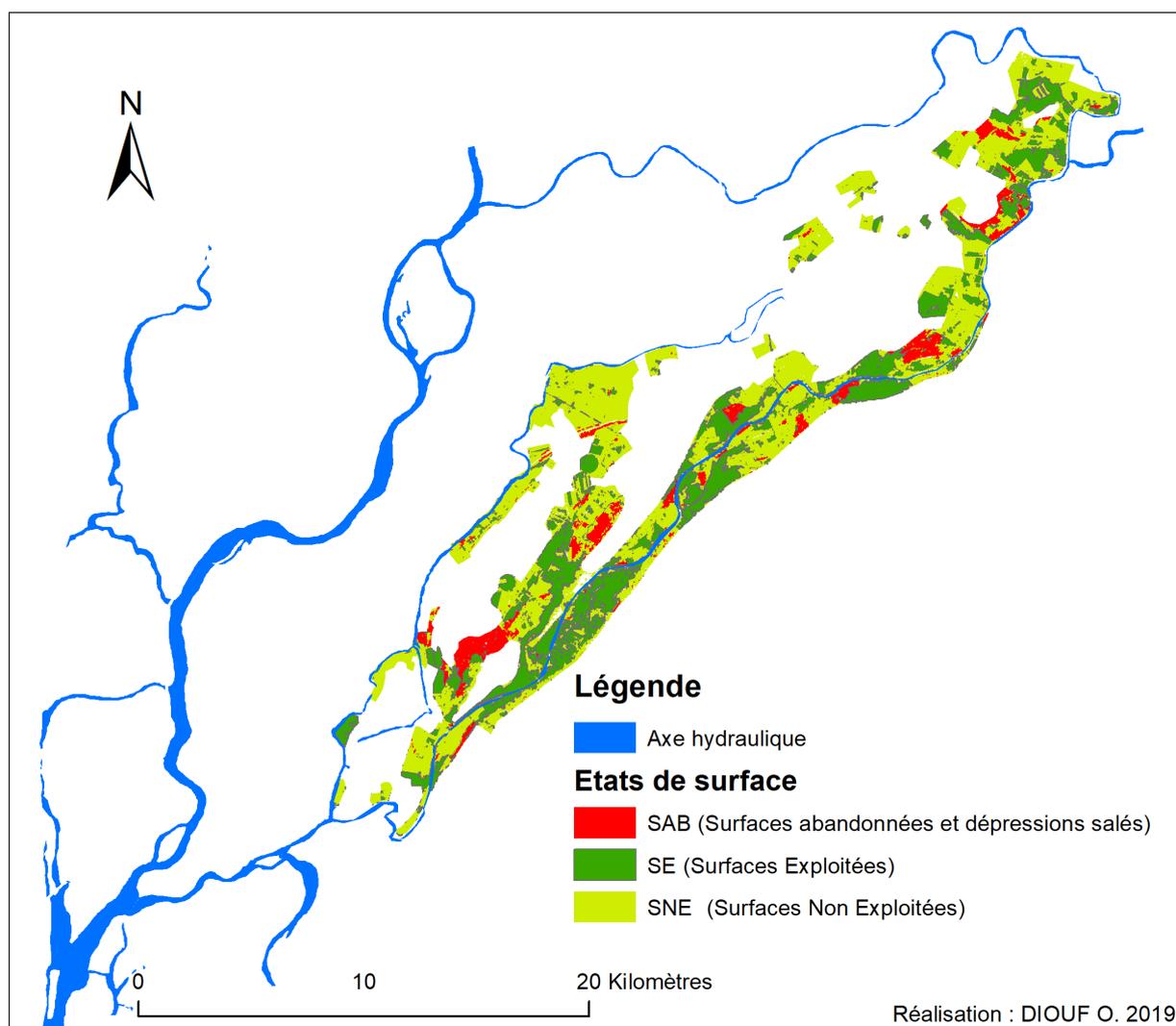


FIGURE 5.25 – Carte des états de surface agricoles du Gorom-Lampsar

5.2.4.3. Calcul de l'indice I_s

Ensuite, nous avons mis en place une formule qui permet, à partir des valeurs moyennes de CE des périmètres tests et du SI, de calculer un indice (Salinité (CE) \times Indice de salinité). Cette tâche met en œuvre les fonctionnalités du SIG qui (principalement de géotraitement) qui permettront la production de cartes de salinité et de statistiques. Notre Indice de salinité (I_s) se calcule comme suit :

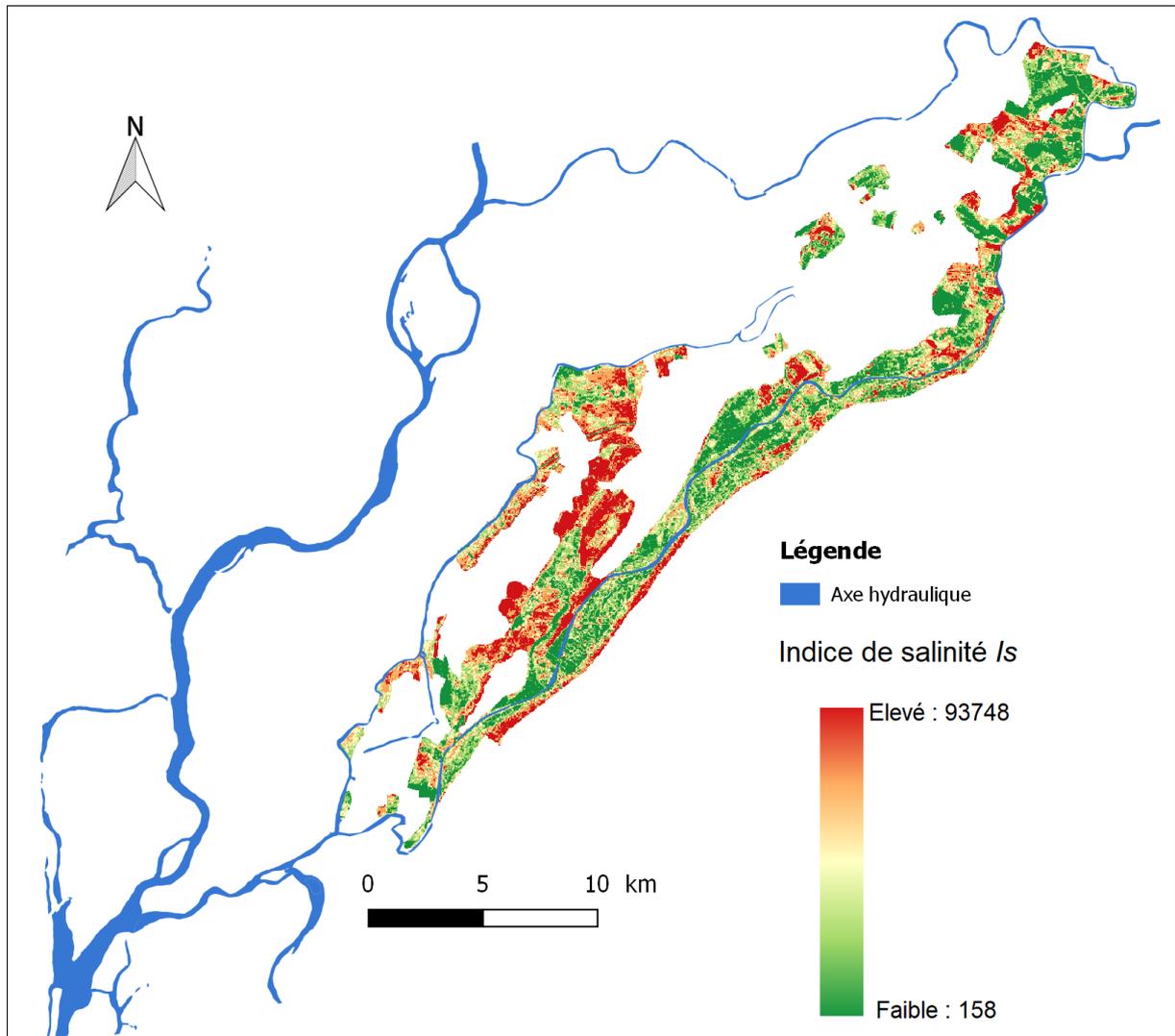
FORMULE 5.1 – Processus de calcul de l'indice de salinité

$$I_s = si \times \bar{x}_{(es)}$$

I_s = Indice à calculer

$\bar{x}_{(es)}$ = Moyenne de salinité de l'état de surface

si = Valeur de l'indice SI du pixel

FIGURE 5.26 – Indice de salinité I_s

Le calcul de l'indice de salinité (I_s) entraîne une multiplication des valeurs extrêmes de l'indice I_s par conséquent, les surfaces salées et extrêmement salées montrent des valeurs de l'indice I_s très élevées (entre 30.000 et 90000). De 150 à 3000, représente les autres classes de salinité. La classification des sols salés de J.-H. DURAND (1983) (tableau 1.7) est basée sur le critère de l'équirépartition (0-500; 500-1000; 1000-2000; 2000- 4000 et > 4000). Par conséquent, une méthode de discrétisation doit être appliquée aux valeurs de notre indice (I_s). Le résultat donne une carte de salinité à 5 classes.

Pour passer de cette carte indicée à une cartographie classée, nous avons appliqué un modèle de prédiction des valeurs de conductivité par le biais de la régression linéaire simple.

5.2.4.4. Modèle de cartographie basé sur la régression linéaire

Nous disposons de quelques échantillons de CE sur les trois sites et une carte indicée (*Is*) à l'échelle du Gorom-Lampsar. Maintenant, il s'agit de trouver un modèle qui permet, à partir de ces données, de prédire la valeur de conductivité électrique en tout point du Gorom-Lampsar (5.10).

Tableau 5.7 – Statistiques descriptives des données

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
CE_dS_m	77	0,020	28,500	2,547	5,218
RASTERVALU (<i>Is</i>)	77	319,890	40196,923	2394,245	7065,215

Ce tableau montre les statistiques descriptives des données CE et *Is*. On constate une moyenne "salée" de 2,54 dS_m qui correspond à une valeur moyenne du *Is*. Ce-ci montre une très bonne corrélation ($R = 0.95$) des variables CE (variable dépendante Y) et *Is* (Variable indépendante X).

5.2.4.5. Équation du modèle de régression

L'objectif de cette équation est de prédire les valeurs de CE à partir d'une donnée que l'on a, c'est-à-dire les valeurs de notre indice *Is*. L'équation de régression montre qu'il existe une liaison positive très forte entre les valeurs de CE et les valeurs de l'indice *Is* (5.27).

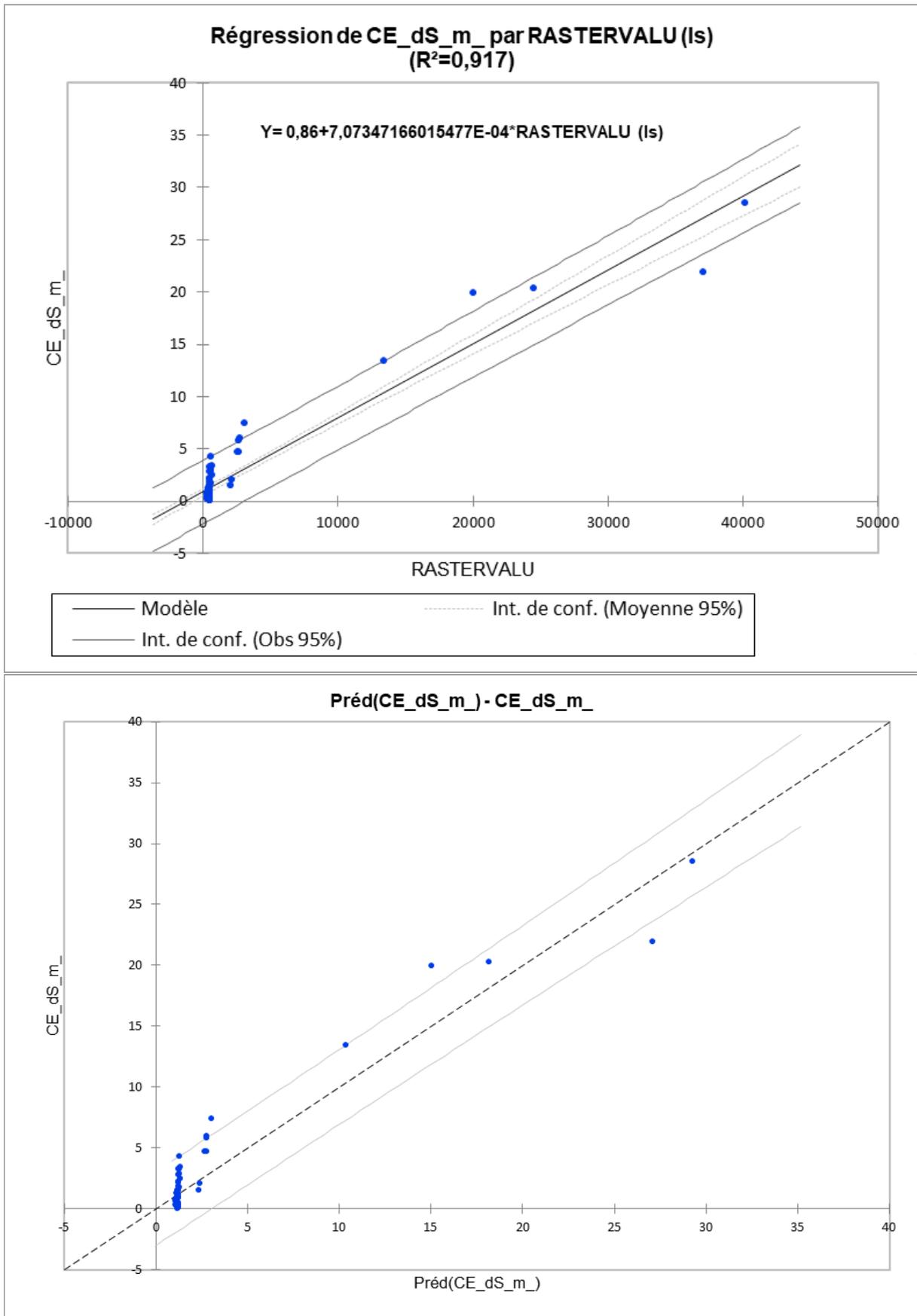


FIGURE 5.27 – Régression de CE par Is et des CE par les prédictions

Grace à l'équation suivante, il est maintenant possibles de prédire pour chaque valeur de notre indice I_s (que l'on connait) la valeur de CE correspondante

FORMULE 5.2 – Equation du modèle de prédiction

$$Y = 0,86 + 7,07347166015477e^{-04} \times RASTERVALU(I_s)$$

En suite la détermination d'un intervalle de confiance à toute ces nouvelles valeurs permet de vérifier sa validité.

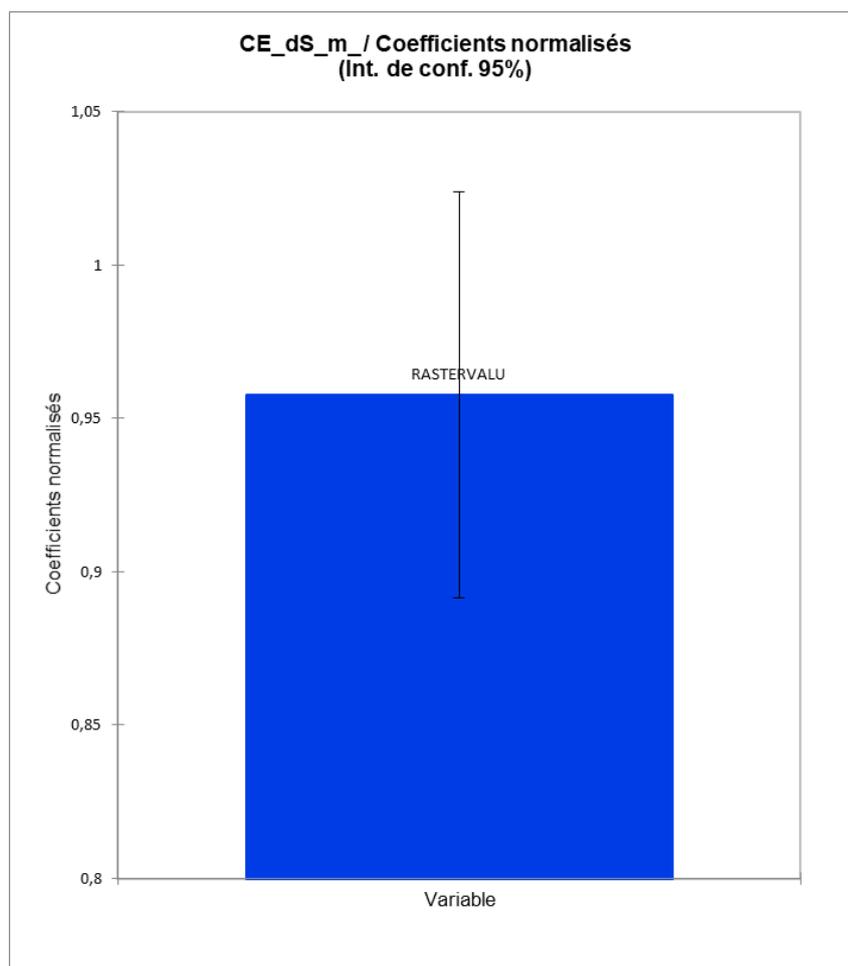


FIGURE 5.28 – Coefficients normalisés (CE_dS_m) : Intervalle de confiance

Cette figure montre l'intervalle de confiance. L'utilisation de cet intervalle de confiance peut nous aider à comprendre la précision de notre modèle. Un intervalle de confiance de 95% signifie que 95 % des mesures de CE futurs devraient se situer dans ce rayon de 0,8 à 0,958.

Tableau 5.8 – Prédications et résidus (CE_dS_m)

Observation	Poids	Is	CE_dS_m	Préd(CE_dS_m_)	Résidu
Obs1	1	493,794	0,020	1,203	-1,183
Obs2	1	497,917	0,096	1,206	-1,110
Obs3	1	478,667	0,140	1,192	-1,052
Obs4	1	466,320	0,140	1,183	-1,043
Obs5	1	430,326	0,150	1,222	-0,982
Obs43	1	519,227	0,900	1,221	-0,321
Obs44	1	479,860	0,920	1,193	-0,273
Obs45	1	525,181	0,930	1,225	-0,295
Obs46	1	454,318	0,977	1,175	-0,198
Obs68	1	2698,378	4,680	2,762	1,918
Obs69	1	2586,175	4,690	2,683	2,007
Obs70	1	2694,960	5,780	2,760	3,020
Obs71	1	2744,635	6,000	2,795	3,205
Obs72	1	3090,647	7,400	3,040	4,360
Obs73	1	13410,318	13,400	10,339	3,061
Obs74	1	20034,647	19,940	15,025	4,915
Obs75	1	24473,484	20,300	18,165	2,135
Obs76	1	37101,750	21,900	27,097	-5,197
Obs77	1	40196,923	28,500	29,287	-0,787

Ce tableau montre les valeurs de quelques valeurs CE et leurs prédictions par le modèle de régression. Il montre de faibles entre les observations et les prédictions. Le modèle de régression fournit également de faibles résidus.

Le modèle de prédiction est ensuite appliqué à tout pixel de l'image de la zone d'étude par ré-échantillonnage dans le *spatial analyst* d'Arcgis. Puis une nouvelle d'interpolation a été appliquée sur ces données pour créer une carte de salinité krigée (5.29).

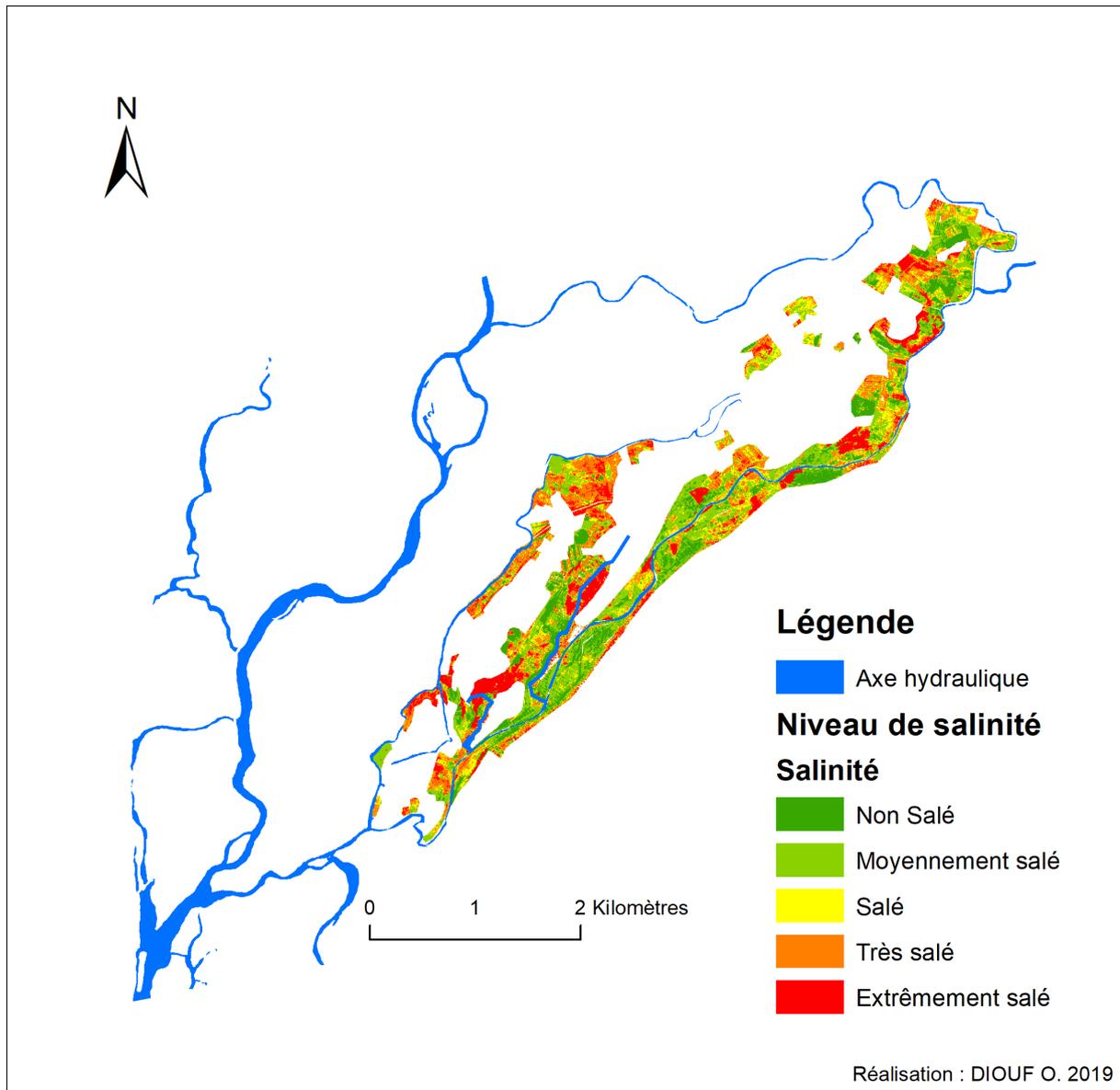


FIGURE 5.29 – Carte de salinité du Gorom-Lampsar

Cette carte montre une distribution très hétérogène de la salinité sur l'ensemble du Gorom-Lampsar. Elle montre néanmoins deux zonages de salinité :

- Sur les rives des cours d'eau du Lampsar et Djeuss, on note des taux moyens (moyennement salés à salés)
- Dans les zones intermédiaires (dans les PIP et les PIV), les surfaces ont des taux de salinité, en général, élevés (très salé à extrêmement élevés).

Tableau 5.9 – Statistiques de la salinité dans le Gorom-Lampsar

Classes	Superficie	Superficie	Superficie	Superficie	Superficie	Sup. sols	Sup. sols	Sup.	Sup. PIP
	totale (ha)	totale en %	SE (ha)	SNE (ha)	SAB (ha)	Hollaldé (ha)	Fondé (ha)	GA (ha)	et PIP (ha)
Non salé	2681,35	17,70	2647,47	16,08	0,10	307,35	611,71	1100,44	1580,91
Salé	2190,86	14,42	9,50	2163,22	3,72	1481,91	2242,33	760,21	1430,65
Moyennement salé	4450,60	29,38	2456,61	1963,88	0,73	604,58	1189,15	2038,73	2411,87
Très salé	3554,09	23,45	4,27	3522,20	4,17	965,91	1685,04	890,04	2664,05
Extrêmement salé	2279,39	15,05	5,11	972,04	1287,19	591,14	966,18	434,55	1844,84

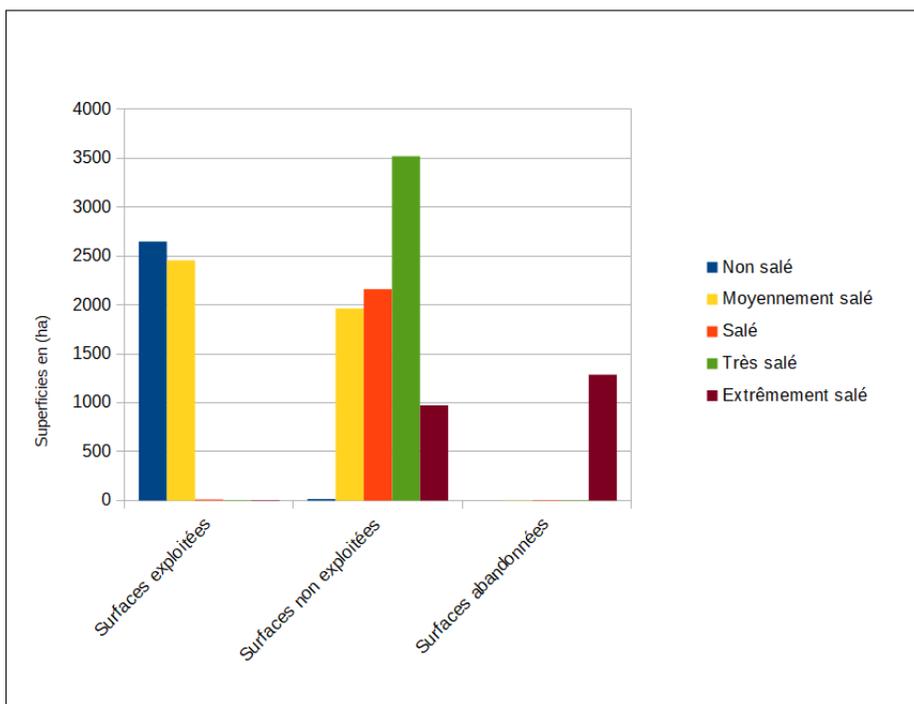


FIGURE 5.30 – Salinité et états de surface

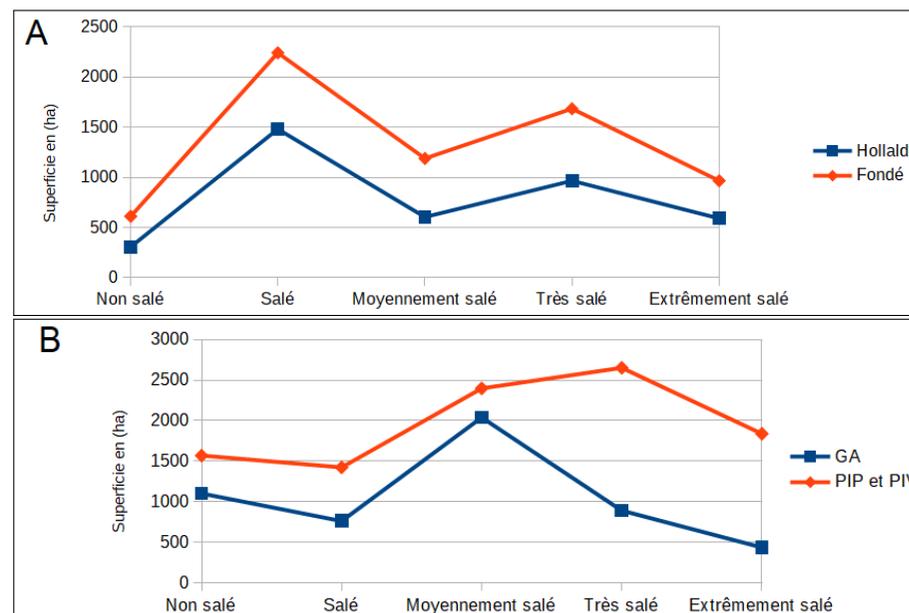


FIGURE 5.31 – A. Salinité et types de sols - B. Salinité et type d'aménagement

L'analyse de ces résultats montre :

- Une salinité qui dépend, à petite comme à grande échelle cartographique, des états de surface agricole par année de culture (figure 5.30);
- La distance par rapport à l'axe hydraulique aurait le plus gros impact sur la salinité (figure 5.32). Sur les rives du fleuve Lampro, les GA, pour les niveaux de salinité « salé à extrêmement salé », les distances moyennes par rapport à l'axe hydraulique varient, en moyenne, entre 500 et 600 mètres tandis que dans les PIP, les distances sont de l'ordre de 850 à 950 mètres.
- On distingue une dichotomie amont-aval : les sols situés à l'aval du Gorom-Lampro sont plus salés que ceux d'amont (topographie et présence de dépressions réceptrices d'eaux usées en amont);

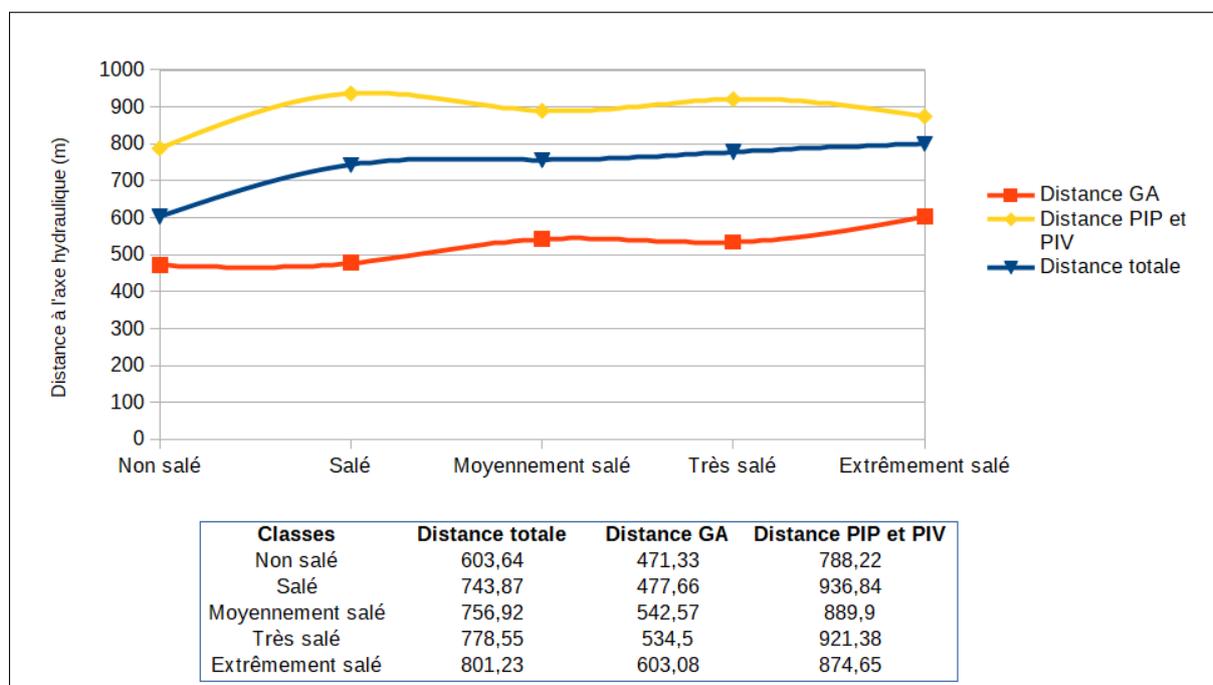


FIGURE 5.32 – Salinité et distance moyenne à l'axe hydraulique le plus proche

- Le type de sol n'aurait pas d'impact considérable sur la salinité des sols (figure 5.31 - A). On opère une distribution amont-aval des types de sols (*Hollaldé* en aval et *Fondé* en amont) et la distribution de la salinité ne suit pas cette logique; seules les surfaces intermédiaires (distantes de l'axe hydraulique) présentent un fort indice de salinité.
- Le nombre d'années de mise en culture se confond avec la typologie des aménagements. Les GA, en général, moins salés sont mis en place plus tôt que les PIP et les PIV. C'est-à-dire, en principe, que plus un aménagement est vieux, moins il est salé ce qui serait vrai

si les GA et PIP disposaient au même titre des réseaux de drainage adéquats. C'est plutôt l'absence de drainage qui aurait un grand impact sur la salinisation des terres, car les PIP et les PIV présentent des niveaux de salinité « très salé à extrêmement salé » (figure 5.31 - B)

Cependant, se limiter à cette superposition de conclusions serait contraire à la géographie. L'explication du phénomène de salinité doit engager une démarche de discussion analytique prenant en compte toutes ces énumérations ci-dessus.

5.3. Discussion des résultats

La géographie est science holistique, car la réponse à ses problématiques engage une démarche systémique avec le mariage de plusieurs facteurs. Ce n'est pas en juxtaposant ces facteurs qu'on arrive à répondre aux questions, mais c'est plutôt la manière de les agencer. Quelles sont les combinaisons de facteurs qui expliquent la salinité des sols dans le delta du Sénégal ? À cette question, la réponse simpliste du facteur type de sol ou de distance à l'axe hydraulique ne permettrait de pas de la vérifier, car d'amont en aval du bassin du Gorom-Lampsar la salinité connaît une distribution spatiale hétérogène combinée à d'autres facteurs comme la topographie et la typologie des aménagements.

Le Gorom-Lampsar tout comme le delta du Sénégal est le résultat d'un processus de territorialisation hydraulique très complexe. Ce processus a mis en place les hommes, mis en valeur les ressources naturelles (terre et eau) à travers l'agriculture, mais dans un contexte bourré de tâtonnements et d'échecs (un « territoire salé » de l'eau). La salinisation des terres agricoles est le résultat de l'inaboutissement de la mise en place du territoire de l'eau. Trois éléments permettent de replacer ce phénomène dans le contexte de mise en place du territoire de l'eau : la ressource en eau, les acteurs, et les stratégies de la territorialisation de l'eau. Les stratégies des acteurs ont dès le début mis en place 3 types d'aménagements (les GA, les PIP et les PIV). Ces stratégies ont aussi favorisé le désengagement de l'État du Sénégal (la responsabilisation des paysans, la rétrocession de la gestion financière de l'eau aux communautés rurales); ce qui à leur tour ont pour conséquence le développement du secteur privé dans l'agriculture. Ce processus explique la complexité de la gestion des périmètres irrigués et de la salinité.

Dans les grands périmètres agricoles (GA) gérés par la SAED, cette gestion de la salinité s'effectue continuellement. Il est démontré que la riziculture, pratiquée en majorité dans les

grands aménagements sur les rives du Gorom-Lampsar, est réductrice des niveaux de salinité. En effet, d'énormes quantités d'eaux de drainage sont mobilisées dans les périmètres irrigués puis rejetées par l'intermédiaire de grands émissaires de drainage (*Annexes*) soit dans les dépressions naturelles isolées du système hydrologique originel soit dans les axes hydrauliques.

A l'opposé des rives du Gorom-Lampsar, sur les rives du Djeuss, du Lampsar amont et les zones intermédiaires, s'étalent les PIP et les PIV gérés par des privés. Les sols salés y sont salés à extrêmement salés, malgré l'existence d'un émissaire de drainage.

✓ *La proximité aux ressources en eau serait l'élément central*

Sur le terrain et dans l'analyse cartographique, dans le Gorom-Lampsar, les surfaces agricoles suivent une logique de localisation du « *plus près à l'axe d'alimentation* ». Ce facteur de proximité est très important puisqu'il permet aux agriculteurs d'avoir accès à l'eau très facilement, mais aussi de mieux évacuer les eaux de drainage vers les grands émissaires (qui aussi sont aménagés sur le même profil que les grands axes du Lampsar et du Djeuss). L'absence de réseaux de drainage dans les PIP et les PIV oblige les paysans à s'installer parfois tout près de la ressource. La distance à la ressource pourrait expliquer les niveaux de salinité extrêmes dans les PIP et les PIV. Dans ces derniers, l'installation des parcelles agricoles ne s'est pas faite suivant la logique du plus près à la ressource. À partir de 1990, leur développement s'est accéléré grâce à la disponibilité en eau offerte par le barrage de Diama. Alors on retrouve, sur les rives du Djeuss et dans les zones intermédiaires un maillage conséquent de périmètres privés, sans réseaux de drainage.

✓ *L'année de mise en culture est fonction de la distance à la ressource*

L'année de mise en culture se confond avec la typologie d'aménagement caractérisé par présence (GA aménagés en premier) ou non (PIP et PIV aménagés après) de réseaux de drainage. De la ville de Rosso jusqu'aux périmètres irrigués du village de Lampsar s'étalent les grands périmètres gérés par la SAED, mis en place entre 1975 et 1985. De Rosso jusqu'à Boundoum-Barrage et sur les rives du Djeuss on retrouve les PIP et les PIV créés entre 1986 et les années 2000. La distance explique leur localisation. Les distances moyennes des parcelles salées à l'axe hydraulique sont de 800 mètres à environ 1 km dans les PIP (500 mètres dans les GA). Ces statistiques montrent que les superficies récentes sont plus éloignées de la ressource en eau, donc plus salées, mais cette conclusion n'est valable que dans le contexte d'un drainage

existant dans les PIP.

✓ *Le type de sol serait un facteur insignifiant sur la salinité dans l'analyse géographique*

Cette variable ne montre pas d'impacts sur la salinité des sols. La figure 5.31 montre les mêmes niveaux de salinité sur les *Hollaldé* et les *Fondé*. Elle est, dans cette étude, insuffisante pour analyser la salinité des sols sous notre approche de « territoire hydraulique ». Les pédologues et les domaines des sciences de l'eau abordent souvent la question de la salinité sous l'angle du type de sol en mettant en exergue les transferts hydrodynamiques de la nappe phréatique. Des études similaires (B. NDIAYE et al. (2008) par exemple) ont été faites dans le delta et ont montré que les remontées capillaires de la nappe phréatique salée, une source de salinisation des sols, sont moins fortes sur les *Hollaldé* que sur les *Fondé* et le maintien d'une lame d'eau en surface permet de réduire la salinisation. Toutefois celles-ci se font à l'échelle de la petite parcelle agricole.

Conclusion du chapitre 5

L'axe Gorom-Lampsar présente des caractéristiques physiques et humaines favorables qui font de lui un territoire hydraulique. Il a connu, comme dans le tout le delta des problèmes de salinité, résultat du processus de mise en valeur des terres par l'agriculture.

Les techniques de cartographie et télédétection et les SIG ont permis de produire des résultats cartographiques et statistiques.

L'analyse cartographique a montré que la distance à l'axe hydraulique est l'élément central dans la compréhension de la salinité. Cette distance à l'axe hydraulique est aussi fonction de l'ancienneté des périmètres. En effet, la politique de territorialisation dans le delta du fleuve Sénégal s'est faite selon le principe du plus près à l'axe hydraulique (les premiers aménagements sur les rives avec de faibles distances et les aménagements secondaires, PIP et PIV plus salés dans les zones intermédiaires avec les longues distances). Le type de sol n'aurait pas d'impact sur la salinité dans cette analyse géographique même si des études pédologiques montrent que la vitesse de percolation et les phénomènes de remontée capillaire plus faible sur les *Hollaldé* (moins salés) que sur les *Fondé*.

PERCEPTION ET PRATIQUES DE GESTION DE LA SALINITÉ DANS LES PIP ET PIV

Sommaire

6.1 Perception, indicateurs et pratiques dans un contexte de salinité	178
6.1.1 La démarche sur le terrain	179
6.1.2 Les indicateurs de reconnaissance de la salinité	180
6.2 Les pratiques de gestion dans le Gorom-Lampsar	183
6.2.1 Les pratiques de gestion hydrauliques	185
6.2.2 Les pratiques de gestion agronomiques	191
6.3 Discussion des résultats	193
Conclusion du chapitre 6	196

Dans cette dernière partie du travail, nous essayerons de faire un état des lieux des différentes pratiques (techniques, opérations, actions) de gestion de la salinité sur les périmètres privés et villageois du Gorom-Lampsar, de répondre à la dernière hypothèse de travail ([hypothèse 4](#)). Ce chapitre met aussi en exergue lien entre la salinité et la gestion des eaux de drainage dans les PIP et les PIV. Ces périmètres, comme le montre le dernier chapitre, ne sont pas dotés de systèmes de gestion des eaux usées à cause de la politique de territorialisation hydraulique du « *tout près à l'axe hydraulique* », c'est la raison pour laquelle les populations appliquent des pratiques de gestion traditionnelles. Ces dernières sont conditionnées par la perception, car les paysans analysent le phénomène auquel ils donnent un ensemble de valeurs cognitives ; ce qui oriente leurs choix. Cette perception doit être prise en compte dans la démarche en géographie. En France, au début du XX^{ème} siècle,

une série de travaux sur le sens de l'espace, l'orientation dans les populations primitives et la structuration de la perception lointaine [...] puis elle se modifie, change d'échelle, et touche davantage à la perception proche, qui constitue un domaine plus accessible au psychologue rompu aux méthodes expérimentales (CLAVAL, 1974). En effet, au cours des années 1950, les réflexions les plus originales étaient le fait d'hommes de laboratoire (...) à partir de 1960, l'échelle change, la curiosité s'oriente vers la perception de l'environnement (CLAVAL, 1974). Dès lors, la géographie se veut aussi qualitative (CLAVAL, 1981).

Dans ce cas d'étude, le système d'irrigation (le périmètre agricole) (schéma 6.1) est pris comme unité de base pour l'analyse. Cette unité d'analyse peut être appréhendée comme un écosystème, un agroécosystème. La sécurisation complète des ressources (terres et eau) et leur mise en valeur dans le cadre d'une gestion rationnelle et durable dans le delta du fleuve Sénégal est une préoccupation majeure du Gouvernement Sénégal. Cette sécurisation des ressources se veut aussi durable (la durabilité des agroécosystèmes) et la salinisation et la sodisation des terres sont considérées comme des processus de dégradation de l'environnement.

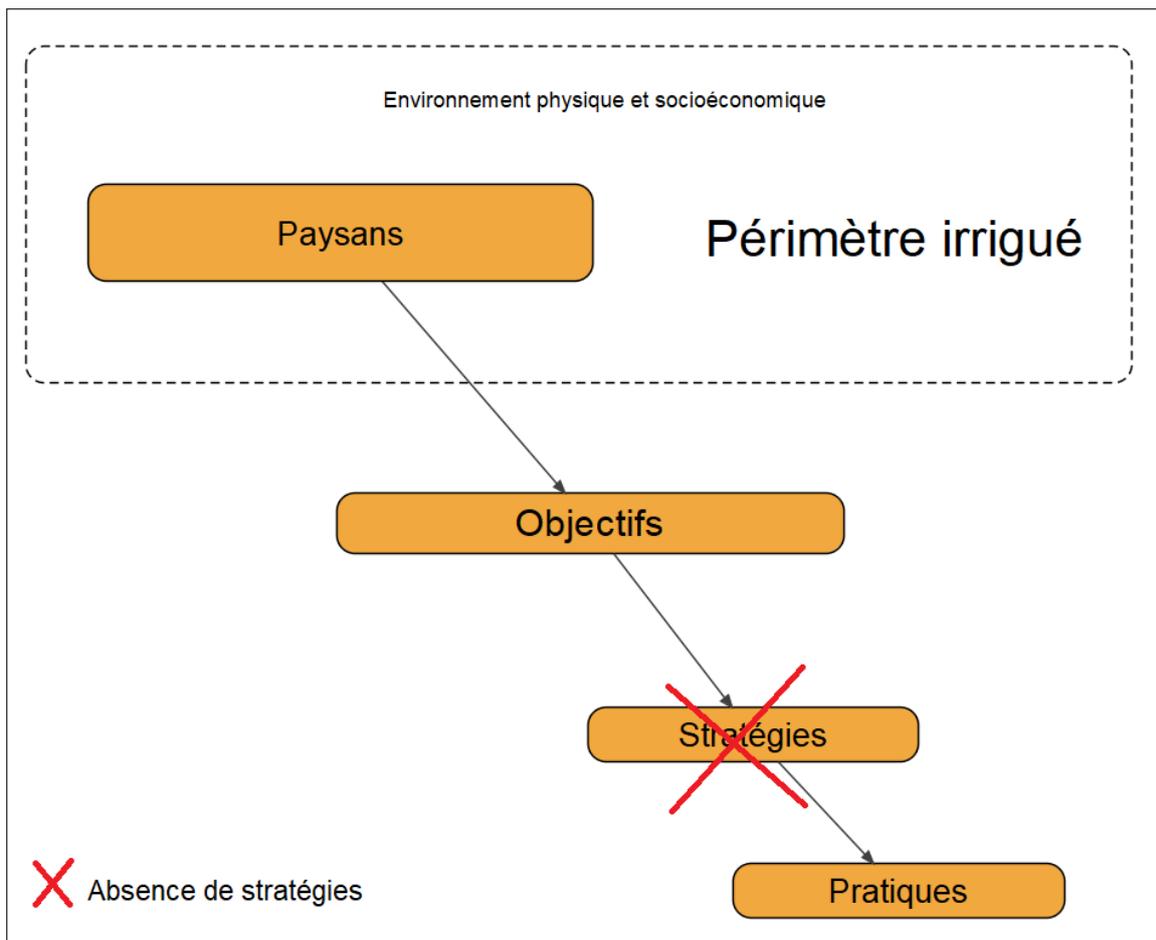


SCHÉMA 6.1 – Système agricole paysan des PIP et PIV du Gorom-Lampsar - inspiré de KIELEN (1996)

Un périmètre agricole est géré par un ensemble de décisions individuelles. Les objectifs de l'agriculture sont basés sur les besoins. La façon dont cet objectif est atteint dépend des connaissances et de l'expérience des agriculteurs, ainsi que des contraintes internes et externes de l'agriculture. La manière dont un agriculteur tente d'atteindre ses objectifs sera considérée comme une pratique. À partir de cette pratique, un certain nombre d'activités et de processus sont initiés et mis en œuvre (KIELEN, 1996). La salinité et la sodicité peuvent être considérées comme une contrainte, ou un danger, qui limitent la réalisation des objectifs des agriculteurs ou limitent l'organisation de la production pour atteindre les objectifs paysans. La salinité/sodicité⁽¹⁾ n'est pas une contrainte irréversible ni un danger inévitable, elle dépend des perceptions des agriculteurs (KUPER, 1997)

6.1. Perception, indicateurs et pratiques dans un contexte de salinité

La notion de perception en sciences géographiques est la fonction par laquelle l'esprit se représente des objets en leur présence, elle apparait comme une composante de la représentation dont elle se diffère (DUPRÉ, 2006). C'est un vrai outil pour expliquer les phénomènes géographiques puisqu'elle est une métastructure individuelle, et parfois spatiale, à laquelle l'individu affecte une valeur qualitative. Par conséquent, dans un contexte de salinité, pour évaluer les pratiques de gestion actuelles, il convient de comprendre les perceptions et d'interroger les différentes pratiques.

Une stratégie de gestion de la salinité est le choix d'un ensemble de pratiques entreprises par l'agriculteur pour s'adapter au milieu salin afin de diminuer le sel et maximiser le rendement d'une part, et d'autre part de capitaliser les connaissances (« *technologies traditionnelles* ») issues de la perception. Cette perception dépend des moyens de production des connaissances acquises par l'agriculteur au fil du temps. Elles impriment un processus décisionnel (Figure 6.2).

Dans les PIP et les PIV du Gorom-Lampsar , le cadre de gestion de la salinité montre l'existence de pratiques de gestion individuelles et non un cadre opérationnel de gestion.

(1). On parle, à cette échelle du périmètre agricole, de salinité/sodicité car les formes de salinité y coexistent (les sols sont salins et sodiques). Les paysans ne voient de différence entre ces formes de salinité, pour eux c'est tout simplement salé

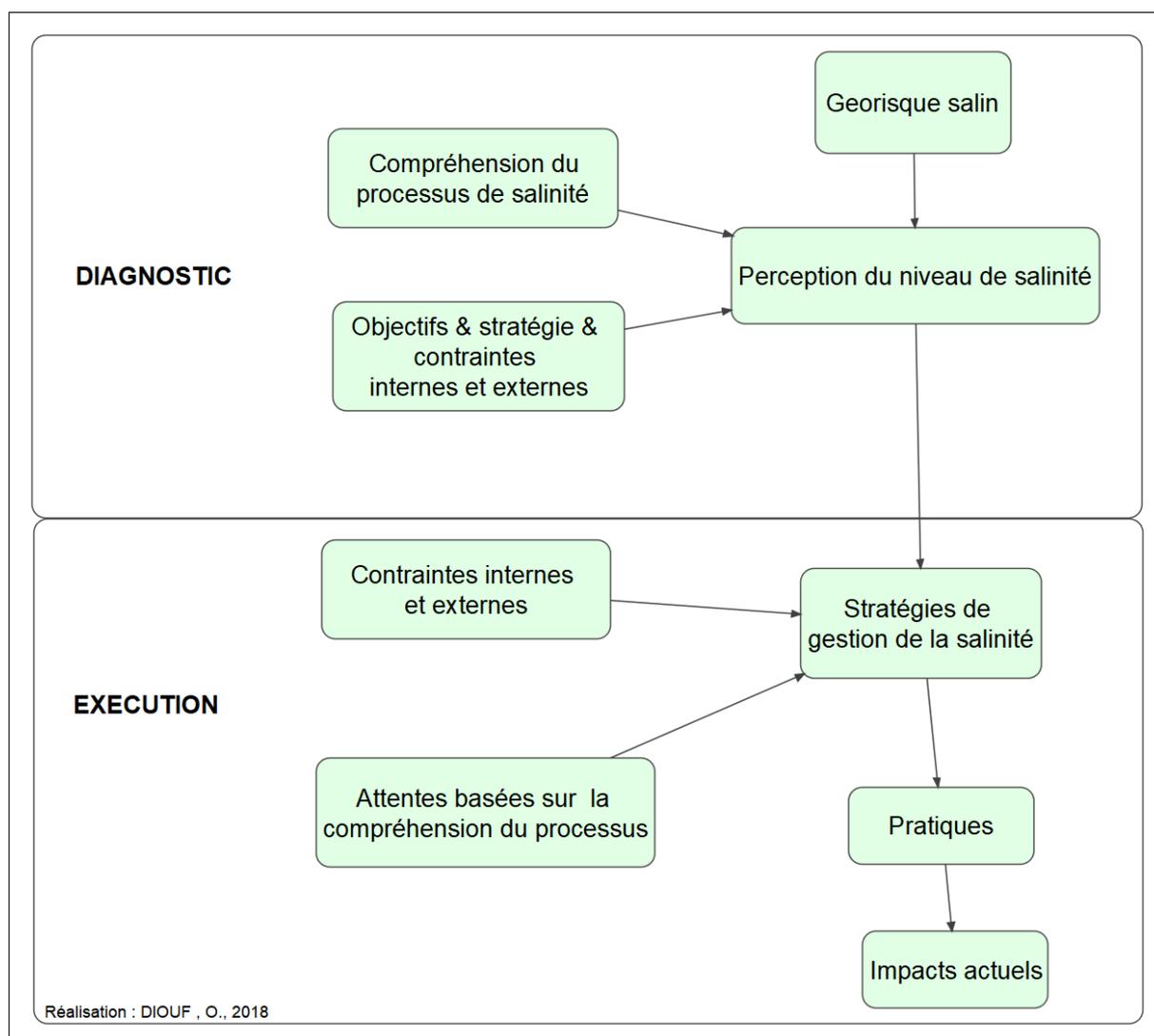


SCHÉMA 6.2 – Processus décisionnel pour définir une pratique de gestion

6.1.1. La démarche sur le terrain

Partant de cette réflexion, notre recherche passe donc par une démarche qualitative qui privilégie le raisonnement subjectiviste et l'induction. Pour atteindre cet objectif d'étude, des entretiens semi-directifs et des enquêtes ont été conduits dans le but de recueillir des informations sur la perception de la salinité/sodicité et sur les pratiques et stratégies de gestion de la salinité/sodicité.

Tableau 6.1 – Données collectées pour comprendre la gestion de l’irrigation et de la salinité dans le Gorom-Lampsar

Données	Méthodes de collecte	Échantillon
Caractéristiques des parcelles agricoles	Enquêtes	155 Paysans
Pratiques d’irrigation	Observations de terrain, enquêtes	155 Paysans
Pratiques culturales	Observations de terrain, enquêtes	155 Paysans
Développement des cultures	Observations de terrain, enquêtes	155 Paysans
Salinité des sols	Échantillons de sol	71 Échantillons
Gestion opérationnelle de la salinité	Interviews, enquêtes	45 personnes (OP, GIE, UH,)

Ce tableau de données intègre également les mêmes informations des échantillons de sols utilisés dans le précédent chapitre. La collecte de ces données s’est déroulée sur les 3 premières années de thèse. Nous avons rencontré et enquêté 155 paysans dans la zone d’étude y compris les 45 personnes appartenant à des OP et des UH.

6.1.2. Les indicateurs de reconnaissance de la salinité

Les agriculteurs utilisent un certain nombre d’indicateurs pour identifier les sols salés. Ces indicateurs pourraient jouer un rôle important dans la gestion de la salinité. Chaque indicateur concerne soit le sol, soit les cultures et a une signification; et la combinaison des deux qui permettent aux agriculteurs de classer leurs sols. Pour bien comprendre la perception des agriculteurs sur la salinité et la sodicité, il est utile d’explorer les termes qu’ils utilisent pour indiquer certains types de salinité et de sodicité dans le sol. Les agriculteurs ont défini quatre unités de salinité/sodicité pour distinguer les différents types et niveaux de sols salins, sodiques. Les agriculteurs n’utilisent pas les termes de manière cohérente, mais en général, la plupart des agriculteurs s’accordent sur la classification suivante :

1. Les sols présentant une surface blanchâtre (photo 6.1)
2. Les sols qui ne présentent que quelques traces de croûte blanche et noire (photo 6.3),
3. Les sols qui ont une apparence noire et qui sont durs dans la couche supérieure (figure 6.2),
4. Les sols argileux assez meuble dans la partie supérieure



PHOTO 6.1 – Efflorescences salines sur une surface irriguée - Cliché DIOUF, O. 2018



PHOTO 6.3 – Apparences sodiques et salines sur les bords d'un cours d'eau - Cliché DIOUF, O. 2018



PHOTO 6.2 – Efflorescences sodiques sur une surface irriguée - Cliché DIOUF, O. 2018



PHOTO 6.4 – Apparences sodiques - Cliché DIOUF, O. 2018

Le tableau suivant montre les indicateurs et les explications qu'en font agriculteurs :

Tableau 6.2 – Les indicateurs et leurs significations dans le Gorom-Lampsar - (Source : Entretiens)

Indicateurs	Explications
Fissures dans le sol après irrigation	Cela arrive si le sol a une mauvaise structure
Une texture blanche des sols	C'est la première manifestation de la salinité. Elle apparaît une fois les sols exploités puis abandonnés
Apparence noire du sol	Quand le sol a une apparence noire, cela veut dire que la salinité est encore plus sévère
Sols argileux meuble en surface	Cela arrive quand les sols non exploités enregistrent d'énormes taux d'évaporation
Problème de croissance des cultures	Cela montre les impacts des sels sur la couleur des feuilles des plantes

Sur la base de ces indicateurs de salinité, il est déjà possible de relier les types de sol des agriculteurs à la salinité liée aux problèmes :

Tableau 6.3 – Les indicateurs et les types de salinité dans le Gorom-Lampsar

Indicateurs	Nom	Problèmes
Efflorescence saline sur la croûte	« <i>Khorom</i> »	Salinité
Efflorescence et couleur blanche	« <i>Khorom</i> »	Salinité
Couleur noire du sol + Retard de croissance	« <i>Khorom</i> »	Sodicité
Structure meuble du sol	« <i>Khorom</i> »	Sodicité
Croute et/ou texture meuble du sol + couleur noire	« <i>Khorom</i> »	Salinité/Sodicité

Les paysans utilisent des indicateurs différents, mais n'utilisent qu'un seul terme « *Khorom* »⁽²⁾ pour caractériser le type de salinité. Ces indicateurs permettent de faire le lien entre la perception et les pratiques agricoles. C'est en fonction des indicateurs que les paysans adoptent leurs pratiques pour gérer la salinité ou la sodicité des sols. Cependant, nos données dans cette étude ne nous permettent pas faire la correspondance entre les données et les réponses des agriculteurs.

(2). « *Khorom* » ou « *Xorom* » (en alphabet local) signifie « sel » en langue Wolof

ENCADRÉ 6.1 – Salinité et durabilité des agroécosystèmes

Selon la définition de la durabilité, la salinité et la sodicité doivent être considérées comme un processus de dégradation de l'environnement sur lequel l'action des agriculteurs peut influencer. L'approche de l'agroécosystème a affiné cette idée en nommant les agents par lesquels les nutriments, et donc les sels, peuvent entrer ou sortir de l'écosystème. En prenant le périmètre irrigué comme unité de base pour l'analyse et en utilisant l'approche du système agricole paysan comme outil d'analyse, a permis de placer toutes les activités des agriculteurs dans le contexte suivant : un agriculteur en tant que décideur individuel, qui tente de réaliser les objectifs globaux de son agriculture, dans les limites des possibilités et des contraintes de son système de production. L'utilisation de deux concepts théoriques (concepts d'écosystème agricole et de systèmes agricoles paysans) a permis de définir un concept expliquant le processus de prise de décision d'un agriculteur, qui explique également la manière dont les agriculteurs élaborent une stratégie pour gérer la salinité et la sodicité dans leurs exploitations. Ce cadre conceptuel était un outil pratique pour tenter de comprendre pourquoi les agriculteurs gèrent la salinité et la sodicité d'une certaine manière. Cela a placé la question de la salinité et de la sodicité dans les objectifs, les stratégies et les contraintes de l'agriculture mondiale. Le concept a également permis de mieux comprendre comment un agriculteur, en tant que décideur individuel doté d'une vision personnelle des processus de salinité/de sodicité, essaie de gérer la salinité et la sodicité de son système agricole et comment il parvient à définir une stratégie particulière.

Source : KIELEN (1996) : *Farmers' Perceptions on Salinity and Sodicity*

6.2. Les pratiques de gestion dans le Gorom-Lampsar

Cette partie repose sur l'exploitation des données de terrain (Enquêtes et interviews). Afin de mettre en œuvre leurs pratiques visant à prévenir, réduire ou atténuer les effets de la salinité, les agriculteurs disposent de nombreuses pratiques. À partir des entretiens semi-structurés et des questionnaires, une liste de pratiques pourrait être extraite. Dans le graphique ci-dessous, les mesures sont regroupées en fonction de la pratique qu'elles servent. Un groupe contient les pratiques de gestion hydrauliques. Ces pratiques concernent le système d'irrigation et vont permettre une réduction de la salinité du sol ou empêchent seulement une augmentation de la

salinité/de la sodicité du sol. Le deuxième groupe est constitué des mesures agronomiques qui atténuent l'effet de la salinité sur la croissance des cultures et augmentent les rendements. Ces mesures ne visent principalement pas à réduire la salinité/la sodicité du sol, mais à prévenir les baisses de rendement ou les pertes financières. De plus, les pratiques sont regroupées en fonction du type de mesure. Certaines pratiques impliquent un ajustement de la gestion de l'irrigation, tandis que d'autres sont liées au choix des cultures, aux modifications chimiques ou biologiques ou aux améliorations mécaniques. Dans le Gorom-Lampsar, les paysans n'utilisent pas une stratégie de gestion, mais la combinaison de plusieurs stratégies.

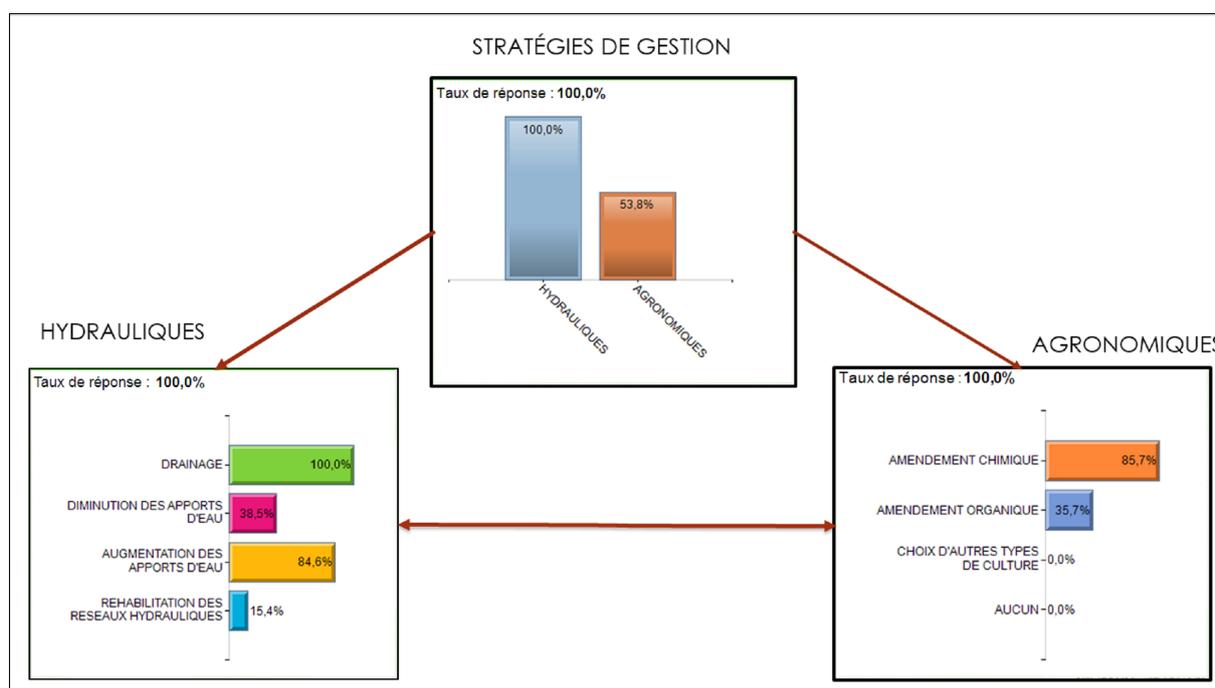


FIGURE 6.1 – Les pratiques de gestion de la salinité

Globalement, la gestion locale de salinité devrait permettre de :

- réduire la salinité des sols
- prévenir, les taux de salinité énorme
- atténuer les effets de la salinité/de la sodicité sur la croissance des cultures
- augmenter le rendement des cultures

Mais les paysans du Gorom-Lampsar sont eux plus préoccupés par les résultats dans l'immédiat que sont la réduction du sel et l'augmentation des rendements (figure 6.2). Ils sont moins préoccupés par la prévention taux de salinité extrêmes sur leurs cultures.

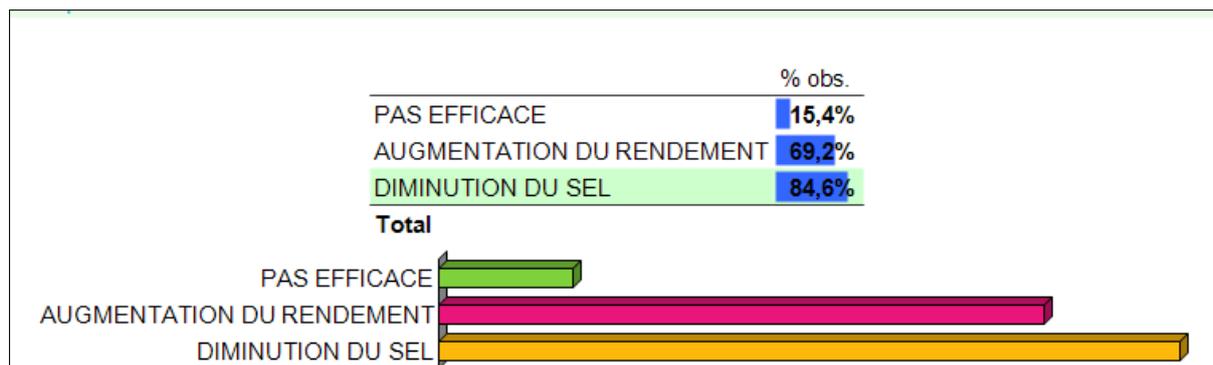


FIGURE 6.2 – L'impact des pratiques selon les agriculteurs - (Enquêtes de terrain)

6.2.1. Les pratiques de gestion hydrauliques

Elles concernent toutes les options de génie rural et managériales, principalement mises en œuvre par les gestionnaires à l'échelle du système d'irrigation. Le drainage naturel dans certains milieux peut s'avérer suffisant pour évacuer les eaux et sels excédentaires dans certaines conditions d'aquifères perméables, de pente suffisante ou d'extension limitée des superficies irriguées (MARLET et JOB, 2006). Mais lorsque la nappe atteint une position subaffleurante ou la pente très faible, le recours au drainage (utilisé par 100% des agriculteurs) devient indispensable afin de s'affranchir des contraintes liées à l'engorgement et à la salinité. Sur l'ensemble de son parcours dans le Delta, la pente moyenne est de 0,006 ‰, (F.-X. COGELS, 1994); ce qui complique la viabilité de réseaux de drainage.

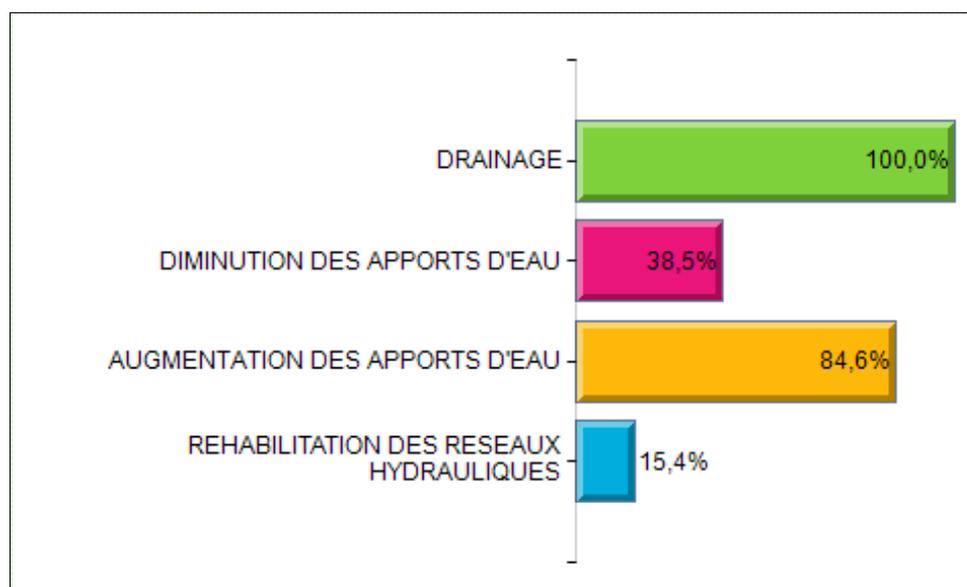


FIGURE 6.3 – Pratiques de gestion hydrauliques dans le Gorom-Lampar - (Enquêtes de terrain)

✓ *Le « drainage » est la première pratique de lutte*

La première condition nécessaire au contrôle de la salinité est l'apport de volumes d'eau excédentaires, pluie ou irrigation, permettant de lessiver les sels au-delà de la zone racinaire. La figure 6.3 montre une utilisation à 84,6% par les agriculteurs. L'un des paramètres de qualité les plus importants pour l'eau d'irrigation est la salinité. L'un des moyens pour venir à bout des problèmes de salinité est d'épandre suffisamment d'eau pour garantir l'entraînement des sels au-dessous de la zone de racines. Ce phénomène est appelé lixiviation.

Le Gorom-Lampsar a connu une profusion d'aménagements privés à la fin des années 1980 qui s'est poursuivie spectaculairement dans la décennie 1990 pour atteindre et dépasser de loin les aménagements publics. Un recensement fait par la SAED en 2009 indique que les aménagements privés représentent 66,94% des surfaces emblavées en riziculture dans le Delta sénégalais (CISSÉ, 2011 ; SAED, 2014). La quasi-totalité des PIP est dépourvue de réseaux de drainage. C'est pourquoi il est inapproprié de parler de drainage au niveau des PIP. Il n'y a aucune installation de drainage superficielle ou souterraine. Les fossés d'assainissement qui recueillent les eaux de surface et les déversent dans un drain collecteur et les aménagements topographiques qui facilitent l'écoulement des eaux vers les fossés sont inexistantes. Il serait mieux, dans ce cas précis d'employer, le mot vidange (photo 6.5).



PHOTO 6.5 – Méthodes de drainage des PIP

Les pratiques les plus courantes pour la vidange des eaux excédentaires consistent à :

- utiliser les canaux d'irrigation pour évacuer les eaux de drainage. Cette pratique est risquée, car les canaux d'irrigation se situent un peu en hauteur par rapport aux parcelles. Le mouvement ascendant des eaux dans ce cas est très lent et la parcelle n'est jamais vidée totalement ;

- créer une petite tranchée dans les parcelles pour y rabattre les eaux. Ensuite, un passage est créé sur une diguette pour évacuer l'eau dans la nature. Selon la position des parcelles, il arrive que les eaux de certaines parcelles transitent dans d'autres parcelles pour se rabattre en contrebas du PIP.

Ces rejets d'eaux de drainage dans les axes hydrauliques, au niveau des dépressions et aux abords des périmètres privés ont constitué un problème éminemment environnemental causant l'accroissement des superficies salées. L'accroissement des surfaces emblavées explique (plus de 100.000 ha/an) (SAED, 2009) explique les importants volumes rejetés. En se basant sur la méthode de calcul du bilan hydrique, ces quantités rejetées sont estimées à 42844088 m³/campagne dans les périmètres publics et 79493400 m³ dans les périmètres privés (CISSÉ, 2011). Les épandages de ces eaux de drainage dans les dépressions, les cours d'eau, etc. (Photo 6.6), tel qu'ils se produisent actuellement constituent un risque bien réel pour les écosystèmes récepteurs, pour la santé des populations et du cheptel. Cette problématique attire de plus en plus l'attention des environnementalistes.



PHOTO 6.6 – Rejets des eaux de drainage - Cliché : DIOUF O. 2018

On constate aujourd'hui une utilisation anarchique de l'eau à travers une politique d'aménagement mal maîtrisée, un mauvais contrôle des rejets agricoles (pesticides et nitrates) pourrait, au-delà de cet abandon des terres, causer la destruction de l'équilibre fragile de la zone (A. DIA, 1986).

✓ *Des pratiques hydrauliques sources de pollution*

Le Gorom-Lampsar est aujourd'hui caractérisé par le développement anarchique des zones d'épandage d'eaux polluées et de surfaces abandonnées. Le problème est complexe, la situation est devenue préoccupante, faute d'un système d'évacuation adéquat, ce qui fait qu'il faut voir dans le détail l'évacuation de ces eaux (A. KANE, 1997). Les paysans parlent de réhabilitation des réseaux d'irrigation (15,5%). Il s'agit de réseaux vétustes, souvent débouchant sur les parcelles abandonnées qui reçoivent les eaux usées.



PHOTO 6.7 – « Canal de drainage » dans un PIP - Cliché : DIOUF O. 2018

Les pratiques hydrauliques dans le Gorom-Lampsar sont dans un contexte vraiment paradoxal. Tous les paysans parlent de drainage alors que les usées ne sortent pas des parcelles agricoles. Dans ces conditions, on préfère parler de vidage et non de drainage. Ce vidage pose aujourd'hui d'énormes problèmes sur la qualité de l'eau d'irrigation dont la connaissance est indispensable en agriculture. Une eau de mauvaise qualité risque de nuire à la vitalité des cultures et d'abaisser la production agricole. La qualité de l'eau d'irrigation peut être mieux déterminée par une analyse chimique en laboratoire. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont les suivants :

- le pH
- la conductivité électrique (Salinité)
- le risque de Sodium (Degré d'Adsorption du Sodium ou SAR)
- les carbonate et bicarbonates en relation avec les teneurs en Ca et Mg

L'analyse physicochimique des eaux faite par la SAED (2009) montre les paramètres suivants : l'acidité (pH), la salinité (CE) et les ions majeurs. Les anions mesurés sont : le bicarbonate (HCO_3^-), le chlorure (Cl^-), le nitrate (NO_3^-) et le sulfate (SO_4^-). Les cations déterminés sont le sodium (Na), le potassium (K), le magnésium (Mg) et le calcium (Ca).

Tableau 6.4 – Qualité des eaux d'irrigation dans le Delta du fleuve Sénégal (juillet et octobre 2008) SAED (2009)

pH	CE*	Anions en meq/l					Cations en meq/l					SAR
		HCO_3	Cl	NO_3	SO_4	Anions	Na	K	Mg	Ca	Cations	
6,5	55	0,40	0,05	0,02	0,02	0,50	0,09	0,03	0,12	0,22	0,46	0,21
6,6	90	0,60	0,23	0,01	0,04	0,88	0,30	0,03	0,24	0,23	0,80	0,06
7,5	80	0,51	0,57	NA	0,43	1,51	0,14	0,54	0,17	0,24	1,10	0,32
7,4	130	0,61	0,69	NA	0,60	1,89	0,30	0,06	0,24	0,32	0,91	0,56

Malgré les problèmes de drainage les eaux du delta du Sénégal restent neutres, les valeurs de pH tournent autour de 6 et 7. Les valeurs de conductivité électrique montrent que les eaux sont de bonne qualité d'irrigation (toutes $<500\mu\text{s}/\text{cm}$).

Le taux de salinité n'atteint pas encore des seuils inquiétants, mais, on peut craindre de fortes concentrations à moyen et long termes.

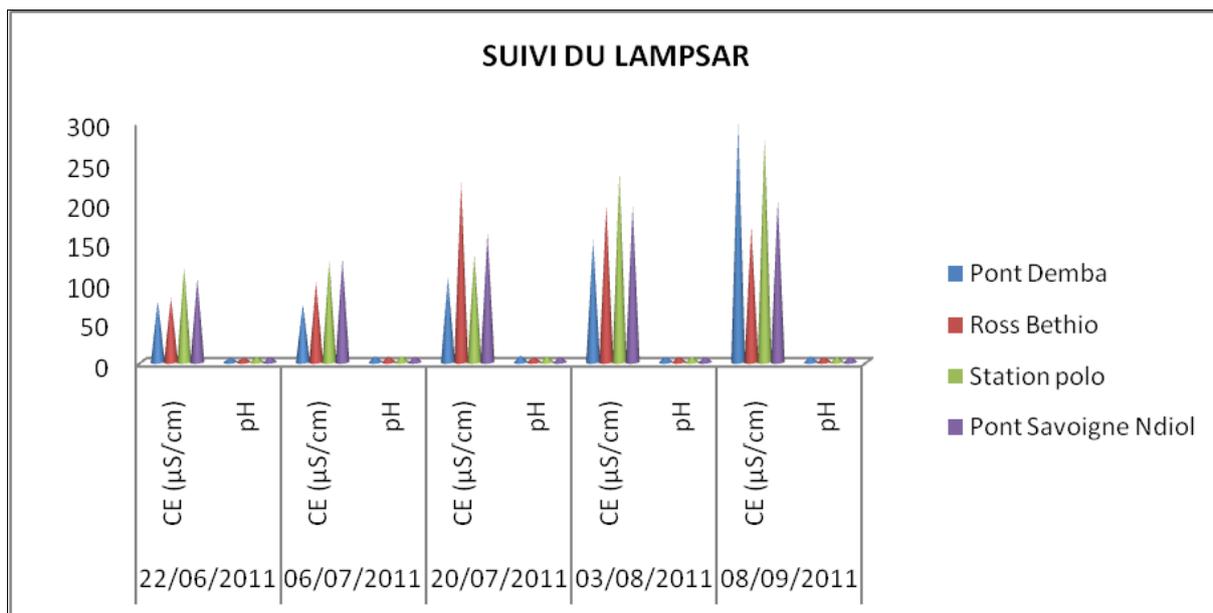


FIGURE 6.4 – Suivi des eaux du Lampsar - (Source SAED)

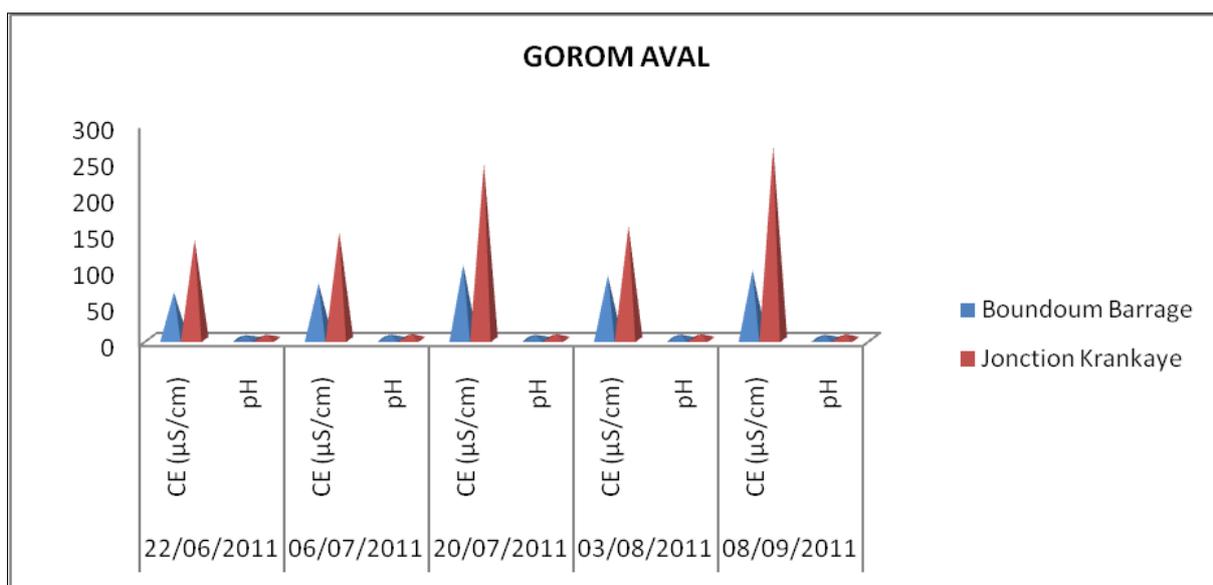


FIGURE 6.5 – Suivi des eaux du Gorom Aval - (Source SAED)

Globalement, les eaux du Gorom-Lampsar restent de bonne qualité (figures 6.4 et 6.5), mais un gros travail reste à faire pour maintenir ce seuil. Aujourd’hui les paysans se préoccupent plus de la productivité des terres que de la qualité des eaux. Les méthodes agronomiques telles que le phosphogypse sont appliquées au point que les cultures ont d’énormes nuisances à la fois sur l’eau, sur l’environnement et sur la santé des populations.

6.2.2. Les pratiques de gestion agronomiques

Dans le Gorom-Lampsar ces pratiques sont moins utilisées que celles citées précédemment. Elles concernent l'ensemble des options entreprises à l'échelle de la parcelle et sur la culture. Les amendements chimiques (82,4%) et organiques (29,4%) sont utilisés et leurs impacts, selon les agriculteurs, sont réels; sur la salinité, mais encore plus sur le rendement agricole. Ces amendements sont toutefois coûteux et leur efficacité limitée en raison du fort pouvoir tampon exercé par le sol (MARLET et JOB, 2006). Tirer le meilleur parti de ces amendements suppose une amélioration de l'ensemble des pratiques de gestion de la salinité pour prévenir toute nouvelle dégradation et valoriser l'augmentation attendue de la productivité des terres. En fait, les interventions biologiques sont souvent plus accessibles aux capacités des agriculteurs, et par conséquent plus efficaces. L'apport d'amendement organique permet d'améliorer les propriétés physiques des sols et de produire du CO₂ aux effets bénéfiques sur le pH des sols et la sodicité. Mais dans le Gorom-Lampsar, les agriculteurs n'y croient pas; pour eux, c'est l'application d'amendements chimiques qui fournit les meilleurs résultats.

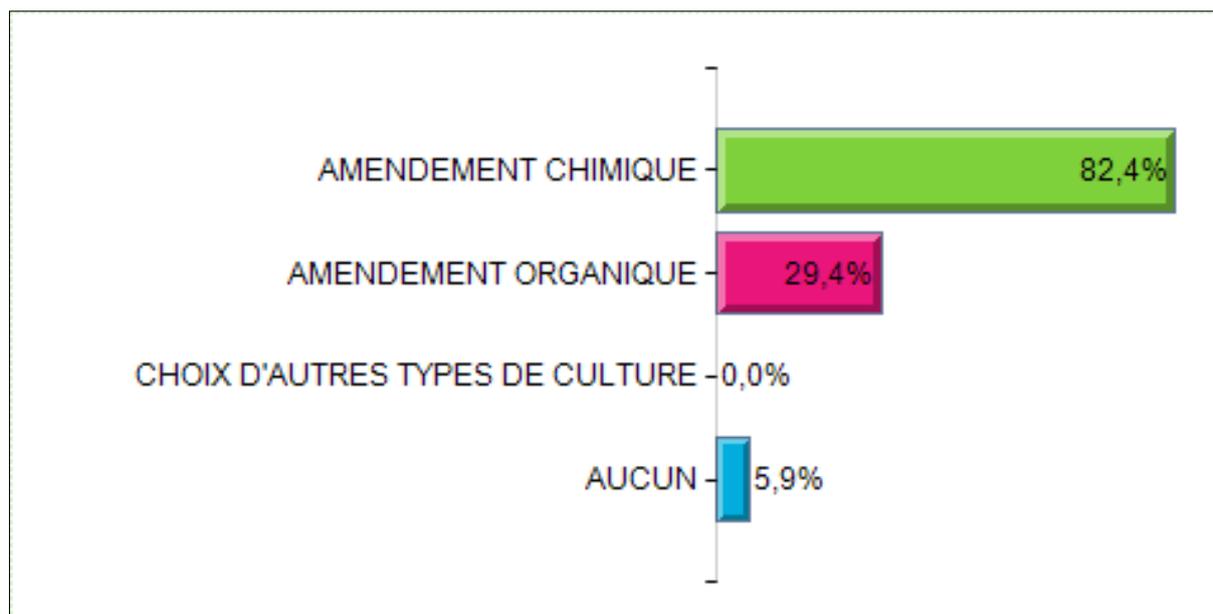


FIGURE 6.6 – Les pratiques de gestion agronomiques dans le Gorom-Lampsar - (Enquêtes)

Certains agriculteurs (5.9%) dépourvus de moyens pour se payer d'amendements chimiques préfèrent n'utiliser aucune pratique, car pour eux les amendements organiques n'ont aucun impact malgré les impacts négatifs de la salinité sur les cultures (figure 6.7).

La tolérance des cultures aux sels peut varier. Dans les cas de forte salinité du sol ou de salinité de l'eau d'irrigation dépassant 3 dS/m, il peut être nécessaire de cultiver des espèces végétales

plus tolérantes aux sels (PESCOD, 1992; TANJI et al., 2002). Les paysans du Gorom-Lampsar n'utilisent pas cette pratique, car ils ont une très longue tradition de la riziculture. On note une prédominance de l'utilisation du phosphogypse et des méthodes chimiques. Le phosphogypse est bien reconnu pour ses fonctions de restauration des terres salées. En effet, l'utilisation du phosphogypse sur les sols salés permet d'évacuer le sodium et de fixer le calcium sur le complexe, ce qui corrige la salinité/sodicité.

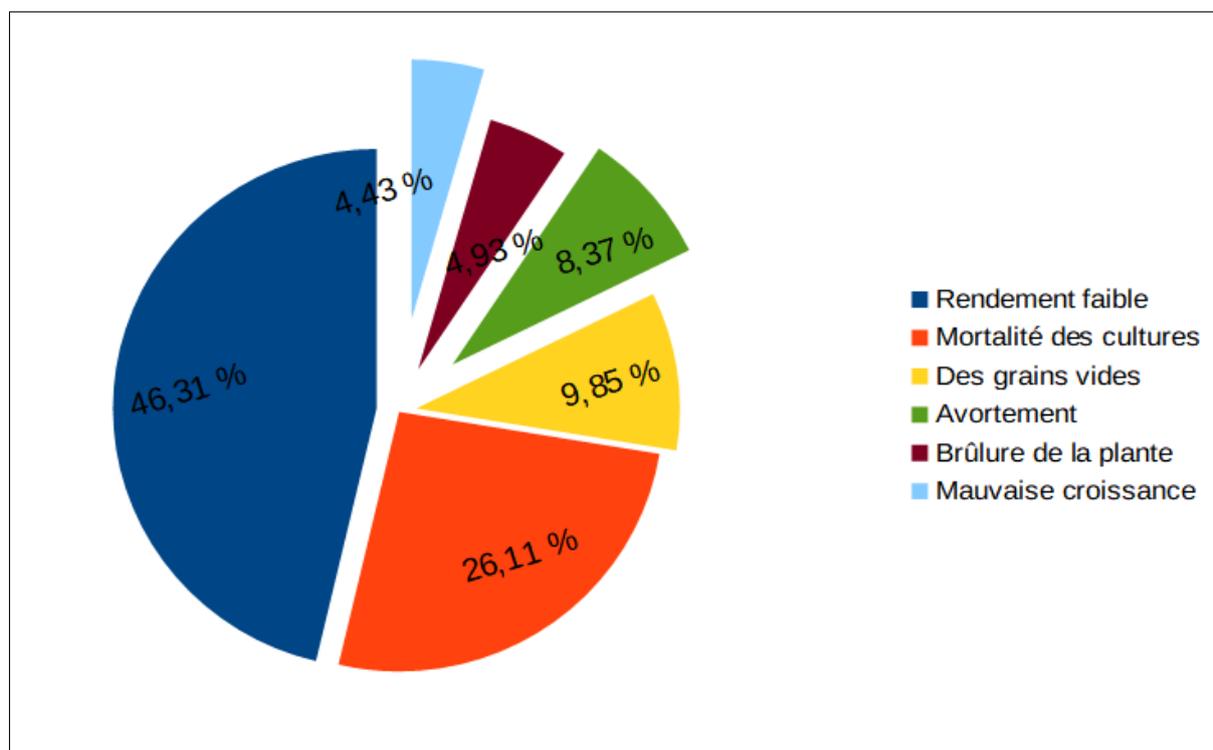


FIGURE 6.7 – Les impacts de la salinité sur les cultures - (Enquêtes)

Des programmes de « phosphogypage » ont été introduits dans le delta sans mesure d'accompagnement. Beaucoup de paysans ne maîtrisent pas le dosage approprié sur les cultures. La méconnaissance de la dose peut induire des dommages sur la plante et sur le sol. Pour ce qui est de la plante, l'application du phosphogypse sur les sols salés participe à la bonne croissance et au bon développement de la plante. Ce produit peut occasionner des brûlures des feuilles à cause de l'acidité si les doses ne sont pas respectées. Les producteurs n'ont confiance qu'à une seule méthode, il était difficile de croire le phosphogypse.

6.3. Discussion des résultats

✓ Plusieurs indicateurs et seul terme pour la salinité/sodicité

Les agriculteurs et les scientifiques utilisent souvent des langages différents pour décrire les mêmes phénomènes. Dans le contexte du Gorom-Lampsar, les paysans n'utilisent qu'un terme local pour décrire la salinité, mais plusieurs indicateurs tandis que les scientifiques parlent de salinité et de sodicité. Les paysans classifient la sodicité et la salinité du sol sur la base de l'apparence physique du sol et de l'effet de la salinité/de la sodicité sur la croissance des cultures, tandis que les scientifiques classeront la salinité/la sodicité du sol principalement sur la base du CE, du ESP, et pH. On note que les agriculteurs du Gorom-Lampsar ont une très bonne perception de la salinité des sols à travers ses indicateurs.

✓ La gestion de la salinité : une combinaison de pratiques

Dans le Gorom-Lampsar, il n'existe pas une voie unique pour le contrôle de la salinité, mais un ensemble de pratiques agronomiques et hydrauliques, combinées. Néanmoins les résultats de notre étude montrent la prépondérance de l'utilisation des pratiques hydrauliques (100%) dont le drainage qui est utilisé par pratiquement tous les paysans. Ce drainage est vraiment un transfert de problème, puisqu'il suppose le rejet des eaux usées hors des parcelles et dans ce contexte où les réseaux d'irrigation sont inexistantes, il se fait sur les parcelles abandonnées ou non exploitées (raison pour laquelle elles sont les plus salées). Les 53,8% des exploitants utilisent les pratiques agronomiques. La faiblesse de ce chiffre par rapport au chiffre hydraulique est dû au manque d'assistance de part de la SAED mais aussi au manque de moyens de se procurer d'amendements chimiques.

Un contrôle croisé est ensuite fait sur pratiques et leur efficacité quant à la diminution du sel et à l'augmentation du rendement puisque inventer des pratiques de gestion n'ont qu'un seul but : celui d'augmenter le rendement. Le croisement des variables « stratégies de gestion » et « efficacité de la stratégie » montre que le drainage augmente le rendement selon 69,2% des agriculteurs et diminue la salinité selon 84,6% ; ce qui montre le besoin de drainer l'eau hors des parcelles ; le sel est toujours dans les parcelles. Il montre également que l'augmentation des apports d'eau à la parcelle diminue plus le sel qu'il n'augmente le rendement.

Malgré ces efforts de gestion, la salinité demeure un gros problème pour les populations paysannes.

D'une façon générale, la gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar est fortement inhérente à la gestion de l'irrigation. Ces pratiques proposées ne diffèrent pas sensiblement de celles relevant d'une gestion efficace de l'irrigation en l'absence de contraintes spécifiques de salinité.

✓ Absence d'un cadre de gestion opérationnel de la salinité dans les PIP et les PIV

La gestion paysanne de l'irrigation requiert une instrumentalisation de la part de l'État. Ceci doit passer par la création d'un cadre de gestion opérationnel des périmètres irrigués afin d'inscrire la pratique de l'irrigation dans un cadre temporel (une réflexion stratégique, qui se situe en amont de la campagne d'irrigation et une réflexion tactique, qui se situe durant la campagne d'irrigation)(BERGEZ et al., 2008).

Dans ce contexte, l'État du Sénégal, travers la SAED doit, au-delà de l'appui technique et organisationnel aux organisations paysannes dans la conception, la réalisation et l'utilisation de leurs équipements et aménagements, mettre en place un cadre de gestion doté de systèmes d'informations afin que tous les paysans puissent décider ensemble de la gestion des périmètres. Ce cadre opérationnel n'est que conceptuel à travers la Base de données de la SAED (figure 6.3).

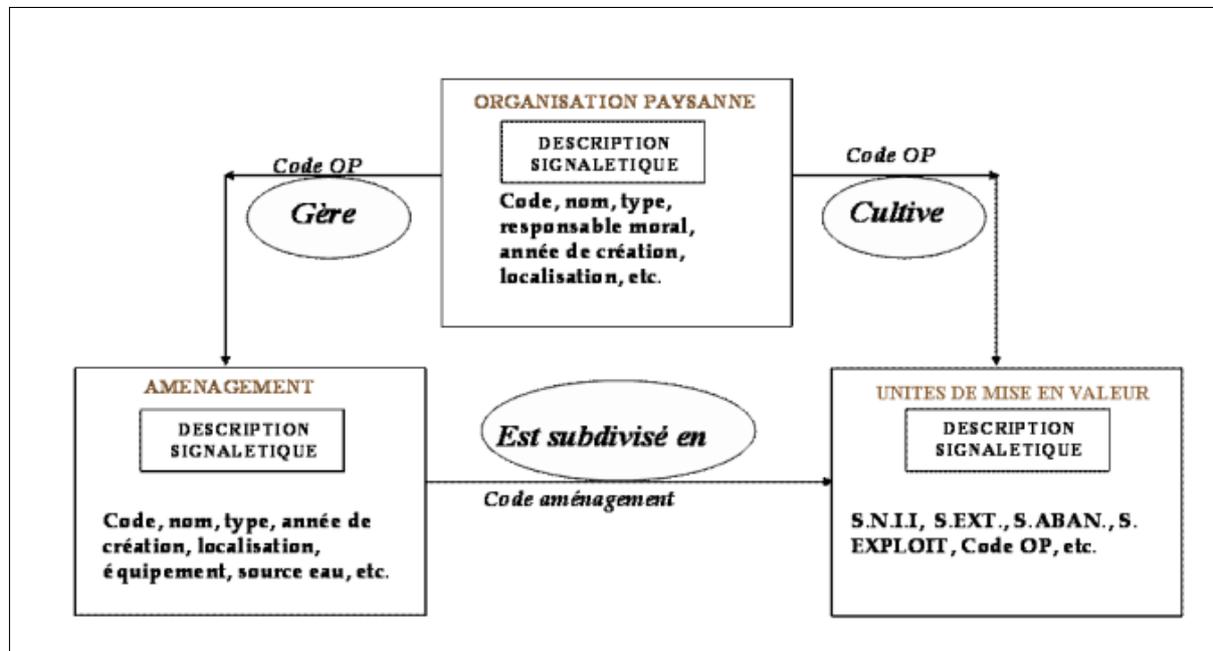


SCHÉMA 6.3 – Schéma conceptuel du cadre de gestion des périmètres - SAED (2009)

Les Aménagements Hydroagricole (AHA)⁽³⁾ sont gérés par les Organisations paysannes

(3). Un AHA regroupe les périmètres irrigués, les cours d'eau à savoir le fleuve Sénégal et ses adducteurs (affluents/défluent), les ouvrages hydrauliques, les axes de drainage, les stations de pompage, etc. Chaque AHA est dominé par une et une seule station de pompage (fixe ou mobile) ou ouvrage hydraulique

(OP) (des regroupements de paysans) qui exploitent des Unités de Mise Valeur (UMV). Dans le Gorom-Lampsar l'absence de cadre de gestion de la salinité est premier élément relaté par nos enquêtés. L'analyse chronométrique des données d'entretien montre la prépondérance des réponses sur les impacts de la salinité, le manque d'assistance de l'État et les questions de rendement agricoles (figure 6.5). Ces données montrent aussi à quel point les paysans se soucient des impacts de la salinité sur leur rendement.

Tableau 6.5 – Léxicométrie des données d'entretien

Thématiques	Int.	Mots	% (réponses)	Moy.	Max.	R/Q	Q/min	Mots/Min
Impacts de la salinité sur le rendement	3	86	85,1%	28,7	45	5,73	2,73	147,4
Impacts de salinité sur les sols	1	17	65,4%	17,0	17	1,89	1,20	22,7
Méthodes agronomiques	5	81	66,4%	16,2	23	1,98	3,57	90,0
Assistance de la SAED	2	30	66,7%	15,0	20	2,00	1,40	26,1
Rendement	6	140	79,1%	23,3	45	3,78	2,33	77,1
Réseaux de drainage	4	40	36,7%	10,0	21	0,58	2,82	60,0
Techniques agricoles	6	94	58,0%	15,7	23	1,38	1,92	49,5
Non Assistance de la SAED	11	171	55,0%	15,5	41	1,22	2,81	89,2
Total	20	321	61,4%	16,1	45	1,59	2,31	167,5

Globalement, dans le Gorom-Lampsar, la salinité résulte souvent moins d'une baisse appréciable des rendements (et a fortiori d'un abandon des terres agricoles qui reste limité à quelques situations où la viabilité des exploitations n'est pas garantie), que de causes indirectes comme : une augmentation des coûts de production (eau, engrais, semences, travail...); un choix de culture limité aux cultures tolérantes souvent moins rentables; et, in fine, une baisse de revenu des exploitations.

Faut-il rappeler l'importance du problème? Selon la FAO chaque année, les surfaces aménagées abandonnées à cause de mauvais entretien sont égales aux surfaces nouvellement aménagées. Les petits périmètres n'échappent malheureusement pas à cette loi. Le pilotage de l'irrigation et l'entretien des périmètres irrigués, dans un cadre opérationnel, doivent porter sur trois points principaux :

- celui de l'ensemble des infrastructures : les réseaux d'irrigation et de drainage, comme les systèmes de protection du périmètre et du captage de l'eau, à savoir digues, barrages et prises d'eau;
- celui de la machinerie de pompage en particulier;
- celui des parcelles et des sols.

Conclusion du chapitre 6

Les connaissances traditionnelles de perception passent sous le silence des institutions de développement et de recherche scientifique (KIELEN, 1996; KIJNE, 1998; KUPER, 1997), c'est le cas dans le Gorom-Lampsar où les paysans, dans ce contexte de salinité et de sodicité se représentent les phénomènes à travers des indicateurs. Ces derniers orientent leurs choix de gestion individuelle mis en œuvre. Dotés de peu de moyens dans un système paysan dépourvu de réseaux d'irrigation, mal formés aux techniques agricoles, ces paysans subissent le résultat de la mise en place d'un territoire de l'eau inaboutie. La SAED, à travers ses politiques agricoles doit non seulement dotés ces périmètres de réseaux d'irrigation adéquats, mais aussi renforcer l'appui technique à travers la formation et la sensibilisation.

Malgré ces difficultés, ces périmètres contribuent de manière significative à la production rizicole dans le Delta.

Aujourd'hui, la salinisation des sols dans le Gorom-Lampsar pose dans un autre schéma la question de la conservation et de la durabilité des sols. L'exploitation durable des sols passe par une bonne gestion de sa fertilité. Et la dégradation des sols par salinisation entraîne une baisse de cette fertilité. Le maintien de la fertilité des sols passe aussi par une bonne politique d'aménagement et de gestion des ressources que doit mener la SAED et les populations paysannes pour pérenniser ces agroécosystèmes.

PERSPECTIVES D'AMÉNAGEMENT ET DE GESTION DURABLE DES RESSOURCES

Sommaire

7.1	Pourquoi une bonne gouvernance de l'eau dans les « territoires salés » de l'eau ?	198
7.1.1	La nécessité d'une bonne gouvernance de l'eau pour la salinité dans le delta du fleuve Sénégal	200
7.1.2	La gestion de l'eau : entre logique individuelle et intérêt collectif . . .	201
7.1.3	La charte du domaine irrigué doit être appliquée sous le contrôle strict de la SAED	204
7.2	La formation à la gestion des systèmes irrigués	205
7.2.1	Le renforcement de la formation agricole	206
7.2.2	La gestion stratégique et opérationnelle de l'irrigation doit être une préoccupation majeure	206
7.3	Des outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion des terres salées . .	210
7.3.1	Le suivi des propriétés des sols : mesure <i>in-situ</i> et télédétection	211
7.3.2	Un périmètre agricole : un schéma, une carte	211
	Conclusion du chapitre 7	212

Dans ce dernier chapitre, nous estimons utile de formuler un certain nombre de propositions d'aménagement dans la perspective de mieux rentabiliser les investissements consentis dans le secteur agricole et de préserver les ressources deltaïques, supports essentiels du développement. Les défis à relever sont nombreux et variés. Ces propositions d'aménagements sont formulées grâce aux résultats obtenus dans cette thèse, mais aussi

grâce aux nombreuses discussions sur le terrain et avec les agents de la SAED durant nos stages de recherche. De ces résultats et ces entretiens ressort l'idée fondamentale de ce chapitre et nous montrent que la gestion de la salinité se confond avec celle de la gestion de l'eau et des terres agricoles. En effet, l'approche l'étude de la salinité par le « territoire de l'eau » a montré que la salinité présente dans les périmètres est également l'effet d'une mauvaise gestion des apports d'eau mais aussi celui d'un drainage insuffisant. La gestion de la salinité nécessite une méthode appropriée permettant à la fois de comprendre les processus impliqués et d'évaluer les décisions à adopter en matière de gestion et de planification de la ressource en eau.

Une meilleure gestion de la salinité des sols dans les périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal nécessite :

- 1 Une bonne gouvernance de l'eau par la mise en œuvre d'un dispositif pérenne complémentaire pour l'analyse des performances des usagers et gestionnaires de l'eau et un suivi des sols, et l'application d'un certain nombre de textes réglementaires (la Charte du Domaine Irrigué (CDI) par exemple).
- 2 Une gestion opérationnelle et stratégique dans les périmètres qui permettrait aux paysans du delta du Sénégal de renforcer leur formation à la gestion de leurs périmètres.
- 3 Des méthodes appropriées de quantification des sols salés, ceci passe inévitablement par l'établissement de dispositifs d'outils d'aide à la décision.

7.1. Pourquoi une bonne gouvernance de l'eau dans les « territoires salés » de l'eau ?

La gouvernance comprend des mécanismes, processus et institutions complexes, à travers lesquels les citoyens et leurs groupes articulent leurs intérêts, exercent leurs droits juridiques, s'acquittent de leurs obligations et négocient leurs différences. Les acteurs impliqués ne sont donc pas seulement issus des pouvoirs publics, mais également de la société civile et du secteur privé. La gouvernance de l'eau détermine qui peut avoir, quand et comment, droit à l'eau et aux services connexes. Cela comprend les règles politiques, institutionnelles et administratives, les pratiques et les processus (formels et informels), les coutumes et croyances, au travers desquels les décisions sont prises et mises en œuvre, les parties prenantes expriment leurs intérêts et ceux-ci sont pris en compte, et les décideurs sont tenus redevables de la gestion des ressources

d'eau et des services publics d'eau.

Depuis quelques années, le terme de gouvernance, une des expressions les plus utilisées du vocabulaire sociopolitique contemporain, est souvent associé au concept de développement durable lorsqu'il s'agit de politique de l'eau (PETIT, 2004). Aujourd'hui, la gouvernance de l'eau en agriculture alimente beaucoup les débats sur la scène internationale, tellement l'enjeu est de taille, car il existe de vives concurrences entre les différents usages de l'eau (agriculture, industrie, collectivités, loisirs, etc.) qui font que la pression sur la ressource est inquiétante. Très vite, les grandes rencontres internationales mettent l'accent sur la problématique de l'eau dans le monde.

En janvier 1992 à Dublin la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement met l'accent sur la rareté de l'eau douce, son unicité et formule des principes directeurs qui vont influencer l'ensemble des politiques publiques de l'eau. Puis, la Conférence de Rio de Janeiro ⁽¹⁾ qui elle, prône une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).

Sur le plan agricole, c'est la Déclaration de Turin de 1999 qui a fait de la gestion de l'eau pour l'irrigation une priorité dans ses plans d'action.

La conférence de Johannesburg (Rio + 10) de 2002 met en avant la priorité donnée aux ressources naturelles aux fins du développement économique et social. Le développement durable exige une gestion des ressources naturelles durable et intégrée y compris la gestion intégrée des ressources en eau, la mise en œuvre de programmes de lutte contre la désertification, la gestion intégrée des zones côtières et la lutte contre la pollution des terres et des eaux. (ONU, 2002, points 24 et 25 du chapitre 4).

L'agriculture irriguée est le premier à être remise en cause. L'activité d'irrigation contribue à l'échelle mondiale pour près de 70 % du total de l'eau douce utilisée (tous usages confondus) (BIED-CHARRETON et al., 2006). Elle est considérée comme la plus grosse consommatrice d'eau, cette tendance va augmenter dans les années à venir. La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) estime que 80% de la nourriture produite d'ici 2025 proviendront des terres irriguées d'où l'importance accordée à la gestion de l'eau dans les systèmes irrigués (COLES, 2000). L'impact de l'agriculture irriguée sur l'environnement est, pour beaucoup, lié à la gestion de l'eau et au bilan salin des terres irriguées (KIJNE, 2003). Conscient des divers problèmes liés à la gestion de l'eau en irrigation, l'intérêt doit être mis sur l'amélioration de

(1). La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement connue sous le nom de « Sommet de la planète Terre » s'est tenue du 3 au 14 juin 1992 dans la ville de Rio de Janeiro, au Brésil. Le sommet de la Terre adopte un Plan d'action pour le développement appelé : Agenda 21. Le chapitre 18 évoque le concept de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) indispensable dans le contexte mondial de pénurie.

la productivité de l'eau, l'efficacité de l'irrigation, l'efficacité de l'usage de l'eau dans les systèmes irrigués et la participation effective des paysans.

À l'échelle européenne, la pollution de l'eau et la diminution de la ressource disponible accaparent depuis des décennies des milliers de chercheurs et de gestionnaires (BARTOUT et TOUCHART, 2017); ce qui est l'origine de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) qui prône la gestion par « masses d'eau ».

En France, cette directive a été secondée par un ensemble de textes⁽²⁾ incitant à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau ;

À l'échelle africaine, depuis les indépendances, les tensions et les conflits autour de la ressource en eau ont fait naître des cadres de gouvernance de l'eau dans les bassins transfrontaliers. C'est le cas de l'OMVS pour le fleuve Sénégal. Ces cadres réglementaires mènent le partage de la ressource pour éviter les conflits, mais se soucient moins de la gestion de la ressource à l'échelle locale.

7.1.1. La nécessité d'une bonne gouvernance de l'eau pour la salinité dans le delta du fleuve Sénégal

Le problème de la salinité dans le delta du Sénégal est aussi un problème de gouvernance des ressources en eau, qui depuis quelques décennies, est l'une des préoccupations majeures dans les pays en voie de développement. La gouvernance des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal est structurée autour de l'offre. Celle-ci renvoie à la gestion des ouvrages hydrauliques, des retenues/réservoirs d'eau douce, mais aussi à celle des zones de drainage (KAMARA et al., 2012). Les PIP du delta du fleuve Sénégal sont caractérisés par un système d'irrigation sommaire. L'aspect technique et durable des infrastructures hydrauliques n'est pas encore une priorité chez les exploitants privés. Ils cherchent plutôt une rentabilité rapide de l'outil de production.

Dans les périmètres irrigués du delta du Sénégal, parvenir à résoudre les problèmes de salinité et de gestion des ressources requiert une gouvernance de l'eau efficace. Or, celle-ci se réfère implicitement à un compromis sur la gestion transparente, négociée et responsable des ressources, un compromis entre la coordination des actions individuelles et les formes de l'action collective. Ceci suppose que ce système de gouvernance ainsi proposé vise à associer

(2). La LEMA-2006 (Loi sur l'Eau et les Milieux aquatiques) et le Grenelle II de l'Environnement (2010) par exemple

7.1 POURQUOI UNE BONNE GOUVERNANCE DE L'EAU DANS LES « TERRITOIRES SALÉS » DE L'EAU ?

tous les acteurs pertinents (SAED, communautés et partenaires, techniciens), tous ceux qui, à des titres divers, ont une légitimité à intervenir dans la gestion de l'eau dans le delta. Mais cette pluralité d'acteurs aux logiques pas forcément compatibles autour d'une même ressource est-elle capable d'une dynamique de l'action en commun (Schéma 7.1) ?

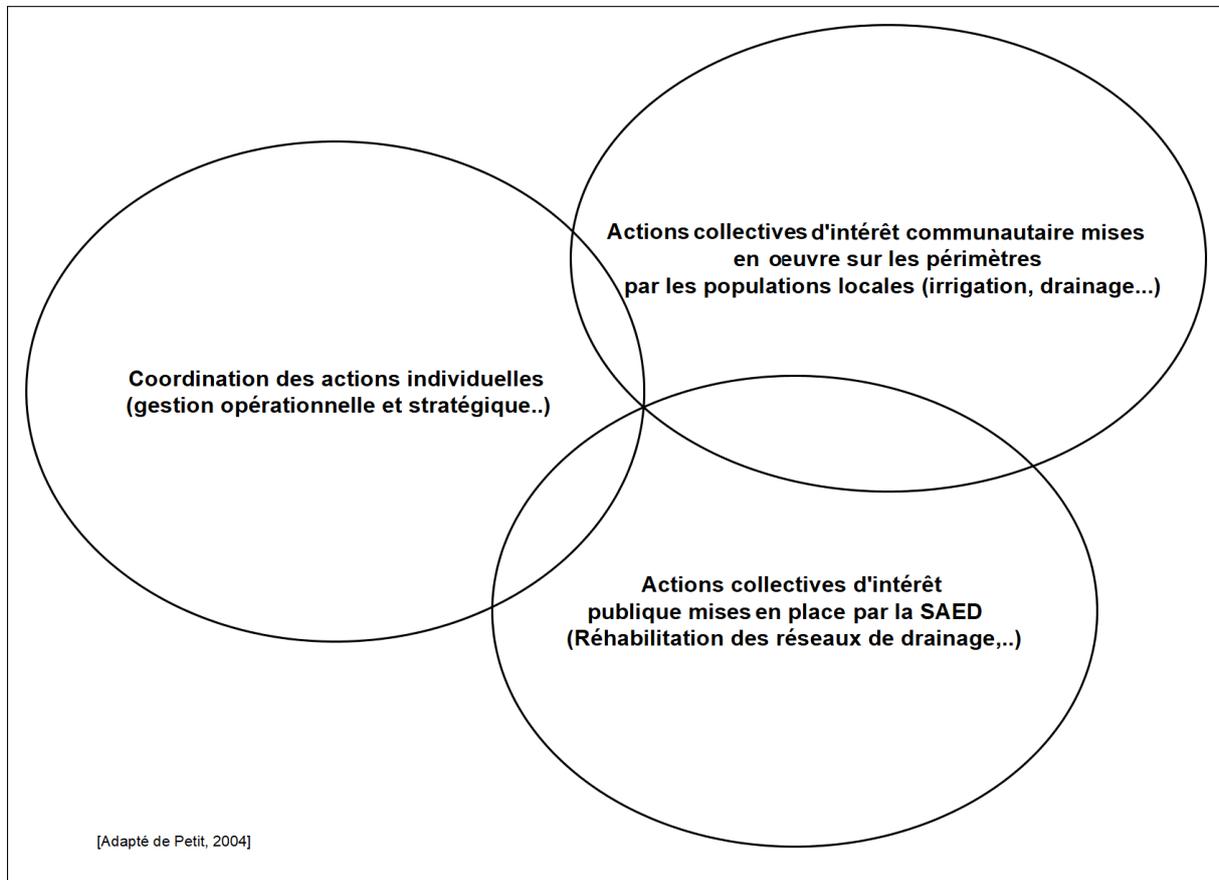


SCHÉMA 7.1 – Schéma d'une bonne gouvernance de l'eau dans les PIP et les PIV

Dans les périmètres du Gorom-Lampsar, la gestion de l'eau ne bénéficie pas d'un cadre de gouvernance établi. Un bon cadre de gestion qui *"met l'accent sur la nécessité d'aborder la gestion de l'eau sous plusieurs angles à la fois, autant en termes techniques (eau de surface comme souterraine, compétition entre usages, etc.) que sous ses diverses facettes politiques, économiques et sociales"* (BURTON, 2004) pourrait à la fois résoudre les problèmes l'eau et de salinité dans le delta du fleuve Sénégal .

7.1.2. La gestion de l'eau : entre logique individuelle et intérêt collectif

La logique individuelle de l'irrigant (les pratiques) l'amène souvent à gaspiller l'eau tandis que les attributaires ont tendance à « profiter » au maximum de l'eau disponible. La

gouvernance de l'eau recherche donc l'équilibre entre les divers intérêts des usagers. Quant à la GIRE, elle suppose une concertation poussée entre les différents usagers et participe à l'amélioration de la gouvernance de l'eau. La rentabilité des systèmes irrigués dépend d'une bonne gestion de l'eau, car une irrigation efficace se traduit par de meilleurs rendements, des charges de pompage plus faibles, ou des surfaces irrigables plus importantes (GRET, 1992).

Le territoire de l'eau s'inscrit complètement dans une logique de GIRE qui conduit à porter une attention particulière de perceptions et de représentations des acteurs, mais nécessitant, pour une gouvernance locale de l'eau efficace, d'articuler « les règles nationales et les règles communautaires (BARTOUT et TOUCHART, 2017). En effet tout territoire hydraulique dispose d'une GIRE. Dans le contexte des PIP et des PIV du Gorom-Lampsar la gestion de l'eau connaît une réelle difficulté, car il n'y a pas de statuts ni de règles régissant le mode de prélèvement de l'eau. En plus la quantification de ces prélèvements est quasi impossible, car il n'y a pas de fiches de pompage pour les GMP et les superficies augmentent de manière exponentielle. De plus, les pertes d'eau y sont considérables, et l'efficacité de l'irrigation laisse à désirer. Des efforts restent à faire dans la conduite des irrigations par les paysans. Cette conduite intègre à la fois l'apport des volumes d'eau sur les parcelles, mais aussi le drainage de ceux-ci hors des parcelles. La gestion de l'eau dans les systèmes irrigués du delta du Sénégal connaît, depuis les années 1980, un déficit suite au désengagement de l'État du Sénégal.

La gestion de l'eau s'articule dans un contexte réglementaire et institutionnel défini par les directives du PAGIRE. Ce plan oriente la gestion de l'eau, au Sénégal, vers la maîtrise de la demande (en milieu urbain, pour l'irrigation, en fonction des apports pluviaux et de la qualité de l'eau) tout en permettant aux populations rurales d'accéder à l'eau potable (COLY, 2006), dans le cadre des Objectifs du Millénaire pour le Développement pour 2015 relatifs à la réduction du nombre de personnes n'ayant pas accès à une eau potable et à l'assainissement (KAMARA et al., 2012). Du coup, les réseaux hydrauliques sont mal entretenus et se dégradent progressivement. La maîtrise de l'eau n'est alors plus assurée et les rendements baissent. Face à ce constat, les politiques nationales ont évolué progressivement à partir des années 1980. La gestion des périmètres, ou de sous-sections des périmètres pour les plus grands (« maille hydraulique »), a été confiée à des associations de producteurs organisées en coopératives, en groupement d'intérêt économique et groupements villageois. La SAED continue à assurer l'encadrement technique de ces périmètres, à gérer les infrastructures les plus importantes (barrages, grands canaux d'irrigation) et à appuyer la commercialisation et le crédit au niveau national.

7.1 POURQUOI UNE BONNE GOUVERNANCE DE L'EAU DANS LES « TERRITOIRES SALÉS » DE L'EAU ?

La mise place d'outils de quantification des prélèvements, des pertes en eau se présente ainsi très indispensable pour une meilleure gestion de l'irrigation.

ENCADRÉ 7.1 – Importance de la gestion de l'eau dans les systèmes irrigués

Tous les renseignements statistiques confirment que l'agriculture est le secteur clé de la gestion de l'eau. L'utilisation productive de l'eau pour la production agricole et le développement rural devra être améliorée sans relâche si les objectifs de production alimentaire et de croissance économique, ainsi que les visées écologiques, doivent être atteints. Cela nécessitera une modernisation progressive de la gestion des eaux en agriculture qui devra se montrer à la fois plus sensible à la demande et mieux adaptée aux conditions climatiques, écologiques et socioéconomiques locales. À l'avenir, l'agriculture va devoir faire face à l'évolution des besoins alimentaires et lutter contre l'insécurité alimentaire et la pauvreté dans les communautés marginalisées. L'eau sera l'élément clé de l'effort qu'il faudra fournir pour augmenter et maintenir la production agricole de manière à satisfaire ces multiples besoins. La gestion de l'eau en agriculture sera essentielle au maintien de la sécurité alimentaire et de sources de revenus pour les ruraux pauvres. Une gestion équitable des ressources en eau ne pourra toutefois s'obtenir à l'échelle locale que par une participation plus importante des communautés rurales et des agriculteurs individuels.

Source : « Déverrouiller le potentiel de l'eau en agriculture », FAO (2002)

La gestion de l'eau dans les systèmes : c'est l'organisation mise en place pour mobiliser et gérer la distribution de l'eau jusqu'à la parcelle à irriguer. Cela implique un ensemble de décisions⁽³⁾ et d'activités (GRET, 1992) :

- estimation de la ressource (réserves, pérennité) ;
- délimitation éventuelle de la surface irrigable ;
- décision de prélèvement et fourniture d'eau en tête du périmètre (par pompage ou ouverture de la vanne principale) ;
- mise au point d'une réglementation de la distribution de l'eau ;
- choix des parcelles à irriguer, des débits et doses à appliquer en fonction des besoins estimés et des règles choisies et information des irrigants ;

(3). Ces décisions doivent être collectives. À la différence des pratiques individuelles dans le Gorom-Lampar ces décisions doivent s'inscrire dans un cadre opérationnel de gestion

- ouverture des vannes correspondantes sur le réseau des canaux ;
- contrôle des quantités reçues et de leur bonne utilisation afin d'éviter tout gaspillage ;
- drainage lorsque des vannes ou des pompes permettent de régler le niveau de l'eau dans les drains.

La gestion de l'eau dans les PIP et les PIV n'est pas tâche simple. Pour une bonne gestion de l'eau, il faut, dans un cadre collectif, décider du plan de culture et planifier soigneusement les opérations agricoles, si l'on souhaite pratiquer plusieurs cultures successives sur une même année, en tenant compte de la main-d'œuvre disponible. Il faut prévoir les besoins en eau de chaque parcelle et organiser au mieux la répartition de l'eau pour obtenir les meilleurs résultats possibles et limiter les coûts. Il faut également s'assurer du bon entretien du matériel et du réseau d'irrigation, et prévoir les stocks de pièces détachées, de carburant et d'engrais. Bref, un ensemble de dispositifs de la part des paysans pour mener des saisons agricoles avec plus d'autonomie et de ressources. Ceci doit obligatoirement passer par une bonne formation agricole (7.2) et l'application d'un certain nombre de textes.

7.1.3. La charte du domaine irrigué doit être appliquée sous le contrôle strict de la SAED

La charte du domaine irrigué du delta du Sénégal ([annexes](#)) est un grand ensemble de dispositifs à la fois techniques et institutionnels de gouvernance des ressources naturelles établie par le gouvernement sénégalais en 2007 et donc l'application sur le terrain laisse à désirer. Son objet est la sécurisation complète des ressources et leur mise en valeur dans le cadre d'une gestion rationnelle et durable (article 2). Pour mieux gérer le potentiel du delta du Sénégal, il faut trouver un consensus entre l'État, les collectivités locales et les usagers afin de sauvegarder les ressources naturelles impliquées dans l'irrigation tout en assurant leur rentabilité. C'est un outil qui repose sur les lois et règlements en vigueur auxquels il apporte des compléments et approfondissements. La Charte pose des règles d'utilisation optimale du domaine irrigué compte tenu du caractère limité, stratégique et dégradable des ressources eau et terre et de leur caractère de patrimoine national. Cette charte engage un ensemble de dispositions à la fois de la part des collectivités, de l'État et des exploitants qui pourraient permettre de réduire les taux énormes de salinité dans le PIP.

- L'État s'engage à s'assurer du suivi régulier de la qualité des sols et des eaux et à prendre

les mesures de sauvegarde nécessaires au cas où des périls se signalent,

- Tout nouvel exploitant doit disposer d'un dossier d'étude comportant, notamment, un plan d'aménagement approuvé par la SAED (localisation, source de prélèvement, d'un réseau d'irrigation et de drainage) et les activités agricoles envisagées.
- Les collectivités territoriales doivent faire signer, préalablement à toute décision d'affectation de terres du Domaine Irrigué, un « Engagement de l'attributaire de terres du Domaine Irrigué »,

La charte a été élaborée suite au développement anarchique des périmètres privés observé dans le Delta à fin des années 1990. La dégradation rapide de ces aménagements (qui induit des risques de salinisation) et leur implantation anarchique (obstruction des voies d'accès, non prise en compte des capacités des adducteurs) ont motivé l'élaboration de la CDI. Malgré ces dispositions, l'application de cette charte pose un sérieux problème. En effet, la CDI dont l'application n'est pas encore effective sur le terrain, n'est pas en tant que tel un outil de sécurisation foncière, mais elle vient combler, pour les terres du domaine irrigué des vallées du Sénégal et de la Falémé, le vide créé jusqu'ici par l'absence de définition de la notion de mise en valeur. De ce fait, elle met fortement l'accent, dans la vallée du fleuve Sénégal, sur la valorisation des ressources en eau et en terres, à travers l'intensification de l'agriculture. La CDI occulte toute autre forme de valorisation de ces deux ressources. De plus, elle donne de plus une définition très extensive du domaine irrigué en y incluant toutes les terres du « *Jeeri* » qui peuvent faire l'objet d'aménagements hydro-agricoles.

L'application de cette charte doit être effective pour garantir la préservation des ressources dans un contexte de développement continu des périmètres privés. La majorité des paysans interrogés dans ce travail est non instruite et ne parle pas la langue française. Un gros travail de la part de la SAED reste à faire sur la sensibilisation et de formation des populations paysannes à la compréhension des textes et règlements à travers leurs langues locales.

7.2. La formation à la gestion des systèmes irrigués

Une des dispositions les plus importantes de la CDI est celle de contribuer (pour chaque partie : État, exploitant et collectivités) chacune dans son domaine d'activité (formation, recherche, conseil, communication...) à la création de conditions définies de manière consensuelle comme nécessaires à la satisfaction de l'objectif commun (article 5). La formation agricole obli-

gatoire apparaît dans ce contexte comme une étape incontournable pour maîtriser les enjeux énormes du développement de l'agriculture irriguée. La formation ne doit pas être une activité séparée du reste du suivi technico-économique du périmètre (GRET, 1992).

Il ressort de l'analyse des stratégies de gestion de la salinité que les eaux de drainage agricoles est le principal problème qui requiert à la fois la prise en compte d'un dispositif institutionnel, mais également des dispositifs techniques mis en œuvre à l'échelle du des systèmes irrigués.

7.2.1. Le renforcement de la formation agricole

La professionnalisation des paysans, certes analphabètes, du delta du fleuve Sénégal doit être un pilier important dans les stratégies de l'État et des engagements de la SAED dans le cadre la CDI. Dans les périmètres privés, plusieurs modules de formation pourraient être dispensés aux paysans : la formation des responsables des organisations paysannes, le développement local, le conseil agricole et rural, l'animation du développement local, l'ingénierie de la formation, la gestion des axes de drainage agricole, les techniques de production... Il ne s'agit plus de former les paysans uniquement aux techniques de l'irrigation, il s'agit plutôt aussi de les former à la gestion des aménagements hydroagricoles (AHA), à la communication, à la négociation avec les partenaires, à la préservation des outils de production et des ressources naturelles, à trouver des solutions locales aux difficultés et à anticiper sur les éventuelles difficultés, etc. Cependant ces formations pourraient ne pas donner des résultats escomptés si elles ne sont faites avec des langues locales.

L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication (les téléphones portables, les systèmes d'informations géographiques participatives, etc.) est de plus en plus répandue. Ces outils sont indispensables dans le relais des informations, mais faudrait-il que les paysans s'en approprient le contenu. Avec ces technologies, on pourrait aussi mettre en place des schémas, des cartes des systèmes irrigués, car la représentation spatiale est un élément important dans la gestion.

7.2.2. La gestion stratégique et opérationnelle de l'irrigation doit être une préoccupation majeure

Les pratiques, actions ou opérations de gestion de la salinité sont déployées sur les parcelles agricoles de manière individuelle tandis que les stratégies de gestion impliquent une vo-

lonté de coordination, une démarche collective, car c'est un ensemble d'actions ou d'opérations et de pratiques coordonnées destinées à suivre un plan, un objectif pour résoudre un problème, ici, celui de la gestion de l'eau et de la salinité des sols. L'organisation des agriculteurs est capitale :

- pour assurer la mobilisation de la force de travail et des moyens financiers nécessités par les réparations et l'entretien régulier ;
- pour éviter les pratiques individuelles aboutissant parfois à la dégradation saline dans les superficies non exploitées,
- pour garantir que la répartition de l'eau entre les différents irrigants n'aboutisse pas à faire passer des débits excessifs dans certains canaux.

Dans les périmètres irrigués, la gestion de l'eau ne se résume pas à la gestion de l'irrigation et inversement. L'irrigation est une pratique culturelle complexe qui ne peut se résumer à ouvrir et fermer un robinet. Elle est le résultat d'un choix stratégique de l'agriculteur, choix intégrant de l'équipement, des cultures, des surfaces, mais aussi des stratégies de conduite mobilisant des aspects économiques et sociaux (BERGEZ et al., 2008 ; COMBRES et al., 1999).

La formation est utile, mais pas suffisante. Une bonne gestion des ressources dans les systèmes à l'échelle locale requiert une participation plus importante des communautés rurales et des agriculteurs individuels. Les problèmes de fonctionnement des périmètres sont attribués, à tort, au manque de compréhension des agriculteurs.

Cependant, l'efficacité des systèmes d'irrigation sous autogestion paysanne peut être durable avec la prise en compte des règles d'action des organisations paysannes. La création des Unions Hydrauliques correspond à la dernière phase du processus de désengagement de l'État et du transfert des aménagements aux paysans. Les Unions hydrauliques sont composées de commissions techniques qui assurent le fonctionnement des activités agricoles dans l'aménagement. La solution des problèmes du périmètre ne peut pas toujours être trouvée au sein du groupement uniquement, et des décisions sont à prendre à des niveaux plus élevés de l'administration.

ENCADRÉ 7.2 – La gestion des périmètres irrigués

L'introduction de l'irrigation pose des problèmes nouveaux. Quelles que soient les structures de gestion des périmètres, des fonctions spécifiques doivent être assurées. L'avenir du périmètre dépend de la capacité des agriculteurs à s'organiser pour gérer ces problèmes.

La gestion d'un périmètre irrigué privé est une opération complexe. Il faut décider du plan de culture et planifier soigneusement les opérations agricoles, si l'on souhaite pratiquer plusieurs cultures successives sur une même année, en tenant compte de la main-d'œuvre disponible. Il faut prévoir les besoins en eau de chaque parcelle et organiser au mieux la répartition de l'eau pour obtenir les meilleurs résultats possibles et limiter les coûts. Il faut également s'assurer du bon entretien du matériel et du réseau d'irrigation, et prévoir les stocks de pièces détachées, de carburant et d'engrais. Enfin, il faut tenir une comptabilité soignée afin que les coûts n'excèdent pas les dépenses. Il est également indispensable de mettre en place une programmation financière pour savoir à quel moment on aura besoin d'argent, et sous quelle forme on prépare des réserves (des « provisions ») pour remplacer le matériel utilisé. Il faut décider d'un montant et d'une forme d'épargne, ou d'un volume et de modalités d'emprunt. Toutes ces tâches relèvent du groupe d'irrigants lorsque le périmètre est exploité en commun. Il faut alors aussi prévoir des méthodes de répartition des terres et des systèmes de prise de décision et de sanctions efficaces. Le groupe arbitre en permanence les conflits entre l'intérêt collectif et les intérêts individuels, ce qui complique sa tâche.

Source : FAO (2002) : *L'irrigation villageoise : Gérer les petits périmètres irrigués au Sahel*

En France, des outils d'aide à la décision ont été mis en place pour *inscrire l'irrigation dans un cadre temporel* (BERGEZ et al., 2008), une réflexion stratégique, qui se situe en amont de la campagne d'irrigation et une réflexion tactique, qui se situe durant la campagne d'irrigation (Schéma 7.2).

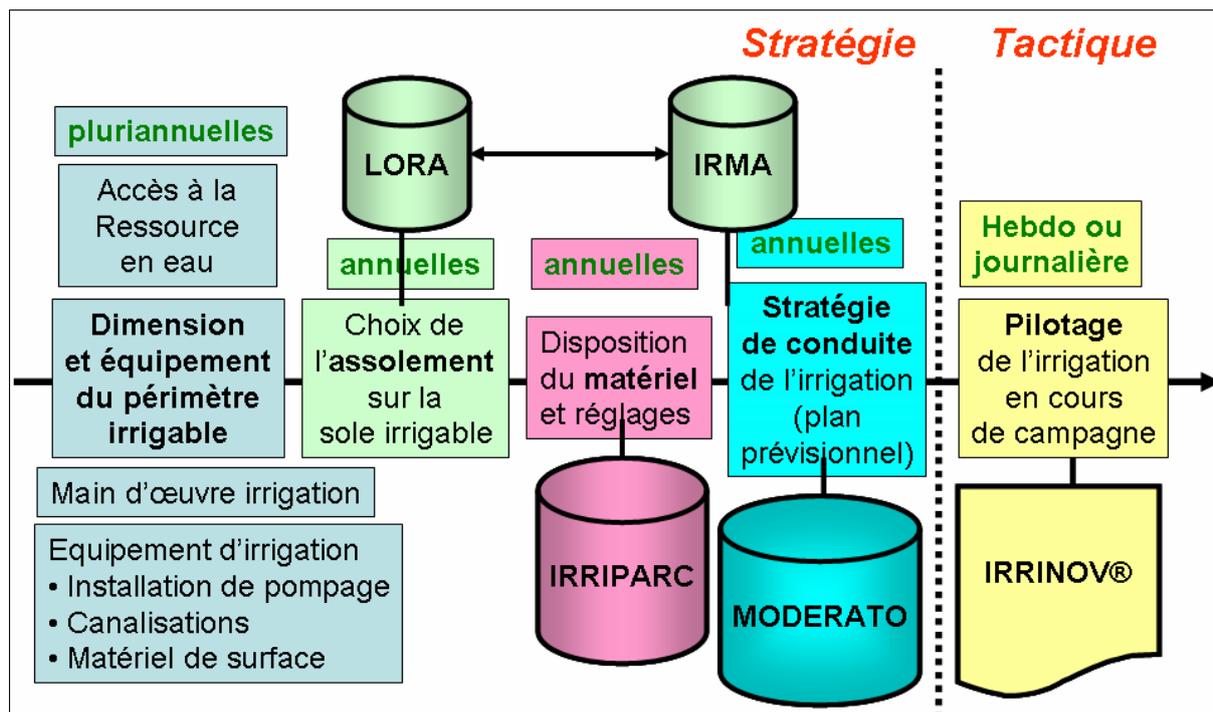


SCHÉMA 7.2 – Différents outils d'aide aux décisions d'irrigation en grandes cultures
LACROIX (2004)

La gestion de l'irrigation peut être vue à plusieurs échelles de temps et d'espace (Bassin Versant, Exploitation ou Ilot agricole, Parcelle). À chacune de ces échelles, des questions sont posées et des acteurs différents sont mobilisés. À ce niveau également, la taille de l'exploitation conditionne la hiérarchie des préoccupations des exploitants.

Dans le Gorom-Lampsar, la gestion de l'irrigation dans les périmètres privés doit disposer d'un cadre d'aide à la décision stratégique et tactique (figure 7.3) dans les systèmes irrigués. La gestion de l'irrigation nécessite une méthode appropriée permettant à la fois de comprendre les processus impliqués et d'évaluer les décisions à court et à long terme à adopter en matière de gestion et de planification en fonction de la situation actuelle et des évolutions attendues.

Dans la réflexion stratégique et tactique, les organisations paysannes pourraient décider du choix du matériel d'irrigation, des prélèvements d'eau ainsi que leur quantification, des choix d'assolement (positionner les soles irriguées et les soles en sec, choisir les cultures irriguées ainsi que les variétés), d'un calendrier prévisionnel d'irrigation (positionner dans le temps les opérations culturales concernant l'irrigation et le drainage en fonction des contraintes climatiques, agronomiques et techniques prévisibles, des volumes à apporter par culture et par type de sol).

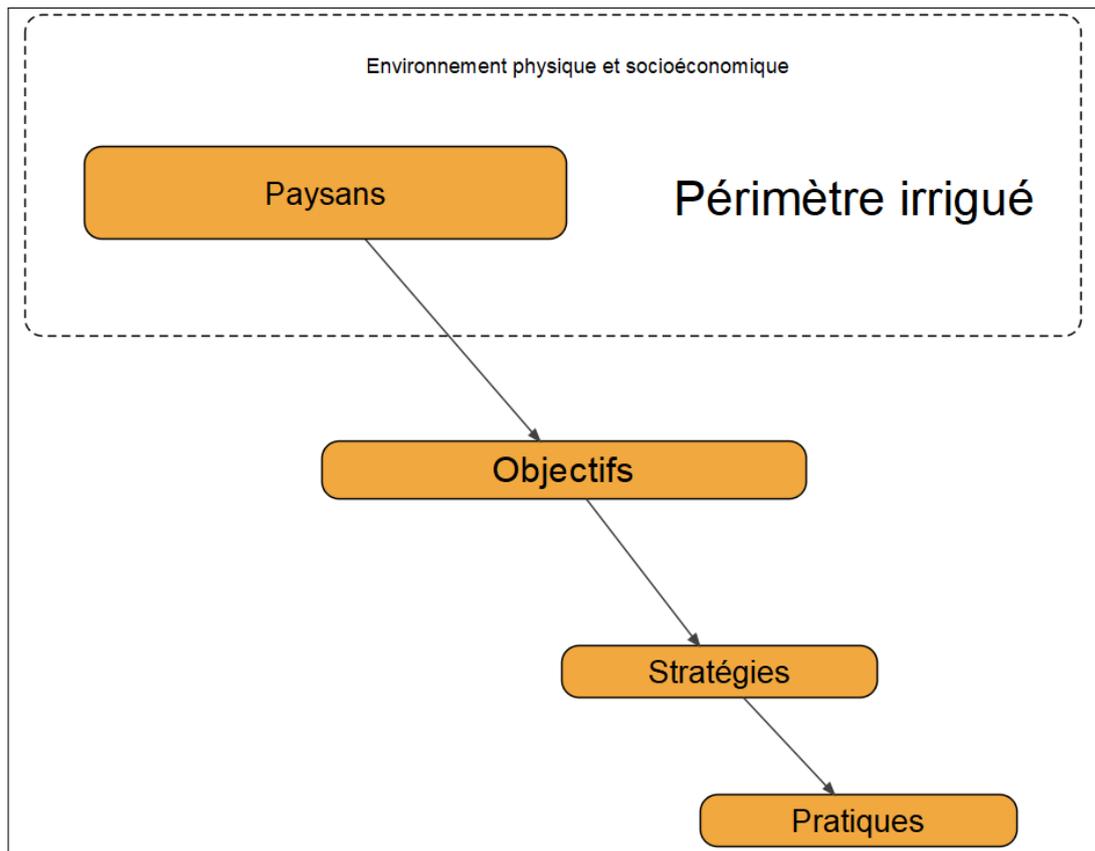


SCHÉMA 7.3 – Système agricole paysan d'après KIELEN (1996) - modifié

Les agriculteurs doivent par ailleurs être motivés et convaincus de l'intérêt du pilotage collectif stratégique de l'irrigation. Cette aide à la décision pour le pilotage de l'irrigation doit gérer les différentes causes de variabilité intra et inter-parcellaire, et tenir compte des pratiques des agriculteurs et les perceptions des agriculteurs.

7.3. Des outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion des terres salées

Des mesures techniques existent pour contrôler la salinisation des terres (les stratégies de gestion collectives à travers un dispositif opérationnel mis en œuvre par l'ensemble des acteurs de la gestion de l'eau dans les périmètres irrigués), mais leur application suppose aussi que les acteurs disposent des informations et outils permettent de les concevoir et de les mettre en œuvre (MARLET, 2004). La mise en place d'outils d'évaluation et de suivi de la salinité des sols (observatoires) est aujourd'hui indispensable pour une gestion plus réactive et efficace des ressources en sol et en eau dans le Gorom-Lampsar.

7.3.1. Le suivi des propriétés des sols : mesure *in-situ* et télédétection

La connaissance de la structure spatiale de la salinité doit être une information primordiale dans le contexte du Gorom-Lampsar. La bonne gestion de la salinité passe aussi par la mise en place d'un grand dispositif de suivi des sols salés.

D'abord, dans le Gorom-Lampsar, la mesure des propriétés des sols par l'analyse d'échantillons prélevés (mesures *in situ* de la conductivité électrique) se fait principalement sur les Grands Aménagements (GA) (tous les échantillons fournis par la SAED ont été prélevés dans ces GA). Ces prélèvements doivent être aussi effectués sur les PIP et les PIV car ils sont plus pertinents et en mesure de fournir plus d'informations puisque les superficies concernées sont assez réduites (MARLET, VINCENT et al., 2005). Le suivi des propriétés des sols par mesure *in-situ* doit plutôt s'effectuer dans ces petits périmètres car l'analyse de ces informations à petite échelle, permettrait d'apprécier la salinité, et de concevoir des modèles de suivi de l'évolution des sols salés et de les adapter aux GA.

Ensuite, l'imagerie satellitaire est aujourd'hui un outil incontournable et particulièrement adapté à l'analyse de la salinité des sols à petite échelle et à moindre coût. Malgré le fait que ses potentialités restent limitées à l'observation des états de surface à certaines périodes singulières de l'année (en saison sèche), elle peut être complétée par des informations additionnelles sur les sols, les cultures...

La disponibilité d'images de très bonne résolution comme les SENTINEL, de nos jours, peuvent permettre la SAED de mettre en place un dispositif pérenne de suivi des sols salés par télédétection et évaluer les tendances évolutives, dans un sens ou dans l'autre, de la salinité.

Toutes ces deux sources d'informations peuvent être mise en œuvre dans un système d'information vivant et efficace géré par la SAED. Pour devenir un véritable outil de gestion, ce système d'informations doit prendre en compte les informations des pratiques de gestion des agriculteurs.

7.3.2. Un périmètre agricole : un schéma, une carte

La cartographie est aujourd'hui indispensable pour une meilleure connaissance des ressources en sol et en eau dans les périmètres. En effet, une bonne gestion paysanne de ce milieu agricole doit passer par une bonne connaissance des composantes du milieu agricole. Dans le Gorom-Lampsar, les paysans privés et villageois manquent d'outils de visualisation de leurs

périmètres. La cartographie est un outil méconnu par beaucoup de ces paysans et qui doit être présente dans leur quotidien pour visualiser leurs surfaces agricoles ainsi que d'autres éléments (sols, les cultures, les réseaux d'irrigation et de drainage...).

Le slogan « un périmètre, une carte, un schéma » peut-être ainsi porté par la SAED afin de doter à chaque périmètre privé ou villageois des schémas et des cartes annuelles qui montrent de façon claire, les différents éléments de chaque périmètre agricole.

La bonne gouvernance de l'eau, la gestion paysanne stratégique et opérationnelle et les outils de suivi ont tous comme objectif l'amélioration des performances hydrauliques, agronomiques et environnementales des systèmes irrigués et donc la réduction de la salinisation des terres dans le Gorom-Lampsar. En effet, la salinisation est considérée comme un indicateur de performance de l'irrigation. Cependant, la mise en œuvre de ces propositions dépend de la volonté des institutions de gestion (la SAED) et de la prise de conscience des problèmes de gestion par populations paysannes privées et villageoises.

Conclusion du chapitre 7

La bonne gestion des ressources (terre et eau) dans les PIP et les PIV est une opération complexe. Le caractère privé de ces périmètres complique le cadre de la gestion de l'eau et de la salinité. La rentabilité des périmètres privés dépend d'une bonne gestion de l'eau qui nécessite, dans le cadre d'une bonne gouvernance locale et efficiente, l'application d'un certain nombre de règles autour concertation et de la participation de tous les acteurs (un cadre opérationnel de gestion) et secondé par la formation et la mise en place d'outils pérennes (observatoires) d'aide à la décision.

La SAED doit, dans le cadre d'une bonne gestion de l'irrigation, s'assurer que les paysans respectent leurs engagements (ceux de la CDI) et mettre à leur disposition des formations utiles pour la bonne gestion des périmètres mais également d'initier la mise en place de ces outils de suivi et d'évaluation qui deviennent de plus en plus incontournables.

CONCLUSION PARTIELLE

La salinité est un risque⁽⁴⁾ et sa prise en compte repose nécessairement d'abord sur une bonne compréhension des processus naturels ou influencés par les pratiques des agriculteurs, les opérations d'exploitation ou de maintenance des réseaux d'irrigation et de drainage ou les politiques publiques, en interaction.

Les paysans des périmètres privés et villageois du Gorom-Lampsar ont une très bonne perception de la salinité travers un ensemble d'indicateurs, mais utilisent le terme « Khorom » pour les caractériser. Ces connaissances traditionnelles, très peu prises en compte par les institutions scientifiques, permettent aux agriculteurs d'engager des stratégies de gestion individuelles qui ont une relation directe avec les stratégies agricoles globales du système paysan.

Dans cet environnement marqué par la salinité des terres, la gestion des ressources recouvre à la fois celle de l'eau douce et de l'eau d'irrigation. Il est alors nécessaire d'encadrer les pratiques culturales et d'utilisation de l'eau. La gestion intégrée s'appuie sur les outils (observatoire, système d'indicateurs) et les institutions existantes (SAED par exemple). La mise en place d'observatoires, à toutes les échelles, donne une certaine logique dans la gouvernance de l'eau.

Sur le terrain, on est toujours confronté à une gestion du sel qui est en fonction de la typologie des exploitations. Les grands aménagements disposent de réseaux de drainage, d'un émissaire pour évacuer les eaux, l'appui et le conseil de la part du SAED, en plus spécialisés dans la riziculture connue comme réductrice de salinité, ce qui se traduit par une salinité faible. Contrairement à ces précédents, les PIP connaissent des stratégies individuelles alimentées par la perception, ce qui détermine leur mode de gestion. Cette gestion de la salinité dans le contexte des territoires de l'eau se confond avec celle de la gouvernance et de la gestion intégrée des ressources en eau et des ouvrages hydrauliques.

(4). La salinité au-delà du processus de dégradation des ressources en sol et en eau, il met plus généralement en péril la viabilité des exploitations agricoles et la durabilité des systèmes d'irrigation (MARLET et JOB, 2006)

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'analyse de tous les résultats obtenus dans cette thèse nous a permis de vérifier nos hypothèses de travail posées en amont au vu desquelles nous avons formulé des propositions d'aménagements. Au terme de ce travail d'étude et de recherche, nous pouvons retenir que :

- 1 Le type de sol, d'après l'analyse des statistiques de cartographie, n'aurait aucun impact sur la salinité des sols. Les *Hollaldé* et les *Fondé* présentent les mêmes profils de salinité (non salé à extrêmement salé). Néanmoins, des études ont montré que les propriétés hydrodynamiques d'infiltration, de drainage et de transpiration mettraient en exergue un fonctionnement hydrique différent entre *Hollaldé* et *Fondé*. Les *Fondé*, dont la conductivité hydraulique est plus élevée et la rétention de l'eau plus faible que les *Hollaldé* (B. NDIAYE et al., 2008), présenteraient un degré de salinité plus élevé, mais du fait des apports d'eau par irrigation, les remontées de sels ont tendance à s'annihiler. Les quantités de sels qui arrivent par remontée capillaire pendant les périodes de non-irrigation sont très proches selon les deux types de sols. Par conséquent, le degré de salinité est donc en fonction des états de surface et non en fonction du type de sol. Ceci concorde avec les résultats cartographiques et les constats *in-situ* et permet encore d'avancer que les sols exploités, non exploités ou abandonnés obtiennent une évaporation semblable dans les deux types de sol et des propriétés hydrodynamiques de la nappe phréatique assez similaire.
- 2 Dans le Gorom-Lampsar, la configuration du système d'irrigation met en œuvre une typologie des surfaces irriguées et la salinité dépend de ces états de surfaces. Les superficies les plus salées sont celles qui ont été exploitées et abandonnées. Cette analyse a montré que le facteur central qui explique les niveaux de salinité est la distance des surfaces agricoles par rapport à l'axe hydraulique le plus proche. En effet, les distances moyennes à l'axe hydraulique des surfaces salées dans les grands aménagements sont plus faibles (500 et 600 mètres) que celles des Périmètres Irrigués Villageois et des Périmètres Irrigués Privés qui présentent des taux de salinité élevés sur des distances à l'axe hydraulique de 800 à 1km. La cartographie montre aussi des niveaux de salinité, dans les zones intermédiaires du Gorom-Lampsar, non ou partiellement exploitées, sont plus élevés que les rives du Djeuss et du Lampsar. La distance est en effet l'élément central dans la compréhension des niveaux de salinité.
- 3 L'ancienneté des surfaces irriguées est, dans le contexte de mise en valeur des terres (les Grands Aménagements (GA) et les Périmètres Irrigués Villageois (PIV) et Périmètres

irrigués privés (PIP) après), fonction de la distance à l'axe hydraulique. Mais dans ces conditions de drainage quasi inexistant dans les PIP et PIV, cette hypothèse pourrait corroborer celle de distance à l'axe hydraulique, les grands aménagements plus proches de la ressource, moins salés plus et anciens, mais disposent de drainage suffisant pour contrôler la salinité et les PIP, plus distants à la ressource, plus salés et ne disposant pas de drainage.

- 4 Dans les périmètres du Gorom-Lampsar les agriculteurs analysent la salinité et la sodicité des sols grâce aux mêmes indicateurs, mais n'utilisent qu'un seul terme ("Khorom" ou "xorom") pour les caractériser. Cette bonne perception de la salinité des sols est un élément important dans leur prise de décision individuelle dans le processus de gestion de l'irrigation. Ils font face à la salinité grâce à la mise en œuvre de stratégies individuelles de gestion hydraulique et agronomique combinées malgré le manque d'assistance et le manque d'un cadre opérationnel. La gestion des eaux de drainage est un paradoxe dans un contexte de drainage quasi inexistant. Les organisations paysannes, à qui incombe la gestion des périmètres irrigués, demeurent confrontées, au-delà de ces problèmes de salinité, à de nombreuses difficultés d'ordre institutionnel, financier et économique. Malgré la maigre assistance de la SAED, les problèmes d'évacuation des eaux de drainage continuent d'inquiéter les périmètres privés non intégrés à un système de drainage.

Les potentialités géomatiques nous ont permis d'établir des cartographies et des statistiques à partir des données de terrain et des images satellites. Les techniques géostatistiques et de télédétection ont permis de montrer que la salinité des terres dans les périmètres du Gorom-Lampsar est fonction des états de surface agricole.

Cette étude de la salinité dans le delta du Sénégal a tout d'abord montré la complexité de la mise en valeur des territoires, tant sur le plan institutionnel que humain. Les remarquables potentialités que regorge cet écosystème deltaïque ont très vite suscité la mise en place d'un territoire de l'eau dans une zone sahélienne où moindre goutte d'eau est sacrée. La mise en place de ce territoire de l'eau a permis certes une amélioration économique et sociale, mais s'avère inaboutie, et ceci a engendré des conséquences néfastes sur le plan humain et environnemental. La salinité, une réponse parmi cette série de conséquences, est le résultat direct de la mise en place de ce territoire de l'eau.

Aujourd'hui, au regard de ces conclusions, il est important de formuler des propositions d'aménagement dans le but le mieux capitaliser nos recherches. Ces propositions mettent en jeu

à la fois les populations paysannes et les pouvoirs publics dans le cadre d'une gouvernance des ressources à travers l'application d'un certain nombre de règles nationales et communautaires.

D'abord, il est important de doter les PIP et les PIV d'un cadre de gestion des ressources en eau au travers la mise en place d'outils de quantification des prélèvements, des pertes indispensables pour la gestion de l'irrigation. Cette gestion doit s'effectuer dans un cadre de décisions collectif et opérationnel.

L'application de la Charte du Domaine Irrigué (CDI) devient alors capitale dans les PIP et les PIV qui consomment beaucoup d'espaces et dégradent les sols. La formation obligatoire à la gestion des périmètres irrigués pour la professionnalisation paysanne est un point majeur de la CDI qui doit être mis en application pour tous les exploitants privés.

Enfin, la SAED doit doter ces périmètres d'un cadre d'aide à la décision stratégique de l'irrigation avec des outils modernes. Dans un contexte actuel de développement des outils de représentation spatiale, les connaissances traditionnelles et la cartographie peuvent jouer en synergie pour une meilleure gestion. Les agriculteurs doivent être dotés, en plus de projets de politiques publiques d'accompagnement pour la gestion de l'irrigation, de documents d'aide à la décision (Cartes de salinité, Schéma du système de production); bref, un cadre de gestion temporel de l'irrigation.

L'exploitation durable d'un sol passe par une bonne gestion de sa fertilité et une bonne gestion des ressources et eau. Et la dégradation des sols par salinisation entraîne une baisse de cette fertilité. Ces résultats permettent de repousser la réflexion sur *la durabilité des agroécosystèmes*.

Au-delà du processus de dégradation des ressources en sol et en eau, la salinité met plus généralement en péril la viabilité des exploitations agricoles et la durabilité des systèmes d'irrigation. Le maintien de la durabilité des agroécosystèmes passe non seulement par de bonnes stratégies de gestion collectives, mais aussi par une bonne politique de conservation des terres agricoles que doit mener la SAED pour pérenniser ce remarquable agroécosystème du delta du Sénégal. Ce maintien passe également par une instrumentalisation de la politique de gestion de la salinité des sols. C'est-à-dire la SAED peut intervenir en orientant et coordonnant ses recherches au service d'une exploitation viable et durable des exploitations et aménagements hydroagricoles, et au travers l'éducation et la transmission d'information permettant de sensibiliser les acteurs du système et la société civile dans son ensemble.

La prise en compte du risque de salinité repose d'abord sur une bonne compréhension des

processus naturels ou influencés par les pratiques des agriculteurs, les opérations d'exploitation ou de maintenance des réseaux d'irrigation et de drainage ou les politiques publiques, en interaction. Des mesures de gestion et de gouvernance de l'eau existent très vraisemblablement pour contrôler ces phénomènes. Mais leur application suppose aussi que les acteurs disposent des informations et outils permettent de les concevoir et de les mettre en œuvre, faute de quoi l'identification de solutions appropriées peut prendre un temps important et sa mise en œuvre atteindre des coûts considérables. Pour y remédier, la mise en place de dispositifs pérennes d'évaluation et de suivi (observatoires environnementaux) et le développement d'outils d'aide à la décision sont indissociables pour une gestion plus réactive et efficace des ressources en sol et en eau.

Aujourd'hui, l'augmentation des terres salées dans le delta et le manque financement des agriculteurs poussent les jeunes de plus en plus à abandonner le secteur agricole (exode, émigration...). L'abandon de ces terres est un grand cadeau au vent, agent morphogénique qui, dans ces conditions arides, mobilise les particules vers les maigres superficies exploitées créant ainsi de nouveaux problèmes (SY, 1995).

En dépit de tous les résultats de cette thèse, il convient de reconnaître qu'elle comporte des limites tant sur fond que sur la méthodologie. Nous n'avons pas pu, faute de moyens financiers suffisants, effectuer des analyses poussées de laboratoire sur les sols, analyses sur les propriétés autres que la CE et le pH afin de les faire correspondre avec la perception des agriculteurs. Il n'a pas été possible non plus pour nous de déterminer, sur le terrain et sur tous paysans enquêtes, d'autres termes locaux pour caractériser par exemple un sol sodique, salin ou salin/sodique. Ces limites ouvrent néanmoins des perspectives de recherches qui mériteraient d'être approfondies. Il convient de préciser aussi les limites de la cartographie de la salinité dans ces zones semi-arides. En effet, les surfaces salines détectables par télédétection se confondent souvent avec ceux de sols nus. Mais dans notre cas d'étude, nous avons restreint cette possibilité en ne sélectionnant que les superficies exploitées ou non. Les surfaces de dunes dans le *Jeeri* présente les caractéristiques spectrales que les sols non exploités dans le *Waal*.

Perspectives de recherche

À l'issue de ce travail de thèse subsistent quelques questions scientifiques qui pourraient permettre de mieux comprendre le contexte de la salinité dans le delta du Sénégal.

- ✓ Une étude ethnolinguistique très poussée sur les indicateurs et les termes locaux grâce auxquels les paysans caractérisent les sols salins et sodiques.
- ✓ D'établir une correspondance entre des propriétés chimiques de sols salés et les résultats de la perception. À travers des normes de classifications des sols salés, il serait possible de faire correspondre pour chaque perception la valeur ou l'intervalle de salinité sur les normes de classifications.
- ✓ La cartographie géostatistique et de télédétection ont été les points de méthodologie qui nous ont permis de répondre à nos hypothèses de recherches. Cependant, ces techniques ne prennent en compte les caractéristiques hydrodynamiques salines, variables importantes dans le processus de salinisation. La modélisation hydrodynamique serait un point de méthodologie très important dans la cartographie des sols salés.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBAS, A. et al., 2013. « Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach ». In *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. Remote Sensing in Hydrology* 55-57, p. 43-52 (cité en pp. 13, 57, 61, 158).
- ADO, M. N., 2017. « Evaluation in situ et en conditions contrôlées de la phytodésalinisation des Vertisols irrigués. Cas d'étude du périmètre rizicole de Kollo (Niger) dans la vallée du fleuve Niger ». Thèse de Doctorat en cotutelle. Rennes : Université de Niamey/ Université de Rennes. 278 p.
- AFES et D. BAIZE, 2009. *Référentiel pédologique 2008*. Coll. Savoir-faire. Peillac : Editions Quae. 432 p. (cité en p. 32).
- AL KHAIER, F., 2003. « Soil Salinity Detection Using Satellite Remote Sensing ». Master of Science. Enschede, The Netherlands : International Institute for Geoinformation Science et Earth Observation. 70 p. (cité en pp. 61, 153).
- ALBERGEL, J. et H. DACOSTA, 1996. « Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal ». In *L'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement : mélanges à la mémoire de Jean Rodier*. Journées Hydrologiques de l'ORSTOM. Sous la dir. de P. CHEVALLIER et B. POUYAUD. Publication - AISH. Paris : AISH, p. 139-156 (cité en p. 84).
- ALEXANDRE, O. et R. ARRUS, 2004. « Les territoires de l'eau ». In *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, p. 1-3 (cité en pp. 20, 118).
- ALHAMMADI, M. et E. GLENN, 2008. « Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI ». In *International Journal Remote Sensing* 29.1745, p. 1745-1765. (Cité en pp. 158, 159).

- ALLBED, A. et L. KUMAR, 2013. « Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology : A Review ». In *Advances in Remote Sensing* 02.4, p. 373-385 (cité en p. 61).
- ALLBED, A., L. KUMAR et Y. Y. ALDAKHEEL, 2014. « Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries : Applications in a date palm dominated region ». In *Geoderma* 230-231, p. 1-8 (cité en pp. 57, 61, 62, 64, 158).
- ANDRIEU, J. et C. MERING, 2008. « Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des Rivières du Sud du delta du Saloum au Rio Geba ». In *Teledetection* 8.2, p. 93-118 (cité en p. 113).
- 2010. « Synergie des données LANDSAT et MSG pour une cartographie de la végétation sur le littoral ouest-Africain ». In *Satellites Grand Champ pour le suivi de l'environnement, des ressources naturelles et des risques*. Clermont-Ferrand, France (cité en p. 113).
- ARID, 2004. *Typologie des systèmes irrigués en Afrique de l'Ouest sahélienne*. Rapport de recherche. Projet D'Amélioration des Performances des Périmètres Irrigués en Afrique. 34 p.
- AUBERT, G., 1949. *Observations sur les sols du Ferlo et de la vallée du Sénégal*. Paris : ORSTOM. 16 p. (cité en p. 50).
- 1953. « Quelques problèmes pédologiques de mise en valeur des sols du delta central nigérien (Soudan français) ». In *Desert research*. Desert Research : International Symposium, Jérusalem (IL), 1952/05/07-14. Jérusalem : Research Council of Israël, p. 1-9.
- AUBERT, G. et J. BOULAIN, 1972. *La pédologie*. 2^e éd. Coll. Que sais-je ? 352. Paris : Presses universitaires de France. 126 p. (cité en p. 32).
- BADER, J.-C., 1994. *Étude des problèmes d'environnement et des projets de conservation du patrimoine naturel*. Rapport Technique. Dakar : ORSTOM. 28 p. (cité en p. 91).
- 2015. *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal : de l'origine des mesures jusqu'en 2011*. Avec la coll. d'IRD et OMVS. OCLC : ocn930923794. Marseille : IRD Éditions. 920 p. (cité en pp. 19, 86, 89, 93-95, 262).
- BADER, J.-C. et J. ALBERGEL, 2015. *Artificial flood support on Senegal river : a challenge to protect natural resources in the valley*. Rapport Technique. Montpellier : IRD. 23 p.
- BADER, J.-C., G. BELAUD et al., 2015. *Modélisation de propagation d'écoulement entre lits mineur et majeur sur les fleuves Sénégal et Niger*. Rapport Technique. Montpellier : IRD. 38 p. (cité en p. 87).

- BAILLY, A. et H. BÉGUIN, 2003. *Introduction à la géographie humaine*. 8e édition. Coll. U. Paris : Armand Colin. 216 p. (cité en p. 46).
- BAIZE, D. et B. JABIOL, 1995. *Guide pour la description des sols*. Editions Quae. Coll. Techniques et Pratiques. Paris : INRA. 389 p. (cité en p. 32).
- BALLOUCHE, A. et al., 2007. « Protection et gestion intégrée de zones humides sahéliennes de Mauritanie : lacs d'Aleg et de Mâl (Brakna) ». In *Quelles aires protégées pour l'Afrique de l'Ouest ? : conservation de la biodiversité et développement*. Séminaire de Parakou : Quelles aires protégées pour l'Afrique de l'Ouest ? : conservation de la biodiversité et développement (BEN) 14-19/04/2003. Sous la dir. d'A. FOURNIER, B. SINSIN et G. MENSAH. Colloques et Séminaires. Paris : IRD, p. 486-497 (cité en p. 105).
- BARBIÉRO, L. et C. LAPERROUSAZ, 1999. « Cartographie de la salinité dans la vallée du Sénégal : succès d'une démarche ascendante ». In *Géophysique des sols et des formations superficielles : résumés étendus*. 2ème colloque GEOFCAN. Orléans : BRGM, p. 3-7 (cité en p. 153).
- BARRETEAU, O., 1998. « Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d'organisation ». Thèse de Doctorat. Montpellier : ENGREF. 260 p. (cité en p. 123).
- BARTOUT, P., 2016. « Le territoire comme palimpseste lentique : une vision spatiale géohistorique des interactions hommes-milieux-plans d'eau ». In *Revue de géographie de l'Est* 56.1 (cité en p. 103).
- 2012. *Les étangs du Limousin : des zones humides face au développement durable*. Treignac : Éd. les Monédières.
- 2006. « Pour un référentiel des zones humides intérieures en milieu tempéré : l'exemple des étangs en Limousin (France) ». Thèse de Doctorat. Limoges : Université de Limoges. 500 p. (cité en p. 100).
- BARTOUT, P. et L. TOUCHART, 2013. « L'inventaire des plans d'eau français : outils d'une meilleure gestion des eaux de surface ». In *Annales de géographie* 3.691, p. 266-289 (cité en p. 103).
- 2017. « Le territoire limnique, une alternative à la gouvernance des plans d'eau par masses d'eau ? » In *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 17.3 (cité en pp. 18, 20, 118, 200, 202).

- BARUSSEAU, J. et al., 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*. Avec la coll. de P. MICHEL. Coll. Etudes - Ministère de la Coopération et du Développement. Perpignan : Presses Universitaires de Perpignan. 158 p. (cité en pp. 18, 132, 135).
- BEAUCHAMP, J., 2005. « Estuaires et deltas ». In *La sédimentologie*. Cours de Sciences de la Terre. Picardie : Université de Picardie Jules VERNE (cité en p. 38).
- BÉCHET, B. et al., déc. 2017. *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action*. Research Report. INRA. 609 p.
- BELIÈRES, J.-F., P. Y. JAMIN et al., 2013. « Dynamiques foncières, investissements et modèles de production pour l'irrigation en Afrique de l'Ouest : logiques financières contre cohérences sociales ? » In *Cahiers Agricultures* 22.1, p. 61-66 (cité en pp. 123, 126, 129).
- BELIÈRES, J.-F. et A. KANE, 1993. « Aménagements hydro-agricoles publics et privés dans le delta du fleuve sénégal : développement et perspectives ». In *Les rizicultures de l'Afrique de l'Ouest*, p. 155-173 (cité en pp. 121, 126, 127).
- BELIÈRES, J.-F. et E. H. A. TOURÉ, 1999. « Impact de l'ajustement structurel sur l'agriculture irriguée du delta du Sénégal ». Thèse de Doctorat commune. Montpellier : ENSA Montpellier. 428 p. (cité en pp. 15, 16, 120, 126, 129).
- BELLEÇ, P. et al., 2005. *Propositions pour un cadre national de gestion durable des sols*. Rapport de recherche CGAAER n° 14135. Paris, France : Conseil Général de l'environnement et du Développement durable. 138 p. (cité en p. 32).
- BELLOUMI, M. et M. M. SALAH, 2007. « Impacts de la salinité sur l'efficience technique de l'agriculture irriguée : application au cas des Oasis de Nefzaoua en Tunisie ». In *Economie prevision* n° 177.1, p. 77-89.
- BENCHALAL, A. et A. OUKIL, 2009. « Identification et détection, par imagerie satellitaire, de la dégradation des sols par la salinité dans la cuvette de Ouargla, sud de l'Algérie ». In *Journées d'Animation Scientifique (J AS09) de l'AUF*. Alger, p. 1-6 (cité en p. 158).
- BERGEZ, J.-E. et B. LACROIX, 2008. « Gestion de l'irrigation : du stratégique au tactique. Quelques apports de la recherche ». In *Innovations Agronomiques* 2, p. 53-63 (cité en pp. 194, 207, 208).
- BERTHET, E., 2015. *Concevoir l'écosystème, un nouveau défi pour l'agriculture*. 1^{re} éd. Collection Sciences de la Conception. Paris, France : Presses des Mines. 271 p.

- BERTHIER, N., 2016. *Les techniques d'enquête en sciences sociales : Méthodes et exercices corrigés*. 4e édition. Coll. U. Paris : Armand Colin. 352 p. (cité en p. 47).
- BERTONCIN, M., P. FAGGI et D. QUATRIDA, 2009. « À la recherche du développement local dans la vallée du Sénégal. Réflexions sur le Ngalenka et la genèse d'un territoire ». In *Géocarrefour* 84.1, p. 65-72 (cité en p. 118).
- BERTRAND, F., 1994. « Les modes de mise en valeur régionaux des mangroves des pays des rivières du Sud : essai de typologie et de représentation graphique ». In *Dynamique et usages de la mangrove dans les pays des rivières du Sud (du Sénégal à la Sierra Leone)*. Sous la dir. de M.-C. CORMIER SALEM. Colloques et Séminaires. Paris / Dakar (SEN) : ORSTOM, p. 153-160 (cité en p. 109).
- BETHEMONT, J., 1972. « Le thème de l'eau dans la vallée du Rhône : essai sur la genèse d'un espace hydraulique ». Thèse de Doctorat. Lyon : Université Lumière. 642 p. (cité en p. 20).
- 2002. *Les grands fleuves : entre nature et société*. 2^e éd. Coll. U. Paris : Armand Colin. 255 p. (cité en p. 20).
- BETHEMONT, J., P. FAGGI et T. P. ZOUNGRANA, 2003. *La vallée du Sourou, Burkina Faso : genèse d'un territoire hydraulique dans l'Afrique soudano-sahélienne*. Paris Budapest Torino : l'Harmattan. 230 p. (cité en p. 118).
- BÈYE, G., 1972. « Bilan de deux années d'études de l'évolution de la salinité dans la cuvette du Boundoum Ouest dans le delta du fleuve Sénégal ». In *L'Agronomie Tropicale. Série 3, Agronomie Générale. Etudes Scientifiques* 27, p. 358-387 (cité en pp. 19, 59).
- BIED-CHARRETON, M. et al., 2006. « La gouvernance des ressources en eau dans les pays en développement : enjeux nationaux et globaux ». In *Mondes en développement* 3.3, p. 39-62 (cité en p. 199).
- BLANCHON, D., 2009. *L'espace hydraulique sud-africain : Le partage des eaux*. Coll. Hommes et Sociétés. Paris : Karthala. 300 p. (cité en p. 118).
- BOCQUET, E., 2018. « Reboisements de mangrove dans le delta du Saloum, Sénégal : Evaluation écologique et sociale ». Mémoire de Master. Liège, Belgique : Université de Liège. 86 p.
- BOIVIN, P., 1993. « La dégradation des terres irriguées dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal ». In *Proceedings of the SCOPE workshop. sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions*. Montpellier, France, CIRAD : CANRY F., CAMPBELL B. (Eds), p. 239-244 (cité en pp. 13, 19, 52).

- BOIVIN, P., J. L. MAEGHT et F. FAVRE, 1998. « Les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : caractéristiques et évolution sous irrigation ». In *Étude et Gestion des Sols*. Étude et Gestion des Sols 5.4, p. 235-246 (cité en pp. 53, 57, 59).
- BONNEFOND, P., 1986. « L'aménagement de la rive gauche du fleuve Sénégal : aspects macro-économiques ». In Cahiers de la Recherche-Développement 12, p. 56-64.
- 1983. *Le riz dans la vallée du fleuve Sénégal : subventions et coûts de production*. (SAED 1980/1981). Paris : Ministère des Relations Extérieures. 95 p.
- 1981. *Systèmes de culture irriguée et systèmes de production paysans sur la rive gauche du fleuve Sénégal*. Dakar : ORSTOM. 44 p. (cité en p. 15).
- BONNEFOND, P. et al., 1981. « La vallée du fleuve Sénégal et ses aménagements ». In *Études Scientifiques*, p. 1-42 (cité en p. 124).
- BOUAZIZ, M., J. MATSCHULLAT et R. GLOAGUEN, 2011. « Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil ». In *Comptes Rendus Geoscience* 343.11, p. 795-803 (cité en pp. 57, 159).
- BOULAIN, J., 1975. *Géographie des sols*. Coll. Sup 17. Paris : Presses universitaires de France. 109 p. (cité en pp. 32, 36, 58).
- 1997. « Histoire abrégée de la Science des Sols ». In *Étude et Gestion des Sols* 4.2, p. 141-151 (cité en pp. 32, 59).
- 1983. « V. V. Dokouchaev et les débuts de la pédologie. » In *Revue d'histoire des sciences* 36.3, p. 285-306 (cité en pp. 33, 36).
- BOURGINE, B., 2018a. *Découverte des principales fonctions géostatistiques de GDM*. Tutoriel. BRGM. 60 p. (cité en p. 56).
- 2018b. *GDM - Outils (géo)statistiques*. Manuel de Référence BRGM/RC-67538-FR. BRGM. 139 p. (cité en p. 55).
- BOURQUE, P. A., 2010. *La planète Terre*. Cours de Sciences de la Terre. Canada : Université de Laval. 20 p.
- BRUCKMANN, L., 2017. « Les territoires du fleuve : une analyse par l'image de l'intégration territoriale du fleuve Sénégal ». In *EchoGéo* 42, p. 1-15 (cité en p. 119).
- BURTON, J., 2004. *La gestion intégrée des ressources en eau par bassin*. Manuel de formation. OCLC : 798836569. Québec : Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie. 260 p. (cité en p. 201).

- CALOZ, R. et C. COLLET, 2001. *Précis de télédétection : Traitements numériques d'images de télédétection*. T. 3. Québec : Presses de l'Université du Québec-AUF. 393 p.
- CARRÉ, F., 2001. « XLVIIIème chronique océanographique ». In *Noroi* 188, p. 107-152 (cité en p. 39).
- CEUPPENS, J., M. WOPEREIS et M. KANE, 1997. *Étude de la salinité en riziculture non drainée dans le delta du Sénégal*. Projet de gestion de l'eau- Bulletin Technique - 13. Saint-Louis-Sénégal : SAED. 40 p. (cité en pp. 19, 52, 53, 98, 152).
- CISSÉ, B., 2011. « Les eaux de drainage des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal : systèmes d'évacuation et qualité des eaux ». Thèse de Doctorat. Dakar-Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 310 p. (cité en pp. 73, 96, 123, 186, 187).
- CITEAU, L., A. BISPO et M. BARDY, 2008. *Gestion durable des sols*. Versailles : Editions Quae. 335 p.
- CLAVAL, P., 1974. « La géographie et la perception de l'espace ». In *L'Espace géographique* 3.3, p. 179-187 (cité en pp. 22, 177).
- 1981. *La Nouvelle géographie*. Les presses universitaires de France. Coll. Que sais-je? Google-Books-ID : lC1YDwAAQBAJ. Paris, France : FeniXX. 142 p. (cité en p. 177).
- COGELS, F. et J.-Y. GAC, 1981. « Le lac de Guiers : fonctionnement, bilans hydriques : évaporation d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Sénégal) ». In *Cahiers ORSTOM* 12.1, p. 41-60 (cité en p. 104).
- COGELS, F.-X., 1994. *La qualité des eaux de surface dans le delta du fleuve Sénégal et le lac de Guiers*. Dakar : ORSTOM. 48 p. (cité en p. 185).
- COLES, P., avr. 2000. « Grands barrages : La fin d'une époque ? » In *Le courrier de l'UNESCO* 53.4, p. 10-11 (cité en p. 199).
- COLY, A., 1992. « Le lac de Guiers : modalités de gestion hydrologique et approche quantitative en 1991 : rapport de stage DEA de géographie physique ». Rapport de stage. Dakar, Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 45 p. (cité en p. 103).
- 2006. *Projet d'élaboration d'un plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau (PAGIRE). Étude sur les usages et les besoins en eau*. Rpport final. Dakar : DGPRE. 120 p. (cité en pp. 103, 202).
- COLY, A., M. JACQUES et P. MARTIN, 2003. *Réflexions sur la nature des objets et des indicateurs de la géographie*. Rapport de recherche. Université d'Avignon. 316 p. (cité en pp. 41, 42).

- COMBRES, J.-C. et L. LE MESO, 1999. « Le pilotage de l'irrigation : de la parcelle au périmètre irrigué ». In *Agriculture et développement* 24, p. 101-105 (cité en p. 207).
- CONGEDO, L., 2019. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Manuel de Référence. 234 p. (cité en p. 65).
- CORMIER SALEM, M.-C., 2016. « Habiter les deltas ouest-africains : incertitudes scientifiques et enjeux humains ». In *Habiter le littoral : enjeux contemporains*. Sous la dir. de S. ROBERT et H. MELIN. Espace et Développement Durable. Marseille : PUP, p. 409-429 (cité en pp. 70, 115).
- 1998. « Sociétés et espaces littoraux ouest-africains : dynamiques, enjeux et conflits ». In *Iles et littoraux tropicaux : actes des 7èmes journées de géographie tropicale du comité national de géographes français - U.G.I. (commission "Espaces tropicaux et leur Développement")*. Sous la dir. de G. MAINET. Nantes : Ouest Editions, p. 695-708 (cité en p. 119).
- CORMIER SALEM, M.-C. et al., 2016. « SIRENA, une plateforme participative au service de la gouvernance du delta transfrontalier du fleuve Sénégal ». In *Revue d'Ethnoécologie* 9. Sous la dir. de P. d. ROBERT et S. DUVAIL, p. 1-18 (cité en p. 116).
- COUEY, M. et al., 1965. « Études récentes sur la fertilisation du riz dans le delta au Sénégal ». In *La fertilité des sols et l'utilisation des engrais en Afrique de l'Ouest*. 2ème réunion sur la Fertilité des Sols et l'Utilisation des Engrais en Afrique de l'Ouest. Dakar : FAO.
- DAIH, 2009. *Note sur la gestion du Gorom Lamptar contre saison chaude 2009*. Note de synthèse. Saint-Louis-Sénégal : SAED. 10 p. (cité en pp. 72, 73, 145).
- DANSERO, E., E. LUZZATI et S. M. SECK, 2009. *Organisations paysannes et développement local : leçons à partir du cas du delta du fleuve Sénégal*. Google-Books-ID : 3UL25Z3ujBoC. Italie : L'Harmattan. 335 p.
- DECKERS, J. et al., 1996. « Évolution de l'acidité dans les sols du delta du fleuve Sénégal sous influence anthropogène ». In *Étude et Gestion des Sols* 3.3, p. 151-163 (cité en pp. 21, 52).
- DELCOMBEL, E., 1996. « Analyse de la diversité des exploitations rizicoles dans le delta du fleuve Sénégal. Contribution à la construction d'une matrice de comptabilité sociale ». Mémoire de DEA. Montpellier : Université de Bourgogne. 101 p.
- DEMANGEOT, J., 1994. *Les milieux « naturels » du globe*. Coll. Géographie. Paris : Masson. 313 p. (cité en p. 69).
- DEMATÊ, J. A. M. et al., 2004. « Visible-NIR reflectance : a new approach on soil evaluation ». In *Geoderma* 121.1, p. 95-112 (cité en p. 61).

- DESCROIX, L., 2003a. « Gestion de l'eau ou aménagement de l'espace ? : la fonction hydrologique d'un territoire ». In *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitiques de l'eau*. Sous la dir. de F. LASSERRE et L. DESCROIX. Avec la coll. de J. BURTON. Ressources Renouvelables. Paris : L'Harmattan, p. 177-219.
- 2003b. « L'irrigation : multiplication des récoltes, concentration des nuisances ». In *Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitiques de l'eau*. Sous la dir. de F. LASSERRE et L. DESCROIX. Avec la coll. de J. BURTON. Ressources Renouvelables. Paris : L'Harmattan, p. 153-176.
- 2003c. « Sur les rives du Sénégal : l'eau et le riz dans la gestion du territoire ». In LASSERRE, F. et L. DESCROIX. *L'eau dans tous ses états : Chine, Australie, Sénégal, Etats-Unis, Mexique, Moyen-Orient ...* Avec la coll. d'A. LE STRAT. Ressources Renouvelables. Paris : L'Harmattan, p. 277-306 (cité en pp. 119, 130).
- DGPRES, 2016. *Suivi du fleuve Sénégal*. Présentation d'atelier. Saint-Louis-Sénégal : (DGPRES) Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau. 17 p. (cité en pp. 90, 259).
- DI MÉO, G., 20 août 2014. *Introduction à la géographie sociale*. Paris : Armand Colin. 192 p. (cité en p. 40).
- DIA, A., 1986. « Les aspects de la gestion des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal ». Thèse de Doctorat. Montpellier : Université Montpellier III. 236 p. (cité en pp. 76, 96, 187).
- DIA, S., 2012. « Évolution des politiques publiques dans le Delta du Sénégal : les réponses organisationnelles et spatiales au désengagement de la SAED. Solutions préventives aux conflits d'usage ou facteur d'inégalités dans le Delta du Sénégal ? » In *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 12.2, p. 1-19 (cité en p. 146).
- DIAGANA, A., 1994. « Études hydrogéologiques dans la vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Podor : relations eaux de surface/eaux souterraines ». Thèse de Doctorat. Dakar : ORSTOM. 177 p.
- DIAKHATÉ, M., 1986. « Le barrage de Diama : essai sur l'évaluation de ses impacts potentiels ». In *Géocarrefour* 61.1, p. 43-61.
- DIAO, S., 1992. « Étude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal (secteur Rosso-Dagana-Lac de Guiers) ». Mémoire de Magister. Dakar : UCAD. 104 p.

- DI AW, A., 1993. « Rôle des structures d'exploitation agricole dans l'aménagement du Fleuve Sénégal ». Thèse de Doctorat. Orléans : Université d'Orléans. 516 p. (cité en pp. [71](#), [76](#), [81](#), [91](#), [92](#), [120](#)).
- DI AW, M., 2008. « Approche hydrochimique et isotopique de la relation eau de surface/nappe et du mode de recharge de la nappe alluviale dans l'estuaire et la basse vallée du fleuve Sénégal : Identification des zones inondées par Télédétection et par traçage isotopique ». Thèse de Doctorat. Dakar, Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 210 p. (cité en pp. [81](#), [258](#)).
- DIÈNE, R. S., 1998. « Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture ». Thèse de Doctorat. Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 175 p. (cité en pp. [52](#), [53](#)).
- DIEP, T. M. H., 1994. « Influence des contraintes édaphiques sur la nutrition minérale, le développement et la production du cocotier (*Cocos nucifera* L.) dans des sols sulfatés acides salés ou non salés du delta du Mékong : effet améliorant d'un apport de phosphate naturel ». Thèse de Doctorat. Créteil : Université Paris 12. 481 p.
- DIOP, A., 1998. « Salinité des sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : zone de Mboyo : aspects morphologiques et géochimiques ». Mémoire de DEA. Dakar : Université Cheikh Anta DIOP. 81 p. (cité en p. [53](#)).
- DIOP, P., 2017. « Vers une stratégie de gestion participative multi-usages de la ressource en eau dans le delta du fleuve Sénégal : processus de décision et outils de régulation autour du lac de Guiers ». Thèse de doct. 371 p.
- DIOUF, O., 2015. « Cartographie de la végétation aquatique dans le bas delta du Sénégal : Approche orientée objet sur l'évolution de la végétation et essais sur la discrimination du typha à l'aide d'indices ». Mémoire de Master. Orléans : Université d'Orléans. 101 p. (cité en pp. [7](#), [111](#), [132](#), [133](#)).
- DORE, T., M. LA BAIL et P. MARTIN, 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Quae. Coll. Synthèse. Versailles : Editions Quae. 381 p. (cité en p. [33](#)).
- DOUAOUI, A. E. K., H. NICOLAS et C. WALTER, 2006. « Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data ». In *Geoderma* 134.1, p. 217-230 (cité en pp. [57](#), [64](#), [158](#), [159](#)).

- DUBOIS, J., 1957. « Avant-projet d'aménagement de l'Aftout-ès-Sahel et de la partie mauritanienne du delta du Sénégal ». In *Bulletin - Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal* 109.
- 1963. *La mise en valeur du delta du Sénégal : Etudes, Réalisations et Projets*. Rapport de recherche. Saint-Louis : Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal. 597 p. (cité en p. 50).
- 1959. *Le développement du delta du Sénégal*. Littérature grise. Saint-Louis-Sénégal : Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal. 18 p.
- 1954. « Sur une classification de sols de delta soumis à des influences salines appliquée au Bas-Sénégal ». In *Compte rendus de la deuxième conférence interafricaine des sols*. Conférence interafricaine des sols. T. 2. Bruxelles : Direction Agriculture, Forêts et Elevages du Ministère des Colonies, p. 1119-1124.
- DUBUCQ, M., 1986. « Télédétection spatiale et érosion des sols : étude bibliographique ». In *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 22.2, p. 247-258 (cité en p. 59).
- DUPLANTIER, J.-M. et al., 1990. « Structures génétiques comparées de trois espèces de rongeurs africains du genre *Mastomys* au Sénégal ». In *Genetica* 81, p. 179-192.
- DUPRÉ, S., 2006. « Perceptions et représentations géographiques : un outil pour aménager les forêts touristifiées ? » In *Téoros. Revue de recherche en tourisme* 25.25, p. 53-61 (cité en p. 178).
- DURAND, J.-H., 1983. *Les Sols irrigables : étude pédologique*. Presses Universitaire de France. Paris : Agence de Coopération Culturelle et Technique. 338 p. (cité en pp. 49, 165).
- DURAND, P., B. ANSELME et Y.-F. THOMAS, 27 avr. 2010. « L'impact de l'ouverture de la brèche dans la langue de Barbarie à Saint-Louis du Sénégal en 2003 : un changement de nature de l'aléa inondation ? » In *Cybergeog : European Journal of Geography* (cité en p. 39).
- DURANT, J.-H., 1969. « Saline Soils of the Senegal delta ». In *Saline soils in Africa*. AGRO-KEMIA ES TALAJTAN. T. 18, p. 181-186 (cité en p. 51).
- ESCADAFAL, R., 1989. *Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection*. Coll. Études et thèses. OCLC : 20552443. Bondy : Editions de l'ORSTOM. 317 p. (cité en pp. 59, 61).
- ETIENNE, L. et al., 2012. « Dynamiques récentes des sebkhas littorales de l'archipel des Kerkennah (Tunisie centro-méridionale) : apport de la télédétection. » In *Teledetection* 11.1, p. 273-281.

- FAGGI, P. et R. BERGERON, 1990. « Les développements de l'irrigation dans la diagonale aride entre logique productive et logique stratégique ? » In *Géocarrefour* 65.1, p. 21-26 (cité en p. 118).
- FAGNANI, J., 31 déc. 1990. « De l'utilisation du concept de stratégie en géographie sociale : quelques éléments de réflexion ». In *Strates. Matériaux pour la recherche en sciences sociales* 5 (cité en p. 40).
- FAION, D. et al., 1988. *La télédétection satellitaire en milieu végétal. : Approche de la télédétection des unités de végétation (marais & bocage)*. Caen, France. 274 p.
- FAN, X. et al., 2012. « Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics. » In *Land Degrad. Dev.* 23.2, p. 175-189 (cité en p. 159).
- FANCHETTE, S., 2006a. « De l'importance des liens géographie physique/géographie humaine pour comprendre les risques de submersion des deltas surpeuplés. » In *Herodote - Revue de géographie et de géopolitique* 121, p. 3-6.
- 2006b. « Le delta du Niger (Nigeria) : rivalités de pouvoir, revendications territoriales et exploitation pétrolière ou les ferments de la violence ». In *Herodote - Revue de géographie et de géopolitique* 121, p. 190-220.
- 1997. *Le delta du Nil : densités de population et urbanisation des campagnes*. Coll. Fascicule de Recherches URBAMA 32. Tours : URBAMA. 398 p. (cité en pp. 37, 69).
- 2006c. « Le delta du Nil : enjeux et limites du contrôle territorial par l'État ». In *Herodote - Revue de géographie et de géopolitique* 121, p. 165-190.
- 2014. « Les Deltas du fleuve Rouge et du Nil. Conditions pour une densification élevée du peuplement ». In 8.
- FAO, 2002. *Eau et agriculture : produire plus avec moins*. Guide à l'intention des décideurs. Rome. 26 p. (cité en pp. 203, 208).
- 1998. *Résoudre les conflits concernant les terres*. Focus / 1998. URL : <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/9810/spot4.htm> (visité le 01/10/2019) (cité en p. 13).
- FAO, CISEAU et IPTRID, 2006. *Conférence électronique sur la salinisation : extension et stratégies de prévention et réhabilitation*. Rapport de recherche. CISEAU (Centre d'Information Sur l'Eau Agricole et ses Usages), FAO (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture) et IPTRID (Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage). 11 p. (cité en pp. 13, 14, 31).

- FAO et SEDAGRI, 1970. *Étude hydroagricole du bassin du Fleuve Sénégal*. Rapport Technique AGL : SFÆEG 61. Paris, France : SEDAGRI. 78 p. (cité en pp. [36](#), [59](#), [76](#), [82](#)).
- FARIFTEH, J., A. FRASHAD et R. J. GEORGE, 2006. « Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics ». In *Geoderma* 130.3, p. 191-206 (cité en p. [61](#)).
- FAYE, A., 1990. « Eau et milieu physique dans le bassin de l'axe Gorom-Lampsar ». Mémoire de Maîtrise. Dakar : UCAD. 107 p. (cité en pp. [144](#), [145](#)).
- FAYE, B., 2009. « Gestion Intégrée des Ressources en Eau e l'axe Gorom Lampsar : Cas des PIV et es PIP du Delta Central ». Mémoire de Master. Ouagadougou, Burkina Faso. 71 p. (cité en pp. [141](#), [142](#), [145](#), [147](#), [148](#)).
- FAYE, O., D. FONTENILLE et al., 1995. « Paludisme et riziculture dans le delta du fleuve Sénégal (Sénégal) ». In *Annales de la Société Belge de Médecine Tropicale* 75, p. 179-189 (cité en p. [132](#)).
- FAYE, O., O. GAYE et al., 1998. « Prévision et prévention des épidémies de paludisme dans la vallée du fleuve Sénégal ». In *Santé : Cahiers d'Etudes et de Recherches Francophones* 8, p. 347-352 (cité en p. [132](#)).
- FAYE, V., C. MBOW et A. THIAM, 2016. « Évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol entre 1973 et 2010 dans la zone agropastorale du lac de Guiers (Sénégal) ». In *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* 16.1 (cité en p. [105](#)).
- FERNANDEZ-BUCES, N. et al., 2006. « Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation : A case study in the former lake Texcoco, Mexico ». In *Journal of Arid Environments* 65.4, p. 644-667 (cité en p. [13](#)).
- FOIN, P., 1985. *Cours de télédétection*. Paris, France : Ecole nationale des sciences géographiques.
- FOTSING, J.-M., éd., 2005. *Apport des SIG à la recherche : actes du colloque international géomatique et applications n° 1*. Coll. du CEDETE. Orléans : Presses Universitaires d'Orléans. 263 p. (cité en p. [67](#)).
- FRÉCAUT, R., 1982. *Éléments d'hydrologie et de dynamique fluviales des régions chaudes et humides des basses latitudes*. Nancy : Publications Université Nancy II. 147 p. (cité en pp. [89](#), [99](#)).
- GAC, J.-Y., M. CARN et al., 1992. *Environnement et qualité des eaux du Sénégal : rapport scientifique n° 7 : ébauche du rapport final*. Dakar : ORSTOM. 74 p.

- GAC, J.-Y., A. KANE et J. MONTEILLET, 1981. « Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850 ». In *Cahiers ORSTOM* 12.1, p. 73-75.
- GAC, J.-Y. et A. KANE, 1986. « Le fleuve Sénégal : Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulières à l'embouchure ». In *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires* 39.1, p. 99-130 (cité en pp. 89, 94).
- 1985. *Les flux continentaux de matières particulières et dissoutes à l'embouchure du fleuve Sénégal (Station de St Louis)*. Dakar Hann : ORSTOM. 79 p.
- GANTET, P., J.-P. MONTOROI et C. FALL, mar. 2017. « Face à la salinisation des terres cultivées ». In *Sciences au Sud*, p. 1-2 (cité en p. 36).
- GAUCHER, G., 1966. *Étude pédologique de la vallée du Lampsar et la basse vallée du Djeuss*. Saint-Louis-Sénégal : SAED. 87 p. (cité en pp. 76, 77, 79, 82).
- GAVAUD, M., 1989. « Nature et localisation de la dégradation des sols au Sénégal ». In *Cahiers ORSTOM* 25.3, p. 253-262.
- GHERINA, S. A. et al., 2008. « Application de la télédétection dans la connaissance de la salinité des sols de la plaine du Bas-Chéouli ». In *Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*. Algérie : CIRAD, p. 9 (cité en p. 46).
- GHIOTTI, S., 2006. « Les Territoires de l'eau et la décentralisation. La gouvernance de bassin versant ou les limites d'une évidence ». In *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* (Dossier 6) (cité en p. 118).
- GIRARD, M.-C. et C. M. GIRARD, 2010. *Traitement des données de télédétection : Environnement et ressources naturelles*. Paris : Dunod. 575 p. (cité en p. 60).
- GIRARD, M.-C., C. WALTER et J.-C. RÉMY, 2011. *Sols et environnement : Cours, exercices corrigés et études de cas*. 2^e éd. Paris : Dunod. 896 p. (cité en pp. 32, 36).
- GOELDNER-GIANELLA, L. et A.-L. HUMAIN-LAMOURE, 2010. « Les enquêtes par questionnaire en géographie de l'environnement ». In *Espace géographique* 39.4, p. 325-344 (cité en p. 46).
- GONZALEZ-BARRIOS, J., 1994. *Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride Mexicaine : exemple dans la "Comarca Lagunera"*. OCLC : 952495752. Paris : ORSTOM.
- GRAMOND, D. et al., 2005. « Méthodologies de délimitation des zones humides : de l'image satellitale à l'analyse terrain ». In *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 82.2, p. 246-255 (cité en p. 101).

- GRATTON, Y., 2002. « Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale ». In *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, p. 1-4 (cité en p. 57).
- GRET, 1992. *L'irrigation villageoise : Gérer les petits périmètres irrigués au Sahel*. Le point sur les technologies (cité en pp. 202, 203, 206, 208).
- GRÜNBERGER, O., 2015. « Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides ». HDR. Montpellier : Université de Montpellier. 133 p.
- GUILCHER, A., 1954. *Morphologie littorale et sous-marine*. Paris : PUF. 215 p. (cité en pp. 37, 77).
- 1965. *Précis d'hydrologie marine et continentale*. Paris : Masson. 389 p.
- GUILMOTO, C. Z., 1994. « Démographe et développement dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal ». In *Maîtrise de la croissance démographique et développement en Afrique*. Sous la dir. de N. KOFFI et al. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 403-417.
- HAMERLYNCK, O. et S. DUVAIL, 2003. *The rehabilitation of the delta of the Senegal river in Mauritania : fielding the ecosystem approach*. IUCN (cité en p. 19).
- HANDSCHUMACHER, P., G. HÉBRARD et al., 1995. « Risques sanitaires et aménagements hydro-agricoles : un couple inséparable ? L'exemple du périmètre de Diomandou ». In *Nianga, Laboratoire de la culture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*. Ed. de l'ORSTOM, coll. *Colloques et séminaires*, p. 117-131.
- HANDSCHUMACHER, P., J.-P. HERVÉ et G. HÉBRARD, 1992. *Des aménagements hydroagricoles dans la vallée du fleuve Sénégal ou le risque des maladies hydriques en milieu sahélien*. Dakar : ORSTOM. 14 p. (cité en p. 132).
- HARTANI, T., M. KUPER et A. E. K. DOUAOUI, 2007. « Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff cas du périmètre de Ouarizane ». In *Troisième atelier régional du projet Sirma*. Nabeul, Tunisie, p. 1-17.
- HUETE, A. R., 1988. « A soil-adjusted vegetation index (SAVI) ». In *Remote sensing of environment* 25.3, p. 295-309 (cité en p. 159).
- HUMBERT, J., M. MIETTON et A. KANE, 1995. « L'après-barrages dans le delta du Sénégal. Scénarios de remise en eau de la cuvette du Ndiel et impacts ». In *Science et changements planétaires / Sécheresse* 6.2, p. 201-214.
- JAEGER, M. C., 1987. « La télédétection satellitaire au service de la géographie : son exploitation et ses limites actuelles ». In *Revue de géographie alpine* 75.3, p. 263-284.

- JAMIN, P. Y. et J.-F. TOURRAND, 1986. « Évolution de l'agriculture et de l'élevage dans une zone de grands aménagements : le delta du fleuve Sénégal ». In. Cahiers de la Recherche-Développement 12, p. 21-34 (cité en pp. 15, 119).
- JOB, J.-O., 1992a. *Introduction à la géochimie des sols salés*. Rapport de mission. Tunis : ORSTOM. 32 p. (cité en pp. 13, 30).
- 1992b. « Les sols salés de l'oasis d'El Guettar ». Thèse de Doctorat. Montpellier : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. 161 p. (cité en p. 59).
- JOB, J.-O., J.-Y. LOYER et M. AILOUL, 1987. « Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols ». In *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XXIII.123, p. 9 (cité en p. 49).
- JOIN, P., 1982. *Étude pédologique d'une zone fluvio-marine à Dakar-Bango (delta du fleuve Sénégal)*. Dakar : ORSTOM. 60 p. (cité en p. 51).
- KAMARA, S., 2013. « Développements hydrauliques et gestion d'un hydrosystème largement anthropisé : le delta du fleuve Sénégal ». Thèse de Doctorat. Avignon : Université d'Avignon. 472 p. (cité en pp. 71, 79, 83, 88, 119, 120, 128).
- KAMARA, S., A. COLY et P. MARTIN, 2012. « Gestion des ouvrages hydrauliques et des ressources en eau dans le delta du Sénégal ». In *Journal of hydrocarbons Mines and environmental Research* 3, p. 66-75 (cité en pp. 69, 200, 202).
- KANE, A., 1997. « L'après barrages dans la vallée du fleuve Sénégal : modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles ». Thèse de Doctorat. Dakar, Sénégal : Cheikh Anta DIOP. 447 p. (cité en pp. 14, 19, 71, 76, 83, 96, 98, 120, 123, 125, 132, 188).
- KANE, C., 2010. « Vulnérabilité du système socio-environnemental en domaine sahélien : l'exemple de l'estuaire du fleuve Sénégal. De la perception à la gestion des risques naturels. » Thèse de Doctorat. Strasbourg : Université de Strasbourg. 318 p. (cité en p. 83).
- KERGOMARD, C., 2003. *Cours de télédétection entrée*. Cours de télédétection. Paris : Professeur Ecole Normale Supérieure Paris. 74 p. (cité en pp. 58, 60).
- KHACHEBA, R., 2011. « Cartographie de la salinité du sol évaluée par induction électromagnétique "Geonics EM38" : cas du sous bassin de Sidi Rached (Tipaza) ». Mémoire de Magister. Alger : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach. 94 p. (cité en p. 56).

- KHAN, N. et al., 2005. « Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators ». In *Agric. Water Manag* 77.1, p. 96-109 (cité en p. 159).
- KIELEN, N., 1996. *Farmers' Perceptions on Salinity and Sodicty*. Lahore, Pakistan : International Irrigation Management Institute. 70 p. (cité en pp. 23, 177, 178, 183, 196, 210, 259).
- KIJNE, J. W., 2003. *Déverrouiller le potentiel de l'eau en agriculture*. Rome, Italie : FAO. 72 p. (cité en p. 199).
- 1998. *How to Manage Salinity in Irrigated Lands : A Selective Review with Particular Reference to Irrigation in Developing Countries*. Google-Books-ID : no_OJwxJP6cC. Colombo, Sri-lanka : IWMI. 44 p. (cité en p. 196).
- KUPER, M., 1997. « Irrigation management strategies for improved salinity and sodicity control ». Thèse de Doctorat. International Irrigation Management Institute (IIMI) , Pakistan : Université agricole de Wageningen. 237 p. (cité en pp. 178, 196).
- La Gouvernance de l'Eau et de 'Assainissement appliquée aux projets humanitaires et de développement* 2016. Rapport de recherche. Paris , France : Action contre la Faim-France. 100 p.
- LACROIX, B., 2004. « Aides aux décisions d'irrigation en grandes cultures. Quelques outils et méthodes ». In *Rencontre Agrometeo*. Avignon : INRA (cité en pp. 209, 259).
- LAGANIER, R. et L. DAVY, 2000. « La gestion de l'espace face aux risques hydroclimatiques en région méditerranéenne ». In BRAVARD, J.-P. *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. gestion des excès et de la pénurie*. Paris : SEDES, p. 15-38 (cité en p. 24).
- LANDSBERG, F., 1999. « Impact de la qualité de l'eau d'irrigation sur les propriétés hydrodynamiques du sol en Moyenne Vallée du fleuve Sénégal ». Diplôme d'Ingénieur Agronome. Dakar : Université Chatholique de Louvin. 137 p. (cité en p. 53).
- LARCHER, P., 1802. *Histoire d'Hérodote traduite du grec*. T. 1. Imprimerie Crapelet, Paris. 114 p. (cité en p. 37).
- LAVIGNE DELVILLE, P., 1993. « Les paradoxes du désengagement : les périmètres irrigués villageois du fleuve Sénégal ». In *Dynamique des systèmes agraires : politiques agricoles et initiatives locales : adversaires ou partenaires*. Sous la dir. de C. BLANC-PAMARD. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 217-238.
- LE BERRE, M., 1976. « Boulaine (Jean). — Géographie des sols. » In *Revue de Géographie Alpine* 64.3, p. 420-422 (cité en p. 36).

- LE BRUSQ, J.-Y., 1980. « Étude pédologique des cuvettes de la vallée du Lampsar ». Rapport d'élève. Dakar, Sénégal : ORSTOM. 115 p. (cité en pp. 13, 19, 50).
- 1984. *Quelques observations sur la dynamique des sels et des états de surface dans les sols du delta du Sénégal*. Dakar : ORSTOM. 17 p.
- LE BRUSQ, J.-Y. et J.-Y. LOYER, 1984. *Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le delta du fleuve Sénégal (campagne 1982)*. Dakar : ORSTOM. 18 p. (cité en p. 51).
- LEGGÉ, J. A., 2001. *Les statistiques : le pouvoirs des données*. Enquêtes et programmes statistiques. Canada : Statistique Canada (cité en p. 48).
- LERICOLLAIS, A., 1981. « La vallée du Sénégal ». In *Etudes Scientifiques*, p. 5-13.
- 1989. « Risques anciens, risques nouveaux en agriculture paysanne dans la vallée du Sénégal ». In *Le risque en agriculture*. Sous la dir. de M. ELDIN et P. MILLEVILLE. A Travers Champs. Paris : ORSTOM, p. 419-436.
- LEROUX, M., 1980. « Le climat de l'Afrique tropicale ». Thèse de Doctorat d'Etat. Dakar, Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 1427 p. (cité en pp. 70, 74).
- LESERVOISIER, O., 1995. « Enjeux fonciers et frontaliers en Mauritanie ». In *Dynamique des systèmes agraires*. Terre, Terroir, Territoire : les Tensions Foncières. Sous la dir. de C. BLANC-PAMARD et L. CAMDRESY. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 341-359 (cité en p. 130).
- LHISSOU, R. et al., 2013. *Caractérisation de la salinité des sols à l'aide de l'imagerie radar satellitaire : cas de la Tunisie et du Maroc*. Rapport de recherche N° R1480. OCLC : 1007739221. Quebec : Institut National de Recherche Scientifique. 99 p.
- LILLSAND, T., R. W. KIEFER et J. CHIPMAN, 2014. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Google-Books-ID : AFHDCAAQBAJ. John Wiley & Sons. 680 p. (cité en pp. 60, 61).
- LITTRÉ, 2019. *Stratégie - définition, citations, étymologie*. In *Dictionnaire Littré* (cité en p. 40).
- LÔ, M. et O. TOURÉ, 2016. *Evaluation du cadre institutionnel de la zone du N'diael dans la perspective de la remise en eau de la réserve*. Rapport de recherche. Saint-Louis-Sénégal : UICN. 52 p. (cité en p. 106).
- LOINTIER, M., S. PIEYENS et O.R.S.T.O.M. (AGENCY : FRANCE), 1981. *Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupation du sol par télédétection*. OCLC : 16392575. Paris : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer.

- LOUHICHI, K., G. FLICHMAN et A. COMEAU, 2000. « L'amelioration de l'efficience de l'irrigation pour une economie d'eau : cas d'un périmètre irrigué en Tunisie ». In *MEDIT* 3, p. 21-29.
- LOYER, J.-Y., 1989a. « Dégradation saline des sols, induite par l'irrigation en domaine sahélien ». In *Le risque en agriculture*. Sous la dir. de M. ELDIN et P. MILLEVILLE. A Travers Champs. Paris : ORSTOM, p. 531-540 (cité en p. 52).
- 1989b. *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal*. Coll. Etudes et Thèses. Paris : ORSTOM. 132 p. (cité en p. 53).
- LOYER, J.-Y. et M. DIALLO, 1979. *La cuvette de Pont Gendarme (Vallée du Lampsar - Région du Fleuve Sénégal) : données sur les sols et sur les nappes. Recommandations pour la mise en valeur*. Dakar : ORSTOM. 47 p.
- 1980. *Note sur les sols et les nappes de la cuvette de Ndelle Ndiaye (région du fleuve Sénégal)*. Dakar : ORSTOM. 18 p. (cité en p. 53).
- MANÉ, L., 1996. « La surface du sol de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : contribution à l'étude de la dynamique actuelle des milieux naturels : du terrain à la télédétection satellitaire ». Thèse de doct. Dakar : ORSTOM (cité en p. 53).
- MANÉ, L., P. BOIVIN et L. SÉGUI, 1995. « États de surface des sols non cultivés dans la cuvette de Nianga : description, radiométrie de terrain et imagerie Spot ». In *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*. Sous la dir. de P. BOIVIN et al. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 83-105.
- MAR, N. F. et G. MAGRIN, 2006. *Dynamiques spatiales, territoires et gestion foncière autour du lac de Guiers*. Travaux et documents de l'ATP. ATP DOMINO. 40 p. (cité en p. 104).
- MARIUS, C., 1977. *Données préliminaires sur le milieu naturel et les caractéristiques pédologiques de quelques carottages effectués dans le cadre de l'ATP "Mangroves et Vasières"*. Strasbourg : CNRS. 29 p.
- MARLET, S., 2004. « Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées ». In *Modernisation de l'Agriculture Irriguée. Vers une gestion durable de l'irrigation : conséquences sur les options de modernisation* (du 19 au 23 avril). Rabat -Maroc, p. 1-11 (cité en p. 210).
- MARLET, S. et J.-O. JOB, 2006. « Processus et gestion de la salinité des sols ». In *Traité d'irrigation*. Sous la dir. de J. TIERCELIN. 2^e éd. Tec & Doc Lavoisier, p. 1-29 (cité en pp. 13, 185, 191, 213).

- MARLET, S., B. VINCENT et al., 2005. « Gestion de l'eau et de la salinité et redistribution des sels dans les périmètres irrigués ». In. INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE. Beijing, p. 1-18 (cité en p. 211).
- MATHERON, G., 1978. *Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités*. Fontainebleau, France : Ecole nationale supérieure des mines de Paris. 175 p. (cité en p. 54).
- MAYMARD, J., 1960. « Études pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal ». In *Bulletin - Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal* 122, p. 1-48 (cité en pp. 19, 50).
- 1955a. *Les sols du pseudo delta du Sénégal*. Bulletin Technique. Paris : Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal. 72 p. (cité en p. 59).
- 1955b. *Note sur quelques propriétés physico-chimiques (pH et salinité) des sols du Chémama occidental et du lac Rkiz*. Paris : ORSTOM. 7 p.
- 1951. *Prospection pédologique du Djeuss et du Bifeche (delta du Sénégal)*. Paris : ORSTOM. 98 p. (cité en pp. 50, 51).
- MBAYE, M. L., H. KARAMBIRI et G. NDIAYE, 2010. *Gestion intégrée de la réserve d'eau de Bango (Sénégal)*. Dakar : OMVS et Assemblée générale du réseau international des organismes de bassin. 64 p. (cité en p. 152).
- MBOW, L. S., 2013. « La production du territoire Sénégalais ». In *Liens* 17, p. 1-37.
- MERING, C., 1987. « Caractérisation de l'hétérogénéité des unités de paysage sur les images de télédétection ». In. Colloque Hétérogénéité ATP Télédétection, Strasbourg (FRA), 1987/05/06-07. Bondy : ORSTOM, 23 p. multigr. (Cité en p. 48).
- 1990. « Développement de systèmes experts pour la cartographie par télédétection ». In *Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Sous la dir. de M. POUGET, C. MERING et H. ANDRIANASOLO. Colloques et Séminaires. Journées Télédétection, Bondy (FRA), 1988/11/14-17. Paris : ORSTOM, p. 301-320.
- 1989. « Elaboration d'une carte thématique à partir des données satellitaires : un essai de modélisation ». In *La modélisation : aspects pratiques et méthodologie*. Sous la dir. d'E. PERRIER et al. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 343-368 (cité en p. 162).
- 1991. « Quelques remarques à propos des transferts d'échelle lors de l'interprétation des images de télédétection ». In *Le transfert d'échelle*. Sous la dir. de C. MULLON. Colloques et Séminaires. Quatrième Séminaire Informatique de l'ORSTOM. Paris : ORSTOM, p. 3-38 (cité en pp. 48, 153, 161, 162).

- MERING, C., M. POUGET et H. ANDRIANASOLO, éd., 1990. *Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales*. Colloques et Séminaires : Journées Télédétection, Bondy (FRA), 1988/11/14-17. Paris : ORSTOM. 323 p.
- MEUBLAT, G. et J. INGLES, 1997. « L'éternel retour d'une politique de grands projets : l'aménagement du fleuve Sénégal en perspective ». In *Regards interdisciplinaires sur les politiques de développement*. Sous la dir. de J.-F. BARÉ. Paris : L'Harmattan, p. 163-199.
- MICHEL, P., 1973. *Les Bassins des Fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique*. Mémoires ORSTOM. 63. Paris : ORSTOM. 810 p. (cité en pp. 50, 71, 76, 78-80, 98, 110).
- MICHEL, P. et M. SALL, 1984. « Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal ». In *Le développement rural en questions : paysages, espaces ruraux, systèmes agraires : Maghreb-Afrique noire-Mélanésie*. Congrès International de Géographie. Sous la dir. de C. BLANC-PAMARD et al. Mémoires ORSTOM. Paris : ORSTOM, p. 89-109.
- MIETTON, M., 1993. « Conséquences de la mise en valeur ». In *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*. Réd. par P. MICHEL, J. HUMBERT et N. DIOP. Etudes - Ministère de la Coopération et du Développement. Perpignan : Presses Universitaires de Perpignan, p. 32-39 (cité en p. 133).
- MIETTON, M. et al., 2008. « Le delta du fleuve Sénégal Une gestion de l'eau dans l'incertitude chronique ». In *Incertitude et Environnement 11-2005*, p. 321-336 (cité en pp. 83, 131-133).
- MIOSSEC, A., 2004. *Les littoraux entre nature et aménagement*. 3^e éd. Coll. Campus. Paris : Armand Colin. 192 p. (cité en p. 37).
- MONTEILLET, J., A. KANE et J.-I. SAOS, 1993. « Les environnements sédimentaires du bas Sénégal après les barrages de Diama et de Manantali ». In *Geobios* 26.6, p. 751-760 (cité en pp. 76, 91).
- MOUGENOT, B., 1991. « Analyse spatiale et spectrale d'une mangrove dégradée au Sud du Sénégal ». In *Mesures physiques et signatures en télédétection*. Courchevel, France, p. 655-657.
- 1993. « Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés ». In 1, p. 10 (cité en pp. 61, 153).
- 1982. « Étude pédologique de la cuvette de N'Thiagar (partie nord) (delta du fleuve Sénégal) ». Mémoire de Stage. Dakar : ORSTOM. 152 p. (cité en p. 50).

- MOUGENOT, B., M. POUGET et G. F. EPMA, 1993. « Remote sensing of salt affected soils ». In *Remote Sensing Reviews* 7.3, p. 241-259 (cité en pp. 36, 53, 59-61, 153).
- MTIMET, A., 1978. *Étude pédologique de la cuvette de Ndiéyrba (région du fleuve Sénégal)*. Dakar : ORSTOM. 62 p. (cité en p. 50).
- NDAO, M., 2012. « Dynamiques et gestion environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à akar), Mboro (à Thiès) et Saint-Louis ». Thèse de Doctorat. Toulouse : Université Toulouse le Mirail. 371 p. (cité en p. 102).
- NDIAYE, B. et al., 2008. « Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal ». In *Revue des sciences de l'eau* 21.3, p. 325-336 (cité en pp. 13, 14, 175, 215).
- NDIAYE, R., 2004. « Geographic information science : contribution to understanding salt and sodium affected soils in the Senegal river valley. » Thèse de doct. KANSAS : KANSAS STATE UNIVERSITY. 159 p. (cité en pp. 14, 53).
- NIANG, A., 1998. « Suivi de l'environnement et gestion qualitative des eaux du lac de Guiers ». Thèse de Doctorat. Dakar, Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 342 p. (cité en pp. 76, 88).
- NIANG, T. D., 2017. « Dégradation des terres agricoles en milieu Sahélien Cartographie et techniques de récupération des sols salés dans les périmètres rizicoles du delta du fleuve Sénégal ». Thèse de Doctorat. Saint-Louis-Sénégal : université Gaston berger. 150 p. (cité en p. 123).
- NOOMENE, H., 2011. « Etude de la salinité des sols par la méthode de détection électromagnétique dans le périmètre irrigué de Kalàcat Landelous en Tunisie : cas d'une parcelle de courge ». Mémoire de Master. Manouba, Tunisie : Université La Manouba (cité en pp. 48, 258).
- OCDE, 1999. *Glossaire de l'agriculture anglais / français*. OCDE. Paris. 600 p. (cité en p. 40).
- OMVS, 2006. *Rapport annuel sur l'Etat de l'Environnement et des Ressources Naturelles du Bassin du Fleuve Sénégal | Réseau International des Organismes de Bassin*. Sénégal : OMVS. 50 p. (cité en pp. 34, 72, 103).
- ONU, 2002. *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable (Rio + 10)*. Sommet mondial pour le développement durable Johannesburg (Afrique du Sud), 26 août-4 sep-

- tembre 2002 A/CONF.199/20. New York : Organisation des nations Unies (ONU). 198 p. (cité en p. 199).
- OULD KANKOU, M., J. AYELE et M. OULD EBATT, 2004. « La rive droite du delta du fleuve Sénégal conséquences du barrage de diama sur la salinité des eaux. » In *European journal of water quality* 35.2, p. 113-127.
- PAEGELOW, M., 2004. « Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective ». HDR. Toulouse : Université Toulouse le Mirail. 212 p. (cité en pp. 65, 67).
- PARENT, S., 1991. *Dictionnaire des sciences de l'environnement*. Paris : Rageot (cité en p. 101).
- PASKOFF, R., 1998. *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. 3^e éd. Coll. U. Paris : Armand Collin. 260 p. (cité en p. 38).
- PAULINE, D. A., 1998. « Cartographie d'évolution de la mangrove de Saint Louis (effets de la sécheresse et impacts potentiels du barrage de diama) ». Mémoire de Maitrise. Saint-Louis-Sénégal : Université Gaston BERGER. 98 p.
- PESCOD, M. B., 1992. *Wastewater treatment and use in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 169 p. (cité en p. 192).
- PETIT, O., 2004. « La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance ». In *Natures Sciences Sociétés* 12, p. 146-156 (cité en p. 199).
- PHILIPPE, C., 1993. « Aménagements hydro-agricoles et évolution de quelques aspects de l'environnement dans l'axe Gorom-Lampsar (delta du fleuve Sénégal) ». Mémoire de DEA. Strasbourg : Université Louis Pasteur. 109 p. (cité en pp. 141, 143, 150).
- PHILIPPE, C. et al., 1997. « Aménagements hydrauliques et gestion de l'environnement dans le delta du fleuve Sénégal (Axe Gorom-Lampsar - Sénégal) ». In *Pratiques de gestion de l'environnement dans les pays tropicaux*. Sous la dir. de . SINGARAVÉLOU. Collection Espaces Tropicaux 15. Talence : DYMSET, p. 389-401 (cité en pp. 18, 96, 144, 149).
- PICOUET, C., 1999. « Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur ». Thèse de Doctorat. Montpellier : Université de Montpellier II. 466 p.
- PINOT, J.-P., 1998. *La gestion du littoral. Littoraux tempérés : côtes rocheuses et sableuses*. T. 1. Coll. Propos. Paris : Institut Océanographique. 399 p. (cité en p. 37).

- POITEVIN, P., 1993. « Etude d'impact des techniques culturales sur les aménagements hydro-agricoles dans la région de Podor (Sénégal) ». Mémoire de Maitrise. Dakar, Sénégal : ORSTOM. 53 p. (cité en p. 52).
- POUSSIN, J.-C., 1998. « Diagnostic sur les systèmes de riziculture irriguée dans la moyenne vallée aval du fleuve Sénégal ». In *La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes*. Sous la dir. d'A. BIARNÈS. Avec la coll. de LA CONDUITE DU CHAMP CULTIVÉ : POINTS DE VUE D'AGRONOMES : SÉMINAIRE, MONTPELLIER (FRA), 1994/09. Colloques et Séminaires. Paris : ORSTOM, p. 133-161 (cité en p. 15).
- 2008. « Du diagnostic à l'action en agriculture : activités, espaces et modèles ». HDR. Reims : Université de Reims. 144 p. (cité en pp. 15, 16).
- POUSSIN, J.-C. et al., 2002. *Riziculture irriguée et évolution des sols dans la vallée du Sénégal*. Actes de l'atelier du PCSI. Montpellier : CIRAD. 8 p. (cité en p. 52).
- ROCHE, M., 1963. *Mission des Nations Unies pour l'étude du bassin du fleuve Sénégal : rapport hydrologique*. Genève : ONU. 203 p.
- ROCHETTE, C., éd., 1974. *Le Bassin du fleuve Sénégal*. Coll. Monographies hydrologiques ORSTOM. Paris : ORSTOM. 391 p. (cité en pp. 70, 82).
- 1964. *Remontée des eaux marines dans le Sénégal*. Paris : ORSTOM. 146 p.
- ROMANIA, L. A. et al., 1992. « Estuaires et deltas français ». In. Estuaires et deltas : des milieux menacés ? Bègles : Agences de l'Eau et l'I.F.R.E.M.E.R., p. 14.
- SAED, 1984. *Etude du schéma directeur d'aménagement du delta du Sénégal. (Phase 1. : Diagnostic)*. Rapport Technique. Saint-Louis-Sénégal : SAED (cité en p. 149).
- 1993. *Les sols du Delta du fleuve Sénégal, propriétés physiques et chimiques*. Bulletin Technique 8. Saint-Louis-Sénégal : SAED. 96 p. (cité en pp. 34, 53).
- 2014. *Projet d'amélioration de la productivité du riz dans les aménagements hydro-agricoles de la vallée du fleuve Sénégal*. Rapport de Synthèse. Saint-Louis-Sénégal : L'agence japonaise de coopération internationale (JICA). 48 p. (cité en p. 186).
- 2009. *Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal*. Annuaire. Saint-Louis-Sénégal : Société d'aménagement des eaux du delta. 303 p. (cité en pp. 35, 74, 75, 82, 89, 99, 131, 143, 145, 187, 189, 194, 259).
- SAKHO, I., 2011. « Evolution et fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune de la Somone, Petite côte Sénégal ». Thèse de Doctorat en cotutelle. Rouen : Université de Rouen /Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. 252 p. (cité en pp. 70, 71).

- SALL, M. et A. KANE, 1993. « Hydrologie et hydrodynamique ». In *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*. Réd. par P. MICHEL. Etudes - Ministère de la Coopération et du Développement. Perpignan : Presses Universitaires de Perpignan, p. 22-31 (cité en p. 96).
- SALL, M., 2006. « Crue et élévation du niveau marin à Saint-Louis du Sénégal : impacts potentiels et mesures d'adaptation ». Thèse de Doctorat. Maine, France : Université du Maine. 332 p. (cité en p. 72).
- SALOMON, J.-N., 2006. « Les dangers de l'irrigation ». In *Responsabilités et Environnements*. Annales des mines, p. 20-32 (cité en pp. 13, 124, 128, 130).
- SALVIGNOL, C., 1993. « Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal : essai de bilan hydrique et salin ». Mémoire de Stage. Val de Reuil : ESITPA. 107 p.
- SANÉ, T. et al., 2018. « Permanences et mutations dans les terroirs rizicoles de Basse-Casamance (Sénégal) ». In *Espace Géographique* 47.3, p. 201-218.
- SANTOIR, C., 1994. « Décadence et résistance du pastoralisme. Les Peuls de la vallée du fleuve Sénégal ». In *L'archipelpeul*. Réd. par J. SCHMITZ. T. 34. Cahiers d'Études africaines 133-135, p. 231-263 (cité en p. 128).
- 1998. « Les naufragés du fleuve : le problème des réfugiés mauritaniens dans la vallée du fleuve Sénégal ». In *Autrepart* 4, p. 95-119 (cité en pp. 119, 129).
- 1996. « Vallée du fleuve Sénégal : la reconstitution du cheptel paysan ». In *Agriculture et Développement* 10, p. 3-16.
- SCHMITZ, J., 1986. « Agriculture de décrue, unités territoriales et irrigation dans la vallée du Sénégal ». In *Cahiers de la Recherche-Développement* 12, p. 65-77 (cité en p. 128).
- 1993. « Anthropologie des conflits fonciers et hydropolitique du fleuve Sénégal (1975-1991) ». In *Cahier des Sciences Humaines* 29, p. 591-623 (cité en pp. 128, 130).
- 2000. « L'islam en Afrique de l'Ouest : les méridiens et les parallèles ». In *Autrepart* 16. Sous la dir. d'E. GRÉGOIRE et J. SCHMITZ, p. 117-137.
- SECK, M. B., 2018. « Étude systémique de l'érosion côtière dans la zone de Mboro entre vulnérabilité, aménagement et conservation de la Grande Côte ». Thèse de Doctorat. Saint-Louis-Sénégal : Université Gaston BERGER. 250 p. (cité en p. 24).

- SECK, S. M., 2009. « Changements institutionnels et difficultés de développement hydroagricole dans le Delta du fleuve Sénégal : nouvelles dynamiques et recompositions autour de l'irrigation ». In *Organisations paysannes et développement local : leçons à partir du cas du Delta du fleuve Sénégal*. Italie : Harmattan, p. 32-52 (cité en pp. 119, 120, 123, 129, 130).
- 1986a. « Des grands périmètres aux périmètres intermédiaires : prise en compte des aspects sociaux dans les aménagements hydro-agricoles. » In. Cahiers de la Recherche-Développement 12, p. 35-43 (cité en pp. 17, 124).
- 1986b. « La maîtrise de l'eau et la restructuration sociale induite par l'organisation de la production irriguée dans le bassin du fleuve Sénégal ». In. Cahiers de la Recherche-Développement, p. 13-20 (cité en pp. 119, 121).
- 1991. « Sur la dynamique de l'irrigation dans la vallée du fleuve ». In CROUSSE, B., P. MATHIEU et S. M. SECK. *La vallée du fleuve Sénégal : Evaluations et perspectives d'une décennie d'aménagements, 1980-1990*. Paris : Karthala, p. 17-43 (cité en p. 16).
- SECK, S. M. et A. LERICOLLAIS, 1986. « Synthèse : aménagements hydro-agricoles et systèmes de production dans la vallée du Sénégal : Synthèse ». In. Cahiers de la Recherche-Développement 12, p. 3-11 (cité en p. 126).
- SECK, S. M., G. MAGRIN et A. LERICOLLAIS, 2009. « II. L'aménagement de vallée du fleuve Sénégal. Logiques nationales, crises et coopération entre Etats riverains ». In RAISON, J. P. *Des fleuves entre conflits et compromis : essais d'hydropolitique africaine*. Hommes et Sociétés. OCLC : 421015342. Paris : Karthala, p. 31-76 (cité en pp. 123, 124).
- SÈNE, A. M., 2008. « Des institutions internationales à l'action locale. A quelles échelles le développement durable est-il efficace ? : Le cas des équipements structurants dans le bassin versant du fleuve Sénégal ». Thèse de Doctorat. Grenoble : Université de Grenoble. 588 p. (cité en p. 123).
- SINOÛ, A., 1993. « Le Sénégal ». In *Rives coloniales : architectures, de Saint-Louis à Dou-lala*. Sous la dir. de J. SOULILLOU. Avec la coll. de F. DOUTREUWE et al. Architectures Traditionnelles. Marseille : Parenthèses, p. 31-62.
- SOKHNA, C. et al., 2004. « Increase of malaria attacks among children presenting concomitant infection by *Schistosoma mansoni* in Senegal ». In *Malaria Journal* 3 (cité en p. 132).
- SOTO, I. T., 2005. « Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection. Application dans un contexte

- d'agriculture de précision. » Thèse de Doctorat. Toulouse : Institut National Polytechnique. 250 p. (cité en p. 56).
- STEINBERG, J., 2003. *Cartographie. Systèmes d'information géographique et télédétection*. Coll. Campus. Paris : Armand Colin. 160 p. (cité en p. 65).
- SY, B. A., 1995. « Dynamique éolienne actuelle dans le delta du fleuve Sénégal (Contribution à l'étude géomorphologique du Sénégal septentrional) ». Thèse de Doctorat. Dakar-Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 262 p. (cité en pp. 14, 33, 40, 71, 76, 79, 81, 119, 218).
- 2008. « Milieux, sécheresse climatique et érosion : Etude géomorphologique du Sahel sénégalais ». Thèse de Doctorat d'Etat. Saint-Louis-Sénégal : Université Gaston BERGER. 429 p. (cité en pp. 13, 80, 111).
- SYLLA, S. et P. TRIPLET, 2017. *Réserve Spéciale d'Avifaune du Ndiael, Plan de gestion 2018-2022*. Rapport Technique. Saint-Louis-Sénégal : UICN OLAC. 88 p. (cité en p. 102).
- TAÏBI, A. N., A. BALLOUCHE et al., 2007. « Enjeux et impacts des barrages de Diama (Mauritanie) et Arzal (France) : des contextes socio-économiques et environnementaux différents pour de mêmes conséquences ». In *Noréis. Environnement, aménagement, société* 203, p. 51-66 (cité en pp. 61, 91, 111, 132).
- TAÏBI, A. N., J. GASSANI et al., 2006. « Les zones humides en domaine sahélien face aux mutations des modes de mise en valeur agricoles (lacs de Mal, d'Aleg et bas delta du fleuve Sénégal) ». In *Evaluation environnementale et développement d'une agriculture durable*. Evaluation environnementale et développement d'une agriculture durable, p. 1-10 (cité en pp. 109, 111, 115, 132).
- TANJI, K. K. et N. KIELEN, 2002. *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 205 p. (cité en p. 192).
- THEIA, 2017. *Pôle de données et de services surfaces continentales*. THEIA. URL : www.theia-land.fr/fr (visité le 05/12/2017) (cité en pp. 63, 64).
- THI-THANH-HIÊN, P., 2010. « Développement des indicateurs de la qualité de vie urbaine à l'aide de la télédétection à très haute résolution spatiale : cas de la ville de Hanoi ». Thèse de Doctorat. Québec : Université de Québec - Département de géomatique appliquée. 203 p. (cité en pp. 162, 163).
- THIAM, O., 2013. *Le barrage de Diama : Evaluation des avantages sociaux et environnementaux de la retenue d'eau*. Paris : Harmattan. 235 p. (cité en pp. 17-19).

- TOUCHART, L., 2003. *Hydrologie : mers, fleuves et lacs*. Coll. Campus. Paris : Armand Colin. 190 p. (cité en pp. 89, 99).
- 2007. « Le bassin versant ». In *Relations Sociétés/Environnement*, p. 1 (cité en p. 84).
- 1996. « Les lacs dans le cycle physique et anthropique de l'eau : essai de typologie ». In *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 73.2, p. 108-118 (cité en p. 103).
- TOUFFET, J., 1982. *Dictionnaire essentiel d'écologie*. OUEST FRANCE (cité en p. 101).
- TOURÉ, M. A., 2018. « Variabilité climatique et dynamique des écosystèmes du delta du fleuve Sénégal des années 1950 aux années 2010 ». Thèse de Doctorat. Dakar, Sénégal : Université Cheikh Anta DIOP. 498 p. (cité en pp. 14, 109, 111, 119).
- TOURRAND, J.-F., 1989. « "Un pasteur devient un agropasteur : Etude de cas dans le delta du fleuve Sénégal ». In RESPAO. ACCRA, p. 1-19 (cité en pp. 104, 128).
- 2000. *L'élevage dans la révolution agricole au Waalo, delta du fleuve Sénégal*. CIRAD : Editions Quae. 166 p. (cité en pp. 37, 69, 71).
- TOURRAND, J.-F. et E. LANDAIS, 1994. « Aménagements hydrauliques et développement : stratégies paysannes d'adaptation dans le delta du fleuve Sénégal (1984-1991) ». In *Natures Sciences Sociétés* 2, p. 212-229.
- TRÉCA, B., M. S. DIOP et S. I. SYLLA, 1996. *Contribution au rapport du groupe de travail sur les écosystèmes particulièrement vulnérables (zones humides continentales et littorales, milieu marin) dans le cadre du Plan National d'Action pour l'Environnement (PNAE)*. Dakar, Sénégal : ORSTOM. 7 p. (cité en pp. 102, 107).
- TRICART, J., 1955a. « Aspects sédimentologiques du delta du Senegal ». In *Geologische Rundschau* 43.2, p. 384-397 (cité en pp. 50, 59, 75-78).
- 1955b. « Carte géomorphologique du delta du Sénégal dressée par le Laboratoire de l'Institut de Géographie de l'Université de Strasbourg ». In *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 32.251, p. 98-117 (cité en p. 75).
- TURCO, A., 1986. *Geografie della complessità in Africa : interpretando il Senegal*. Milano : Unicopli. 404 p. (cité en pp. 20, 118).
- UNESCO, 1992. *Glossaire International d'hydrologie*. 2^e éd. Paris, France : Genève, Suisse : United Nations Educational Scientific et Cultural. 413 p. (cité en p. 101).
- UNIVERSALIS, E., 2016. *La télédétection*. Encyclopædia Universalis. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/teledetection/> (visité le 16/11/2016) (cité en p. 58).

- USSL, 1954. *Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils*. Avec la coll. de L. E. ALLISON et al. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Coll. Agriculture Handbook 60. Washington DC. : RICHARD L-A. 166 p. (cité en pp. 49, 153).
- VERGER, F., 1991. « Les deltas et leur aménagement ». In *Annales de géographie* 100.561, p. 730-769 (cité en p. 39).
- VIEILLEFON, J. et M. PATAUD, 1977. *Les sols des mangroves et des tannes de basse Casamance (Sénégal) : importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse*. Coll. Mémoires ORSTOM 83. Paris : ORSTOM. 296 p.
- VIRAMONTES, D. et L. DESCROIX, 2002. « Modifications physiques du milieu et conséquences sur le comportement hydrologique des cours d'eau de la Sierra Madre Occidentale (Mexique) ». In *Revue des sciences de l'eau* 15.2, p. 493 (cité en p. 91).
- WACKERNAGEL, H., 2004. « Géostatistique et assimilation séquentielle de données ». HDR. Paris : Université Pierre et Marie Curie. 61 p. (cité en pp. 54, 56).
- WADE, M. E. A., 1998. « Cartographie de la salinité des sols dans la zone de Ngnith (Delta du Sénégal) ». Rapport de stage. Dakar, Sénégal : Institut des Sciences de la Terre. 27 p. (cité en pp. 19, 53, 152).
- WEIGEL, J.-Y., 1981. « Bilan socio-économique de l'irrigation dans la région de Bakel ». In *Etudes Scientifiques*, p. 37-41 (cité en p. 86).
- 1980. *Irrigation et système traditionnel de culture de la région de Bakel (vallée du Sénégal)*. Dakar : ORSTOM. 66 p.
- ZANTE, P., 1994. « Culture irriguée et évolution de sols argileux de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : essai de caractérisation physique : mémoire de stage ». Mémoire de Stage. Créteil : Université Paris 12. 93 p. (cité en p. 86).
- 1995. « Étude du comportement physique de sols argileux soumis à l'irrigation dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal : distribution d'agrégats et courbe de retrait ». In *Structure et fertilité des sols tropicaux : deuxième réunion du groupe thématique*. Montpellier : ORSTOM, p. 15-36 (cité en p. 17).
- ZOUNGRANA, T. P., 2006. « La territorialisation hydraulique au Burkina Faso : des modèles de développements à l'épreuve du territoire ». In *Cahiers du CercleSHS* 25, p. 410-436 (cité en pp. 20, 70, 118).

WEBOGRAPHIE

- ❑ THEIA, 2017. Pôle de données et de services surfaces continentales. [PORTAIL THEIA](#), THEIA. (visité le 05/12/2017)
- ❑ E. UNIVERSALIS, 2018. Débuts de télédétection spatiale. Encyclopædia Universalis. [PAGE INTERNET](#) (visité le 16/11/2018)
- ❑ E. UNIVERSALIS, 2016. La télédétection. Encyclopædia Universalis. [PAGE INTERNET](#) (visité le 16/11/2016)
- ❑ IRD, 2019. La base de ressources documentaires de l'IRD. Horizon Plein textes. [PAGE D'ACCUEIL - HORIZON - IRD](#) (visité le 02/07/2019)
- ❑ GÉOCONFLUENCES, 2012. Géosystème. [GEOCONFLUENCES](#) (visité le 13/03/2018)
- ❑ I. NUMÉRIQUE, 2018a. 4.3.2. Analyse et interprétation des résultats d'analyse des sols. INSTITUT NUMÉRIQUE. [PAGE D'ACCUEIL](#) (visité le 21/03/2018)
- ❑ I. NUMÉRIQUE, 2018b. 4.4. Répartition spatiale de la dégradation sur les unités de sol en présence. INSTITUT NUMÉRIQUE. [PAGE D'ACCUEIL](#) (visité le 21/03/2018)
- ❑ I. NUMÉRIQUE, 2014. Historique de la télédétection. [PAGE D'ACCUEIL](#) (visité le 22/11/2018)

LISTES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

1	Les trois domaines du bassin du fleuve Sénégal (Source : POUSSIN (2008)) . . .	16
2	Volume écoulé annuel du Sénégal à Bakel (mai année i à avril année i+1). (Source : BADER, 2015)	19
1.1	Situation des sels dans le paysage (JOB, 1992a)	30
1.2	Le sol : interface vis-à-vis des autres compartiments environnementaux - BEL- LEC et al. (2005)	32
1.3	A. Morphologie d'un delta. B. Classification des deltas d'après BEAUCHAMP (2005)	38
1.4	L'embouchure du delta du Sénégal avant et après l'ouverture de la brèche (vue par satellite) P. DURAND et al. (2010)	39
1.5	Indicateur, objet et système d'information	42
1.6	Carte des sols salés l'axe Gorom-Lampsar - MAYMARD (1951) modifié - Source : IRD	51
1.7	La texture des sols dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal : À = Argile, L = Limon, S = Sable	52
1.8	Salinité chlorurée en surface et en profondeur dans les sols non cultivés	52
1.9	Composantes du variogramme : portée (a), palier (C0+C) et effet pépite (C0). Variogramme expérimental (étoiles) et variogramme théorique (ligne continue) - (Source - WACKERNAGEL (2004))	56
1.10	Réflectances spectrales caractéristiques de trois grands types de surfaces natu- relles d'après LILLSAND et al. (2014)	61
1.11	Réflectance des différentes classes de salinité du sol	62
1.12	Couverture de Sentinel niveau 2A sur le territoire Sénégalais (THEIA, 2017) . . .	64

1.13	SENTINEL-2 10m de Résolution Bands: B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) et B8 (842 nm)	64
2.1	Le <i>Waal</i> au Sénégal et en Afrique de l'Ouest d'après TOURRAND (2000)	69
2.2	Déplacement du FIT au cours de l'année d'après MICHEL (1973)	71
2.3	Pluviométrie moyennes mensuelles de Saint Louis (1951–2003) - (Source : DAIH, 2009)	72
2.4	Moyenne mensuelle des températures à Saint Louis (1951–2003) - (Source : DAIH (2009))	73
2.5	Évolution mensuelle de l'évaporation à Saint Louis et à Richard Toll (1994 – 2005) SAED (2009)	74
2.6	Moyennes mensuelles du vent à Saint Louis (1951 - 2003) (Source : SAED (2009))	75
2.7	Variations mondiales du niveau de la mer au cours de la transgression flandrienne. Les dates sont indiquées en BP : « avant présent », soit 1950 année de référence - Source www.wikipedia.org	77
2.8	Variations mondiales du niveau de la mer au cours de l'Holocène, (-6000 à +2000 par rapport à JC, ici)- Source www.wikipedia.org	78
2.9	Les phases de formation du delta du Sénégal d'après MICHEL (1973). (Source : KAMARA (2013)) mise à jour.	79
2.10	Croquis géomorphologique - (Source : MICHEL (1973))	80
2.11	Les héritages géomorphologiques - (Source : GAUCHER (1966))	82
2.12	Le bassin hydrographique du fleuve Sénégal - (Source : Wikipedia)	85
2.13	Zones éco-géographiques du Sénégal - (Source : Centre de Suivi Écologique (CSE))	86
2.14	Inondation du lit majeur du fleuve Sénégal dans la région de Kaédi, en période de crue (vue satellitaire) - (Source : BADER, BELAUD et al. (2015))	87
2.15	Situation du delta du Sénégal	88
2.16	Coefficients de débits moyens mensuels (1952-1984) du fleuve Sénégal à Bakel - (Source de données : SAED (2009))	89
2.17	Débits moyens mensuels des différents affluents du fleuve Sénégal 1952-1984 - (Source : A. DIAW (1993))	92
2.18	A. La station de Bakel; B. La station de Rosso dans le bassin inférieur; C. La station de Diama dans le delta - (Source BADER (2015))	94

2.19	Réseau hydrographique du Delta du fleuve Sénégal - (CISSÉ (2011))	96
2.20	Évolution des moyennes annuelles du niveau piézométrique dans le Delta - (SAED, 2009)	99
3.1	Carte des zones humides du delta - (Source : SYLLA et al. (2017)) - modifié . .	102
3.2	Recomposition spatiale autour du lac de Guiers entre 1970 et 2010 - (Source : MAR et al. (2006))	104
3.3	Changements de l'occupation du sol dans la zone du lac de Guiers avant- et après-barrage - (Source : V. FAYE et al. (2016))	105
3.4	A. Salinisation des terres B. Prolifération des plantes aquatiques dans le PND entre 1992 et 2001- (Source : TAÏBI, GASSANI et al. (2006))	109
3.5	Mangrove et la steppe à halophyte entre Saint-Louis et Gandiole (Source : MI- CHEL (1973))	110
3.6	Cartographie des écosystèmes en 1973	113
3.7	Cartographie des écosystèmes en 1984	113
3.8	Cartographie des écosystèmes en 1990	114
3.9	Cartographie des écosystèmes en 2010	114
3.10	Réserves de biosphère du Delta Sénégal (Source : CORMIER SALEM (2016)) .	115
4.1	Évolution des superficies aménagées selon le type d'aménagement (1965 – 1982) Source : BELIÈRES et E. H. A. TOURÉ (1999)	126
4.2	Les potentialités irrigables du bassin du Sénégal - (SAED, 2009)	131
4.3	Dynamiques des écosystèmes du delta entre 1985 et 2015 - DIOUF (2015) . . .	133
5.1	Situation du Gorom-Lampsar dans le delta	140
5.2	Topographie du Gorom-Lampsar	141
5.3	Réseau hydrographique et ouvrages hydrauliques du Gorom-Lampsar d'après PHILIPPE et al. (1997)	144
5.4	Suivi des cours d'eau du Gorom-Lampsar (SAED, 2009)	145
5.5	Typologie des aménagements agricoles dans le Gorom-Lampsar et leurs pé- riodes d'aménagement	146
5.6	Répartition des Périmètres Irrigués Privés (PIP) et des Périmètres Irrigués Vil- lageois (PIV) dans le Gorom-Lampsar (Source - Enquêtes)	147

5.7	Évolution de la population dans le Gorom-Lampsar entre 1960 et 1988 - (Source : PHILIPPE (1993)	150
5.8	Statistiques des types de sols dans le Gorom-Lampsar	151
5.9	Les types de sols dans le Gorom-Lampsar	152
5.10	Organigramme de la méthodologie proposée pour cartographier la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar	154
5.11	Les sites tests de l'étude	155
5.12	Histogramme des données	156
5.13	Q-Q plot des données	156
5.14	Variogramme après introduction des paramètres	156
5.15	Distribution spatiale de la salinité - site A	157
5.16	États de surface agricole - Site A	157
5.17	Distribution spatiale de la salinité - Site B	157
5.18	États de surface agricole - Site B	157
5.19	Distribution spatiale de la salinité - Site C	157
5.20	États de surface agricole - Site C	157
5.21	Distribution des niveaux de salinité dans les trois sites d'étude	158
5.22	Les indices de salinité sur les trois sites	160
5.23	Signatures spectrales des différents états de surfaces	161
5.24	Segmentation de l'image en régions élémentaires	163
5.25	Carte des états de surface agricoles du Gorom-Lampsar	164
5.26	Indice de salinité I_s	165
5.27	Régression de CE par I_s et des CE par les prédictions	167
5.28	Coefficients normalisés (CE_dS_m) : Intervalle de confiance	168
5.29	Carte de salinité du Gorom-Lampsar	170
5.30	Salinité et états de surface	171
5.31	A. Salinité et types de sols - B. Salinité et type d'aménagement	171
5.32	Salinité et distance moyenne à l'axe hydraulique le plus proche	172
6.1	Les pratiques de gestion de la salinité	184
6.2	L'impact des pratiques selon les agriculteurs - (Enquêtes de terrain)	185
6.3	Pratiques de gestion hydrauliques dans le Gorom-Lampsar - (Enquêtes de terrain)	185
6.4	Suivi des eaux du Lampsar - (Source SAED)	190

6.5	Suivi des eaux du Gorom Aval - (Source SAED)	190
6.6	Les pratiques de gestion agronomiques dans le Gorom-Lampsar - (Enquêtes) .	191
6.7	Les impacts de la salinité sur les cultures - (Enquêtes)	192

LISTE DES FORMULES

1.1	Calcul du variogramme	55
1.2	Calcul de la variance des distances	55
5.1	Processus de calcul de l'indice de salinité	164
5.2	Equation du modèle de prédiction	168

LISTE DES PHOTOS

1.1	Dispositif de la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (Source - NOOMENE (2011))	48
2.1	Les dunes rouges du <i>Jeeri</i> - (Cliché M. DIAW (2008))	81
3.1	Vue sur le paysage du parc du Djoudj (Source : www.saintlouisdusenegal.com)	108
4.1	Lac de sel sur une surface agricole abandonnée - (Cliché DIOUF, O, 2018) . . .	134
4.2	Eaux de drainage sur une surface agricole abandonnée - (Cliché DIOUF, O, 2018)	134
6.1	Efflorescences salines sur une surface irrigué - Cliché DIOUF, O, 2018	181
6.2	Efflorescences sodiques sur une surface irriguée - Cliché DIOUF, O, 2018 . . .	181
6.3	Apparences sodiques et salines sur les bords d'un cours d'eau - Cliché DIOUF, O, 2018	181
6.4	Apparences sodiques - Cliché DIOUF, O, 2018	181
6.5	Méthodes de drainage des PIP	186
6.6	Rejets des eaux de drainage - Cliché : DIOUF O, 2018	187
6.7	« Canal de drainage » dans un PIP - Cliché : DIOUF O, 2018	188

LISTE DES SCHÉMAS

1.1	Processus de traitement géostatistique A. Données ponctuelles localisées, B. Variogramme et ajustement des paramètres (modèle), C. Cartographie krigée	57
1.2	Structuration des données dans le SIG de la thèse	66
2.1	Répartition des apports d'eau sur le bassin versant du Sénégal - (Source : DGPRE (2016))	90
4.1	Chronologie des évènements majeurs dans le delta du Sénégal	122
5.1	Configuration d'un PIP ou PIV	148
6.1	Système agricole paysan des PIP et PIV du Gorom-Lampsar - inspiré de KIELEN (1996)	177
6.2	Processus décisionnel pour définir une pratique de gestion	179
6.3	Schéma conceptuel du cadre de gestion des périmètres - SAED (2009)	194
7.1	Schéma d'une bonne gouvernance de l'eau dans les PIP et les PIV	201
7.2	Différents outils d'aide aux décisions d'irrigation en grandes cultures LACROIX (2004)	209
7.3	Système agricole paysan d'après KIELEN (1996) - modifié	210

LISTE DES TABLEAUX

1	Vitesse de percolation et remontée capillaire selon les types de sols	21
1.1	Les pédopaysages du delta du fleuve Sénégal - SAED (1993)	34
1.2	Classification détaillée des types de sols du delta du Sénégal - SAED (2009) . .	35
1.3	Le choix des indicateurs de recherche	43
1.4	La recherche bibliographique de l'étude	45
1.5	Les critères de choix	46
1.6	Liste des entretiens effectués	47
1.7	Tableau de classification des sols salés J.-H. DURAND (1983)	49
1.8	Données optiques disponibles sur THEIA	63
1.9	Les différentes bandes de SENTINEL 2 (Source - (CONGEDO, 2019))	65
2.1	Débit moyen interannuel écoulé aux principales stations hydrométriques du Sénégal (de mai 1950 à avril 2012). BADER (2015)	93
3.1	Avantages et problèmes du parc de Djoudj à Saint-Louis - (Source : TRÉCA et al. (1996))	107
3.2	Déficits pluviométriques dans le Sahel (1952, 1972 et 1985) SY (2008) et M. A. TOURÉ (2018)	111
3.3	Liste des données traitées	112
3.4	Les résultats de la qualité de la classification par l'Indice de Kappa (IK) et la Précision d'En-semble (PE)	112
5.1	Fonctions actuelles des axes hydrauliques du Gorom-Lampsar - (Source B. FAYE (2009))	142

5.2	Atouts et contraintes des axes hydrauliques - (Source SAED (2009))	143
5.3	Les différentes spéculations de zone d'étude	149
5.4	Les indices utilisés	158
5.5	Coefficients de corrélation entre les valeurs CE et les indices calculés	161
5.6	Description des états de surface	162
5.7	Statistiques descriptives des données	166
5.8	Prédictions et résidus (CE_dS_m)	169
5.9	Statistiques de la salinité dans le Gorom-Lampsar	171
6.1	Données collectées pour comprendre la gestion de l'irrigation et de la salinité dans le Gorom-Lampsar	180
6.2	Les indicateurs et leurs significations dans le Gorom-Lampsar - (Source : Entretiens)	182
6.3	Les indicateurs et les types de salinité dans le Gorom-Lampsar	182
6.4	Qualité des eaux d'irrigation dans le Delta du fleuve Sénégal (juillet et octobre 2008) SAED (2009)	189
6.5	Léxicométrie des données d'entretien	195

LISTE DES ENCADRÉS

1.1	La salinisation des terres dans le monde	31
1.2	Intérêts de la géomatique dans l'étude des phénomènes en géographie	67
2.1	Généralités sur les régimes d'écoulement du Sénégal - (Source : BADER (2015))	95
3.1	Lacs d'Aleg et de Mâl : des zones humides essentielles	105
4.1	Le milieu naturel et sa dégradation	135
6.1	Salinité et durabilité des agroécosystèmes	183
7.1	Importance de la gestion de l'eau dans les systèmes irrigués	203
7.2	La gestion des périmètres irrigués	208

LISTE DES ANNEXES

1	La Charte du domaine irrigué (CDI) du delta du Sénégal	265
2	Émissaires de drainage Branche B - Seconde tranche	272
3	Émissaires de drainage Branches A et B	273
4	Données de salinité du Site A	274
5	Données de salinité du Site B	275
6	Données de salinité du Site C	276
7	Le questionnaire d'enquête et quelques données d'enquête	277
8	"Canal de drainage" asséché	289
9	Végétation halophile	290
10	Un paysage de l'aménagement agricole	291

ANNEXES

ANNEXE 1 – La Charte du domaine irrigué (CDI) du delta du Sénégal

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UN PEUPLE - UN BUT – UNE FOI

26.07.2007-007808

**MINISTERE DU DEVELOPPEMENT
RURAL ET DE L'AGRICULTURE**

Projet d'Arrêté primatorial portant Charte
du Domaine Irrigué de la Vallée du Fleuve
Sénégal et de la Falémé

Rapport de présentation

La mise en valeur de la Vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé a fait l'objet d'importants investissements publics. Le secteur privé qui s'est signalé au début de la politique de libéralisation a vu ses initiatives s'amenuiser progressivement.

Les superficies aménagées depuis l'introduction de l'irrigation font environ 95 000 hectares (ha). La superficie réellement exploitable n'excède pas 70 000 ha parmi lesquels près de 40 000 ha sont effectivement exploités par année agricole.

Ce taux relativement faible de mise en valeur découle, en grande partie, de pratiques d'acteurs influencés par une certaine idée reçue d'abondance des ressources en terre et en eau. En effet, les superficies abandonnées sont celles qui ont été aménagées de manière très sommaire (sans étude préalable, réseau d'irrigation peu fiable, sans drainage, etc.) ou celles dont les gestionnaires ont trop longtemps négligé la maintenance.

De telles pratiques reproduisent une agriculture extensive, gaspilleuse de sol et d'eau. Elles sont aux antipodes de l'objectif d'intensification pour rentabiliser durablement les investissements. Elles sont susceptibles de provoquer des dégradations pouvant être irréversibles: salinisation, alcalinisation, pollution par les produits phytosanitaires, etc.

Pourtant, l'eau et la terre sont des ressources limitées dans la Vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé. Depuis 1994, le Plan Directeur de développement intégré de la Rive Gauche (PDRG) a arrêté une répartition précise du potentiel (240 000 ha) en consacrant 88 000 ha aux cultures irriguées, 33 000 ha aux cultures de décrue, 62 000 ha aux forêts et pâturages et le reste du potentiel pour la navigabilité du fleuve, la production d'électricité, etc.

Aujourd'hui, pour mieux gérer ce potentiel, un consensus est nécessaire entre l'Etat, les collectivités locales et les usagers afin de sauvegarder les ressources naturelles impliquées dans l'irrigation tout en assurant leur rentabilité.

C'est pourquoi l'institution de la présente Charte du Domaine Irrigué est une réponse adéquate à cette problématique de rationalisation et de sécurisation foncière dans la Vallée.

Elle est un outil qui repose, avant tout, sur les lois et règlements en vigueur auxquels elle apporte des compléments et approfondissements. Elle pose des règles d'utilisation optimale du domaine irrigué compte tenu du caractère limité, stratégique et dégradable des ressources en eau et en terre et de leur caractère de patrimoine national.

A travers une approche souple, elle répond, dans le cadre de la politique de décentralisation, aux exigences d'une pluralité d'interventions mais aussi à celles de sécurisation des acteurs locaux. En effet, l'élaboration concertée de cet outil s'est faite à travers une série de quarante quatre (44) ateliers au niveau des départements, des communes, des communautés rurales, du Comité d'élaboration et du Comité de pilotage créé par arrêté n°004343/MAE du 2 juillet 2002 du Ministre de l'Agriculture et de l'Elevage.

Au total, trente sept (37) collectivités locales de la Vallée concernées par l'irrigation ont été impliquées ainsi que les grandes organisations professionnelles agricoles et les services techniques de l'Etat. Cette large concertation a bénéficié de l'expertise de spécialistes en droit foncier et en décentralisation.

L'outil que constitue la Charte est destiné principalement à l'usage des communautés rurales qui ont la responsabilité de la gestion des terres du Domaine national (affectation et désaffectation). Elles en sont les premières bénéficiaires en ce qu'elle leur permet de répondre à certaines imprécisions du cadre de gestion dont elles disposaient jusque-là. La mise en application de la Charte est de leur ressort.

Tel est l'objet du présent arrêté primatorial portant Charte du Domaine Irrigué de la Vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé.



Arrêté primatorial portant Charte du Domaine Irrigué de la vallée du Fleuve Sénégal

Le Premier Ministre

- VU la Constitution ;
- VU la Charte des eaux du Fleuve Sénégal du 28 mai 2002 ;
- VU la Loi n° 64-46 du 17 juin 1964 relative au domaine National ;
- VU la loi n° 65-01 du 20 janvier 1965 portant création de la Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et de la Falémé ;
- VU la Loi n° 72-02 du 1^{er} février 1972 relative à l'Organisation de l'Administration Territoriale et Locale, modifiée ;
- VU la Loi n° 76-67 du 2 juillet 1976 portant Code du Domaine de l'Etat ;
- VU la Loi n° 81-13 du 4 mars 1981 portant Code de l'Eau ;
- VU la Loi n° 81-57 du 10 juillet 1981 portant modification du statut juridique de la SAED ;
- VU la Loi n° 96-06 du 22 mars 1996 portant Code des Collectivités Locales ;
- VU la Loi n° 96-07 du 22 mars 1996 portant transfert de compétences aux régions, communes et communautés rurales, modifiée ;
- VU la Loi n° 98-03 du 08 janvier 1998 portant Code forestier ;
- VU la Loi n° 2001-01 du 15 janvier 2001 portant Code de l'Environnement ;
- VU la loi n° 2004-16 du 04 juin 2004 portant loi d'orientation agro-sylvo-pastorale ;
- VU le Décret n° 72-1288 du 27 octobre 1972 relatif aux conditions d'affectation et de désaffectation des terres du Domaine national comprises dans les communautés rurales ;
- VU le Décret n° 81-981 du 2 septembre 1981 approuvant les statuts de la SAED ;
- VU le Décret n° 96-1130 du 17 décembre 1996 fixant loi de transfert de compétences aux régions, communes et communautés rurales en matière de gestion et d'utilisation du domaine privé de l'Etat, du domaine public et du domaine national ;
- VU le Décret n° 98-555 du 25 juin 1998 portant application des dispositions du Code de l'Eau ;
- VU le Décret n° 98-557 du 25 juin 1998 portant création du Conseil Supérieur de l'Eau ;
- VU le Décret n° 2007-826 du 19 juin 2007 portant nomination du Premier Ministre ;
- VU le Décret n° 2007-828 du 19 juin 2007 portant nomination des Ministres et fixant la composition du gouvernement, modifié ;
- VU le Décret n° 2007-831 du 25 juin 2007 portant répartition des services de l'Etat et du contrôle des établissements publics, des sociétés nationales et des sociétés à participation publique entre la Présidence de la République, la Primature et les Ministres, modifié ;

- VU l'Arrêté Ministériel n° 004343 du 02 juillet 2002 portant création du Comité de Pilotage de l'élaboration d'une Charte du Domaine Irrigué (CDI) de la vallée du fleuve Sénégal et de la Falémé;
- VU le Procès-verbal en date du 19 août 2004 du Comité de Pilotage portant adoption de la Charte du Domaine Irrigué de la Vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé.

Sur présentation du Ministre du Développement Rural et de l'Agriculture

ARRETE

Article premier : Il est institué la Charte du Domaine irrigué de la Vallée du Fleuve Sénégal et de la Falémé.

Article 2 : Objet de la charte

La présente charte a pour objet la sécurisation complète des ressources (terres et eau) et leur mise en valeur dans le cadre d'une gestion rationnelle et durable.

Les dispositions de la présente charte portent sur les terres irrigables de la rive gauche du Delta du Fleuve Sénégal et des vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé.

La notion de domaine irrigué concerne l'ensemble des terres relevant du domaine privé de l'Etat et des zones de terroir du Domaine National occupées par des périmètres hydro-agricoles ou des aménagements structurants et leurs voisinages, ainsi que toutes celles qui peuvent l'être grâce aux possibilités offertes par les barrages, qu'elles se situent dans le Waalo ou dans le Diéri.

La sécurisation renvoie ici à la préservation des ressources visées contre les différentes formes de dégradation pour garantir la mise en valeur et la clarification des relations entre les différents acteurs.

Article 3 : Conditions d'exploitation des terres du domaine irrigué

Pour exploiter une terre du domaine irrigué, il faut satisfaire aux conditions suivantes :

- disposer d'une assiette foncière mise à disposition par délibération du conseil rural ou par affectation par l'Etat, conformément aux lois et règlements ;

- disposer d'un dossier d'étude comportant, notamment, un plan d'aménagement approuvé par la SAED ou par toute autre structure habilitée (localisation, source de prélèvement, réseau d'irrigation et de drainage) et une description des activités agricoles envisagées.
- ne pas gêner l'accès à la source d'eau pour d'autres usagers.
- être pris en compte par la capacité de transit si la source d'eau est un adducteur.

Article 4 : Les critères de mise en valeur des terres du domaine irrigué

Tout attributaire d'une parcelle de terre du domaine irrigué est tenu :

- dans le cadre des aménagements hydro-agricoles publics, de réaliser un taux d'exploitation annuelle au moins égal à 100%;
- dans le cadre des aménagements privés, hydro-agricoles ou autres, de mettre en valeur toute la superficie affectée dans un délai maximum de 5 ans. Toutefois, la moitié de cette superficie doit être aménagée dans un délai strict de trois (3) ans.

Article 5 : Obligations générales des parties

Toutes les parties sont tenues de :

- ne reconnaître la qualité d'une mise en valeur qu'aux conditions décrites par la présente charte ;
- contribuer, chacune dans son domaine d'activité (formation, recherche-développement, mise à disposition de données, entretien/maintenance, conseil, communication, etc.) à la création des conditions définies de manière consensuelle comme nécessaires à la satisfaction de l'objectif commun ;
- n'intervenir sur le domaine irrigué que dans le respect des dispositions et des vocations des sols définies par l'Etat ou les Plans d'Occupation et d'Affectation des Sols (POAS) des différentes communautés rurales, s'il en existe ;
- respecter les normes environnementales.

Article 6 : Obligations de l'Etat

- assurer un suivi régulier de la qualité des sols et des eaux et prendre les mesures de sauvegarde nécessaires,
- garantir l'approvisionnement permanent en eau d'irrigation notamment au niveau des principaux adducteurs sous réserve du respect, par les usagers, de leurs engagements dans le cadre de la présente charte.

- mettre en place les infrastructures structurantes nécessaires dans les zones sous équipées ou non équipées.

Article 7 : Obligations des collectivités locales concernées et de l'Etat.

- conformer aux dispositions de la présente charte toutes leurs décisions d'affectation de terres du domaine irrigué,
- faire signer, préalablement à toute décision d'affectation de terres du Domaine irrigué, un "Engagement de l'attributaire de terres du domaine irrigué",
- procéder au retrait de toute terre du domaine irrigué dont la mise en valeur ne se conformerait pas aux dispositions de la Charte et des dispositions législatives et réglementaires en vigueur.

Article 8 : Obligations de l'Attributaire d'une parcelle du domaine irrigué

Tout attributaire d'une parcelle du domaine irrigué est tenu de conduire sa valorisation conformément aux conditions définies par la présente charte, en particulier :

- la signature d'un engagement le liant à la communauté rurale,
- l'entretien et la maintenance des aménagements qu'il aura installés sur les terres qui lui sont attribuées,
- la participation à la maintenance des aménagements structurants dont dépend la mise en valeur des terres qui lui sont attribuées en contribuant, notamment, aux fonds de maintenance qui existeraient dans sa zone d'implantation par le paiement des redevances arrêtées,
- la gestion économique de l'eau et un suivi rigoureux des normes d'utilisation des produits phytosanitaires,
- une intensité culturale conforme à ce qui est indiqué dans l'engagement de l'attributaire du domaine irrigué.

Article 9 : Conditions d'application de la charte

Les conditions d'exploitation des terres du domaine irrigué ainsi que les critères de mise en valeur définis par la charte seront appliqués à travers un engagement signé par tout attributaire et visé par le Président du Conseil rural concerné dont un exemplaire est ci-annexé.

Article 10 : Il est créé, dans le cadre de l'application de la présente charte, un comité de suivi présidé par le Gouverneur de la Région de Saint-Louis et composé des représentants du Gouverneur de la Région de Matam, des Préfets des Départements

de Bakel et de Louga, des représentants des Conseils régionaux et ruraux de Saint-Louis, Matam, Louga et Tambacounda, des services régionaux impliqués et des représentants des usagers.

La mission dévolue audit comité est de vérifier le respect des orientations de la charte, de servir de cadre de référence, de concertation et de médiation pour la recherche de solution en cas de blocages concernant ladite charte.

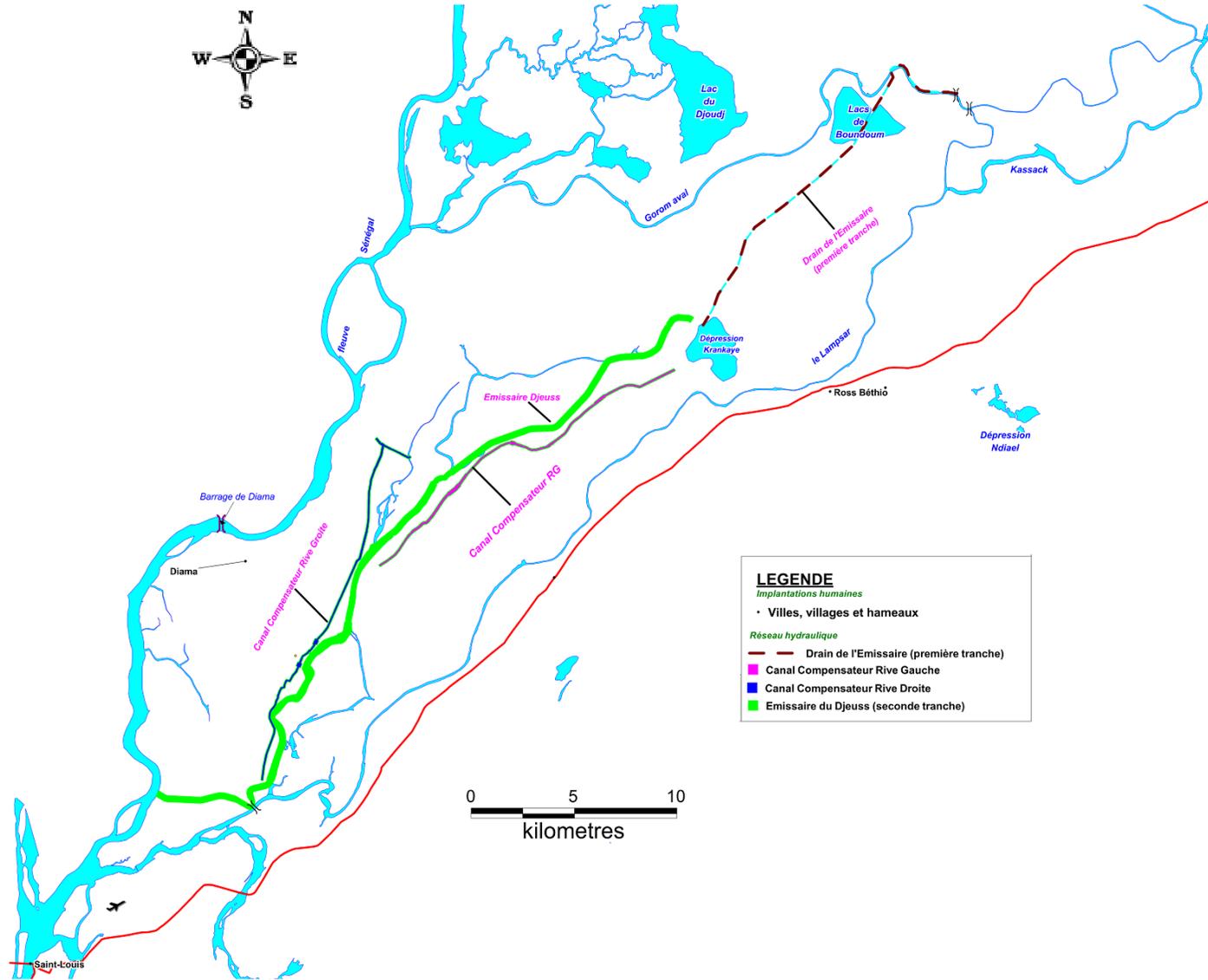
Par ailleurs, le comité aura pour tâche de s'enquérir de l'état des ressources et d'initier, si nécessaire, la procédure de révision de la présente charte.

Article 11 :

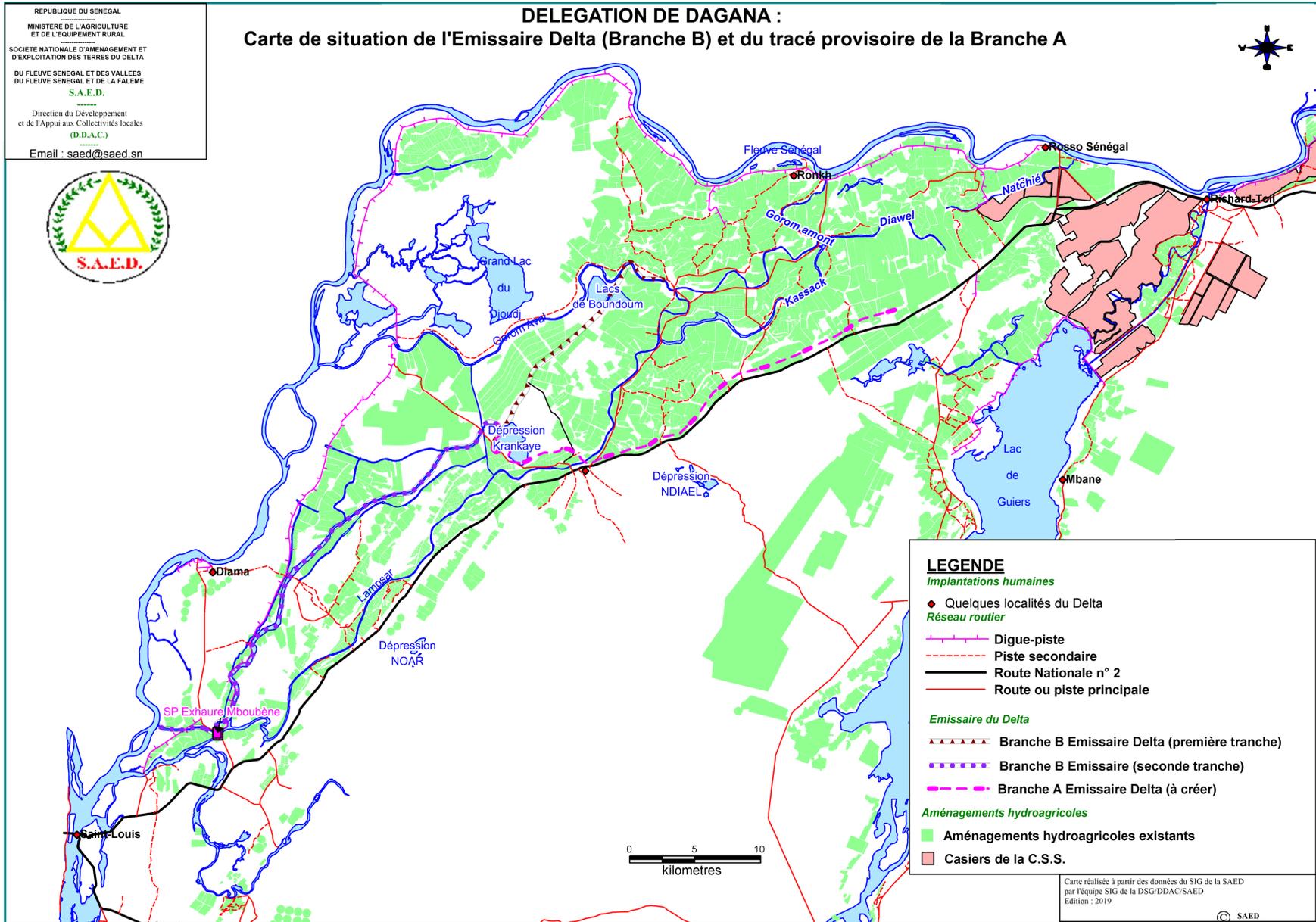
Les Ministres chargés de l'Economie et des Finances, de l'Intérieur, des Collectivités Locales, de l'Environnement, de l'Hydraulique, de l'Agriculture, de l'Elevage et de l'Aménagement du Territoire sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution de la présente charte qui prend effet à partir de sa date de publication au Journal Officiel de la République du Sénégal.



Cheikh Hadjibou SOUMARE



ANNEXE 2 – Émissaires de drainage Branche B - Seconde tranche



ANNEXE 3 – Émissaires de drainage Branches A et B

ANNEXE 4 – Données de salinité du Site A

Nom	Coordonnées X	Coordonnées Y	pH	CE(dS/m)	horizon
S7	375817	1800760	6,46	1,34	0-15
S8	375472	1800929	4,64	0,55	0-15
S9	375467	1800805	6,77	1,14	0-15
THL11	375543	1799180	6,84	0,327	0 -15
S10	375051	1800838	7,18	0,342	0-15
S11	375894	1800303	5,2	0,28	0-15
THL12	375629	1799263	6,34	0,786	0 -15
S12	375444	1800263	5,11	0,164	0-15
S13	374728	1800248	6,25	0,25	0-15
THL13	375533	1799259	5,01	0,977	0 -15
THL14	375602	1799229	6,8	0,217	0 -15
THL15	375633	1799205	7,05	0,874	0 -15
THL16	374276	1798981	4,36	19,94	0 -15
THL17	374276	1798981	4,3	28,5	0 -15
THL18	374300	1798994	6,48	23,3	0- 15
THL19	374236	1798991	4,56	20,3	0 -15
THL20	374239	1798971	4,04	13,4	0 -15
S1	376979	1800484	5,72	1,05	0-15
S2	377359	1801250	5,95	1,5	0-15
S3	376858	1801338	7,11	1,2	0-15
S4	376436	1801006	6,8	1,54	0-15
S5	376145	1800903	4,38	0,096	0-15
S6	375807	1800871	4,85	0,23	0-15

[Revenir à la liste des annexes](#)

ANNEXE 5 – Données de salinité du Site B

Nom	Coordonnées X	Coordonnées Y	pH	CE(dS/m)	horizon
S1	368362	1798662	6,15	1,01	0-15
S2	368106	1798399	6,28	0,02	0-15
S3	367510	1797375	4,79	0,12	0-15
S4	368603	1798776	6,08	1,75	0-15
S5	369243	1799150	6,91	0,58	0-15
S6	369954	1798785	4,84	0,64	0-15
S7	369587	1798704	5,57	0,16	0-15
S8	369262	1798585	4,17	21,9	0-15
S1	371230	1799872	4,45	0,13	0-15
S9	369199	1798180	4,69	7,4	0-15
S2	371039	1800096	5,21	0,38	0-15
S10	368222	1798439	6,37	2,8	0-15
S3	371476	1800013	4,48	0,14	0-15
S11	368068	1798107	4,81	0,41	0-15
S4	371825	1800239	4,66	0,08	0-15
S12	367438	1797154	5,3	0,15	0-15
S5	372410	1800481	4,98	2,09	0-15
S13	367265	1796886	6,2	0,22	0-15
S6	371574	1801158	4,96	0,78	0-15
S14	367856	1796925	9,19	1,25	0-15
S7	371103	1799590	5,28	0,24	0-15
S8	370892	1799617	6,05	2,44	0-15
S9	370774	1799913	5,61	1,5	0-15
S10	370763	1800565	5,11	0,14	0-15
S11	369723	1799392	6,09	1,05	0-15
S12	371628	1799907	4,61	0,68	0-15

[Revenir à la liste des annexes](#)

ANNEXE 6 – Données de salinité du Site C

Nom	Coordonnées X	Coordonnées Y	pH	CE dS/m	Horizon
B1	360729	1787498	NA	0,7	0-15
B2	360634	1787223	NA	3,28	0-15
B3	360411	1786864	NA	0,93	0-15
B4	360042	1786781	NA	0,92	0-15
B5	359905	1786611	NA	0,33	0-15
B6	360010	1786967	NA	4,28	0-15
B7	359761	1786749	NA	0,28	0-15
B8	359577	1786275	NA	0,35	0-15
B9	359388	1786377	NA	0,3	0-15
B10	359175	1786217	NA	0,24	0-15
B11	359087	1786160	NA	0,46	0-15
B12	358911	1786109	NA	0,28	0-15
B13	360826	1787843	NA	0,18	0-15
B14	360546	178812	NA	0,35	0-15
B15	360810	1788576	NA	0,37	0-15
B16	361125	1788896	NA	0,35	0-15
B17	360237	1787659	NA	1,4	0-15
B18	360440	1787697	NA	25	0-15
B19	360212	1787139	NA	10	0-15
B20	360432	1787156	NA	2	0-15

[Revenir à la liste des annexes](#)

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

INDICATEURS DE SALINITE

LE TYPE D'EXPLOITATION

- PIP PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

- ABANDON DES TERRES REUTILISATION REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

- SALINITE EROSION
 CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

- RENDEMENT FAIBLE GRAINS VIDES BRULURE
 MORTALITE DES CULTURES AVORTEMENT MAUVAISE CROISSANCE



Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

- HYDRAULIQUES
- AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

- DRAINAGE
- DIMINUTION DES APPORTS D'EAU
- AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU
- REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

- AMENDEMENTS CHIMIQUES
- AMENDEMENTS ORGANIQUES
- CHOIX D'AUTRES VARIETES
- AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

- PAS EFFICACE
- DIMINUTION DU SEL
- AUGMENTATION DU RENDEMENT

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

- PAS EFFICACE
- DIMINUTION DU SEL
- AUGMENTATION DU RENDEMENT

◀ Précédent



✓ Enregistrer

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

1

INDICATEURS DE SALINITE

sol noir, croute, retard de croissance, ...

LE TYPE D'EXPLOITATION

PIP

PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

ABANDON DES TERRES

REUTILISATION

REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

SALINITE

EROSION

CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE

SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

RENDEMENT FAIBLE

GRAINS VIDES

BRULURE

MORTALITE DES CULTURES

AVORTEMENT

MAUVAISE CROISSANCE

Précédent



Suivant

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

- HYDRAULIQUES
- AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

- DRAINAGE
- AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU
- DIMINUTION DES APPORTS D'EAU
- REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

- AMENDEMENTS CHIMIQUES
- CHOIX D'AUTRES VARIETES
- AMENDEMENTS ORGANIQUES
- AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

- PAS EFFICACE
- DIMINUTION DU SEL
- AUGMENTATION DU RENDEMENT

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

- PAS EFFICACE
- DIMINUTION DU SEL
- AUGMENTATION DU RENDEMENT



Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

3

INDICATEURS DE SALINITE

LE TYPE D'EXPLOITATION

PIP

PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

ABANDON DES TERRES

REUTILISATION

REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

SALINITE

EROSION

CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE

SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

RENDEMENT FAIBLE

GRAINS VIDES

BRULURE

MORTALITE DES CULTURES

AVORTEMENT

MAUVAISE CROISSANCE

◀ Précédent



Suivant ▶

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

4

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

HYDRAULIQUES

AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

DRAINAGE

AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU

DIMINUTION DES APPORTS D'EAU

REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

AMENDEMENTS CHIMIQUES

CHOIX D'AUTRES VARIETES

AMENDEMENTS ORGANIQUES

AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

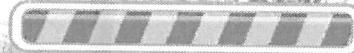
EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

◀ Précédent



✓ Enregistrer

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

5

INDICATEURS DE SALINITE

Croûte saline, sol noir, sol meuble

LE TYPE D'EXPLOITATION

- PIP PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

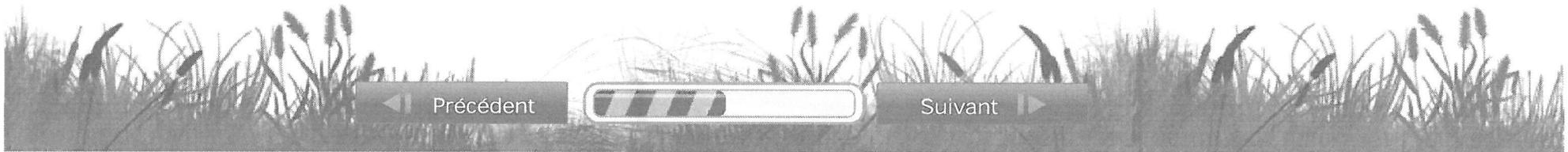
- ABANDON DES TERRES REUTILISATION REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

- SALINITE EROSION
 CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

- RENDEMENT FAIBLE GRAINS VIDES BRULURE
 MORTALITE DES CULTURES AVORTEMENT MAUVAISE CROISSANCE



Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

HYDRAULIQUES

AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

DRAINAGE

DIMINUTION DES APPORTS D'EAU

AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU

REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

AMENDEMENTS CHIMIQUES

AMENDEMENTS ORGANIQUES

CHOIX D'AUTRES VARIETES

AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

◀ Précédent



✓ Enregistrer

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar



INDICATEURS DE SALINITE

Sol noir, meulle, croûte blanche

LE TYPE D'EXPLOITATION

PIP

PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

ABANDON DES TERRES

REUTILISATION

REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

SALINITE

EROSION

CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE

SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

RENDEMENT FAIBLE

GRAINS VIDES

BRULURE

MORTALITE DES CULTURES

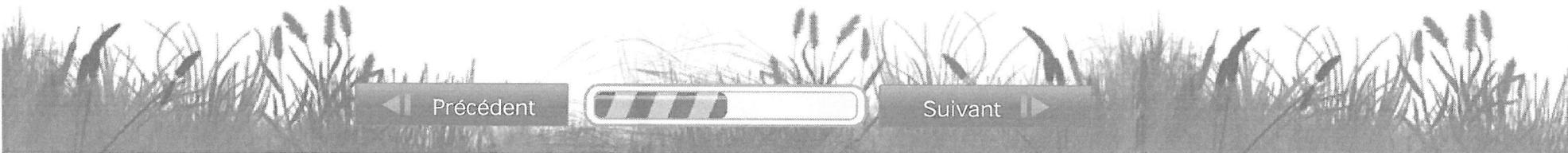
AVORTEMENT

MAUVAISE CROISSANCE

Précédent



Suivant



Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

HYDRAULIQUES

AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

DRAINAGE

DIMINUTION DES APPORTS D'EAU

AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU

REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

AMENDEMENTS CHIMIQUES

AMENDEMENTS ORGANIQUES

CHOIX D'AUTRES VARIETES

AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

◀ Précédent



✓ Enregistrer

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

INDICATEURS DE SALINITE

sol meuble

LE TYPE D'EXPLOITATION

PIP PIV

CONSEQUENCES DE L'HYPERSALINISATION DES SOLS

ABANDON DES TERRES REUTILISATION REAFFECTATION

DIMINUTION DE L'ASSIETTE FONCIERE

SALINITE EROSION
 CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE SURPATURAGE

IMPACTS DE LA SALINITE SUR LES CULTURES

RENDEMENT FAIBLE GRAINS VIDES BRULURE
 MORTALITE DES CULTURES AVORTEMENT MAUVAISE CROISSANCE

Précédent

Suivant

Perception et stratégies de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

20

QUELLES STRATEGIES DE GESTION SONT UTILISEES

HYDRAULIQUES

AGRONOMIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES SONT UTILISEES

DRAINAGE

AUGMENTATION DES APPORTS D'EAU

DIMINUTION DES APPORTS D'EAU

REHABILITATION DES RESEAUX HYDRAULIQUES

QUELLES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES SONT UTILISEES

AMENDEMENTS CHIMIQUES

CHOIX D'AUTRES VARIETES

AMENDEMENTS ORGANIQUES

AUCUN

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION HYDRAULIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

EFFICACITE DES METHODES DE GESTION AGRONOMIQUES

PAS EFFICACE

DIMINUTION DU SEL

AUGMENTATION DU RENDEMENT

◀ Précédent



▼ Enregistrer



ANNEXE 8 – "Canal de drainage" asséché



ANNEXE 9 – Végétation halophile



ANNEXE 10 – Un paysage de l'aménagement agricole

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	2
ABSTRACT	3
DÉDICACES	4
REMERCIEMENTS	5
AVANT-PROPOS	7
SIGLES, ACRONYMES ET SYMBOLES	10
INTRODUCTION GÉNÉRALE	12
Contexte de l'étude	13
La mise en place du territoire de l'eau	15
Problématique et hypothèses de recherche	18
Les objectifs généraux de la thèse	23
Finalités scientifique et socioéconomique de la thèse	23
Une démarche transversale et systémique	24
La structure de la thèse	25
I CONTEXTUALISATION DU TERRITOIRE HYDRAULIQUE	26
INTRODUCTION PARTIELLE	27
Chapitre 1 : Concepts et méthodes	28
1.1 Définitions des concepts	29
1.2 Cadre opératoire	41

1.3	La phase documentaire et de terrain	44
1.4	La géostatistique et la télédétection	53
	Conclusion du Chapitre 1	67
Chapitre 2 : Les composantes naturelles des territoires de l'eau		68
2.1	Les composantes climatologiques	70
2.2	Les composantes géomorphologiques	75
2.3	Les composantes pédologiques	81
2.4	Les composantes d'hydrologie fluviale	83
	Conclusion du Chapitre 2	99
Chapitre 3 : Le delta : des écosystèmes remarquables et en profondes mutations dans un milieu sahélien		100
3.1	Les zones humides	101
3.2	Dynamique des écosystèmes du delta du Sénégal	110
	Conclusion du Chapitre 3	115
Chapitre 4 : Le processus de territorialisation de l'eau dans le delta du Sénégal		117
4.1	Processus de mise en valeur des territoires	118
4.2	Conséquences anthropologiques, environnementales et socioéconomiques de la mise en valeur du delta	128
	Conclusion du chapitre 4	135
CONCLUSION PARTIELLE		136
 II GÉOGRAPHIE DES « TERRITOIRES SALÉS » DE L'EAU		 137
INTRODUCTION PARTIELLE		138
Chapitre 5 : Cartographie de la salinité des sols dans le Gorom-Lampsar		139
5.1	Le territoire hydraulique du Gorom-Lampsar	140
5.2	Cartographies de la salinité	153
5.3	Discussion des résultats	173
	Conclusion du chapitre 5	175

Chapitre 6 : Perception et pratiques de gestion de la salinité dans les PIP et PIV	176
6.1 Perception, indicateurs et pratiques dans un contexte de salinité	178
6.2 Les pratiques de gestion dans le Gorom-Lampsar	183
6.3 Discussion des résultats	193
Conclusion du chapitre 6	196
Chapitre 7 : Perspectives d'aménagement et de gestion durable des ressources	197
7.1 Pourquoi une bonne gouvernance de l'eau dans les « territoires salés » de l'eau ?	198
7.2 La formation à la gestion des systèmes irrigués	205
7.3 Des outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion des terres salées . . .	210
Conclusion du chapitre 7	212
CONCLUSION PARTIELLE	213
CONCLUSION GÉNÉRALE	214
Perspectives de recherche	219
RÉFÉRENCES	220
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	249
WEBOGRAPHIE	250
LISTES DES ILLUSTRATIONS	251
LISTE DES FIGURES	256
LISTE DES FORMULES	257
LISTE DES PHOTOS	258
LISTE DES SCHÉMAS	259
LISTE DES TABLEAUX	261
LISTE DES ENCADRÉS	262
LISTE DES ANNEXES	263
ANNEXES	265

Ousmane DIOUF

Les « territoires salés » de l'eau du delta du Sénégal : Cartographie et pratiques de gestion de la salinité dans le Gorom-Lampsar

Résumé :

Le delta du fleuve Sénégal se situe au nord-ouest de la zone sahélienne. Ses caractéristiques lui confèrent ses multiples potentialités agricoles. Ceci a été le socle de politiques de mise en valeur depuis l'époque coloniale et ont engendré des conséquences multiples. La salinisation des sols est un dégât collatéral de la mise en place d'un territoire hydraulique inabouti, où l'on a apporté des hommes et voulu mettre en place des pratiques agricoles nouvelles. Dans le Gorom-Lampsar la principale variable qui explique la salinisation des sols est la distance à l'axe hydraulique. Le type de sol, d'après l'analyse des statistiques de cartographie, n'aurait pas d'impact sur la salinisation des sols. L'ancienneté des surfaces agricoles se confond avec la typologie des aménagements (les Grands Aménagements (GA) avant et les Périmètres Irrigués privés (PIP) et Périmètres Irrigués Villageois (PIV) après) et est fonction de la distance à l'axe hydraulique. L'évaluation des pratiques de gestion dans les PIP et PIV montre que les populations paysannes utilisent les mêmes indicateurs et un seul terme pour caractériser les phénomènes de salinité et de sodicité. Ces paysans, malgré l'absence de cadre de gestion opérationnel et collectif de l'irrigation, mettent en œuvre des pratiques individuelles de gestion de la salinité, qui nécessite, dans une perspective d'aménagement et de gestion durable des ressources, un cadre opérationnel et stratégique de gestion des périmètres irrigués.

Mots clés : Territoire hydraulique, Perception, salinité, cartographie, stratégies, gestion, delta.

The « salty territories » of the water in the Senegal river delta : mapping and Salinity management practices in the Gorom-Lampsar

Abstract :

The Senegal River delta is located northwest of the Sahelian zone. Its characteristics give it its multiple agricultural potentialities. This has been the basis of development policies since the colonial period and have had multiple consequences. Soil salinization is collateral damage from the establishment of an unfinished hydraulic territory, where people have been brought in and new agricultural practices have been wanted to be put in place. In Gorom-Lampsar the main variable that explains soil salinization is the distance to the hydraulic axis. The type of soil, according to the analysis of mapping statistics, would not have an impact on soil salinization. The age of the agricultural areas merges with the typology of the developments (the Wide layouts (WL) before and the Irrigated Private Perimeters (IPP) and Villagers Perimeters Irrigated (VIP) after) and is a function of the distance from the hydraulic axis. The evaluation of management practices in the IPP and VIP shows that the peasant populations use the same indicators and a single term to characterize the phenomena of salinity and sodicity. These farmers, despite the absence of an operational and collective management framework for irrigation, implement individual salinity management practices, which requires, from a perspective of development and sustainable management of resources, an operational framework and strategic management of irrigated perimeters.

Keywords : Hydraulic territory, Perception, salinity, cartography, strategies, management, delta