

Université du Québec  
INRS-Eau

**GÉOMATIQUE APPLIQUÉE À L'ÉTUDE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA  
VALLÉE DU FLEUVE SÉNÉGAL (SÉNÉGAL)**

Par  
Oumar Housseynou KA  
B.Sc Génie Géologique

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du grade de Maître ès sciences (M.Sc)

Jury d'évaluation

Examineur externe

Marius Thériault  
Professeur Département de Géographie  
Université Laval

Examineur interne

Daniel Cluis  
Professeur INRS-EAU

Directeur de recherche

Olivier Banton  
Professeur INRS-EAU

20 Mars 2000

© Oumar Housseynou KA copyright, 2000

## PRÉFACE

Je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail. Ma reconnaissance va tout d'abord à Olivier Banton, mon directeur de recherche, qui m'a encouragé à réaliser mes travaux sur une problématique relative à mon pays, mais en même temps, m'a laissé l'entière initiative dans la réalisation de mon travail. Ma gratitude va de façon particulière à Emmanuelle Quentin, étudiante en post-doctorat à l'INRS-eau, pour sa très grande disponibilité et ses conseils scientifiques pratiques.

Mes sincères remerciements vont à Marius Thériault, professeur au département de Géographie et directeur du Centre de Recherche en Aménagement et Développement (CRAD) de l'université Laval qui a bien voulu lire ce document avant sa soumission au comité d'évaluation dont il a accepté gentilleme nt de faire partie. Je remercie également Monsieur Daniel Cluis d'avoir consenti à évaluer ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à l'intention des responsables du Service de Gestion et de Planification des Ressources en eau (SGPRE) du Ministère de l'Hydraulique du Sénégal à travers la personne de Madame Fall, directrice du service. Messieurs Omar Sy et Samba Ba, soyez convaincus de ma profonde reconnaissance. Les responsables de la DPDR à la SAED, vous n'êtes pas en reste, je veux citer Messieurs Malick Sarr, Mamadou Kane et Lamine Mané. Vous êtes tous remarquablement en amont de ce travail puisque ayant aidé à l'acquisition des données primaires.

Je n'oublierai pas Aïcha Sy et Serigne Faye qui ont été les personnes ressources ayant initié mes contacts avec la SAED et le SGPRE. Sans vous, le labeur aurait pu être plus dur. Sûr!

À vous mes potes Adriàn, Kossi, Mambaye, Mahmoud, ...merci pour votre sincère amitié.

Je ne pourrais pas terminer sans dire merci infiniment à ma famille pour son amour inconditionnel et son soutien sans faille. Ce mémoire, je le dédie à vous et à Dieynaba Ndiaye tout particulièrement.

## RÉSUMÉ

La mise en service des barrages de Diama et de Manantali, survenue en 1986 et 1988 respectivement, dans le but de promouvoir le développement de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve Sénégal, a occasionné le relèvement du niveau de base de celui-ci en période d'étiage. Ce relèvement dû à la présence d'une charge d'eau permanente, est susceptible d'influencer la dynamique des nappes d'eau souterraines dans toute la région, en particulier dans le delta, sous-zone saline située en aval, et où l'effet des eaux de surface pourrait être majorée par un surplus d'eau résultant d'intenses pratiques d'irrigation réalisées sur des sols salins parfois très filtrants.

L'objectif de cette étude est d'arriver, à l'aide d'une méthode intégrée d'analyse spatiale du comportement hydraulique de l'aquifère superficiel dans la vallée du fleuve Sénégal, à mieux apprécier les mécanismes d'échange entre la nappe superficielle et les cours d'eau, notamment le fleuve et les eaux souterraines et, au-delà, évaluer l'impact des barrages sur la recharge de cette nappe. Dans la zone spécifique du delta, l'étude vise à comprendre si une relation existe entre la dégradation des terres et les fluctuations de la profondeur de la nappe induites par les apports de l'irrigation en plus des apports latéraux des cours d'eau, autrement dit, comprendre la dynamique des rapports entre la nappe superficielle, les cours d'eau, les sols et les aménagements irrigués.

Pour approcher ces objectifs, des données non spatiales multi-sources, relatives pour l'essentiel, au suivi piézométrique de la nappe, aux aménagements et à la pédologie du delta, à la pluviométrie et à la limnimétrie de la moyenne vallée, entre 1987 et 1997, ont été modélisées dans un système de gestion de bases de données relationnelles (MS ACCESS), puis intégrées au même titre que l'information spatiale (cartes des territoires, hydrographies) dans le système d'information géographique (SIG) ArcView.

Le traitement et l'analyse spatiale de ces données révèlent que dans la moyenne vallée, la pluviosité est régressive sur la période d'étude et l'infiltration verticale à la nappe pratiquement nulle. La recharge de la nappe est le seul fait des cours d'eau. Ce phénomène s'est accentué parallèlement à la remontée du niveau de base du fleuve en période hors crue. Dans le delta, même si la nappe subit l'influence locale de l'irrigation, surtout dans les environs du Lampsar, l'alimentation latérale par les cours d'eau reste le phénomène dominant dans la recharge de la nappe. Néanmoins, le niveau moyen de l'eau souterraine s'est rapproché de la surface avec une conductivité électrique qui a augmenté jusqu'en 1990 avant de connaître une chute notable en 1997. Les valeurs de cette conductivité ainsi que ceux du pH, fluctuent en fonction de la profondeur de la nappe. Par ailleurs, la dégradation des terres dans le delta, semble être bel et bien favorisée par les remontées capillaires, puisque le taux de salinité en période hors irrigation est généralement plus élevé dans les zones où la nappe est moins profonde. Cette dégradation est cependant moins sévère dans les territoires aménagés par la SAED.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>I - INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
I. 1 - Problématique de l'étude .....	1
I. 2 - Objectifs de l'étude .....	3
<b>II - REVUE DE LA LITTÉRATURE</b> .....	<b>5</b>
II. 1 - Présentation générale du territoire d'étude .....	5
II. 1. 1 – Données cartographiques de base .....	9
II. 1. 2 – Données non cartographiques .....	10
II. 2 – Systèmes d'information géographique .....	11
II. 2. 1 – Qu'est-ce qu'un SIG? .....	11
II. 2. 2 - Applications générales des SIG .....	16
II. 2. 2. 1 - Applications géoscientifiques .....	16
II. 2. 2. 2 - Applications municipales .....	17
II. 2. 2. 3 - Application à la gestion des ressources côtières .....	18
II. 2. 2. 4 - Applications agricoles .....	18
II. 2. 2. 5 - Application aux sciences de l'eau .....	19
II. 2. 2. 5. 1 - Applications hydrologiques .....	20
II. 2. 2. 5. 2 - Applications hydrogéologiques .....	20
<b>III - MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>23</b>
III. 1 - Rôle de chaque composante .....	23
III. 1. 1 - Système d'Information Géographique (SIG) .....	23
III. 1. 2 - Système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) .....	24
III. 1. 3 - Tableur .....	25
III.2 - Développement de la base de données spatiale (BDS) .....	26
III. 2. 1 - Stockage et structure des données géographiques dans ArcView .....	28
III. 2. 2 - Représentation des données géographiques dans ArcView .....	28
III. 3 - Développement de bases de données relationnelles .....	31
III. 3. 1 - Qu'est-ce qu'une base de données .....	31
III. 3. 2 - Exportation des bases de données vers ArcView .....	40
<b>IV - ANALYSE SPATIALE ET RÉSULTAT</b> .....	<b>41</b>
IV. 1 - Procédure d'analyse spatiale .....	41
IV. 1. 1 - Moyenne vallée du fleuve .....	41
IV. 1. 2 - Delta du fleuve .....	43
IV. 2 - Résultat et discussion .....	45
IV. 2. 1 - Moyenne vallée du fleuve .....	45
IV. 2. 1. 1 - Pluviométrie .....	45
IV. 2. 1. 2 - Limnimétrie .....	50
IV. 2. 1. 2. 1 - Régime de hautes eaux .....	51
IV. 2. 1. 2. 2 - Régime de basses eaux .....	52
IV. 2. 1. 3 - Piézométrie de la nappe superficielle .....	53
IV. 2. 1. 3. 1 - Limnigrammes piézométriques .....	54
IV. 2. 1. 3. 2 - Interpolation spatiale .....	54
IV. 2. 1. 3. 3 - Piézométrie en basses eaux .....	55
IV. 2. 1. 3. 4 - La recharge annuelle .....	56
IV. 2. 1. 3. 5 - Relation étiage du fleuve - recharge de la nappe .....	58

IV. 2. 1. 4 - Conclusion .....	60
IV. 2. 2 - Delta du fleuve.....	62
IV. 2. 2. 1 - Les fluctuations du niveau de la nappe .....	65
IV. 2. 2. 1. 1 - Régime de hautes eaux .....	66
IV. 2. 2. 1. 2 - Régime de basses eaux .....	70
IV. 2. 2. 2 - La conductivité électrique de la nappe .....	71
IV. 2. 2. 2. 1 - Régime de hautes eaux .....	71
IV. 2. 2. 2. 2 - Régime de basses eaux .....	73
IV. 2. 2. 3 - Le pH dans le delta .....	75
IV. 2. 2. 4 - Relations entre la profondeur, la salinité, le pH et les cours d'eau .....	76
IV. 2. 2. 4. 1 - Relation entre la nappe et les cours d'eau .....	76
IV. 2. 2. 4. 2 - Relation entre la profondeur et la salinité (CE) .....	78
IV. 2. 2. 4. 3 - Relation entre le pH et la salinité (CE) .....	78
IV. 2. 2. 5 - Cartographie de la dégradation des terres liée à la salinité.....	81
IV. 2. 2. 5. 1 - Variation de la profondeur et de la CE à l'intérieur des aménagements .....	81
IV. 2. 2. 5. 2 - Variation de la CE selon la pédologie .....	82
IV. 2. 2. 5. 3 - Reclassification de la profondeur .....	83
IV. 2. 2. 5. 4 - Reclassification de la CE .....	84
IV. 2. 2. 5. 5 - Reclassification des types de sols selon la CE.....	85
IV. 2. 2. 6 - Conclusion .....	87
<b>V - CONCLUSION.....</b>	<b>89</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Coupe schématique longitudinale montrant les relations géométriques entre les aquifères, les cours d'eau, l'océan atlantique et la zone agricole dans le delta.....	2
Figure 2.1 : Territoire d'étude avec les barrages de Diama en aval et Manantali en amont. Les subdivisions internes à la zone correspondent à des communautés rurales .....	5
Figure 2.2 : Pente du terrain dans la vallée du fleuve Sénégal.....	6
Figure 2.3 : Relief de la vallée du fleuve Sénégal.....	8
Figure 2.4 : Relation des SIG avec d'autres types d'applications informatiques. Adapté de Bonham-Carter (1994) .....	13
Figure 2.5 : Modèle vectoriel. Adapté de Maidment (1999).....	14
Figure 2.6 : Modèle trame. Adapté de Maidment (1999).....	14
Figure 2.7 : Model vectoriel vs model matriciel (Thériault, 1998).....	15
Figure 3.1 : Intégration d'un SIG avec un SGBDR et un tableur .....	23
Figure 3.2 : Exemple de relation entre la géobase et les attributs thématiques dans le delta	24
Figure 3.3 : Exemple de limnigramme piézométrique de la nappe superficielle .....	25
Figure 3.4 : Simulation de la lame d'eau infiltrée à la nappe pour la station pluviométrique de Dagona.....	26
Figure 3.5 : Données géographiques numérisées .....	27
Figure 3.6 : Formatage des données géographiques de MapInfo vers ArcView .....	27
Figure 3.7 : Modèle simplifié d'organisation des données par couches dans la BDS .....	28
Figure 3.8 : Représentation vectorielle des zones aménagées dans le delta.....	29
Figure 3.9 : Représentation matricielle des aménagements du delta selon le type .....	30
Figure 3.10 : Représentation matricielle des aménagements du delta selon la catégorie .....	30
Figure 3.11 : Représentation matricielle des types de sols dans les zones aménagées du delta .....	31
Figure 3.12 : Gestion des données dans Access : concept d'identifiant unique ou clé.....	32
Figure 3.13 : Tables de données pour Access .....	33
Figure 3.14 a : Relation entre deux tables de la base de données du delta.....	34
Figure 3.14 b : Relation entre deux tables de la base de données de la moyenne vallée .....	34
Figure 3.15 a : Base de données relationnelle de la moyenne vallée du fleuve Sénégal. ....	35
Figure 3.15 b : Base de données relationnelle du delta.....	35
Figure 3.16 a : Exemple de requête pour le delta avec trois critères (nappe, date et conductivité électrique de l'eau de la nappe).....	37
Figure 3.16 b : Treize requêtes réalisées pour la zone du delta.....	37
Figure 3.16 c : Résultat de la requête en 3.16 a.....	38
Figure 3.17 a : Exemple de requête pour la moyenne vallée ; le seul critère est le type d'aquifère superficiel .....	38
Figure 3.17 b : Huit requêtes créées pour la zone de la moyenne vallée du fleuve .....	39
Figure 3.17 c : Résultat de la requête en 3.17 a.....	39
Figure 3.18 : Transfert de données entre MS Access et ArcView par un pilote ODBC : "Open Database Connectivity" .....	40
Figure 4.1 a : Procédure d'analyse des données de la moyenne vallée .....	42
Figure 4.1 b : Procédure d'analyse des données du delta .....	44
ruisselée ; les unités sont en millimètres .....	47

Figure 4.2 : Relation entre les fluctuations piézométriques annuelles et la pluie annuelle pour les ouvrages GA0165, GA0166, GA0171 et GA0187 voisins de la station de Dagana.....	49
Figure 4.3 : Corrélation entre précipitations enregistrées et ruissellement calculé par le modèle .....	49
Figure 4.4 : Évolution de la pluviométrie et du ruissellement de 1987 à 1990.....	50
Figure 4.5 : Évolution des hauteurs du fleuve en période de crue entre 1987 et 1990 .....	51
Figure 4.7 : Situation des piézomètres de la moyenne vallée du fleuve Sénégal.....	53
Figure 4.8 : Période de basses eaux de la nappe superficielle .....	55
Figure 4.9 : Variations annuelles de l'amplitude de fluctuation de la hauteur de la nappe ...	57
Figure 4.10 : Cartes d'égal recharge minimale, moyenne et maximale de la nappe pour une année hydrologique moyenne.....	57
Figure 4.11 : Variation de la hauteur moyenne annuelle de recharge (d'une année hydrologique moyenne) de la nappe superficielle en fonction de la distance au cours d'eau.....	58
Figure 4.12 : Évolution des hauteurs du fleuve en période d'étiage entre 1987 et 1990.....	59
Figure 4.14 : Fluctuations saisonnières de la profondeur de la nappe .....	65
Figure 4.15 : Fluctuation du niveau de la nappe par rapport au sol, en hautes eaux, en 1989 .....	66
Figure 4.16 : Variations de la profondeur et de la conductivité électrique de la nappe en hautes eaux, 1997 .....	69
Figure 4.17 : Fluctuations du niveau de la nappe par rapport au sol en basses eaux 1989 ..	71
Figure 4.18 : Variations saisonnières de la conductivité électrique de la nappe.....	72
Figure 4.19 : Variations annuelles et saisonnières de la CE en 1989, 1990 et 1997 au niveau de 15 ouvrages, dans le bas delta. ....	74
Figure 4.20 : Variations saisonnières du pH de la nappe .....	75
Figure 4.21 : Variations saisonnières de la profondeur et de la salure de la nappe en fonction de la distance au cours d'eau en 1990.....	77
Figure 4.22 : Variations saisonnières du pH selon la salinité de la nappe, en 1989 et 1990.	79
Figure 4.23 : Variations saisonnières de la salure de la nappe en fonction de la profondeur en 1989, 1990 et 1997. ....	80
Figure 4.25 : Variations saisonnières de la CE selon le type de sol en 1989, 1990 et 1997.	83
Figure 4.26 : Dégradation potentielle des terres par salinité dans le delta en 1990 .....	86
Figure 4.27 : Dégradation potentielle des terres en relation avec le type de sol et le type et la catégorie d'aménagement .....	86

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1: Stations et relevés pluviométriques dans la moyenne vallée entre 1987 et 1990 .....	45
Tableau 4.2 : Évapotranspiration en mm/j mesurée aux quatre stations .....46 par la formule de Turc (SGPRE, 1994).....46	46
Tableau 4.3 : Feuille de simulation des lames d'eau infiltrée à la nappe et ruisselées .....	47



# I - INTRODUCTION

---

## I. 1 - Problématique de l'étude

En 1986 le barrage de Diama a été mis en œuvre en aval de la vallée du fleuve Sénégal à 40 km de Saint-Louis, dans l'optique d'empêcher la remontée de la langue saline marine et d'assurer une meilleure gestion de l'eau pour les besoins d'irrigation. En 1988, le barrage hydroélectrique de Manantali a démarré ses activités dans la même vallée mais complètement en amont du fleuve à 1100 km de l'embouchure, dans le territoire malien. Ces deux barrages ont été construits dans le cadre des activités de développement de l'OMVS (organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal) réunissant trois pays riverains du bassin du fleuve (Mali, Mauritanie et Sénégal). Un des rôles qui étaient assignés à ces barrages était d'assurer une bonne gestion des eaux de surface qui devraient être maintenues à un niveau permanent plus élevé dans le but de promouvoir une agriculture irriguée au moindre coût dans toute la vallée.

Parallèlement à cette prise en charge des eaux de surface, un plan de gestion des eaux souterraines a été initié dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'OMVS et l'USAID. Un réseau de 657 piézomètres captant les trois aquifères superficiel, intermédiaire et profond de la vallée, a été implanté le long des deux rives du fleuve depuis 1986 (Cuppens et Kane, 1998). Le suivi de ces ouvrages entre 1987 et 1991 a permis de contrôler à un rythme mensuel, la dynamique du niveau des nappes. Ce suivi interrompu depuis 1991 a été cependant repris partiellement depuis l'hivernage 1997 dans le delta du fleuve Sénégal dans le cadre du projet «Gestion de l'Eau» de la Société d'Aménagement et d'Exploitation des Eaux du Delta du fleuve Sénégal et de la Falémée (SAED) (Cuppens et Kane, 1997). C'est à la fois dans la gestion des barrages et dans le double suivi régional (toute la vallée) puis local (delta du fleuve Sénégal) des ouvrages piézométriques entre 1987 et 1997 qu'il faut situer la problématique de l'étude. **Au niveau régional d'abord, quelles sont, à l'échelle de la vallée, les conséquences de la gestion des barrages sur le comportement hydraulique des nappes d'eau souterraines ?** Au niveau du delta, la problématique s'élargit à l'épineux problème de salinité des eaux souterraines qui entrave

fortement la mise en valeur des terres potentiellement irrigables. Le delta joue un rôle moteur dans le développement de l'agriculture irriguée dans la vallée du fleuve, mais son essor est sérieusement freiné par la salinité des sols et des nappes d'eau souterraines situés dans un contexte marin (figure 1.1).

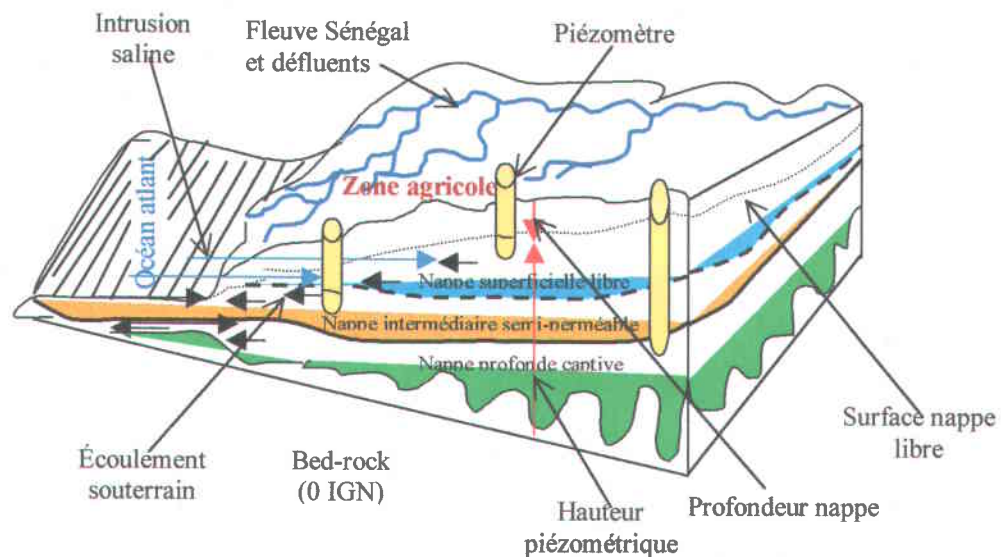


Figure 1.1 : Coupe schématique longitudinale montrant les relations géométriques entre les aquifères, les cours d'eau, l'océan atlantique et la zone agricole dans le delta

La salinité des sols dans le delta serait liée à la fossilisation de sels dans les sédiments du bassin sénégal-mauritanien déposés lors des épisodes de transgressions et régressions marines de l'Atlantique (Loyer, 1989). La dissolution de ces sels dans les eaux souterraines est à l'origine de l'invasion saline des nappes peu profondes (OMVS, 1990). Le delta est mis en valeur dans ce contexte à travers la riziculture à cause de sa capacité d'adaptation à la salinité élevée. Cependant cette plante provoque une percolation de quantités d'eau importantes et de sels dissous vers la nappe en période d'irrigation. Cet excédent d'eau d'irrigation conjugué à l'apport latéral par les cours d'eau, occasionne en principe le relèvement du niveau de la nappe dans les périmètres irrigués, relèvement qui en période hors irrigation est supposé accélérer la remontée capillaire des sels dissous vers la surface (Cuppens et al., 1995). Or ce phénomène catalyse la dégradation des sols. Est-ce que l'irrigation influence réellement la recharge de la nappe? Y a-t-il une relation vérifiable entre la nappe et la dégradation des terres dans les zones irriguées du delta?

## I. 2 - Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est d'arriver, à l'aide d'une méthode intégrée d'analyse spatiale du comportement hydraulique de l'aquifère superficiel de la vallée et delta du Fleuve Sénégal :

- à une meilleure connaissance des mécanismes d'échange entre les cours d'eau (en particulier le fleuve Sénégal) et les eaux souterraines
- à évaluer l'impact des crues du fleuve et par conséquent de la gestion des barrages sur la recharge des nappes
- à déterminer si une relation existe entre la dégradation par salinisation des terres du delta et les fluctuations de la profondeur de la nappe induites par les apports de l'irrigation et le régime (crue ou étiage) des cours d'eau. Il s'agira dans ce dernier cas de comprendre la dynamique des relations entre la **nappe**, les **cours d'eau**, les **sols** et les **aménagements irrigués**.

Au niveau de la vallée, l'étude a été réalisée sur la période 1987, 1989, 1990 ; 1987 est la première année après la mise en œuvre du premier barrage, 1989 est l'année qui a suivi le démarrage des activités de Manantali. Dans le delta, seules les années 1989, 1990 et 1997 ont été prises en considération. Le suivi piézométrique en 1997 ne concerne que les piézomètres du delta ; le reste des ouvrages de la vallée n'ayant fait l'objet d'aucun suivi depuis 1991.

La première partie de l'étude est concentrée sur la partie de la vallée comprise entre Dagana et Semmé (moyenne vallée) pour ce qui est des considérations liées aux fluctuations annuelles du niveau piézométrique de la nappe en rapport avec les eaux de surface et la pluviométrie ; et la deuxième partie est consacrée à la zone du delta pour ce qui a trait à la problématique de la salinité reliée aux influences locales de l'irrigation mais en considérant cette fois les fluctuations du niveau de profondeur de la nappe par rapport à la surface du sol.

Après l'introduction, l'étude présente d'abord le contexte général du territoire d'étude et une revue bibliographique sur les applications des systèmes d'information géographique (SIG) en géoscience, en particulier dans le domaine de l'eau, étant donnée l'absence

d'informations propres à la problématique étudiée. Il est ensuite fait état de la méthodologie utilisée pour organiser les données, les intégrer et les traiter dans un système d'information géographique, avant d'aborder la dernière partie qui traite des résultats obtenus et de leur interprétation.

## II - REVUE DE LA LITTÉRATURE

### II. 1 - Présentation générale du territoire d'étude

Le territoire cible de l'étude s'étend le long du fleuve Sénégal entre Saint-Louis et Semmé sur une bande terrestre d'environ 600 km de longueur couvrant une superficie de l'ordre de 10000 km<sup>2</sup> (figure 2.1). La largeur de la bande varie entre 15 km et 50 km environ. Ce territoire, entièrement soumis à l'influence du barrage de Diama, constitue une plaine alluviale entourée respectivement au nord et au sud par deux zones semi-désertiques que sont le Ferlo et les dunes de la Mauritanie.

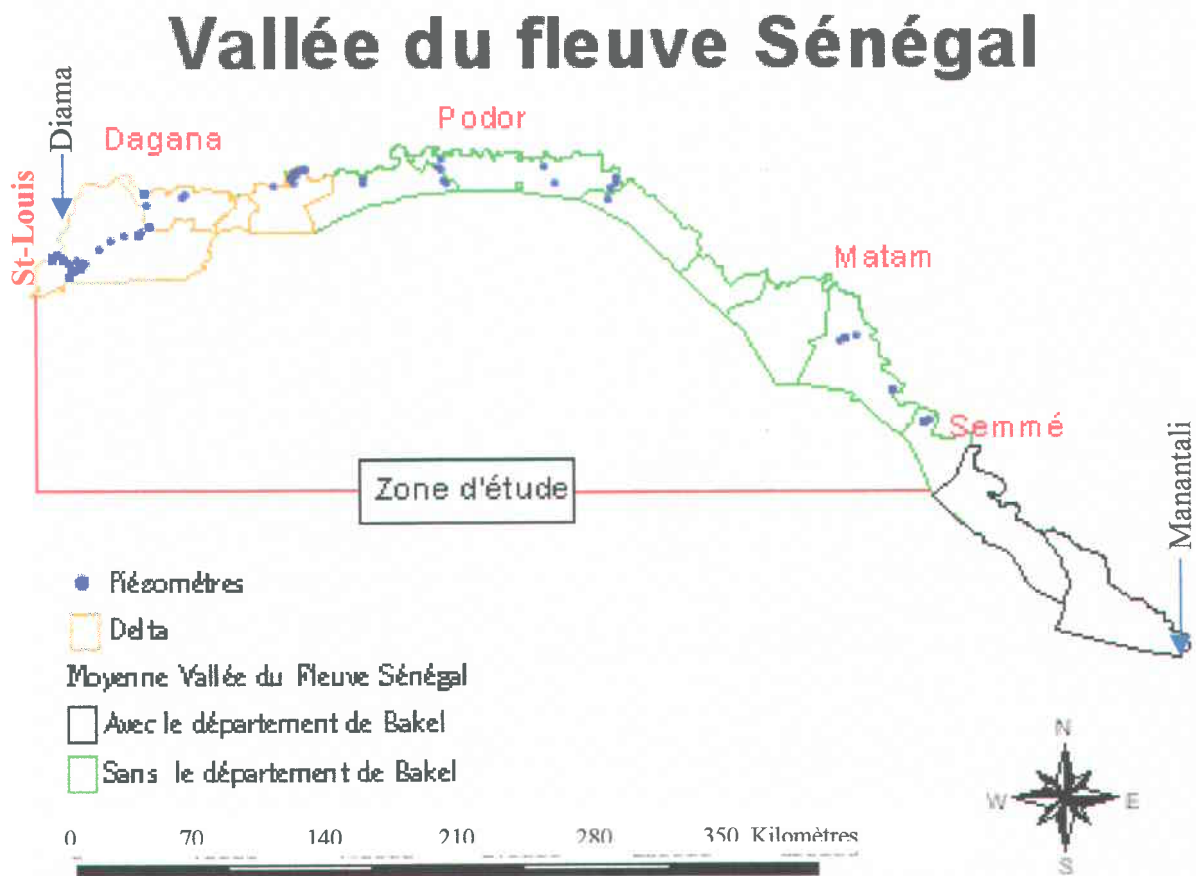


Figure 2.1 : Territoire d'étude avec les barrages de Diama en aval et Manantali en amont. Les subdivisions internes à la zone correspondent à des communautés rurales

Le réseau hydrographique comprend un cours d'eau principal (Fleuve Sénégal) drainant un bassin versant de 218 000 km<sup>2</sup> (entre Saint-Louis et Bakel) qui traverse la partie ouest du Mali et joue le rôle de frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Le fleuve Sénégal coule sur un gradient de pente très faible entre Semmé et Dagana (figure 2.2) et forme un système de nombreux défluent, de plaines d'inondation et de lacs (lac de Guiers au Sénégal et lac Rkiz en Mauritanie). Son régime est tributaire de l'alternance saisonnière des basses et hautes eaux et son débit est fortement régulé depuis quelques années par les barrages de Diama (1986) et de Manantali (1988).

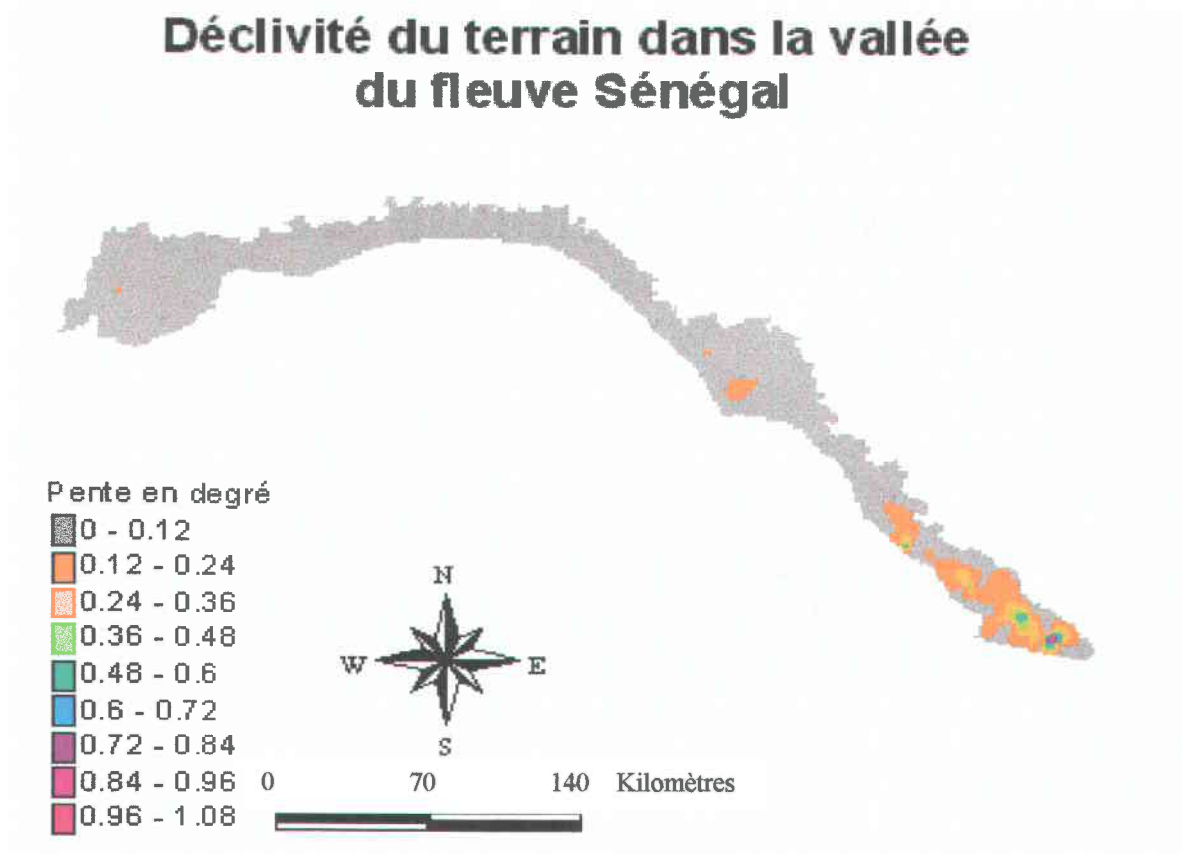


Figure 2.2 : Pente du terrain dans la vallée du fleuve Sénégal

En aval de Dagana sur une longueur d'environ 170 km, le Fleuve Sénégal forme un delta d'une superficie d'environ 4800 km<sup>2</sup> avec de nombreux défluent. C'est une zone vaste et plate dont les conditions naturelles ont été considérablement modifiées depuis la mise en place d'une digue de protection contre les inondations sur la rive gauche du fleuve en 1964.

Les caractéristiques générales des ouvrages piézométriques font ressortir trois grandes unités géologiques (Quaternaires, Éocène-paléocène et Maastrichtien) qui représentent les principales unités hydrogéologiques décrites dans la zone. Ces unités forment trois systèmes aquifères principaux (Rochette, 1993 et 1994) :

- le système aquifère superficiel formé de l'aquifère quaternaire des formations alluvionnaires de la vallée du fleuve et de l'aquifère du Continental Terminal des formations sableuses et sablo-argileuses sous-jacentes. Ce système aquifère d'une profondeur moyenne de 2 m dans le delta, est soumis à la pollution par les eaux salines et à l'influence locale de l'irrigation.
- le système aquifère intermédiaire constitué par les calcaires de l'Éocène et du Paléocène affleurant par endroits.
- le système aquifère profond du Maastrichtien avec sa série sablo-gréseuse est très sollicité dans la vallée. La profondeur de l'eau, fortement salée dans le delta, est comprise entre 10 et 30 m.

Du point de vue climatique, les précipitations très variables d'une année à l'autre, tombent de façon épisodique entre juin et octobre et plus particulièrement en août et septembre. Ces précipitations varient de 200 à 300 mm/an dans le delta et la basse vallée, de 300 à 400 mm/an dans la moyenne vallée et de 500 à 600 mm/an dans la haute vallée (SAED, 1996). L'essentiel de ces précipitations est enregistré sur une période de trois à quatre mois maximum correspondant au régime de hautes eaux du fleuve. Pour le reste de l'année, la vallée du fleuve Sénégal est caractérisée par une sécheresse relative débutant à la fin de novembre et s'étendant sur deux grandes périodes. Une première période sèche de décembre à mars avec des températures relativement douces entre 10 et 30°, suivie par une deuxième d'avril à juin très chaude avec des températures variant entre 25 et 40°. La première période sèche marque la décrue et le retour des eaux de surface vers le lit mineur du fleuve tandis que la deuxième correspond définitivement à la période des basses eaux du fleuve ou étiage. La lame moyenne d'évaporation Piche varie entre 1880 et 3300 mm de Saint-Louis à Matam (SAED, 1996).

La géomorphologie de la vallée du fleuve est caractérisée dans le Walo (zone de cultures de décrue) par des cuvettes de décantation et des bourrelets de berge du lit mineur et dans le Diéri (zone de cultures pluviales) par des dunes sableuses. La hauteur du relief dans la vallée, varie entre 0 m à Saint-Louis et 120 m à Bakel (figure 2.3). Cependant, dans la zone d'étude située entre Saint-Louis et Semmé, l'altitude maximale observée est seulement de 60 m et ceci à Semmé. En aval de Dagana, dans le delta, le relief est très bas et souvent marqué par des zones très plates qui correspondent à des dépressions naturelles temporairement inondées en saison des pluies et soumises à une forte évaporation.

### Modèle numérique d'altitude de la vallée du fleuve Sénégal

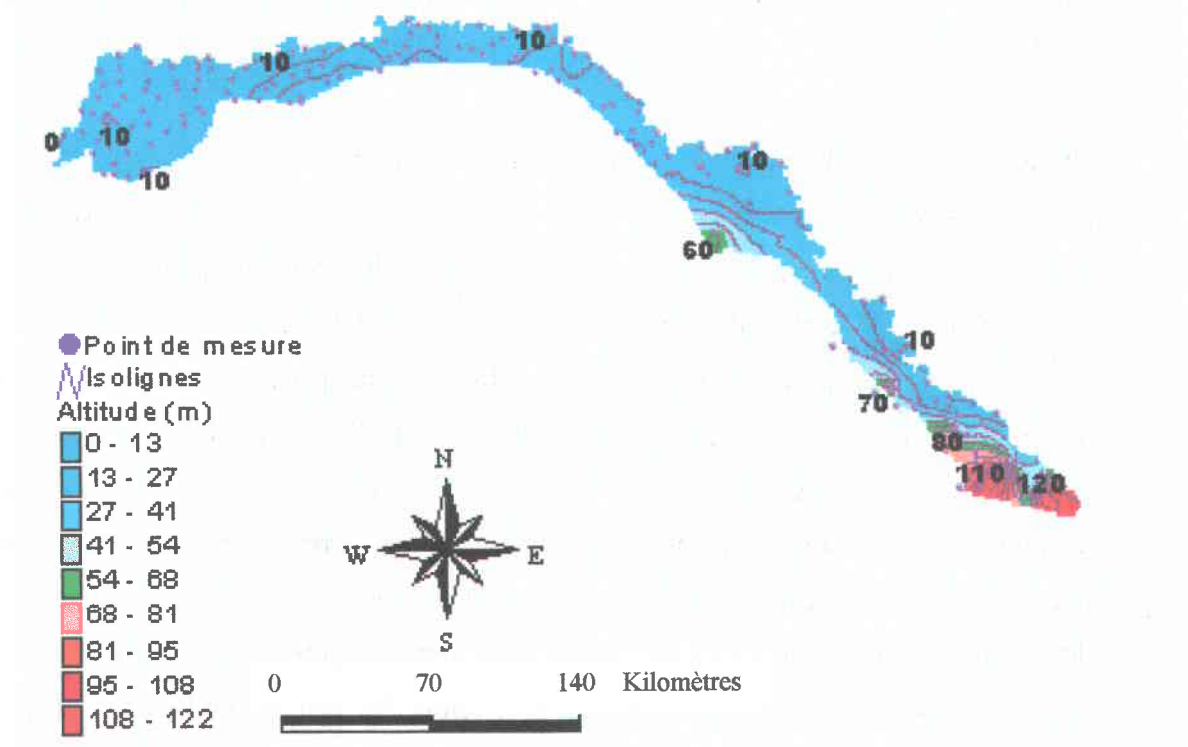


Figure 2.3 : Relief de la vallée du fleuve Sénégal

Au plan morphopédologique, quatre grands groupes de sols sont différenciés dans la zone d'étude (SAED, 1996):



- les sols sablo-silteux ou Fondé contenant moins de 30% d'argile. Ce sont des sols essentiellement limoneux et peu évolués. Leur potentiel d'irrigabilité est de 31%
- les sols très argileux ou Hollaldé à plus de 60% d'argile qu'on retrouve dans les plaines de décantation. Ils sont dominants dans la moyenne vallée. Ils représentent 36% du potentiel irrigable.
- les sols argileux ou Faux-Hollaldé contenant de 30 à 60% d'argile, constituent la transition entre les deux groupes précédents avec 33% du potentiel irrigable
- les sols sablonneux avec 80 à 90% de sable. Ce sont les formations sableuses des cordons, terrasses et dunes littorales, et les sols ferrugineux sur ergs ou terrasses du Diéri.

Les Hollaldé et les Faux-Hollaldé mal drainés sont des sols hydromorphes. Dans le delta ces sols sont salés et dits halomorphes. Les différences naturelles entre ces catégories de sols conduisent à des adaptations différentes par rapport aux types de cultures pratiquées dans la zone. C'est ainsi qu'on a :

- toutes les variétés de cultures autre que le riz dans les Fondé qui sont des sols très perméables
- des cultures variées de riz, maraîchage et autres céréales, dans les Faux-Hollaldé
- uniquement du riz et fourrage dans les Hollaldé
- toutes les cultures autres que le riz dans les sols du Diéri.

L'agriculture dans la vallée a une très forte composante traditionnelle avec notamment les cultures de décrues du Sorgho pratiquées dans le Walo et les cultures du Diéri qui ont cours en saison des pluies.

Quant à l'aménagement hydro-agricole et la mise en valeur dans la vallée, ils sont gérés par la SAED dont les attributions étaient initialement limitées au delta. Mais par la suite, une procédure d'aménagement et d'équipement de petits périmètres irrigués jugés plus adaptés aux conditions naturelles du milieu, a été développée et étendue au reste de la vallée en se substituant aux grands périmètres traditionnels du delta. Mais l'essor de ces aménagements dans le delta est malheureusement entravé par la dégradation saline continue des sols.

### **II. 1. 1 – Données cartographiques de base**

Les données cartographiques sont de deux sources notamment le SGPRE et la SAED.

Les informations récupérées au niveau du SGPRES étaient sous le format numérique du logiciel MapInfo. Il s'agit :

- de la carte vectorielle des limites de la vallée du fleuve Sénégal
- de la carte du réseau hydrographique dans la vallée du fleuve Sénégal

Les données en provenance de la SAED étaient sur support papier formant deux cartes :

- carte papier des types de sols du delta.
- carte papier des zones aménagées dans le delta en 1994.

Ces cartes ont été scannées sous forme d'images. Elles ont par la suite été géoréférencées dans le système de projection UTM-WGS84-Zone 28 Nord puis numérisées dans MapInfo. Le réseau hydrographique dans le delta était déjà disponible sous le format numérique de MapInfo.

## **II. 1. 2 – Données non cartographiques**

Les données non cartographiques forment l'ensemble des informations collectées lors des activités d'échantillonnage sur le terrain. Elles proviennent du SGPRES, de la SAED, de l'OMVS et de l'ASECNA. Les données du SGPRES étaient en format DBASE et formaient deux thèmes :

- données d'évapotranspiration journalière pour trois stations de la moyenne vallée du fleuve Sénégal.
- points cotés mesurés sur toute l'étendue de la vallée du fleuve

De même, les données de la SAED ont été livrées sous le même format. Ces données étaient toutes relatives aux nappes d'eau souterraine dans le delta du fleuve Sénégal :

- positionnement des piézomètres
- caractéristiques des piézomètres (altitude, profondeur, nappe captée, sol au lieu d'implantation)
- relevés mensuels du niveau piézométrique, de la profondeur, de la conductivité électrique et du pH de la nappe pour chaque piézomètre durant les années 1987, 1988, 1989, 1990 et 1997

Les informations de l'OMVS ont été saisies à partir d'un rapport annexe (Dieng, 1997). Elle caractérisent les nappes souterraines et le fleuve Sénégal dans la moyenne vallée :

- positionnement des ouvrages piézométriques
- relevés mensuels du niveau piézométrique effectués au niveau de quarante cinq ouvrages de 1987 à 1990.
- caractéristiques des piézomètres (altitude, profondeur, nappe captée, cours d'eau, distance au cours d'eau le plus proche, distance au limnimètre le plus proche, distance au pluviomètre le plus proche).
- données limnimétriques ou hauteurs d'eau du fleuve mesurées à l'endroit de six stations situés à Rosso, Dagana, Podor, Guédé Chantier, Saldé et Bakel.
- Quant aux informations en provenance de l'ASECNA, elles correspondent à des relevés piézométriques effectués au niveau de quatre stations pluviométriques localisées dans la moyenne vallée notamment à Dagana, Podor, Matam et Semmé.

Signalons que les données relatives au suivi piézométrique des nappes du delta telles que récupérées auprès de la SAED, étaient entachées d'erreurs. En effet toutes les mesures de piézométrie et de profondeur des nappes étaient tronquées de leurs valeurs décimales, déféctuosité qui n'a malheureusement pas pu être solutionnée. Il en a résulté que pour la piézométrie, l'essentiel des mesures étant proche de 0, on s'est retrouvé avec plusieurs valeurs nulles, tandis que pour la profondeur de l'eau, on s'est retrouvé avec des valeurs entières. Cette situation a fait que toute étude relative au niveau piézométrique dans le delta a été écartée au profit d'une approche basée plutôt sur la profondeur des nappes par rapport à la surface du sol. Un choix qui se justifie par le double fait que :

- la troncature constatée des données de profondeur de l'eau est moins sévère que celle de la piézométrie
- mais surtout par le fait que dans le delta, la problématique porte sur l'agriculture qui est plus concernée par la profondeur de la nappe que par sa côte piézométrique.

## **II. 2 – Systèmes d'information géographique**

### **II. 2. 1 – Qu'est-ce qu'un SIG?**

Une définition assez simple des systèmes d'information géographique pourrait être selon Aronoff (1989), un ensemble de systèmes informatiques utilisés pour stocker et manipuler

l'information géographique. De façon plus standard, Thériault (1992) définit un système d'information géographique comme un ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale utilisés pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique. Les données sont analysées afin de produire l'information nécessaire pour les décideurs.

La capacité d'intégrer dans un environnement unique des données spatiales numérisées de sources diverses (images satellitaires, données de cartes papiers numérisées, mesures géophysiques et géochimiques provenant de divers endroits de la terre, etc.), traduit à prime abord, l'intérêt des SIG. La possibilité offerte par la suite de manipuler ces données, de les transformer, et puis d'en extraire des propriétés particulières pouvant être combinées pour produire de nouvelles informations et comprendre de nouvelles relations spatiales, fait des SIG un noyau de caractérisation, d'analyse, de compréhension et de prédiction de phénomènes à référence spatiale.

L'impact majeur des SIG aujourd'hui dans tous les domaines d'activité, tient principalement à leur capacité d'isoler des couches individuelles d'information spatiale et de fournir en même temps des outils permettant d'analyser et de modéliser les interrelations entre ces couches. En effet, il y a un besoin naturel de comprendre les relations pouvant exister entre les variétés d'informations collectées dans l'espace géographique ; l'interaction de plusieurs processus et l'analyse simultanée de ces différents types de données est impérative pour comprendre la plupart des phénomènes naturels.

Pour réaliser ces multiples tâches, les SIG intègrent des fonctions classiques de gestion de bases de données telles que les requêtes et l'analyse statistique avec des fonctions uniques de visualisation par cartographie et d'analyse spatiale rendues possible grâce à la fonction essentielle de jointure entre des données. Cette dernière fonction est absolument utile en ce sens qu'elle permet de relier les objets géographiques à leurs attributs thématiques ; ce qui a pour finalité d'élaborer un ensemble de couches individuelles d'informations spatialement reliées et pouvant être combinées pour l'analyse spatiale et l'affichage cartographique. Mais

il est clair que cet outil ne peut pas tout solutionner à lui seul. En effet, la plupart des applications potentielles sont parfois si spécifiques qu'il est extrêmement difficile de définir un SIG couvrant tous les besoins de tous les utilisateurs. Il en résulte une intégration avec des applications spécialisées externes où le SIG joue en même temps un rôle de serveur de données, d'outil de visualisation et d'aide à la transformation (figure 2.4).

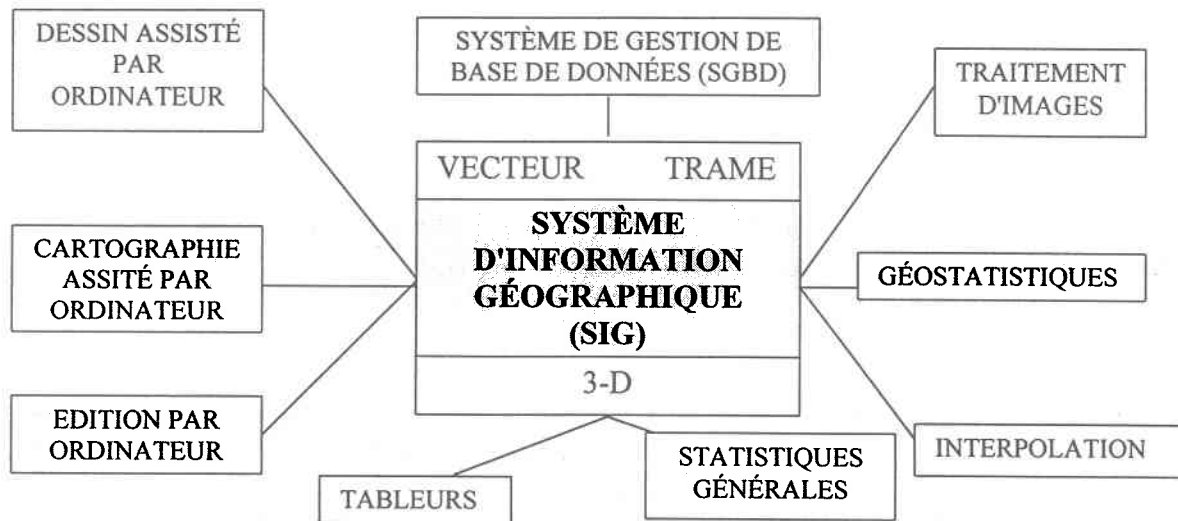


Figure 2.4 : Relation des SIG avec d'autres types d'applications informatiques. Adapté de Bonham-Carter (1994)

Il existe deux modèles principaux utilisés pour représenter les données dans un SIG à travers un système de projection généralement à deux dimensions : le modèle vectoriel et le modèle trame ou matriciel.

Le modèle vectoriel repose principalement sur trois primitives graphiques qui sont les points, les arcs ou lignes connectées par des nœuds et liant ces points, et les surfaces ou polygones délimités par ces lignes (figure 2.5). La mise en œuvre de ces primitives forme les variantes du modèle vecteur peu avide en espace de stockage. En ce qui concerne le modèle matriciel, il est composé de petites cellules juxtaposées, de forme généralement carrée représentant les objets spatiaux avec une surface dont la taille généralement arbitraire, est égale à la résolution du système (figure 2.6). Collet (1992) a défini la structure d'une information spatiale en mode matriciel comme étant un tableau de valeurs numériques

référencées géographiquement par rapport à un système. L'unité fondamentale de cette structure est le pixel, la cellule ou encore le taxon et l'ensemble de ces pixels constitue la grille numérique ou matrice spatiale, très avide en espace de stockage et moins précise dans la caractérisation des objets spatiaux.

**Point** - une paire de coordonnées x et y •  $(x_1, y_1)$

**Ligne** - une séquence de points



**Polygone** - surface délimitée par des lignes

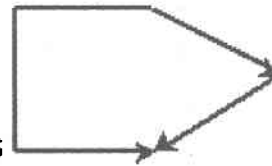


Figure 2.5 : Modèle vectoriel. Adapté de Maidment (1999)

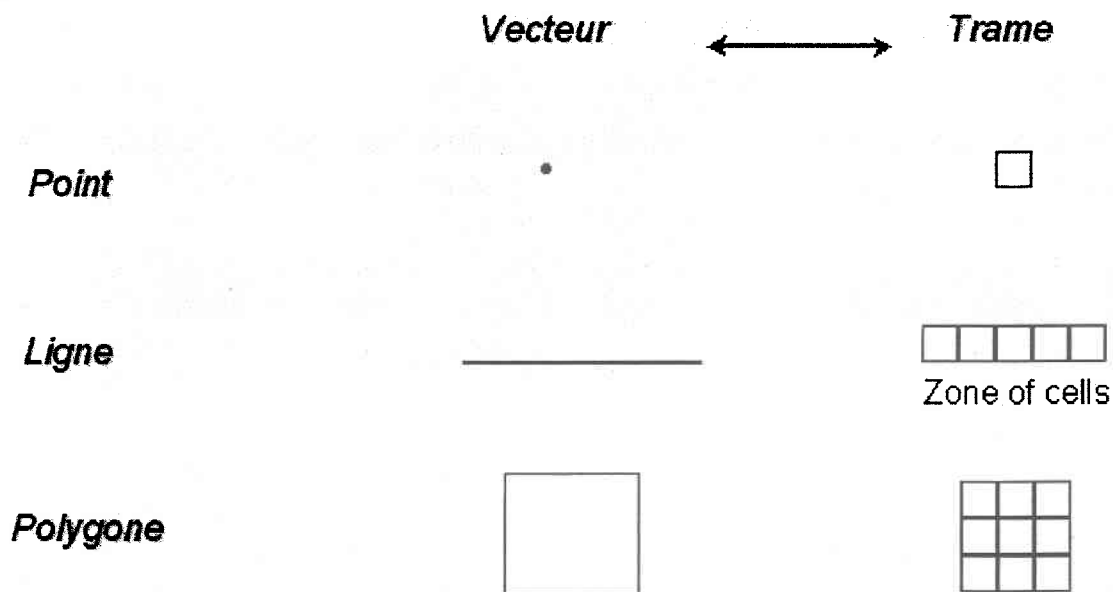


Figure 2.6 : Modèle trame. Adapté de Maidment (1999)

Ces deux modèles de données, se différencient fondamentalement par leur façon de représenter l'espace géographique mais aussi par les objets spatiaux qu'ils utilisent pour représenter cet espace (figure 2.7).

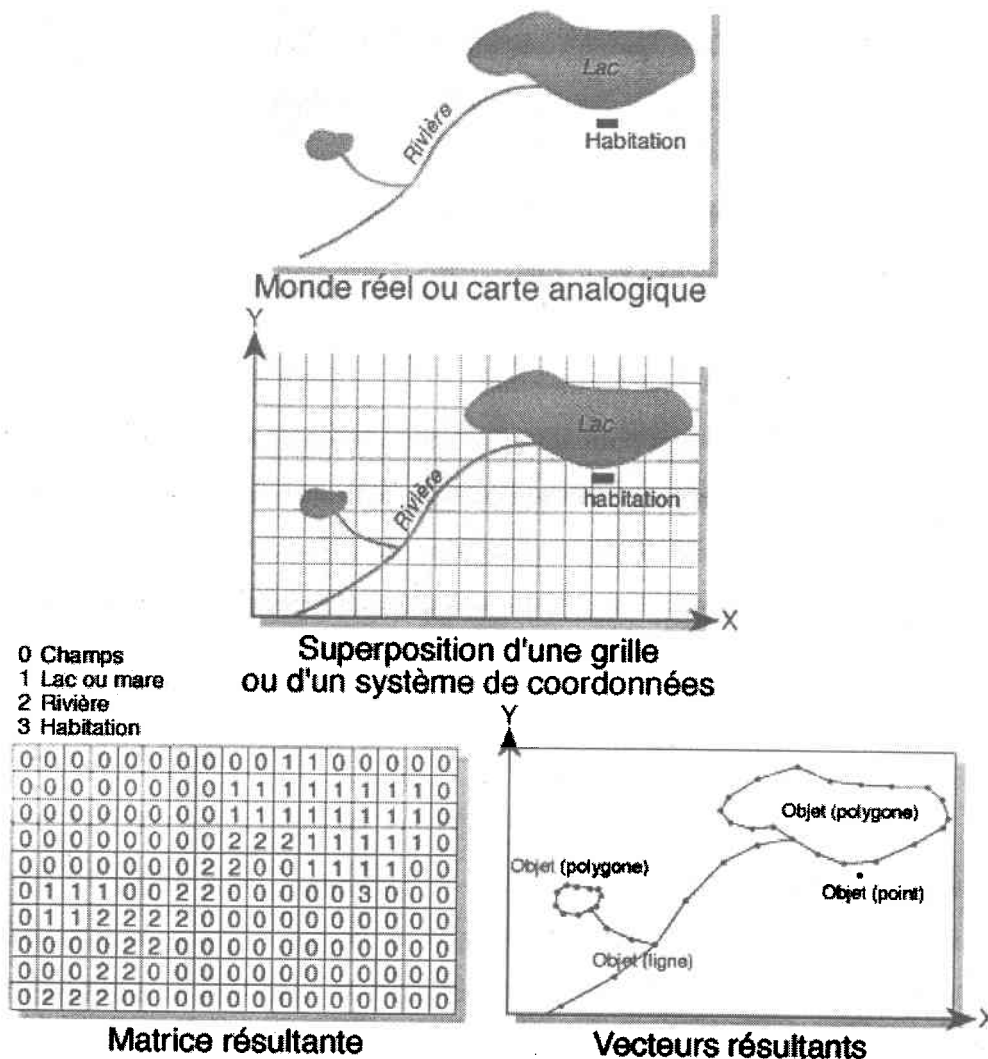


Figure 2.7 : Model vectoriel vs model matriciel (Thériault, 1998)

En effet, là où le modèle matriciel représente directement les objets par des aires, le modèle vectoriel quant à lui, se sert de contours pour illustrer les mêmes formes géométriques de ces objets (Bonham-Carter, 1994). Dans le modèle vectoriel, ces objets ainsi représentés sont reliés à des tableaux d'attributs qui décrivent les entités géographiques correspondantes. Chaque modèle a ses spécificités et offre pour cette raison des avantages

particuliers. C'est ainsi que le modèle matriciel est par exemple plus adapté pour la représentation de variables continues comme l'altitude du relief ou le champ de gravité terrestre, alors que le modèle vectoriel offre plus de précision dans la représentation cartographique d'objets spatiaux identifiés par des points, lignes, ou polygones, notamment les stations de mesures, les cours d'eau ou les limites d'un territoire. Le modèle matriciel, est plus efficace dans les opérations de superposition de couches d'informations alors que le modèle vectoriel prend moins d'espace mémoire. Heureusement, la plupart des logiciels de systèmes d'information géographique actuels intègrent les deux types de modèles, bénéficiant ainsi de leurs avantages conjugués.

## **II. 2. 2 - Applications générales des SIG**

Du fait de leurs nombreuses fonctionnalités définies dans le chapitre précédent, les SIG peuvent s'appliquer à plusieurs domaines d'activité tant que l'information relative à ces domaines a un caractère spatial. Malheureusement, dans la littérature des SIG consultée, aucune information n'a été trouvée relativement à la problématique traitée dans cette étude. C'est pourquoi les exemples d'applications cités ici n'ont pour but que d'illustrer les possibilités générales offertes par les SIG particulièrement dans le domaine des sciences de l'eau.

### **II. 2. 2. 1 - Applications géoscientifiques**

La géoscience est un terme générique utilisé pour désigner toutes les disciplines des sciences de la terre. C'est donc un domaine pluriel où toute analyse nécessite une intégration de données multi-sources. Les applications potentielles des SIG dans ce domaine seraient nombreuses d'après Bonham-Carter (1994) :

- la cartographie des risques naturels liés aux glissements de terrains, aux séismes, aux éruptions volcaniques, aux inondations par des cours d'eau, à l'érosion côtière, à la pollution résultant d'une activité minière ou industrielle
- le choix d'un site pour un projet en ingénierie tels que l'enfouissement de déchets municipaux ou nucléaires, la construction de pipelines, de routes, de chemins de fer, ou de barrages



- l'évaluation de ressources géologiques autres que minérales notamment des matières premières énergétiques telles que l'eau souterraine, le pétrole, le gaz naturel, le charbon, l'énergie géothermique, le sable et le gravier.
- la recherche sur les relations de cause à effet entre plusieurs jeux de données spatiales, telles que l'incidence de maladies (sur des plantes, des animaux ou sur l'homme) en rapport avec des patrons géochimiques dans les roches, les sols ou l'eau.
- la recherche de relations entre la géochimie régionale et les signatures géophysiques de granites de types I et S lors d'une campagne d'exploration minière.

Il cite un exemple d'utilisation des SIG en exploration minière au Manitoba (Canada) publié en 1994 par la commission géologique du Canada sur la prospection des métaux de base dans des dépôts de sulfures massifs volcanogéniques. Cet exemple montre qu'il est possible de prédire le potentiel minéral d'une région grâce à une modélisation spatiale intégrée prenant en entrée une carte du socle rocheux, une carte d'altération des formations géologiques, des échantillons géochimiques de sédiments de lacs et de roches, et une image aéroportée des propriétés magnétiques des roches.

L'Institut de Recherche en Systèmes Environnementaux (ESRI, 1999) rapporte qu'en Portland (Oregon), le Département de Géologie et des Industries Minérales (DOGAMI) de l'Oregon (USA) et le Bureau d'État des Services d'Urgence en collaboration avec la firme GeoNorth, ont mis au point une application SIG (MAD GIS) qui permet de cartographier la vulnérabilité des populations, des constructions et des ressources naturelles aux séismes et aux inondations. L'application a été conçue entre autres à partir de données décrivant les risques de séismes basés sur la déclivité des terrains et la liquéfaction des sols.

#### **II. 2. 2. 2 - Applications municipales**

La RRRASOC (organisation de gestion de déchets solides du comté de huit municipalités d'Oakland au Michigan) a réussi, à travers l'intégration de données de recensement avec les limites territoriales et les données sur les fournisseurs de services en déchets, à réaliser grâce à ArcView, l'analyse et la cartographie thématique des différents fournisseurs de services, de leurs tarifs, des caractéristiques de ces services, des termes de contrat et de la proximité d'équipements ou installations (ESRI, 1999).

### **II. 2. 2. 3 - Application à la gestion des ressources côtières**

Il existe de nombreuses utilisations de SIG traitant de la gestion des ressources côtières notamment en termes de faune et de flore. Beaucoup d'applications dans ce domaine sont orientées vers la protection des espèces menacées de disparition. Deux exemples de ce type sont rapportés par ESRI (1999) :

- le premier est une recherche, sponsorisée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), et menée avec succès au département de télédétection de l'université technique d'Istanbul en Turquie. L'étude qui intègre plusieurs données satellitaires avec des données collectées directement au sol (données captées par radar et par laser optique, données météorologiques, bathymétriques et de recensement, données agricoles et hydrologiques, données de GPS), a permis de créer un réseau de réserves naturelles visant à protéger dix sept plages de nidification de deux espèces de tortues marines (*carretta carretta* et *chelonina mydas*) le long des côtes méditerranéennes de la Turquie.
- Le deuxième exemple est une collaboration réussie entre l'Agence Nationale Américaine d'Administration des Océans et de l'Atmosphère (NOAA) et ESRI. Le résultat est un couple d'applications œuvrant dans le SIG ArcView pour évaluer d'une part les ressources côtières océaniques et d'autre part identifier, modéliser, prédire et cartographier les types d'habitats des espèces animales (invertébrés, poissons, reptiles marins et mammifères).

Ces deux applications relèvent du domaine de l'océanographie.

### **II. 2. 2. 4 - Applications agricoles**

Dans le domaine agricole, les applications de SIG sont diverses également. On peut citer la cartographie de couvertures pédologiques désormais plus facile à réaliser et le concept de modèle d'organisation spatiale des sols ou MOS. Le MOS est une sorte de structure conceptuelle informatique capable d'accueillir la connaissance tridimensionnelle d'une couverture pédologique et la description des relations entre les différents types de sols (King et al., 1990 ; King et Daroussin, 1991). Toujours selon ces chercheurs, on peut combiner l'information pédologique avec des modèles hydrologiques et de croissance de plantes et simuler ainsi divers scénarios.

Valdez (1998) de l'université du Texas à Austin (USA), a réalisé une étude avec ArcView au terme de laquelle il a pu estimer les besoins en irrigation des plantes dans les bassins de Guadalupe de San Antonio (Texas). Il a utilisé les informations suivantes pour réaliser son projet : les sols, la végétation, les cultures, les précipitations mensuelles, le taux d'évaporation potentielle et les limites de la région d'étude.

#### **II. 2. 2. 5 - Application aux sciences de l'eau**

La conservation des ressources mondiales en eau est devenue ces dernières années une préoccupation grandissante dans le cercle des pouvoirs politiques à travers le monde. Cette préoccupation s'est naturellement soldée par la mise au point d'outils scientifiques et techniques sophistiqués pour assurer une gestion tant quantitative que qualitative de cet élément vital. Les SIG sont l'un de ces outils de plus en plus utilisés aujourd'hui dans ce domaine et les applications se multiplient dans tous les domaines des sciences de l'eau, avec l'apparition de concepts nouveaux telle que l'hydrologie spatiale.

En hydrologie, les applications sont moins nombreuses et moins élaborées dans le domaine des eaux souterraines que dans celui des eaux de surface qui est pourtant le composant le plus complexe du cycle hydrologique, compte tenu de l'atmosphère, les sols et même les eaux souterraines. Maidment (1996) explique cette situation par le fait que c'est à la surface de la terre que la description des entités géographiques pouvant être représentées dans un SIG, est la mieux détaillée. Dans tous les cas, la possibilité d'utiliser les SIG dans la modélisation des eaux superficielles et souterraines est un moyen nouveau de déterminer les paramètres et de visualiser les modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Il devient alors plus aisé selon Dennis (1998) de visualiser et comprendre des événements simulés dans le temps (par exemple des inondations ou des orages violents) en vue de les prévenir. Quelques exemples d'applications en hydrologie et en hydrogéologie sont cités ici pour illustrer le rôle essentiel des SIG en sciences de l'eau.

#### **II. 2. 2. 5. 1 - Applications hydrologiques**

Le Centre d'Ingénierie en Hydrologie (HEC) du Corps des Ingénieurs de l'Armée des USA a développé un Système de Modélisation Hydrologique (HEC-HMS) qui intègre les techniques hydrologiques actuelles avec les possibilités offertes par les SIG pour créer des modèles de simulation d'orages. Le système est capable de déterminer des hydrogrammes unitaires, des chemins d'écoulements hydrologiques et des modèles de transformation précipitation-ruissellement en utilisant une grille de données de précipitations (Dennis, 1998). De leur côté, Hellweger et Maidment (1997), et l'équipe du Centre de Recherche en Ressources Eau (CRWR) de l'université du Texas à Austin, ont développé un programme appelé CRWR-Prepro qui utilise l'interface d'une application SIG pour générer les paramètres hydrologiques d'entrée du HEC-HMS..

Ye et al.(1996) ont conçu un programme (SFLOWSIM) permettant de simuler l'écoulement de surface dans un bassin de fleuve à partir d'une carte. Les simulations sont basées sur les quantités de précipitation enregistrées dans les sous bassins versants ainsi que sur la teneur en eau des sols. L'application opère dans l'environnement d'ArcView. Reed et Maidment (1996), ont utilisé cette application pour gérer les débits de ruissellement dans les bassins de Souss (Maroc) et du fleuve Niger (Niger) en Afrique. Par ailleurs, en combinant un modèle numérique de terrain avec des données de précipitations moyennes, Oliviera et al. (1995), ont réalisé la délimitation du bassin versant du fleuve Niger en Afrique de l'Ouest, caractérisé son réseau de drainage et calculé son bilan hydrique moyen.

#### **II. 2. 2. 5. 2 - Applications hydrogéologiques**

À en croire Maidment (1996), la représentation dans un SIG des propriétés souterraines des aquifères est encore à l'état embryonnaire. Ce qui explique sans doute que les modèles de simulation des écoulements souterrains à l'intérieur des SIG sont encore très peu élaborés. Un exemple de ces modèles est le GFLOWSIM qui est un modèle de simulation de l'écoulement souterrain à partir d'une carte conçu par Ye et al. (1996). Le GFLOWSIM intègre des équations (loi de Darcy et équation de continuité), avec des cartes et des jeux de

données de l'aquifère, pour simuler les écoulements en régime permanent et transitoire à l'intérieur et à travers les limites des polygones de sous bassins.

Un des reproches qu'on fait souvent aux modèles hydrogéologiques classiques comme MODFLOW, c'est de n'être pas géoréférencé et d'analyser les phénomènes dans un espace relativement arbitraire défini par l'utilisateur. C'est justement pour intégrer cette dimension spatiale dans les modèles d'écoulements souterrains que :

- l'Engineering Computer Graphics Laboratory de l'université Brigham Young aux USA, a mis au point un module cartographique permettant de relier leur logiciel de Simulation des Systèmes d'eau souterraine (GMS) à ArcView et Arc/Info (ECGL, 1997). L'avantage d'un tel système est qu'au lieu de procéder par la méthode traditionnelle de génération de la grille numérique du domaine à modéliser, on crée un modèle conceptuel en utilisant les objets graphiques (polygones, lignes et points) d'une carte du territoire et en assignant les conditions aux limites et les propriétés du modèle au modèle conceptuel qui est ainsi indépendant du type de grille utilisé (différences finies, éléments finis, etc.).
- Niazi (1998) a travaillé sur un projet similaire dans le sud-est du Texas (USA) et dont l'objectif était de coupler MODFLOW avec ArcView à des fins de simulations des écoulements souterrains et de surface.

Il existe également d'autres modèles utilisant les SIG pour gérer la qualité des eaux aussi bien de surface que souterraines. Parmi eux, les modèles qui traitent de la pollution de source diffuse d'origine agricole, urbaine ou industrielle. L'hypothèse standard pour le traitement des problèmes de pollution de source diffuse consiste selon Maidment (1996) à relier dans un environnement de SIG, la concentration estimée de polluants dans un ruissellement à l'utilisation du territoire dans le bassin de drainage.

Des outils d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines existent. Le plus célèbre dans cette catégorie est DRASTIC développé par l'Association Nationale des Puits d'Eau (NWWA) en coopération avec l'Agence de Protection de l'Environnement des USA . Ce

modèle utilise la profondeur (D), la recharge nette (R), les caractéristiques du milieu aquifère (A), les caractéristiques des sols (S), la topographie (S), l'impact de la zone vadoze (I) et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C) pour cartographier la vulnérabilité potentielle des nappes pour la concentration de contaminants.

### III - MÉTHODOLOGIE

---

Le but ultime de cette étude est de réaliser une **modélisation spatiale de la salinité dans un environnement deltaïque irrigué (MSEDI)** pour aider à la décision en matière de politique agricole. La méthode utilisée pour réaliser l'étude est basée sur une intégration harmonieuse entre un système d'information géographique (SIG), un système de gestion de base de données relationnelles (SGBDR) et un tableur (figure 3.1).

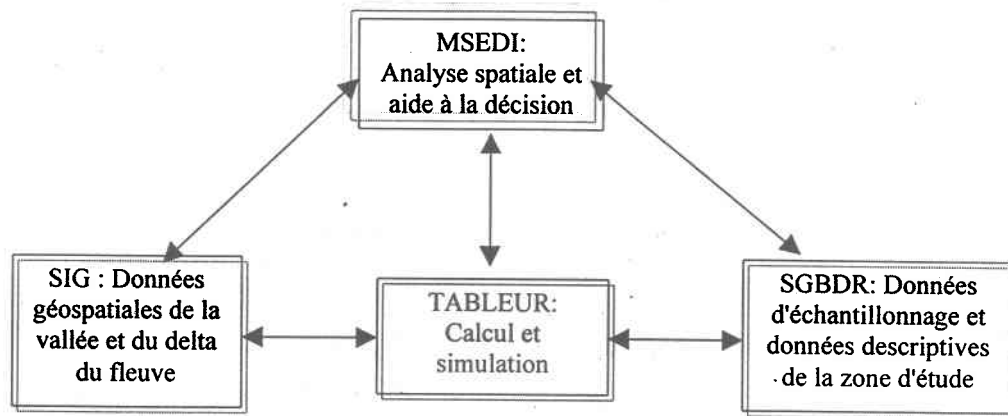


Figure 3.1 : Intégration d'un SIG avec un SGBDR et un Tableur

### III. 1 - Rôle de chaque composante

#### III. 1. 1 - Système d'Information Géographique (SIG)

Le support de SIG utilisé est le logiciel ArcView ; les éléments de la base de données spatiales sont donc en "SHAPE" (format natif d'ArcView). ArcView est un logiciel de système d'information géographique développé par l'Institut de Recherche en Systèmes Environnementaux (ESRI). Tous les documents qui donnent accès à des fonctions d'ArcView, c'est-à-dire les vues ("*Views*"), les tableaux ("*Tables*"), les graphiques ("*Charts*"), les mises en page ("*Layouts*") et les "*Scripts*", sont rassemblées au sein d'un projet ("*Project*"). Les "*Scripts*" sont des programmes en langage Avenue (le langage de programmation d'ArcView). Ces fonctions incluent : montrer les couvertures dans une vue, visualiser les tableaux d'attributs ("*attribute tables*") relatifs à cette vue, relier les tableaux

d'attributs par un champ clé, réaliser des graphiques pour obtenir des informations spatiales, et créer des mises en page pour présenter les informations fournies par les vues, les graphiques et les tableaux. Le rôle du SIG a donc été de :

- fournir les outils techniques permettant de gérer les objets graphiques de la base de données spatiales et leurs relations (topologie) ainsi que les relations entre ces objets et les données descriptives contenues dans la base de données thématiques (figure 3.2)

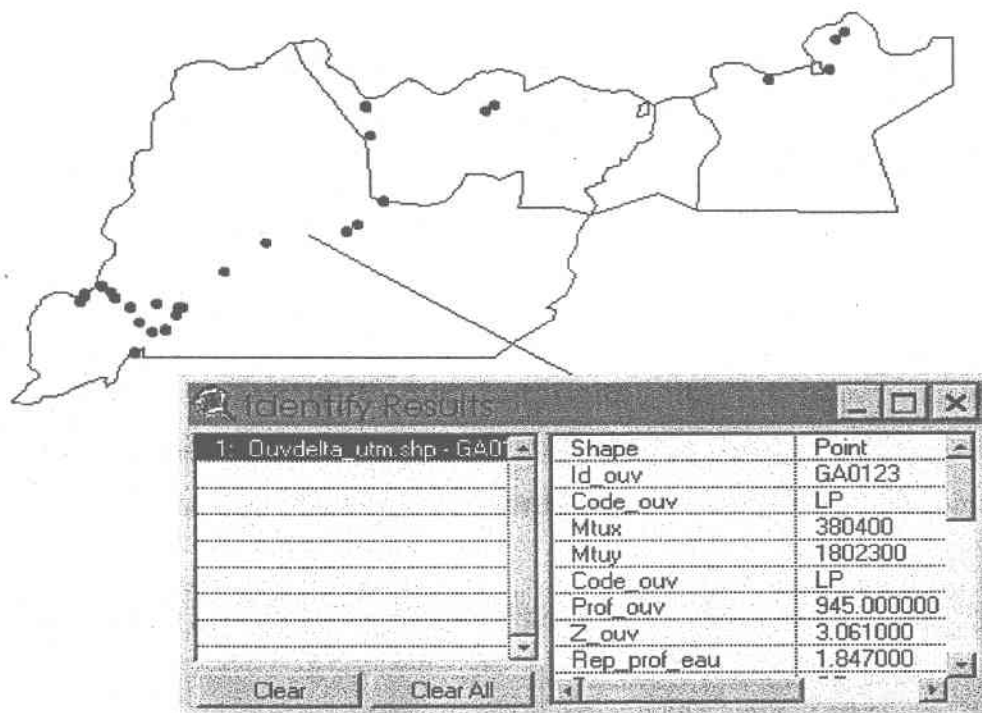


Figure 3.2 : Exemple de relation entre la géobase et les attributs thématiques dans le delta

- de réaliser une analyse de ces données spatiales
- et finalement de produire et visualiser les résultats d'analyse sous forme cartographique pour aider à la décision.

### III. 1. 2 - Système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR)

Dans cet exercice, le rôle du SGBDR (notamment MS ACCESS) a été de gérer sous forme de tables relationnelles, les attributs des entités géographiques représentées dans la base de données spatiales notamment :

- les données hydrologiques : pluviométrie, limnimétrie et évaporation



- les données hydrogéologiques : piézométrie, profondeur, conductivité électrique de la nappe
- les caractéristiques des piézomètres : position géographique, profondeur dans le sol, altitude, nappe captée, cours d'eau le plus proche, distance au cours d'eau etc.
- les données géomorphologiques : points cotés de la vallée du fleuve Sénégal.

### III. 1. 3 - Tableur

C'est avec le tableur EXCEL que la plupart des calculs divers ont été effectués. Il a par exemple permis :

- de tracer les limnigrammes piézométriques pour chaque ouvrage répertorié entre Dagana et Semmé pour en déduire les hauteurs de nappe en période de hautes (HE) et basses eaux (BE) (figure 3.3)
- de calculer l'amplitude de fluctuation annuelle du niveau de la nappe pour chaque piézomètre (figure 3.3)
- de calculer la lame d'eau infiltrée à la nappe en optimisant par simulation l'équation du bilan hydrologique sur quatre stations pluviométriques de la vallée (figure 3.4)

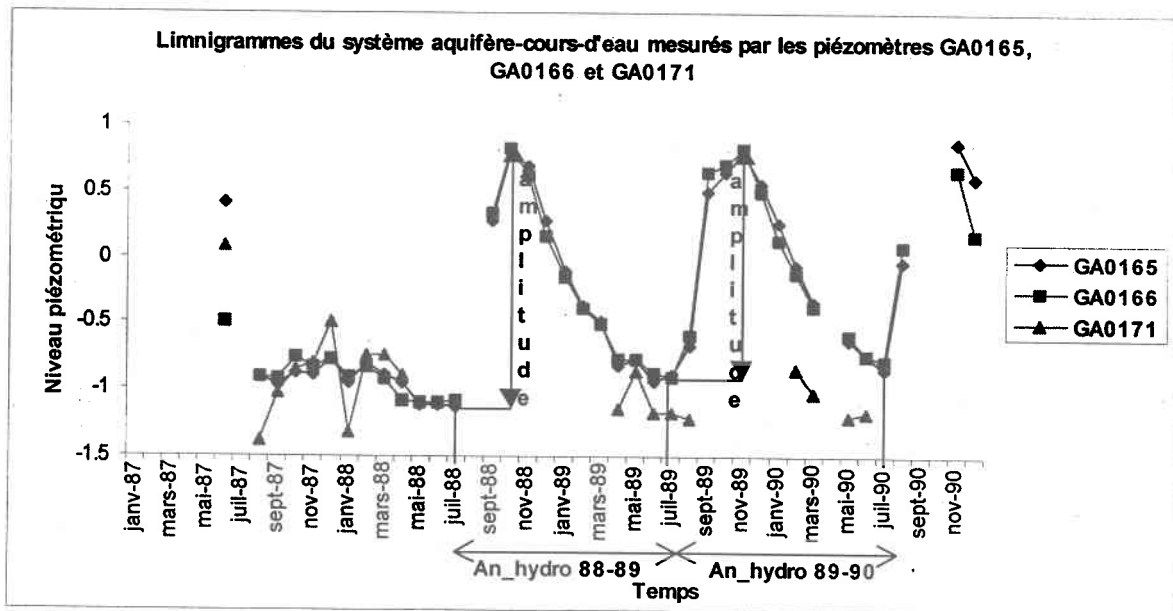


Figure 3.3 : Exemple de limnigramme piézométrique de la nappe superficielle (an-hydro désigne l'année hydrologique)

E42 = -D42\*D42

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
28									
29		No Station	X	Y	Station	Pluvio87	Pluvio88	Pluvio89	Pluvio90
30		1	-15.526	16.5217	Dagana	195	259	271	175
31									
32	Année	Pluviomes	Pluviocal	Pmes-Pcal	(Pmes-Pcal)^2	E'TP	RRU	R	I
33	1987	195	195	0	0	73.5	121.5001	7.105E-15	0
34	1988	259							
35	1989	271							
36	1990	175							
37									
38		No Station							Pluvio90
39		4							31
40									
41	Année	Pluviome							
42	1987	476	476	0	0	243.67	118.6667	113.66673	0

Simulation

Figure 3.4 : Simulation de la lame d'eau infiltrée à la nappe pour la station pluviométrique de Dagana

La méthodologie montre, comme on le verra dans les chapitres suivants, comment à travers une combinaison interactive entre un SIG (ArcView), un SGBDR (MS Access) et un tableur (MS Excel), on peut aider à solutionner une problématique environnementale telle que la dégradation des sols par salinisation.

### III.2 - Développement de la base de données spatiale (BDS)

L'information de base qui a été utilisée pour construire la base de données géographiques est entièrement de source secondaire. Selon l'organisme fournisseur (SAED ou SGPRES), ces données étaient en format numérique ou sur support papier. Les données numériques ont été recueillies en mode vectoriel sous le format natif de MapInfo auprès du SGPRES du Ministère de l'Hydraulique du Sénégal. Elles étaient référencées dans un système de coordonnées en longitude/latitude. Les cartes papiers issus de la SAED ont été géoréférencées dans leur système de projection original (UTM-WGS84-Zone 28 Nord) puis

numérisées en mode vectoriel dans MapInfo et stockés sous le même format également. La figure 3.5 suivante liste les thèmes numérisés ainsi que leurs attributs :

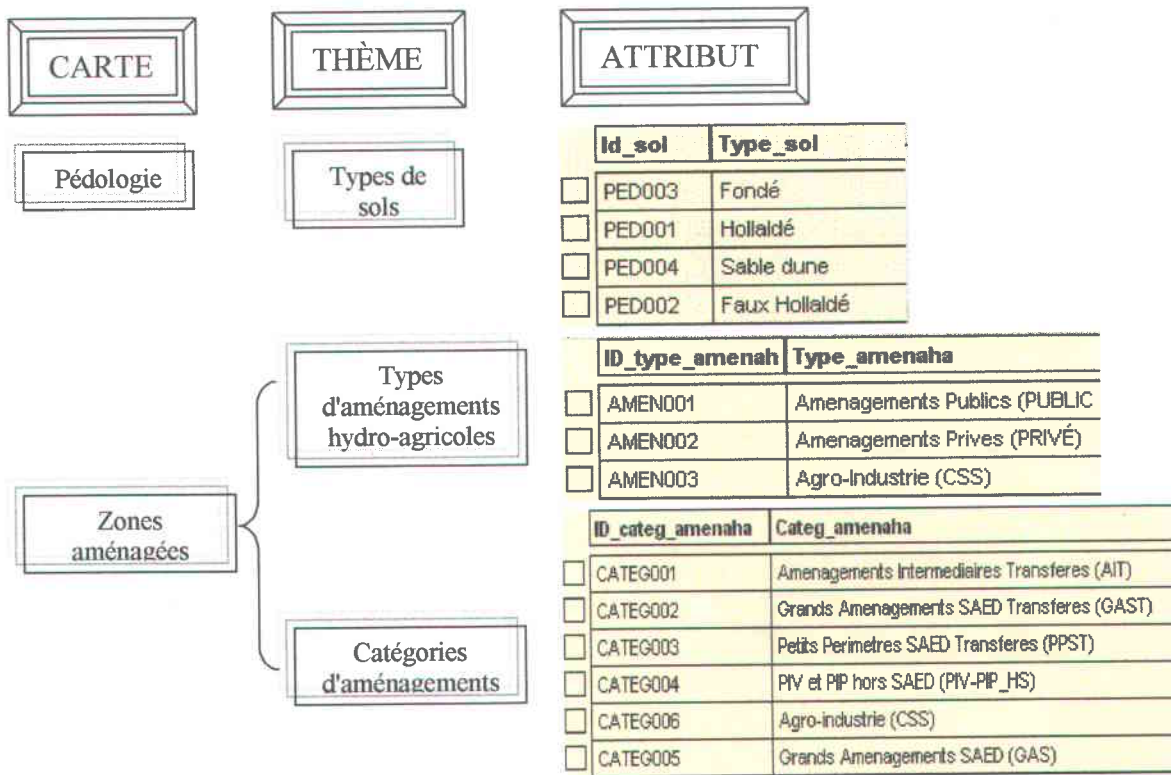


Figure 3.5 : Données géographiques numérisées

Dans l'optique de pouvoir les manipuler ultérieurement dans différentes projections, toutes les données ont été ramenées à une projection unique longitude/latitude avant d'être formatées vers ArcView dans le même système de référence. Le formatage des données de MapInfo vers ArcView s'est fait grâce au module ARCLINK de MapInfo qui est une application conçue pour permettre l'échange de données entre MapInfo et Arc/Info. Cette application crée des fichiers "e00" à partir des fichiers "TAB" de MapInfo. Les fichiers "e00" sont convertibles au format "SHAPE" (ArcView) à l'aide de l'utilitaire "Import71" d'ArcView. La figure 3.6 en montre la procédure simplifiée.

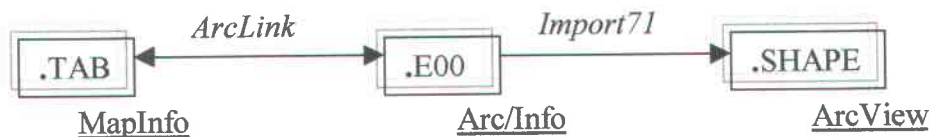


Figure 3.6 : Formatage des données géographiques de MapInfo vers ArcView

### III. 2. 1 - Stockage et structure des données géographiques dans ArcView

Les données sont organisées sous forme de couvertures ou couches dans la base de données géographiques selon un schéma présenté à la figure 3.7 :

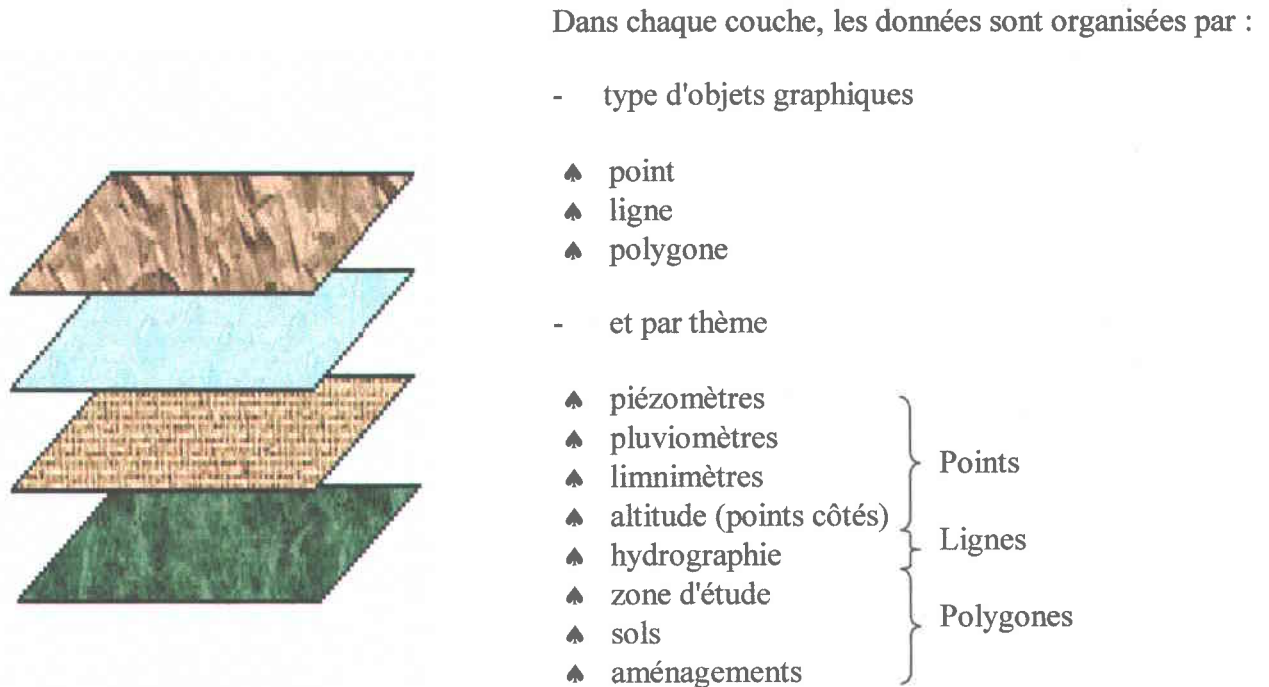


Figure 3.7 : Modèle simplifié d'organisation des données par couches dans la BDS

La BDS comprend ainsi deux parties complémentaires : une base de données géographiques ou géobase qui stocke la géométrie des objets (ci-après définis) et une base de données thématiques constituée de tableaux d'attributs décrivant ces objets.

### III. 2. 2 - Représentation des données géographiques dans ArcView

Le système de coordonnées utilisé pour représenter les données dans l'application est la projection UTM-1927, Zone 28, Clarke 1866. Ce système de référence est en fait conforme à la région d'étude. La représentation des données s'est faite selon deux structures :

- mode vectoriel pour toutes les couvertures en points et en lignes

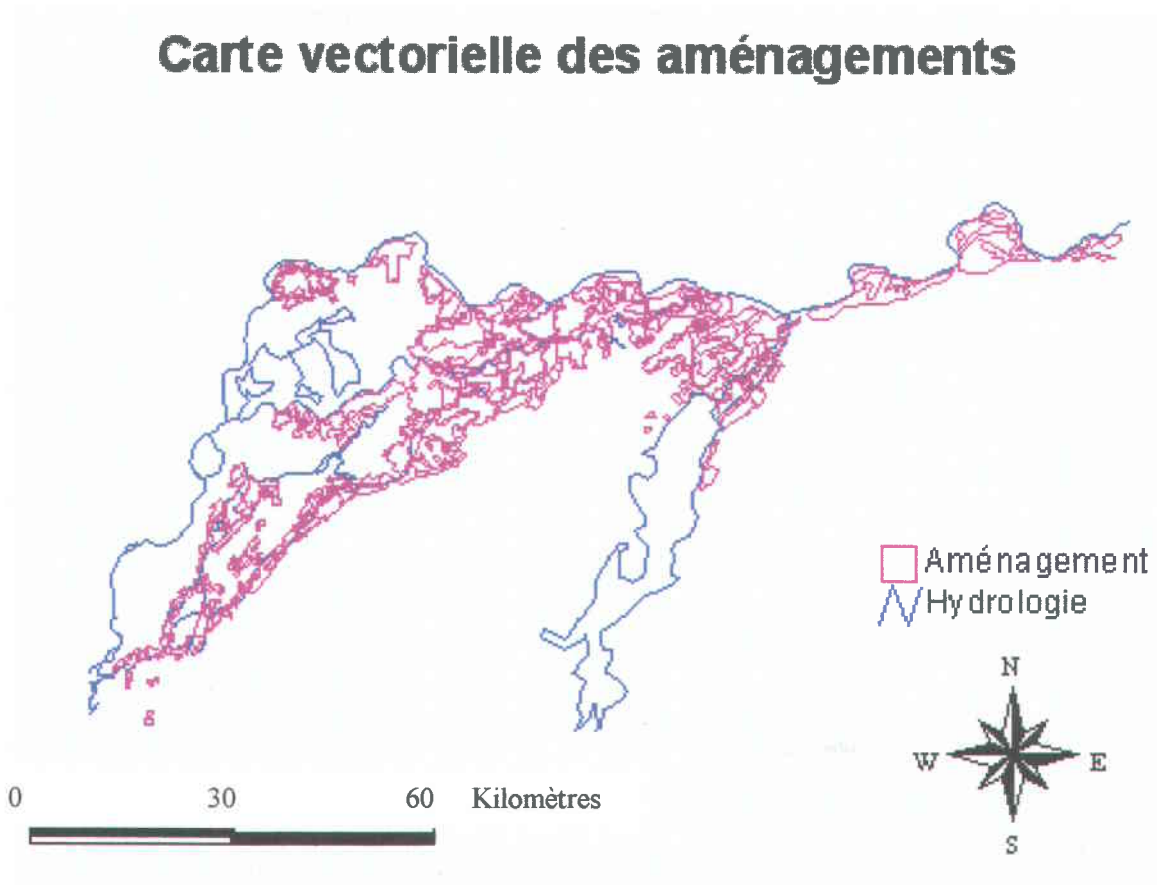


Figure 3.8 : Représentation vectorielle des zones aménagées dans le delta

- et mode "raster" ou matriciel pour les grilles générées

### Carte matricielle des types d'aménagements

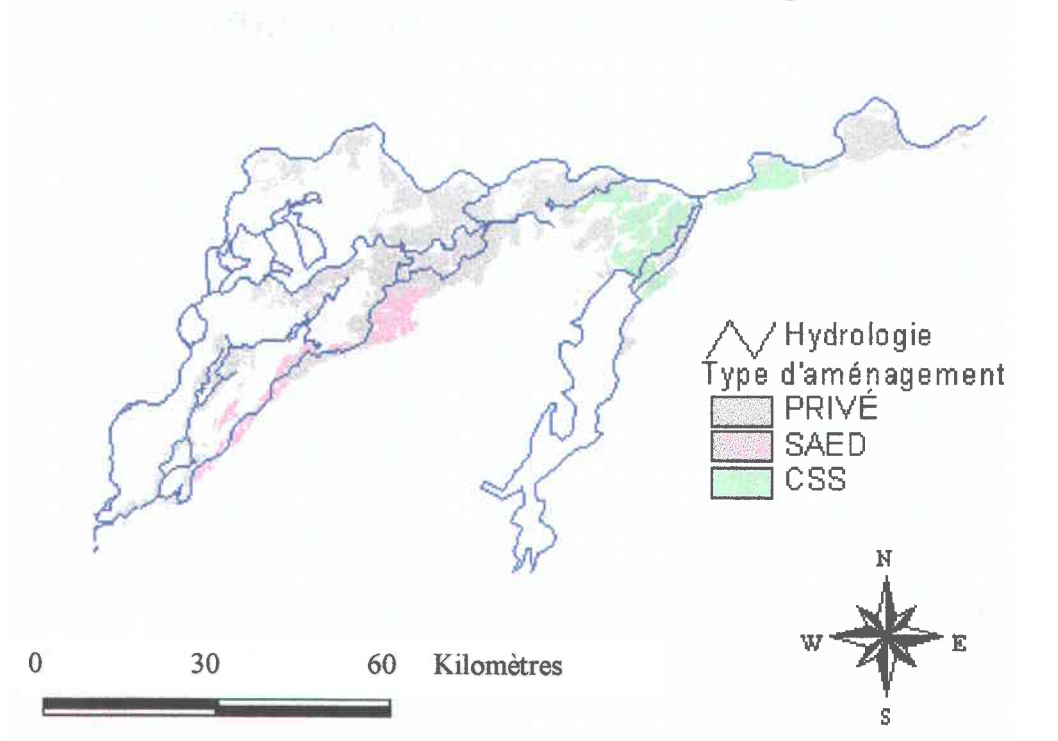


Figure 3.9 : Représentation matricielle des aménagements du delta selon le type

### Carte matricielle des catégories d'aménagements

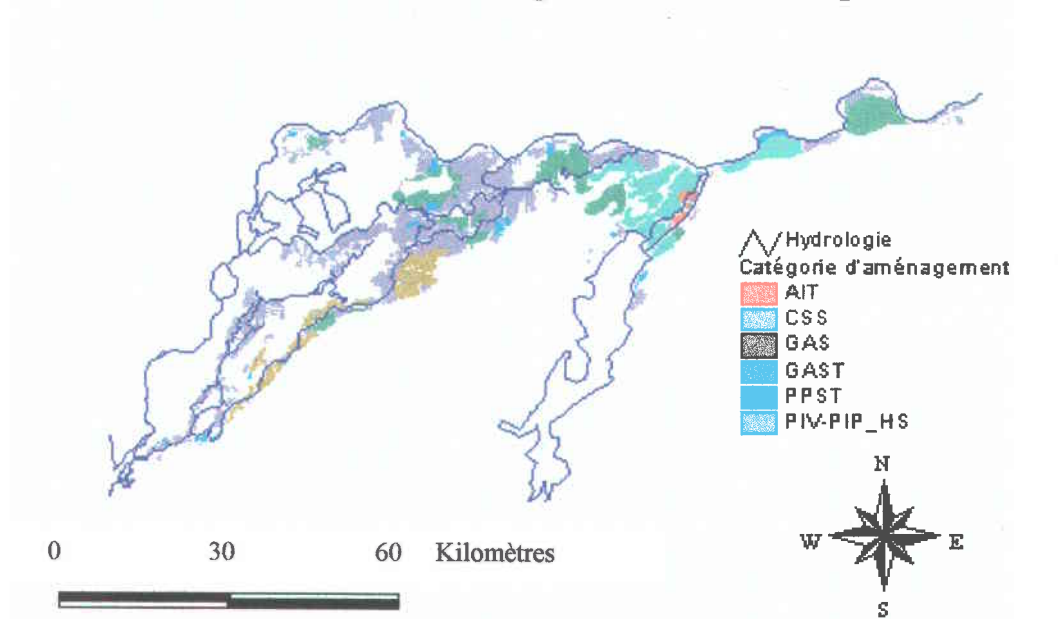


Figure 3.10 : Représentation matricielle des aménagements du delta selon la catégorie

## Carte matricielle des types de sols

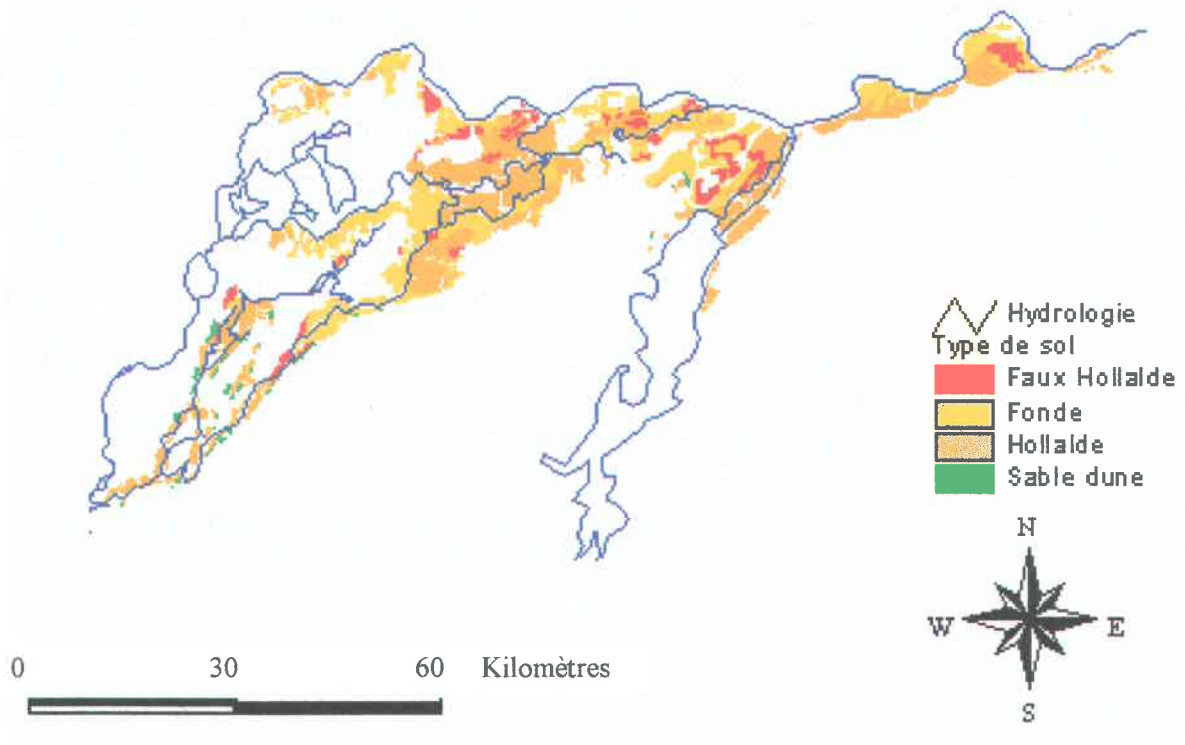


Figure 3.11 : Représentation matricielle des types de sols dans les zones aménagées du delta

### III. 3 - Développement de bases de données relationnelles

#### III. 3. 1 - Qu'est-ce qu'une base de données

Une base de données est un ensemble de données non redondantes et structurées qui peut être partagé par plusieurs applications (Thériault, 1998). Une base de données relationnelle est donc un ensemble d'informations structurées de façon logique entre elles et rattachées à un thème particulier. La base de données se compose de plusieurs tableaux de données contenant des informations différentes mais toutes reliées au dit thème. Pour un stockage efficient des données, il faut créer une table par type d'informations à gérer. Les tables constituent de ce fait les éléments fondamentaux d'une base de données d'autant plus que toutes les actions et opérations qui y sont réalisées sont centrées sur ces dernières. Les

tables peuvent se définir ainsi comme des matrices de données sur lesquelles opèrent les systèmes de gestion de bases de données (SGBD) comme MS Access utilisé ici.

Dans une base de données Access, les informations contenues dans une table peuvent être :

- visualisées, ajoutées et mises à jour à l'aide de formulaires
- recherchées et extraites selon les besoins à l'aide de requêtes
- analysées et imprimées sous forme d'états ou rapports

Des informations de sources diverses peuvent ainsi être rassemblées dans des requêtes, des formulaires ou des états si des relations ou liens sont définies entre les tables qui composent la base de données. La figure 3.12 extraite de l'aide en ligne de MS Access montre comment l'information tabulaire est gérée par l'application.

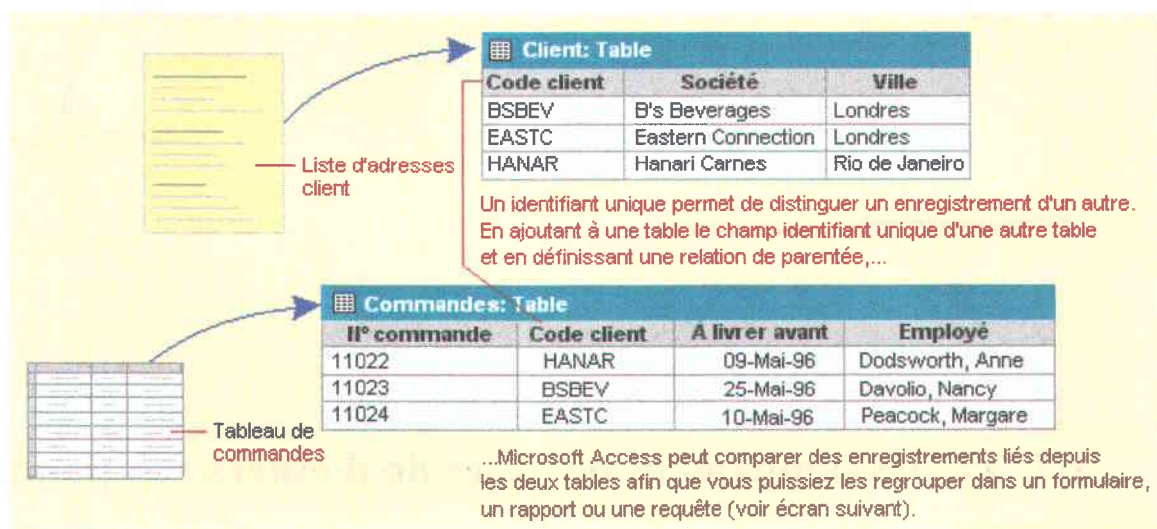


Figure 3.12 : Gestion des données dans Access : concept d'identifiant unique ou clé.

Cependant, bien que très important, le simple fait de créer des requêtes, des formulaires ou d'imprimer des rapports de données ne suffit pas lorsqu'il s'agit de définir des relations de cause à effet entre différentes variables référencées géographiquement. C'est alors seulement que le système d'information géographique ArcView prend son importance puisqu'il permet alors d'analyser et de visualiser les données grâce à sa capacité d'affichage et de stockage de l'information géographique.



Pour les besoins de l'étude, il a fallu créer deux bases de données relationnelles distinctes : une pour la moyenne vallée du fleuve et une autre relative au delta. Cette procédure résulte plus du caractère intrinsèque de l'information dans les deux sous-zones (moyenne vallée et delta) du territoire d'étude que de la problématique double énoncée plus haut (cf. I.1). En effet, bien que le système aquifère superficiel de la vallée soit globalement le même partout et que la collecte de l'information piézométrique de la nappe soit réalisée durant la même période (1987-1990) par le même organisme (l'OMVS) sur l'ensemble de la vallée, les données concernant le delta sont caractérisées par une certaine singularité (cf. I.3.3) qui fait qu'il était finalement plus judicieux de les gérer séparément. Il demeure cependant que les conclusions relatives aux caractéristiques hydrauliques de la nappe (piézométrie, recharge etc.) dans le reste de la zone d'étude (moyenne vallée en l'occurrence) pourraient dans une certaine mesure être extrapolées à la zone du delta pour des raisons qui seront précisées plus tard. La figure 3.13 est un exemple de tables Access créées pour les deux bases de données :

a) - Ouvrages de la moyenne vallée

b) - Ouvrages du delta

Nom du champ	Type de données
ID_PIEZO	Texte
COORD_X	Numérique
COORD_Y	Numérique
CÔTE_Z	Numérique
REP_MES_PROF	Numérique
PROF_OUV	Numérique
AQUIF	Texte

Nom du champ	Type de données
ID_OUV	Texte
CODE_OUV	Texte
MTLX	Numérique
MTLUY	Numérique

Figure 3.13 : Tables de données pour Access

Comme on peut le constater aisément sur cette figure, les données sont stockées dans des tables rectangulaires et organisées en lignes et en colonnes. Les colonnes sont les champs ou types d'informations. C'est également les variables susceptibles d'être cartographiées dans un système d'information géographique. Les lignes ou occurrences sont les enregistrements ou instances répétées de ces informations. Les relations entre les tables d'une même base de données s'effectuent par des champs dits champs clé qui identifient par une valeur unique chaque enregistrement contenu dans chaque table. Une relation entre deux tables se définit dès lors comme une association entre des enregistrements ayant le

même identifiant dans le champ clé (ID\_PIEZO et ID\_OUV dans les exemples ci-dessus de la figure 3.14).

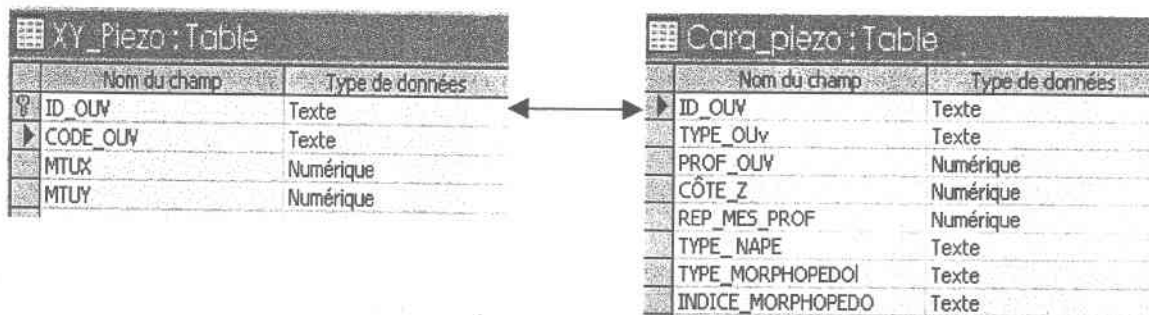


Figure 3.14 a : Relation entre deux tables de la base de données du delta

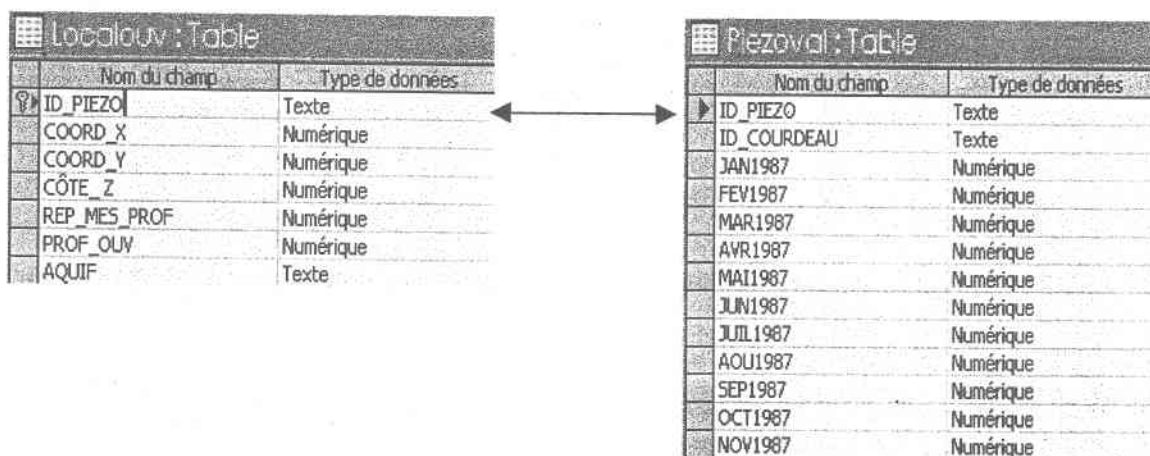


Figure 3.14 b : Relation entre deux tables de la base de données de la moyenne vallée

Des bases de données relationnelles complètes ont ainsi été créées pour les deux sous-zones d'études et sont présentées à la figure 3.15.

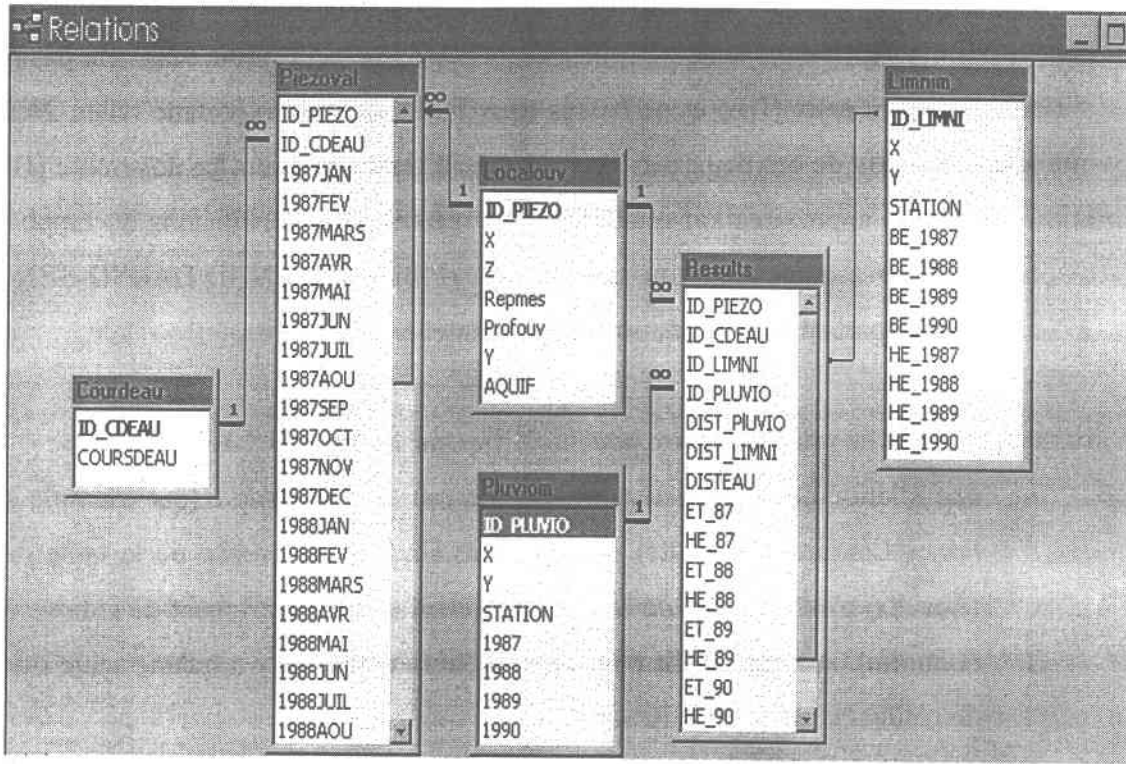


Figure 3.15 a : Base de données relationnelle de la moyenne vallée du fleuve Sénégal.

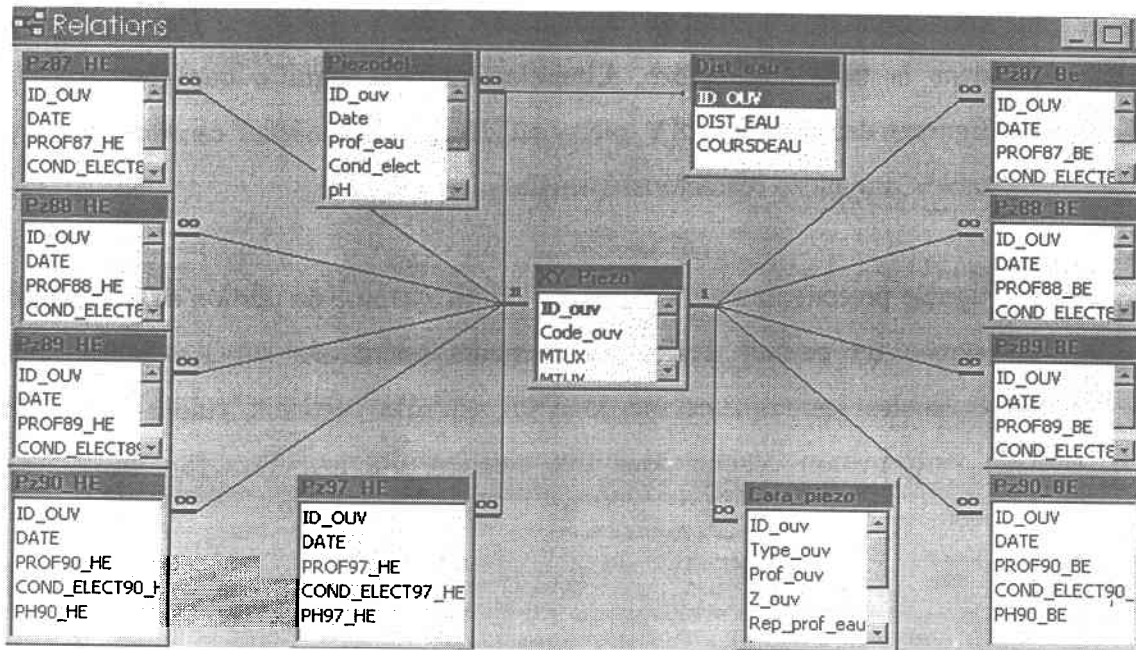


Figure 3.15 b : Base de données relationnelle du delta.

À noter que faute d'une piézométrie fiable, des limnigrammes piézométriques n'ont pas été tracés pour la nappe dans le delta. En conséquence on ne peut rigoureusement pas parler de période de hautes eaux (HE) et de basses eaux (BE) identifiées comme telles. Néanmoins une approximation de ces deux périodes a été faite respectivement en novembre (HE) et en juin (BE). Cette approximation est basée d'une part sur les conclusions du rapport Bilan-diagnostic des ressources en eau du Sénégal (Projet MH/PNUD/DAGSD-SEN/87/006, 1994) et d'autre part sur une connaissance personnelle de la région.

Il y a deux types de relations qu'on peut identifier sur les figures 3.15 a et 3.15 b :

- une relation de type un-à-un matérialisé par un trait simple (par exemple entre les tables Limnim et Results) signifie que chaque occurrence de la table de départ (Results) n'est liée qu'à un seul et seulement un enregistrement de la table d'arrivée (Limnim). Autrement dit pour chaque limnimètre il n'y a qu'une seule occurrence de résultat dans la table Results.
- une relation de un-à-plusieurs traduit par un trait avec un "1" d'un côté et le signe "∞" de l'autre côté comme c'est le cas pour la plupart des relations de la figure 3.17 (exemple entre les tables XY\_piezo et Cara\_piezo). Cette relation indique qu'à chaque enregistrement de la table XY\_piezo correspond plusieurs occurrences dans la table Cara\_piezo. Littéralement cela signifie que chaque piézomètre figurant dans la table XY\_piezo est décrit par plusieurs caractéristiques dans la table Cara\_piezo (caractéristiques des piézomètres).

Comme signalé précédemment, MS Access est un système de gestion de bases de données et qui comme tel permet d'effectuer plusieurs opérations sur les tables. Parmi ces opérations, seules les requêtes ont joué ici un rôle pertinent puisqu'elles ont permis d'extraire l'information désirée pour son transfert ultérieur vers l'application ArcView (figures 3.16 et 3.17).

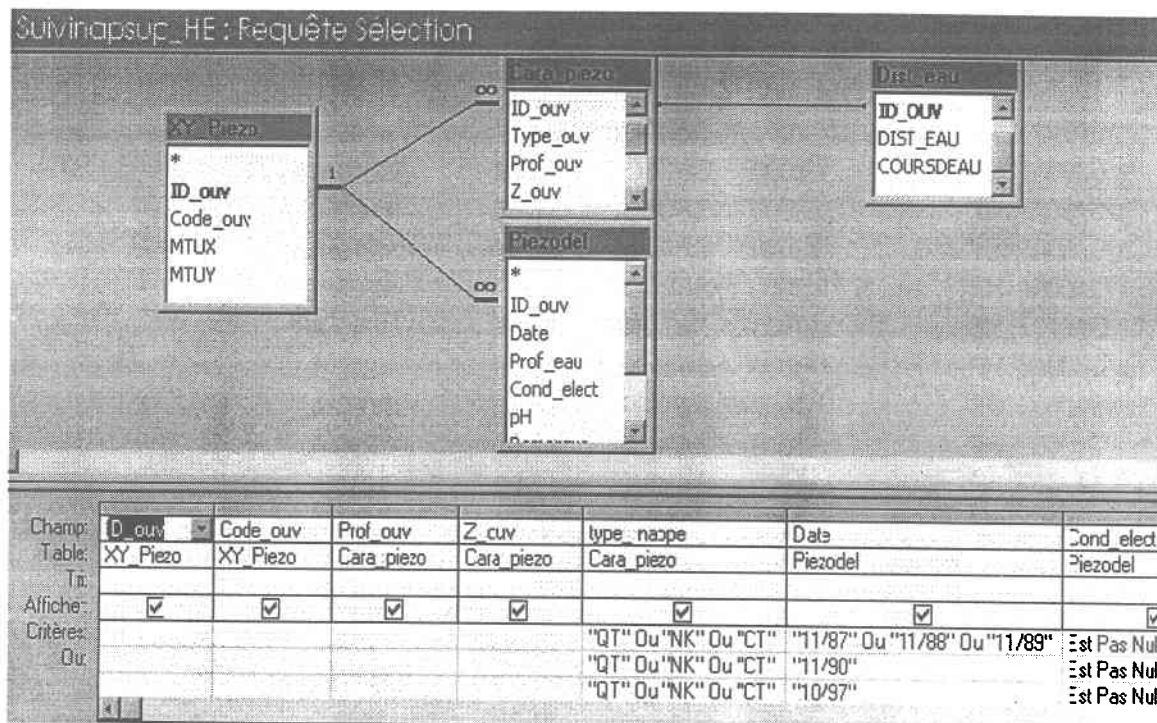


Figure 3.16 a : Exemple de requête pour le delta avec trois critères (nappe, date et conductivité électrique de l'eau de la nappe).

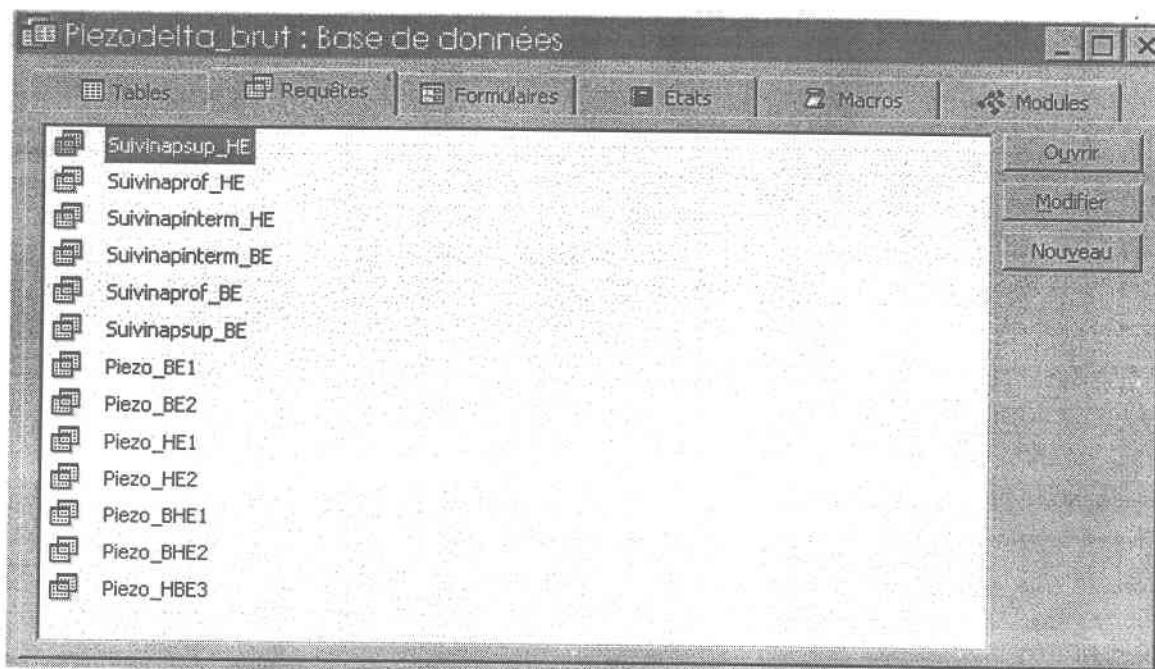


Figure 3.16 b : Treize requêtes réalisées pour la zone du delta

Suivinapsup\_HE : Requête Sélection

ID_ouv	Code_ouv	Prof_ouv	Z_ouv	type	Date	Cond_elect	type_sol	indice_sol	Prof_eau
GA0001	HP	2000	3.672	QT	10/97	4000	A	1	3
GA0001	HP	2000	3.672	QT	11/90	23000	A	1	4
GA0001	HP	2000	3.672	QT	11/88	15000	A	1	4
GA0001	HP	2000	3.672	QT	11/87	210	A	1	4
GA0001	HP	2000	3.672	QT	11/89	7300	A	1	4
GA0002	HP	1000	3.636	NK	10/97	1900	A	1	3
GA0002	HP	1000	3.636	NK	11/90	6200	A	1	4
GA0002	HP	1000	3.636	NK	11/88	13000	A	1	4
GA0002	HP	1000	3.636	NK	11/87	290	A	1	4
GA0002	HP	1000	3.636	NK	11/89	1630	A	1	4
GA0003	HP	1900	2.58	QT	10/97	11800	Q	2	2
GA0003	HP	1900	2.58	QT	11/90	81700	Q	2	2
GA0003	HP	1900	2.58	QT	11/88	23000	Q	2	2
GA0003	HP	1900	2.58	QT	11/87	300	Q	2	2
GA0003	HP	1900	2.58	QT	11/89	59040	Q	2	3
GA0004	HP	1200	2.592	QT	11/88	3400	Q	2	2
GA0004	HP	1200	2.592	QT	10/97	1600	Q	2	2

11 sur 219

Figure 3.16 c : Résultat de la requête en 3.16 a

Fluct\_insup : Requête Sélection

Champ	ID_PIEZO	AQUIF	HE 87	FLUCT88 87: [HE 88][HE 87]	HE 88	FLUCT89 88: [HE 89][HE 88]
Table:	Localouv	Localouv	Results		Results	
Ti:						
Afficher:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Critères:	"IN" Ou "NK" Ou "QT"					

Figure 3.17 a : Exemple de requête pour la moyenne vallée ; le seul critère est le type d'aquifère superficiel

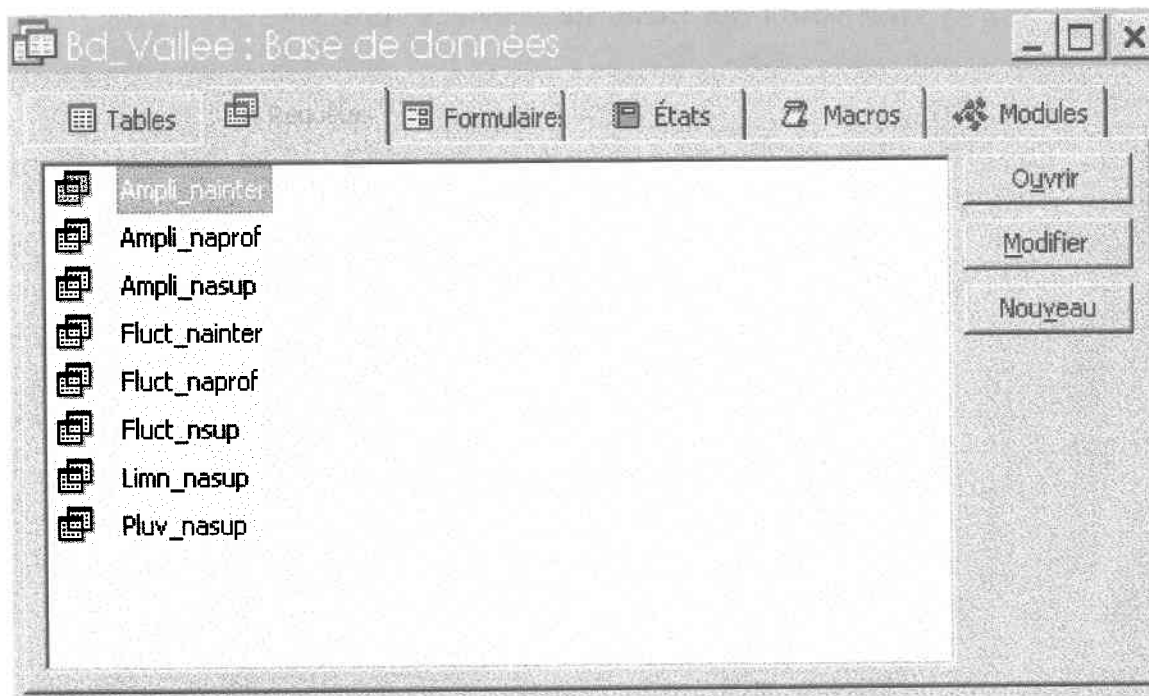


Figure 3.17 b : Huit requêtes créées pour la zone de la moyenne vallée du fleuve

ID_PIEZO	AQUIF	HE_87	FLUCT88_87	HE_88	FLUCT89_88	HE_89	FLUCT90_89	HE_90
GA0165	IN	0.41	0.38	0.79	0	0.79	0.01	0.8
GA0166	QT	-0.5	-0.26	-0.76	1.58	0.82	0	0.82
GA0171	IN	0.09	-0.59	-0.5	-0.24	-0.74	-0.11	-0.85
GA0187	NK	1.2	-1.6	-0.4	1.06	0.66		
GA0188	QT					-0.26	-0.13	-0.39
GA0218	QT			-3.51	-0.42	-3.93	-0.05	-3.98
GA0220	QT			-3.67	-0.43	-4.1	0.33	-3.77
GA0224	QT	3.35	0.13	3.48				3.48
GA0237	QT					-0.87	-0.05	-0.92
GA0241	QT							
GA0243	QT			-4.95				-5.42
GA0246	QT			-6.27	-0.28	-6.55	0.14	-6.41
GA0266	QT					-2.51	3.9	1.39
GA0269	QT					-0.75	-0.14	-0.89
GA0281	QT					0.55	0.21	0.76
GA0282	QT					0.43	0.1	0.53

Figure 3.17 c : Résultat de la requête en 3.17 a

### III. 3. 2 - Exportation des bases de données vers ArcView

Le transfert de données d'Access vers ArcView s'est fait selon un principe de connexion utilisant un pilote ODBC ("Open Database Connectivity") qui permet d'extraire les données stockées dans Access directement à partir d'ArcView (figure 3.20).

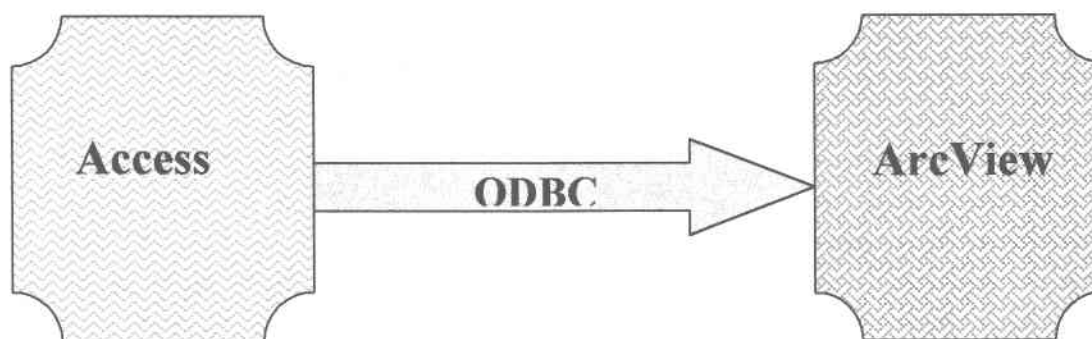


Figure 3.18 : Transfert de données entre MS Access et ArcView par un pilote ODBC : "Open Database Connectivity"

Une fois dans ArcView, des champs clé semblables à ceux décrits précédemment, ont été utilisés pour joindre ces données aux objets graphiques représentant les entités géographiques dans la géobase. L'intérêt d'une telle méthode est qu'elle affecte la gestion des données spatiales à ArcView et toutes les opérations sur les données thématiques relationnelles à Access. Ainsi il est de loin plus pratique d'effectuer les mises à jour directement dans Access (surtout si elles sont nombreuses) étant donné que ces dernières sont reflétées dans le projet de travail à chaque fois que celui-ci est ouvert dans ArcView.



## **IV - ANALYSE SPATIALE ET RÉSULTATS**

---

La somme d'informations intégrées dans ArcView a permis de tracer :

- des graphiques montrant l'évolution de la pluviométrie et du ruissellement (calculé) dans quatre stations pluviométriques de la moyenne vallée du fleuve au cours de la période d'étude
- des graphiques montrant l'évolution du niveau d'étiage du fleuve suivi au niveau de six stations limnimétriques de la moyenne vallée sur la même période
- des cartes d'interpolation de la piézométrie en période de hautes et basses eaux de la nappe superficielle dans la moyenne vallée, d'en déduire les cartes de recharge de la nappe
- des cartes d'interpolation de la profondeur, de la conductivité électrique et du pH de la nappe superficielle dans le delta ; ces cartes croisées avec les zones aménagées, les points de localisation des ouvrages piézométriques et les cours d'eau révèlent des tendances sur le dynamisme de la nappe.

Des relations certaines ont pu être décelées entre le niveau de profondeur de la nappe par rapport à la surface du sol et sa conductivité électrique d'une part, et entre le pH et la conductivité électrique d'autre part. La relation entre le niveau de la nappe et les cours d'eau a également été mise en évidence. Enfin une analyse basée sur tous ces résultats a permis de réaliser une cartographie de la dégradation potentielle des terres du delta en 1990.

### **IV. 1 - Procédure d'analyse spatiale**

#### **IV. 1. 1 - Moyenne vallée du fleuve**

Les figures 4.1 a et 4.1 b expliquent l'analyse spatiale qui a été réalisée respectivement pour la moyenne vallée et pour le delta. Pour cette dernière zone, il s'agit d'un modèle de cartographie de la dégradation des terres liée à la salinité. Les termes en italique correspondent aux fonctions d'Arcview qui ont été sollicitées pour effectuer ces analyses.

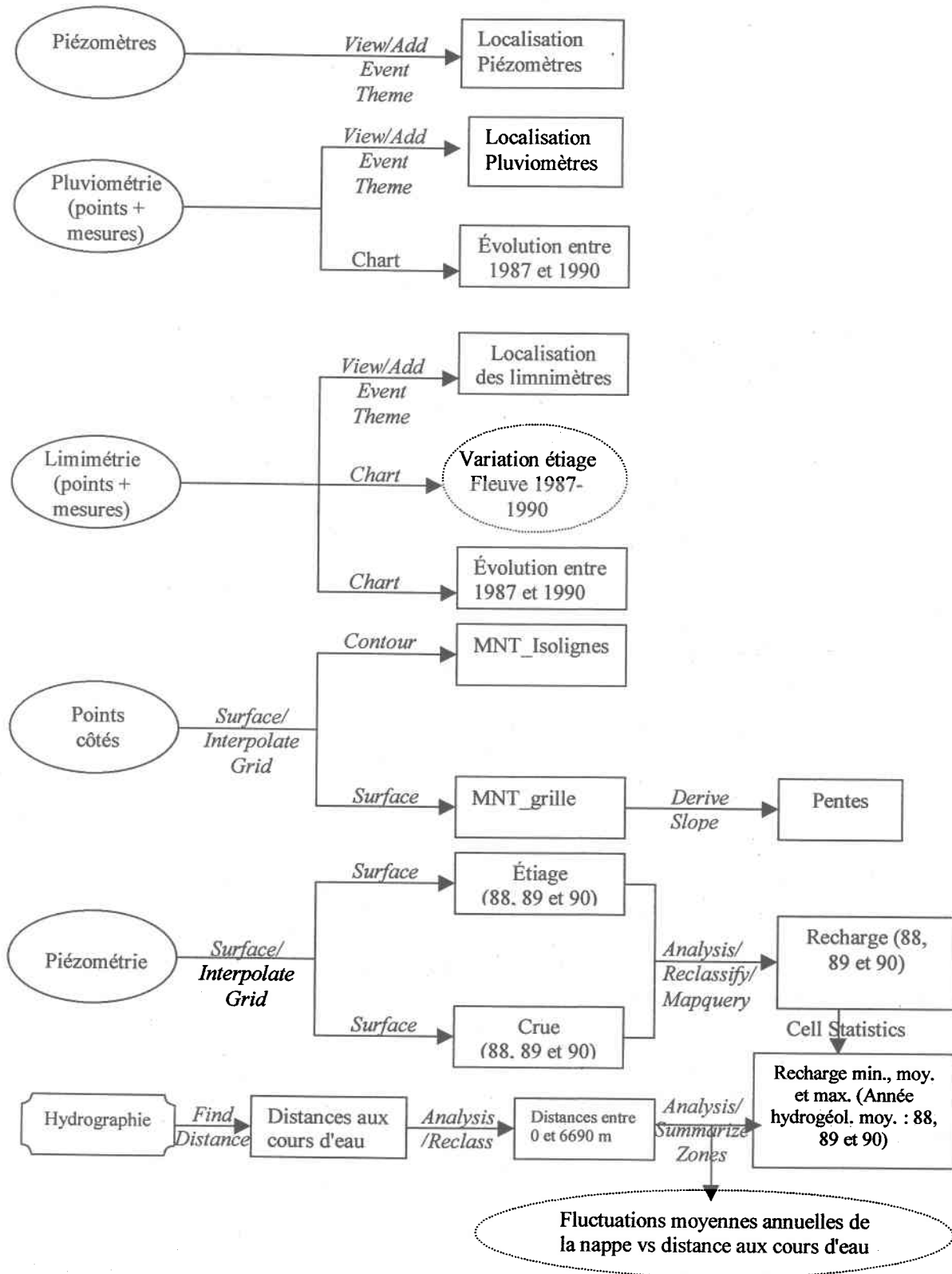
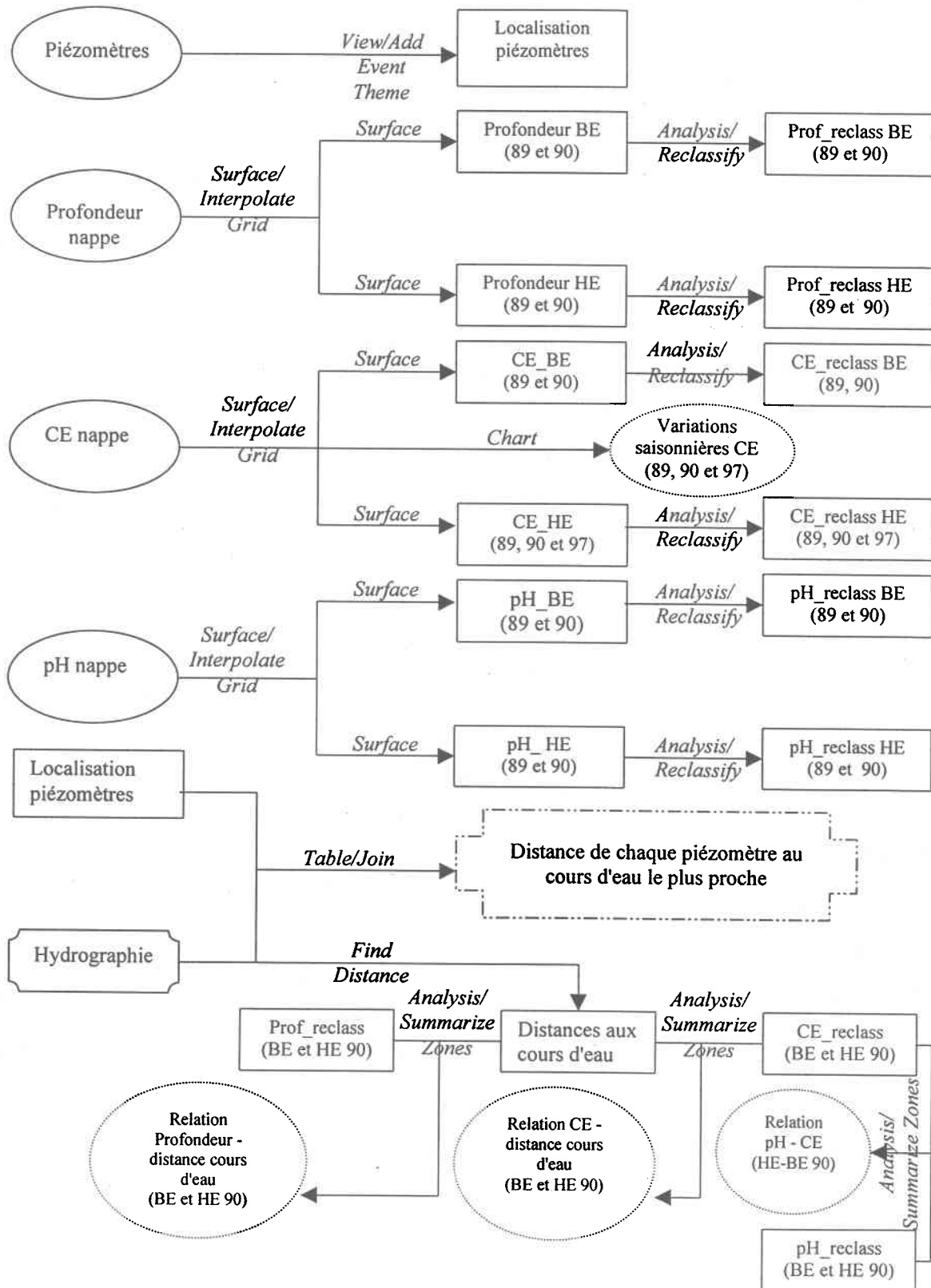


Figure 4.1 a : Procédure d'analyse des données de la moyenne vallée

IV. 1. 2 - Delta du fleuve



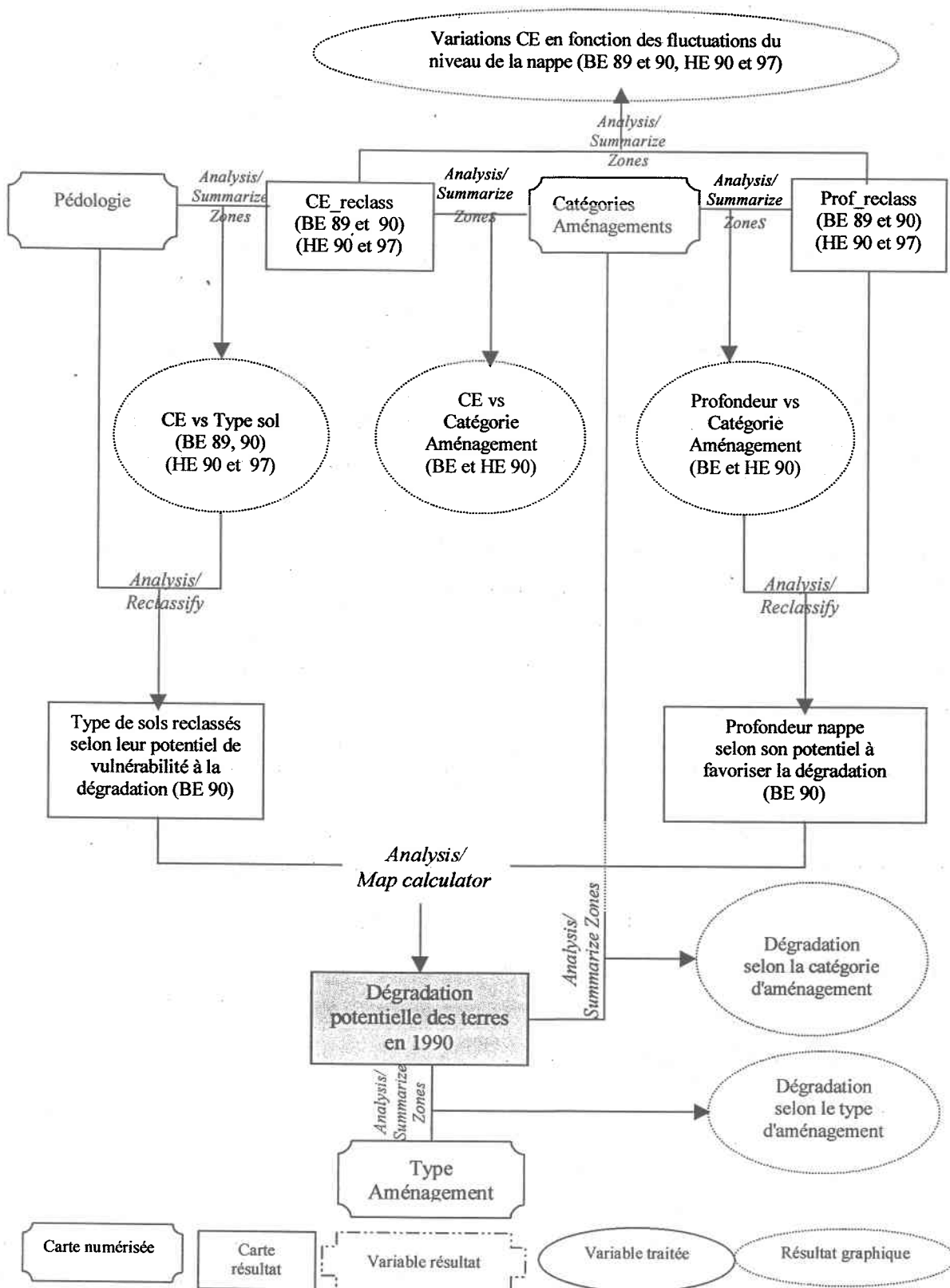


Figure 4.1 b : Procédure d'analyse des données du delta

## IV. 2 - Résultat et discussion

### IV. 2. 1 - Moyenne vallée du fleuve

#### IV. 2. 1. 1 - Pluviométrie

Les données pluviométriques ne sont disponibles que pour quatre stations localisées toutes dans la moyenne vallée entre Dagana et Semmé. Les valeurs enregistrées au niveau de ces stations représentent des hauteurs totales annuelles de précipitation en millimètres (tableau 4.1). Le but final de l'analyse des données pluviométriques est d'arriver à estimer l'apport des précipitations à la nappe phréatique dans la zone ciblée au cours des quatre années d'études.

Tableau 4.1: Stations et relevés pluviométriques dans la moyenne vallée entre 1987 et 1990

No Station	X	Y	Station	1987	1988	1989	1990
1	-15.5261	16.5217	Dagana	195	259	271	175
2	-14.9756	16.6553	Podor	201	305	335	144
3	-13.2917	15.6625	Matam	476	418	337	352
4	-12.9389	15.1972	Semmé	476	726	551	331

À défaut d'un modèle hydrologique de simulation des apports d'eau de pluie à la nappe, une approche simplifiée a été utilisée pour estimer la lame d'eau infiltrée localement au niveau d'une station. Cette approche est basée sur l'équation du bilan hydrologique qui stipule que la quantité totale de pluie tombée annuellement dans une région est égale à la somme de l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR), de la réserve d'eau facilement utilisable par le sol (RFU), de la lame d'eau annuelle ruisselée (R) et de la lame d'eau annuelle infiltrée (I) soit :

$$P_i (mm) = ETR (mm) + RFU (mm) + R (mm) + I (mm)$$

Dans ce modèle, seule la valeur de P (précipitation annuelle) est réellement connue pour les dites stations. L'évapotranspiration réelle a été approchée par l'évapotranspiration potentielle mesurée (en mm) dans chaque station selon un pas de temps journalier par la

formule de Turc (tableau 4.2). Cette approximation peut se justifier par la faible variation de la température annuelle élevée et par la pauvreté du couvert végétal dans la région. À la station de la localité de Dagana, les valeurs d'évapotranspiration, non disponibles, ont été estimées par celles de Saint-Louis (situé à 125 km).

Les valeurs de la RFU, de la lame ruisselée ainsi que celle de la lame infiltrée à la nappe ont été estimées par le modèle. La RFU, définie comme la réserve en eau du sol, est la quantité d'eau contenue dans le sol susceptible d'être transformée en vapeur. Elle est exprimée en mm de hauteur d'eau et sa valeur moyenne varie entre 100 et 200 mm (Castany, 1982). Dans la vallée du fleuve Sénégal, les sols étant sablo-argileux, limoneux et argileux, on pourrait s'attendre à une valeur de la RFU supérieure à 100 mm.

Tableau 4.2 : Évapotranspiration en mm/j mesurée aux quatre stations par la formule de Turc (SGPRE, 1994).

ETP/j	Matam	Podor	Dagana	Semmé	ETP/an	Matam	Podor	Dagana	Semmé
ETPmoy/j	0.7	1.1	0.8	2.1	ETPmoy/an	255.5	401.5	292	756
ETPmin/j	0.3	0.4	0.2	0.9	ETPmin/an	109.5	146	73	324
ETPmax/j	1.1	6	1.9	4.9	ETPmax/an	401.5	2190	693.5	1764

Les paramètres inconnus du modèle ont été estimés par optimisation avec le tableur Microsoft Excel. La procédure qui a guidé les simulations est la suivante : l'équation est résolue pour chaque année et pour chaque station en attribuant à chaque fois une valeur initiale à chaque paramètre inconnu et en considérant un certain nombre de contraintes. On obtient alors la valeur de précipitation calculée à une station pour l'année considérée. En minimisant le carré de la différence entre la précipitation annuelle mesurée et celle qui est calculée à la même station, on arrive à une solution convergente qui donne une bonne estimation des paramètres recherchés. L'attribution des valeurs de départ pour effectuer les simulations a tenu compte d'un certain raisonnement. Ainsi pour l'ETR la valeur initiale fournie au modèle est toujours comprise (ou très proche) entre le minimum et le maximum mesurés à la station (cf. Tableau 4.2). Quant à la RFU, considérant la nature des sols de la

vallée, la valeur initiale a été prise le plus souvent supérieure ou égale à 200 mm. Les valeurs de départ de ruissellement et d'infiltration ont été plus ou moins arbitraires. Les simulations ont été soumises aux contraintes suivantes :

- l'évapotranspiration réelle ne peut pas dépasser la valeur maximale annuelle de l'ETP mesurée au niveau de la station
- la quantité d'eau ruisselée ne peut être négative, elle est seulement positive ou nulle
- la lame infiltrée à la nappe est également positive ou nulle.

Le tableau 4.3 montre la feuille de simulation et les résultats ; les rapports de simulations sont en annexe A.

Tableau 4.3 : Feuille de simulation des lames d'eau infiltrée à la nappe et ruisselée ; les unités sont en millimètres

$$P = ETR + RFU + R + I$$

$$\text{avec } ETR = ETP$$

Station	X	Y	Station	Pluvio87	Pluvio88	Pluvio89	Pluvio90
3	-13.2924	15.6625	Matam	476	418	337	352

Année	Pluviomes	Pluviocal	Pmes-Pcal	(Pmes-Pcal)^2	ETP	RFU	R	I
1987	476	476	0	0	171.92	197.1666	106.91681	0
1988	418	418	0	0	152.67	177.6667	87.666705	0
1989	337	337	0	0	156	169.0004	11.999899	0
1990	352	352	0	0	147.33	177.3332	27.333485	0

Station	X	Y	Station	Pluvio87	Pluvio88	Pluvio89	Pluvio90
2	-14.976	16.6553	Podor	201	305	335	144

Année	Pluviomes	Pluviocal	Pmes-Pcal	(Pmes-Pcal)^2	ETP	RFU	R	I
1987	201	201	0	0	67	116.9999	17.000091	0
1988	305	305	0	0	105	139.9995	60.000291	0
1989	335	335	0	0	82.333	196.3332	56.333425	0
1990	144	144	0	0	15	128.9999	1.421E-14	0

No Station	X	Y	Station	Pluvio87	Pluvio88	Pluvio89	Pluvio90
1	-15.526	16.5217	<b>Dagana</b>	195	259	271	175

Année	Pluviomes	Pluviocal	Pmes-Pcal	(Pmes-Pcal) <sup>2</sup>	ETP	RFU	R	I
1987	195	195	0	0	73.5	121.5001	7.105E-15	0
1988	259	259	0	0	150.17	100.1666	8.6668275	0
1989	271	271	0	0	149	105.9999	16.000128	0
1990	175	175	0	0	64	111.0001	7.105E-15	0

No Station	X	Y	Station	Pluvio87	Pluvio88	Pluvio89	Pluvio90
4	-12.939	15.1972	<b>Semmé</b>	476	726	551	331

Année	Pluviomes	Pluviocal	Pmes-Pcal	(Pmes-Pcal) <sup>2</sup>	ETP	RFU	R	I
1987	476	476	0	0	243.67	118.6667	113.66673	0
1988	726	726	0	0	321	195	185	25
1989	551	551	0	0	274	149	128.00008	0
1990	331	331	0	0	170.33	100.3333	60.333424	0

Ces résultats montrent que la lame d'eau infiltrée localement à la nappe est nulle au cours de la période 1987-1990 sauf à Semmé où une infiltration annuelle de 25 mm a été calculée pour l'année 1988. Cette infiltration positive pourrait s'expliquer par la combinaison dans la zone amont entre Semmé et Bakel, de l'effet de précipitations annuelles relativement élevées avec une charge hydraulique du fleuve souvent très importante en basses eaux (figure 4.6). Mais globalement, les résultats du modèle montrent que l'apport des précipitations à la nappe phréatique est très négligeable à nulle durant la période d'étude. L'absence de corrélation entre la recharge de la nappe et la pluviométrie à l'endroit de la station de Dagana corrobore ce fait (figure 4.2). En ce qui concerne la hauteur d'eau ruisselée, sa valeur calculée à une station varie quasiment proportionnellement à la hauteur totale de précipitation enregistrée au niveau de la même station comme le traduit la forte corrélation positive entre la pluviométrie et le ruissellement (figure 4.3).



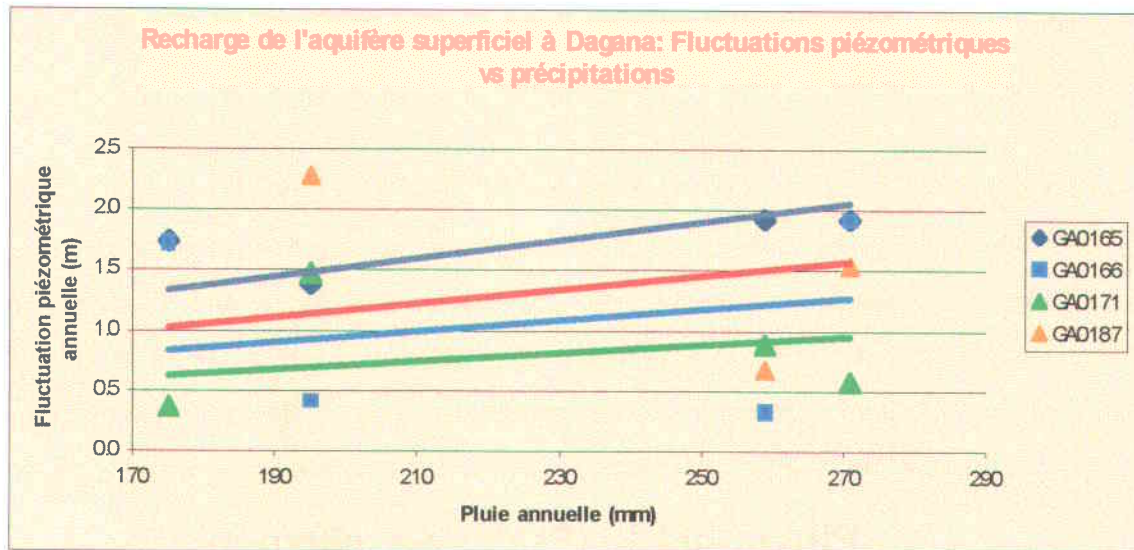


Figure 4.2 : Relation entre les fluctuations piézométriques annuelles et la pluie annuelle pour les ouvrages GA0165, GA0166, GA0171 et GA0187 voisins de la station de Dagana.

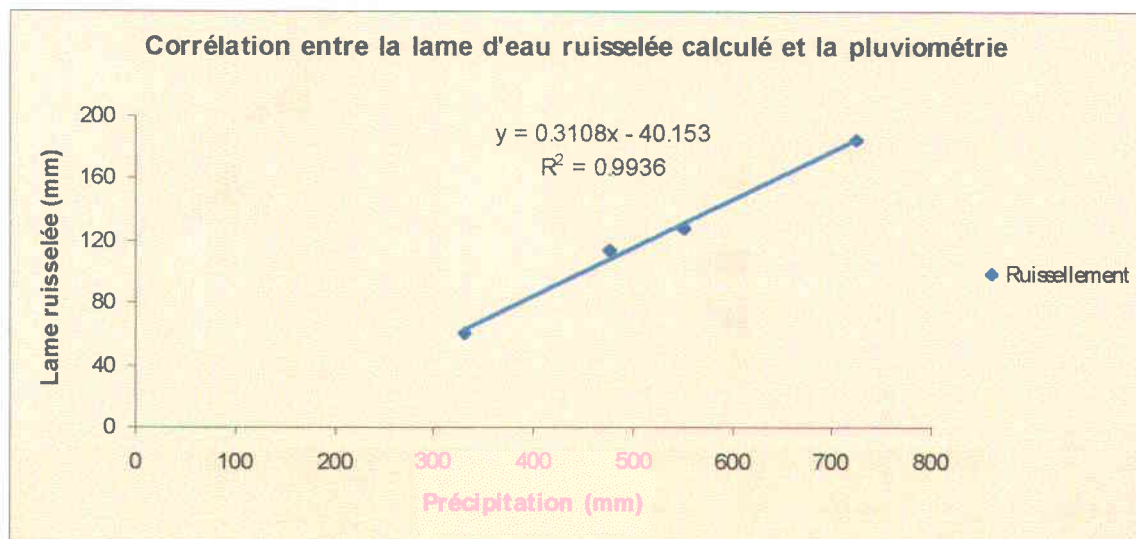


Figure 4.3 : Corrélation entre précipitations enregistrées et ruissellement calculé par le modèle

Les valeurs de la RFU calculées sont toutes comprises entre 100 et 200 mm qui est l'intervalle moyen admis pour un sol (Castany 1982). Elles sont voisines de 200 mm à

Matam et Semmé situés véritablement en amont du territoire d'étude et légèrement supérieures à 100 mm à Dagana situé en aval. Au centre (Podor), la RFU présente des valeurs intermédiaires entre les deux précédentes.

La figure 4.4 présente l'évolution temporelle de la pluviométrie enregistrée dans chaque station et de la lame ruisselée calculée par le modèle du bilan hydrologique. Comme le traduit cette figure, les quantités de pluie diminuent de l'amont (Semmé) vers l'aval (Dagana) de la région. Dans le temps, les précipitations sont globalement régressives entre 1987 et 1990 pour l'ensemble des quatre stations. Il en est de même presque pour la lame d'eau ruisselée qui augmente également d'aval vers l'amont.

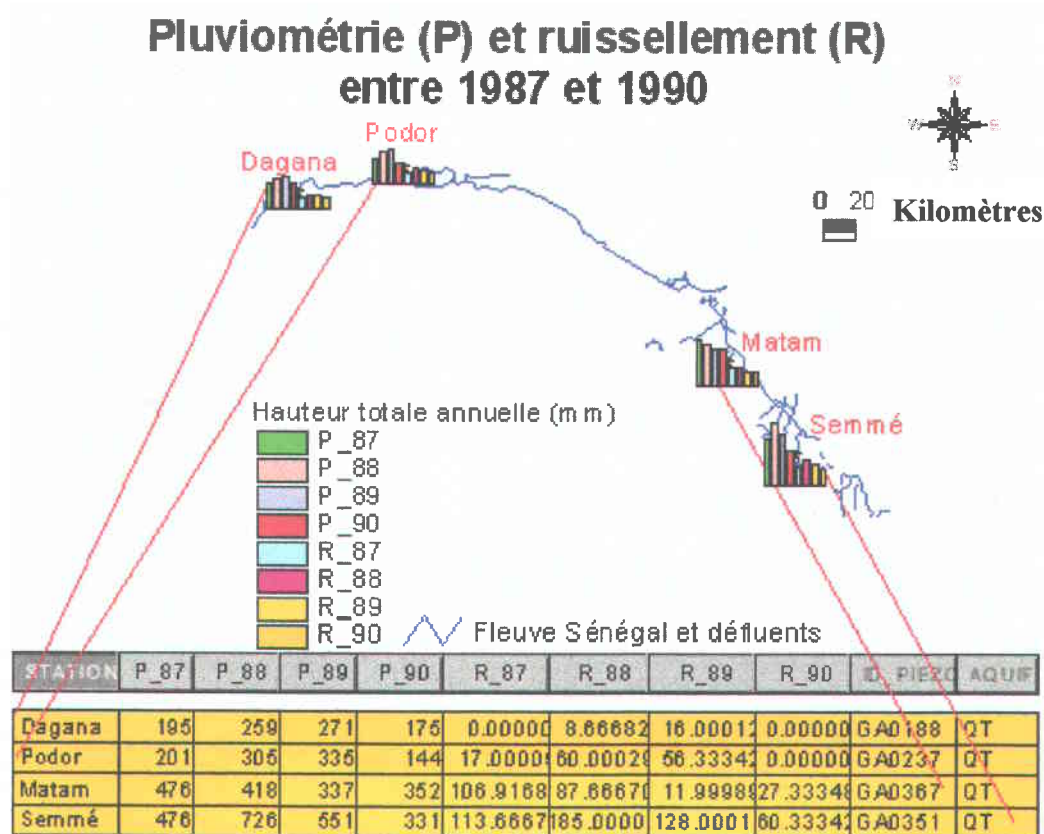


Figure 4.4 : Évolution de la pluviométrie et du ruissellement de 1987 à 1990

#### IV. 2. 1. 2 - Limnimétrie

La limnimétrie se rapporte ici à l'ensemble des mesures de la hauteur du fleuve entre 1987 et 1990. Les mesures concernent deux périodes saisonnières (hautes et basses eaux) qui

correspondent aux deux principaux régimes annuels du fleuve. Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies à six stations de mesure et ont été analysées selon ces deux saisons, avec parfois en basses eaux, une distinction entre l'amont et l'aval de la vallée.

#### IV. 2. 1. 2.1 - Régime de hautes eaux

Il caractérise l'état de crue du fleuve qui a lieu chaque année durant la saison des pluies comprise entre juin et octobre selon la localité. Cette crue résulte des quantités importantes de pluies qui tombent dans la partie frontalière avec la Guinée (les montagnes du Fouta Djallon) où le fleuve prend sa source. La figure 4.5 montre que de 1987 à 1989, la crue a régulièrement augmenté dans la partie de la vallée comprise entre Rosso et Salde contrairement à la partie amont (Bakel) où elle décroissait. Cependant à partir de 1990, la crue a radicalement baissé sur l'ensemble de la vallée. Des données complètes ne sont malheureusement pas disponibles pour caractériser l'évolution ultérieure de la crue après cette période.

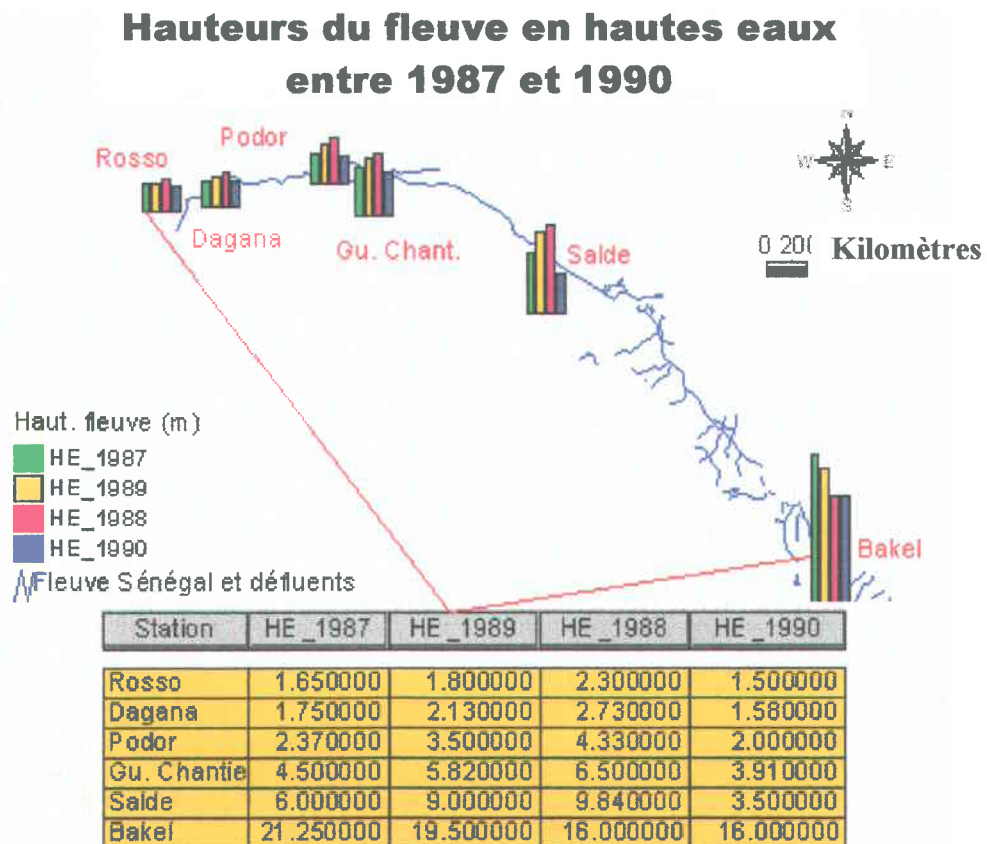


Figure 4.5 : Évolution des hauteurs du fleuve en période de crue entre 1987 et 1990

#### IV. 2. 1. 2 . 2 - Régime de basses eaux

L'évolution du niveau d'étiage dans le fleuve est sensiblement différente de celle constatée en régime de crue comme l'indique la figure 4.6. En effet ce niveau a très légèrement monté dans toute la vallée à partir de 1987. Cette montée s'est effectuée de manière continue en amont (Bakel) et en aval (Rosso et Dagana), tandis que dans la partie intermédiaire de la vallée (Podor, Guédé Chantier et Saldé), elle est plutôt irrégulière avec notamment un niveau d'étiage en 1989 plus bas que celui mesuré en 1988 ; exception faite de la station de Saldé où la situation est assez particulière. Globalement le niveau du fleuve en période d'étiage s'est élevé par rapport à la situation de 1987. C'est ainsi qu'à l'exception de la station de Saldé qui a enregistré une baisse de hauteur de 2 m, dans toutes les autres localités, la remontée du niveau du fleuve entre 1987 et 1990 variait entre 30 cm à Bakel et 35 cm à Rosso. Cette remontée continue des basses eaux s'est soldée comme on le verra plus loin par une recharge plus accentuée des nappes dans la vallée. Pareillement à la situation en hautes eaux, les hauteurs du fleuve en basses eaux, diminuent d'amont vers l'aval à l'image de la pluviosité.

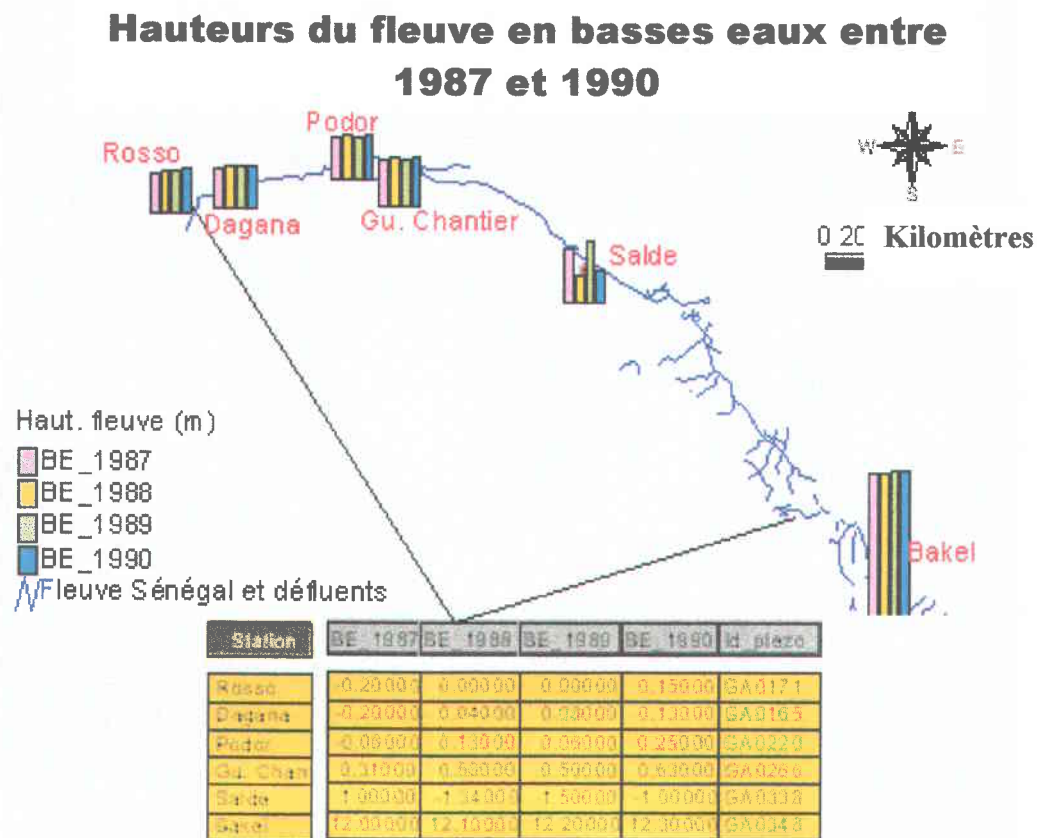


Figure 4.6 : Évolution des hauteurs IGN en période d'étiage entre 1987 et 1990

#### IV. 2. 1. 3 - Piézométrie de la nappe superficielle

Le nombre de piézomètres initialement retenus pour l'étude était de quarante cinq dont trente captent l'aquifère superficiel (figure 4.7), huit l'aquifère intermédiaire et sept l'aquifère profond. À cause du nombre réduit des ouvrages captant les deux derniers aquifères et de leur disposition très dispersée à travers le territoire, il était plus raisonnable de centrer l'étude uniquement sur la nappe de surface qui, de toute façon, est plus sensible à la recharge par les cours d'eau. Le choix des piézomètres dans le document original de l'OMVS s'est fait en fonction de leur situation géographique (Mauritanie et Mali exclus).

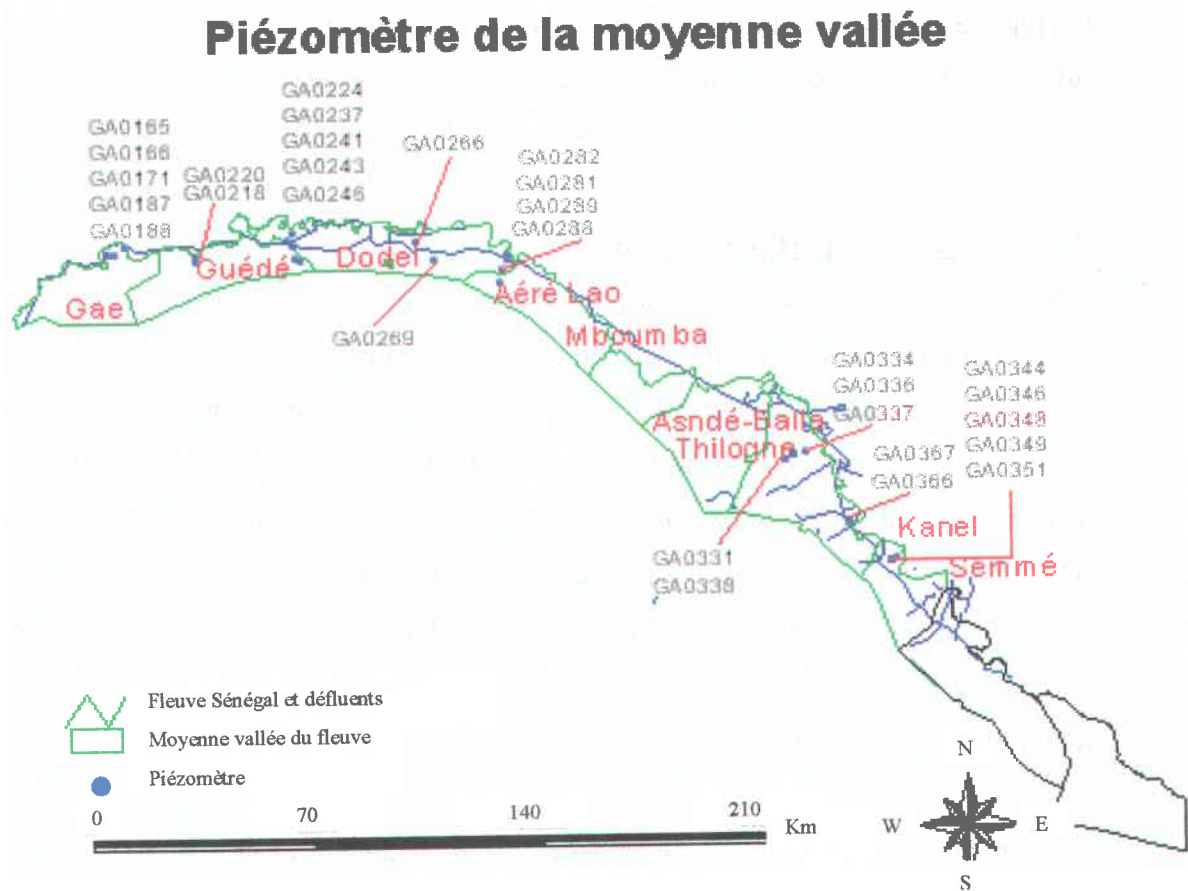


Figure 4.7 : Situation des piézomètres de la moyenne vallée du fleuve Sénégal

Quant aux stations pluviométriques et limnimétriques, leur sélection s'est faite en fonction de la présence de données (distance aux piézomètres) les liant aux piézomètres retenus. L'analyse des niveaux de la nappe a été d'abord réalisée par des limnigrammes

piézométriques enregistrés de façon continue entre juillet 1987 et 1990, puis par interpolation spatiale.

#### **IV. 2. 1. 3. 1 - Limnigrammes piézométriques**

Les limnigrammes (cf. figure 3.3) sont des séries chronologiques ou historiques permettant d'étudier le comportement hydrodynamique de la nappe dans l'espace au moment des mesures piézométriques. Ils montrent des fluctuations caractérisées par une amplitude et une périodicité. La période définit l'année hydrologique et l'amplitude la hauteur de fluctuation annuelle correspondante. L'année hydrologique est une séquence annuelle calculée entre deux minimums ou étiages de la surface piézométrique. Les valeurs de la hauteur de fluctuation annuelle sont différentes selon l'année considérée.

#### **IV. 2. 1. 3. 2 - Interpolation spatiale**

L'interpolation spatiale est une procédure d'estimation des valeurs d'un attribut aux endroits non échantillonnés situés à l'intérieur de la zone sur laquelle les mesures ont été effectuées. Cette méthode d'estimation, est souvent un excellent outil d'analyse de tendances de distribution régionale du phénomène étudié. Dans le cas présent, une seule technique d'interpolation dite de *distance inverse au carré* (Inverse Distance Weighted Squared ou IDW) a été utilisée tout au long de l'étude. La méthode est bien adaptée pour la régionalisation des hauteurs de nappes souterraines. De toute façon, les autres choix offerts par ArcView sont soit inadaptés aux surfaces présentant des fluctuations marquées (les fonctions splines) soit non disponibles sur l'interface (accessibilité par programmation).

L'interpolation par distance inverse assume que chaque point de mesure a une influence locale qui diminue avec la distance, c'est à dire que l'influence de la variable cartographiée s'atténue à mesure que l'on s'éloigne de son point d'échantillonnage. En d'autres termes, cette technique procède par pondération décroissante ; les points les plus proches du lieu de référence ayant plus de poids que ceux qui en sont éloignés. L'application de cette méthode aux paramètres de fluctuation de la surface piézométrique déterminés à partir des limnigrammes piézométriques, a permis de dresser quatre types de cartes relatives à trois années hydrologiques, 1987-1988, 1988-1989 et 1989-1990 :

- cartes de la surface piézométrique minimale annuelle ou carte d'étiage de la nappe relative à chaque année hydrologique
- cartes de la surface piézométrique maximale annuelle ou cartes en hautes eaux portant sur la même année
- cartes en courbes d'égale hauteur de fluctuation annuelle ou cartes d'égale recharge de la nappe ;
- cartes de la recharge minimale, moyenne et maximale annuelle de la nappe portant sur l'année hydrologique moyenne ; les relations entre d'une part la recharge de la nappe et la pluviométrie (cf. figure 4.2) et d'autre part entre les fluctuations annuelles et les cours d'eaux ont pu être étudiées.

#### IV. 2. 1. 3 . 3 - Piézométrie en basses eaux

La surface piézométrique montre des variations importantes entre l'amont et l'aval de la vallée indiquant que l'écoulement général de la nappe se fait de Bakel vers Rosso. La morphologie de cette surface est caractérisée par une alternance de dômes (D) et de dépressions (d) piézométriques (figure 4.8).

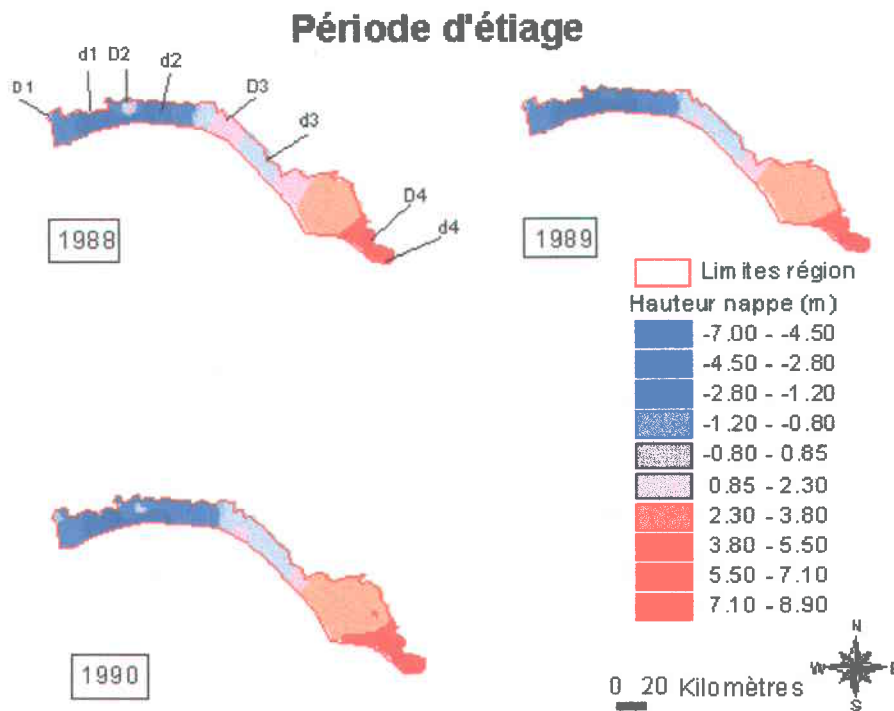


Figure 4.8 : Période de basses eaux de la nappe superficielle

Les dômes sont des aires de charges élevées et les dépressions des aires de faibles charges. Les écoulements sont divergents à partir d'un dôme et convergents vers une dépression souvent située entre deux ou plusieurs dômes. Bien que les variations de la surface piézométrique soient globalement faibles d'une année à l'autre, on peut noter quand même que la situation piézométrique de l'année 1989 accuse une baisse sensible par rapport à celle de 1988. Cette baisse est bien illustrée par les dômes 2 et 3. Par exemple, la hauteur piézométrique du dôme 3 qui oscillait entre 2.3 et 3.83 m en 1988 ne varie plus qu'entre -2.85 et -1.19 m en 1989. L'aire du dôme 3 s'est fortement rétrécie et son influence est devenue très locale en 1989. En 1990, la surface piézométrique est remontée à nouveau. Le niveau piézométrique du dôme 3 variait désormais entre 0.77 et 2.3 m et l'aire d'influence du dôme 2 a augmenté sensiblement. Néanmoins la surface reste globalement moins élevée qu'en 1988 dans la zone aval voire dans la zone intermédiaire contrairement à l'amont où les hauteurs comprises entre 2.3 et 8.9 m restent spatialement plus étendues.

#### **IV. 2. 1. 3 . 4 - La recharge annuelle**

La recharge annuelle désigne ici l'amplitude de variation annuelle de la surface piézométrique entre l'étiage et la période des hautes eaux en absence d'infiltration des eaux de pluie. C'est donc une charge positive. Comme l'indique la figure 4.9, la recharge de la nappe est plus élevée à l'endroit des dômes piézométriques ; ce qui en fait donc des aires d'alimentation importantes de la nappe. Il apparaît aussi que la recharge de la nappe est en moyenne plus significative en 1988 qu'en 1989 principalement en amont et dans la zone intermédiaire de la vallée. Dans la zone aval, ce n'est visiblement pas le cas d'après les fluctuations de hauteur de la nappe à l'endroit du dôme 3. En outre, la recharge de la nappe est moyennement plus faible en 1989 qu'en 1990.

Les cartes d'égale recharge minimale, moyenne et maximale sur la période considérée ont été déduites des hauteurs de fluctuations annuelles de la nappe (figure 4.10). Elles montrent dans les différents cas que la recharge de la nappe varie positivement de l'aval vers l'amont et qu'elle est localement plus élevée au niveau des dômes piézométriques. L'importance de la charge d'eau dans le fleuve liée en partie à la proximité du barrage de Manantali expliquerait la prépondérance de la recharge dans la zone amont.



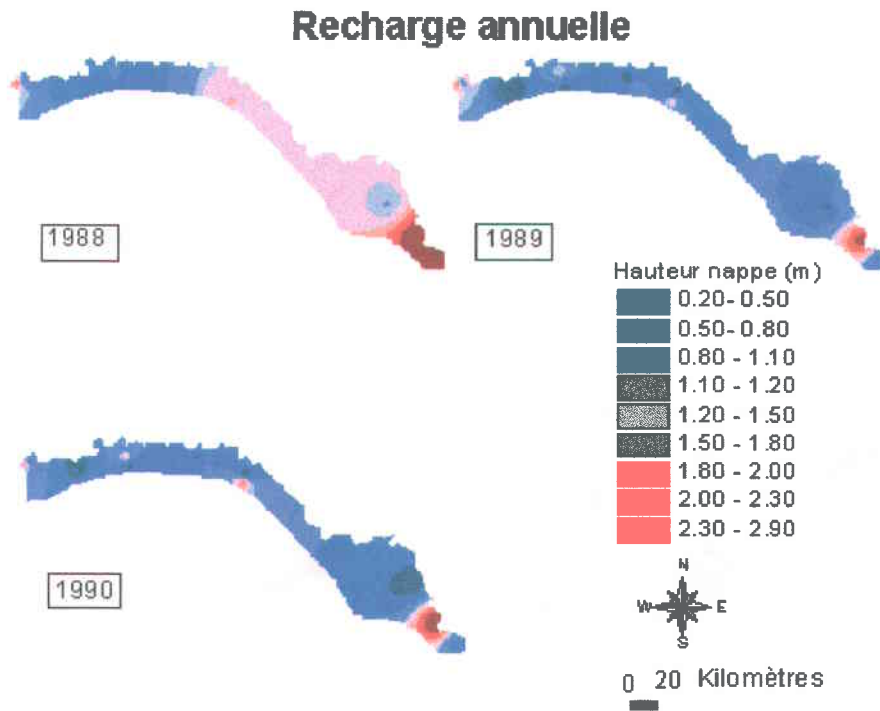


Figure 4.9 : Variations annuelles de l'amplitude de fluctuation de la hauteur de la nappe

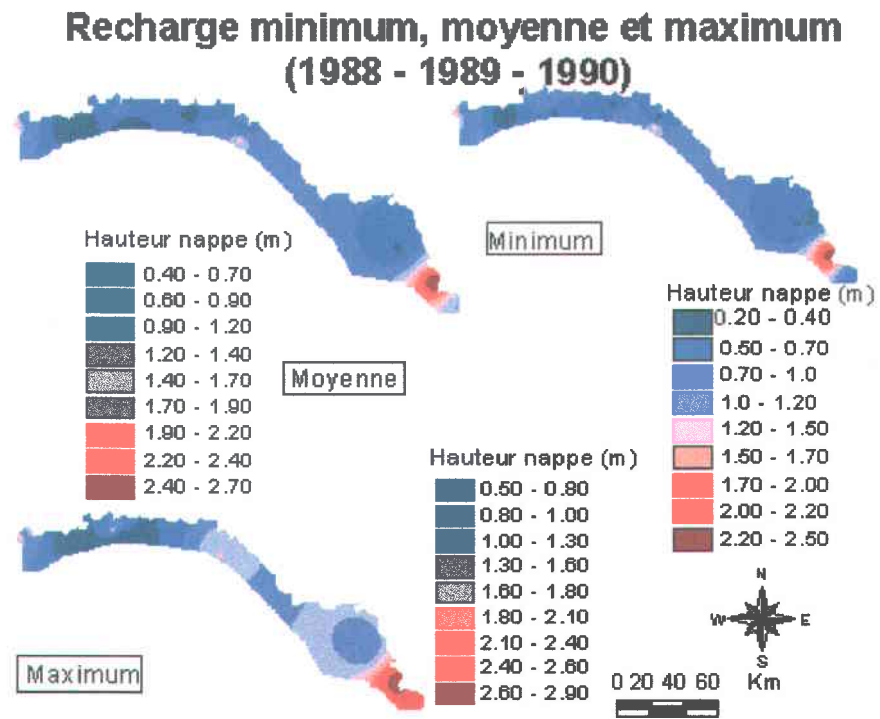


Figure 4.10 : Cartes d'égale recharge minimale, moyenne et maximale de la nappe pour une année hydrologique moyenne.

La relation entre la fluctuation moyenne annuelle (cf. figure 4.10) et les cours d'eau a été établie. Elle montre que la hauteur moyenne de recharge de la nappe varie inversement avec la distance au cours d'eau (figure 4.11). En d'autres termes, l'amplitude de fluctuation moyenne annuelle de la surface piézométrique diminue et tend même à s'annuler à mesure que la zone considérée s'éloigne des cours d'eau. À noter que seul l'intervalle de distances 0 - 6690 m a été considéré dans la relation.

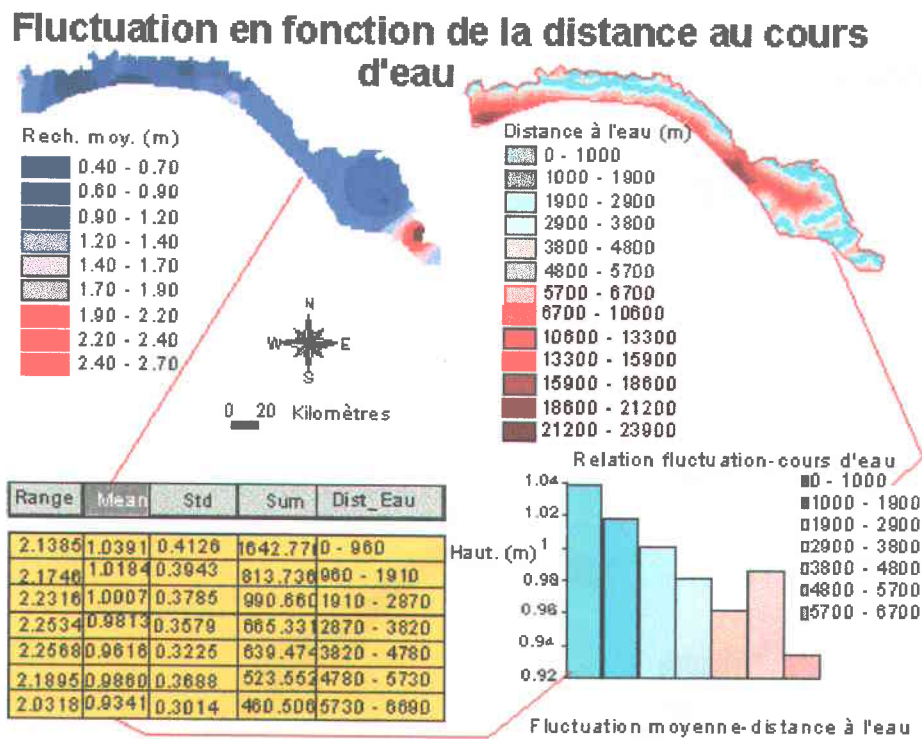


Figure 4.11 : Variation de la hauteur moyenne annuelle de recharge (d'une année hydrologique moyenne) de la nappe superficielle en fonction de la distance au cours d'eau.

#### IV. 2. 1. 3. 5 - Relation étiage du fleuve - recharge de la nappe

Les buts qui étaient visés dans cette première partie de l'étude étaient de préciser les mécanismes d'échange entre les cours d'eaux et les eaux souterraines et d'évaluer l'impact des crues du fleuve, et par conséquent de la gestion des barrages, sur la recharge des nappes. La mise en œuvre des barrages (Diama et Manantali) est respectivement survenue en 1986 et 1988 (SAED, 1996). L'absence d'informations complètes relatives à la mise en service des barrages empêche l'évaluation de l'effet direct de ces ouvrages sur les eaux souterraines. Pour pallier à cette difficulté, une autre approche a été adoptée. Elle a consisté

à analyser les variations annuelles de la surface piézométrique de la nappe notamment l'évolution des niveaux d'étiage et de la recharge à la lumière des variations de charges hydrauliques du fleuve en période de basses eaux ; étant entendu que le relèvement du niveau de basses eaux dans les cours d'eaux est fonction des barrages qui favorisent le maintien d'une charge permanente d'eau superficielle susceptible de prolonger la recharge de la nappe en dehors de la période de crue.

L'évolution des hauteurs du fleuve en période d'étiage a déjà été analysée de manière cartographique pour la période 1987/1990 (cf. figure 4.6). La figure 4.12 précise les résultats de cette analyse et permet de faire un parallèle avec les fluctuations piézométriques de la nappe étudiées sur les figures 4.9 et 4.10.

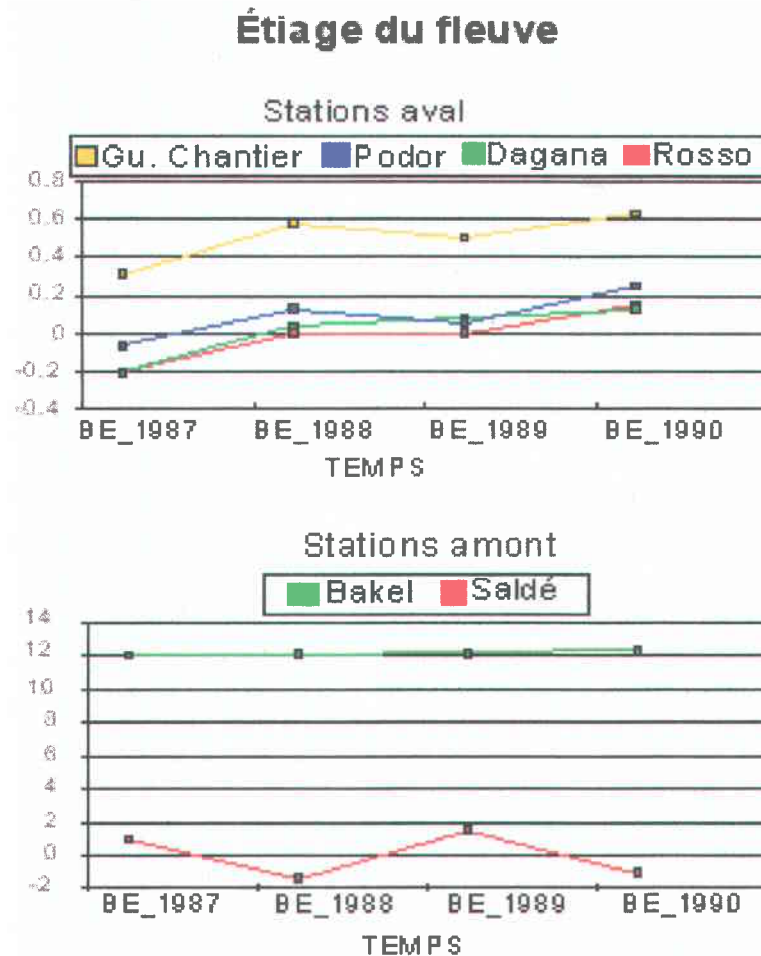


Figure 4.12 : Évolution des hauteurs du fleuve en période d'étiage entre 1987 et 1990.

En effet cette figure montre que

- le niveau de base du fleuve s'est relevé de 30 cm en amont (Bakel) et de 35 cm en aval (Rosso) entre 1987 et 1990.
- une baisse sensible du niveau est survenue en 1989 en aval ; par exemple à Podor le niveau est passé de 13 cm en 1988 à 6 cm en 1989 et à Guédé Chantier de 58 cm à 50 cm. Mais en amont (Saldé se situe plutôt entre l'amont et l'aval), la montée bien que très faible (12.10 cm en 1988 à 12.20 cm en 1989 à Bakel), s'est poursuivie. Parallèlement, la surface piézométrique d'étiage en 1989 est en baisse par rapport à sa hauteur en 1988. De même il y a une baisse de l'amplitude de la fluctuation annuelle ou recharge en aval contrairement à ce qui est observé dans la zone amont.
- le niveau se relève en 1990 et dépasse légèrement la situation de 1988, en aval comme en amont. Du côté de la nappe, la piézométrie d'étiage est remontée partout dans la vallée, avec en amont une propagation des fortes charges entre 2.3 et 8.9 m, plus importante en 1990 qu'en 1988. Dans la zone aval par contre, bien que les niveaux piézométriques d'étiage en 1990 soient en dessous de ceux de 1988, la recharge de la nappe est quant à elle plus significative à cause sans doute de la permanence d'une charge positive du fleuve en basses eaux depuis 1988.

Au terme de cette analyse, il apparaît qu'une relation fonctionnelle stable existe entre les variations de hauteur du fleuve en étiage et les fluctuations de la surface piézométrique de la nappe superficielle dans la vallée du fleuve Sénégal. L'analyse montre en effet, que la présence d'un niveau d'eau constant dans le fleuve en période d'étiages, améliore sensiblement la recharge de la nappe. Vu que le maintien de ce niveau est le fait des barrages de Diama en aval et de Manantali en amont, il en résulte donc que ces ouvrages influencent le comportement hydraulique de la nappe, notamment sa recharge par les cours d'eau.

#### **IV. 2. 1. 4 - Conclusion**

La première partie de cette étude s'est limitée principalement à la moyenne vallée du fleuve comprise entre Dagana et Semmé pour l'analyse piézométrique de la nappe superficielle. Pour l'étude des données limnimétriques, la moyenne vallée a été étendue jusqu'à Rosso en

aval (incluant donc le haut delta) et jusqu'à Bakel en amont. Les données qui étaient disponibles pour réaliser l'étude conformément aux objectifs définis au I. 2 étaient de trois types :

- historique de la pluviométrie enregistrée à quatre stations, de 1987 à 1990
- données limnimétriques sur la même période et se rapportant à six stations
- relevés piézométriques effectués en même temps à quarante cinq piézomètres captant les nappes superficielle (trente piézomètres), intermédiaire (huit piézomètres) et profonde (sept piézomètres) ; les deux dernières nappes ont été exclues de l'étude à cause du nombre insuffisant d'ouvrages les captant.

L'analyse de ces informations a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- La pluviométrie augmente progressivement de l'aval vers l'amont en même temps que l'altitude ; elle est cependant globalement déficitaire entre 1987 et 1990.
- L'infiltration locale des précipitations à la nappe évaluée à l'endroit des stations est négligeable voire complètement nulle.
- la lame d'eau ruisselée calculée à une station est fortement corrélée à la hauteur de pluie tombée au sol.
- Il n'y a aucune corrélation entre les fluctuations piézométriques de la nappe de surface et la pluviométrie mesurée.
- les hauteurs de crue du fleuve connaissent une baisse sensible en amont depuis 1988, alors qu'en aval la baisse ne s'observe qu'à partir de 1990.
- Alors que les hauteurs d'étiage connaissent quant à elles une augmentation plus ou moins régulière depuis 1988 avec comme conséquence la présence presque partout d'une charge d'eau permanente dans le fleuve.
- La surface piézométrique de la nappe est remontée de façon sensible durant la même période, notamment celle du niveau d'étiage. Ceci est le résultat de l'augmentation de la recharge de la nappe en période de basses eaux. Par exemple malgré la baisse en aval du niveau piézométrique en 1990 par rapport à son niveau de 1988, la recharge de la nappe est restée plus sensible en 1990 qu'en 1988 à cause du relèvement permanent du niveau de base du fleuve au-dessus du niveau marin.
- L'amplitude des fluctuations piézométriques annuelles diminue avec l'éloignement des cours d'eau, preuve d'une alimentation de la nappe par un processus latéral.

- La recharge moyenne annuelle de la nappe varie positivement de l'amont vers l'aval en même temps que le niveau de base du fleuve ; elle est assez élevée en amont vers Semmé où elle fluctue entre 1.18 m et 2.69 m tandis qu'en aval elle est relativement faible (entre 0.42 m et 1.18 m).

L'étude des interactions de la nappe superficielle avec son environnement dans la moyenne vallée aurait été plus complète si les apports éventuels en eau au droit de certains périmètres irrigués présents à Dagana, Podor et Matam, avaient été explorés. L'absence d'informations à ce sujet a été un handicap certain. C'est justement la relation entre l'irrigation prépondérante dans le delta, et la même nappe superficielle qui va faire l'objet de la deuxième partie de cette recherche. Il s'est agi en général dans cette partie, de confirmer les mécanismes d'échange entre la nappe et les cours d'eau discutés antérieurement et en particulier d'étudier les rapports entre les fluctuations du niveau de la nappe rechargée localement par l'irrigation et la dégradation des terres liée à la salinité. Mais au préalable il a été naturellement admis que les conclusions tirées de la première partie de l'étude, notamment **l'alimentation latérale de la nappe par les cours d'eau et l'augmentation de la recharge au cours de la période 1987-1990**, pouvaient être extrapolées à la zone du delta. Cette extrapolation trouve son fondement dans le fait que

- 1) la zone cible de l'étude est relativement petite ; bande d'environ 600 km de long sur 15 à 50 km de large
- 2) les propriétés physiques et hydrodynamiques de l'aquifère superficiel sont relativement homogènes dans toute la vallée
- 3) la moyenne vallée a été étendue au haut delta pour ce qui est des considérations liées à la pluviométrie (station de Dagana) et à la limnimétrie (station de Rosso).

#### **IV. 2. 2 - Delta du fleuve**

L'étude de la nappe superficielle dans le delta a été effectuée avec les relevés de profondeur de l'eau dans les piézomètres pour les raisons déjà énoncées au I. 3. 3. Elle couvre seulement les trois années 1989, 1990 et 1997. Il n'y avait pas de données complètes pour l'année 1987. Quant à l'année 1988, c'est pour des raisons pratiques (surcharge) qu'elle n'a pas été considérée dans le travail final.

L'analyse spatiale dans le delta porte sur les différentes relations pouvant exister entre la nappe (profondeur, conductivité électrique et pH), l'irrigation, les cours d'eau et les sols ; ceci dans le but de comprendre le(s) problème(s) à l'origine de la dégradation des sols dans le delta. Il est important de noter que la plupart des piézomètres ont été implantés à l'intérieur ou aux abords de périmètres irrigués. Du fait de cette disposition très particulière des ouvrages, l'analyse des interpolations de même que l'analyse spatiale n'ont été effectuées qu'à l'intérieur des zones aménagées. Pour une meilleure présentation des résultats, les grilles d'interpolation ont été habillées avec les cours d'eau et les ouvrages piézométriques, mais pas avec les périmètres irrigués ; ceci afin d'éviter de surcharger les cartes. Deux types de piézomètres ont été distingués au cours de l'analyse : les piézomètres à l'intérieur de zones aménagées et les piézomètres en dehors de zones aménagées (figure 4.13). Dans l'analyse des résultats d'interpolation, on va parler de delta aval (bas delta), delta centre (moyen delta) et delta amont (haut delta) pour désigner respectivement les zones aval, centre et amont du delta.

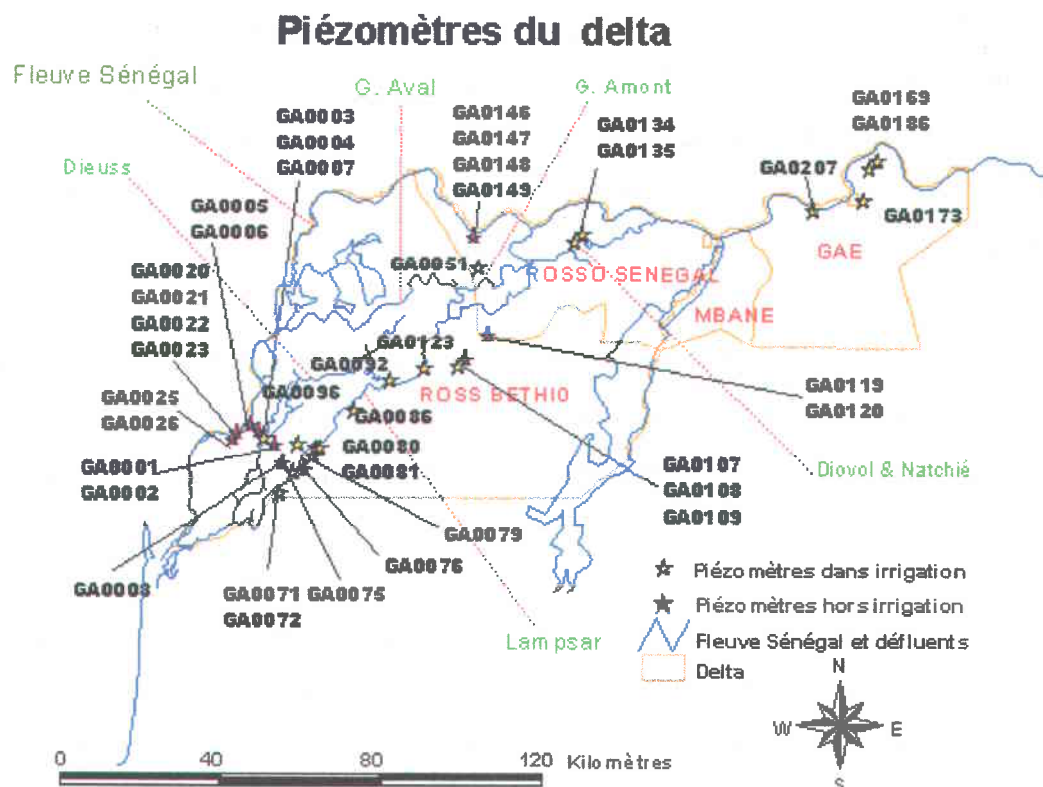


Figure 4.13 : Situation des piézomètres par rapport aux cours d'eau dans le delta (G. Amont et G. Aval correspondent aux cours d'eau Gorom amont, Gorom aval).

La plupart des ouvrages sont concentrés dans le bas delta comme l'indique la figure ci-dessus. Les piézomètres GA0075 et GA0001 à GA0008 forment une transversale dans le bas delta. Cette transversale s'étend du fleuve Sénégal (NW) au cours d'eau le Lampsar (SE) en traversant le cours d'eau le Dieuss. Les piézomètres GA0003, GA0004 proches du Dieuss et GA0075 sont situés à l'intérieur de zones aménagées alors que le reste se trouve à l'extérieur de ces zones. Ainsi les piézomètres GA0005 et GA0006 sont à côté du fleuve Sénégal et les autres sont soit à côté du Dieuss (GA0007), soit entre le Dieuss et le Lampsar (GA0001, GA0002 et GA0008). Non loin et de part et d'autre de la transversale sont situés :

- à côté du fleuve Sénégal : les piézomètres GA0020, GA0021, GA0022, GA0023, GA0025, et GA0026 à l'extérieur des périmètres irrigués
- le long du Lampsar : les piézomètres GA0071, GA0072, GA0079, GA0080, GA0081 GA0096 à l'intérieur des zones aménagées et GA0076 à l'extérieur

Dans la zone centre du delta, les piézomètres sont localisés à l'intérieur (GA0051, GA0086, GA0092, GA00123, GA0134 et GA0135) ou en bordure (GA0107, GA0108 et GA0109) d'aménagements. Ces piézomètres sont situés le long du Lampsar (GA0086, GA0092, GA0123), à côté du Gorom amont (GA0051) et aux abords du Diovol et du Natchié (GA0134 et GA0135). Cette zone abrite également les piézomètres GA0119 et GA0120 éloignés de tout aménagement et de tout cours d'eau.

Il n'y a que quatre ouvrages dans la zone amont, tous localisés à l'intérieur d'aménagements et à côté du fleuve Sénégal. Ce sont les piézomètres GA0169, GA0173, GA0186 et GA0207. Ces ouvrages n'ont pas été suivis en 1997 par la SAED, de même que les piézomètres GA0134 et GA0135 du delta centre.

Les fluctuations de la profondeur ainsi que les variations de la conductivité électrique et du pH de la nappe ont été analysées et commentées pour toutes les années considérées dans l'étude. Cependant pour des raisons pratiques, les résultats n'ont été présentés et commentés de façon exhaustive que pour l'année 1989 (hautes et basses eaux) pour laquelle les fluctuations de la profondeur de la nappe ont été superposées uniquement avec les cours d'eau et les piézomètres, pour permettre une meilleure lisibilité des cartes.



#### IV. 2. 2. 1 - Les fluctuations du niveau de la nappe

Le niveau de la nappe correspond ici à la profondeur de sa surface piézométrique mesurée à partir du sol (figure 4.14). L'analyse de ses fluctuations s'est faite en fonction du régime saisonnier du fleuve dont on a vu dans la première partie qu'il influence sérieusement la nappe superficielle. Il n'est pas commun d'utiliser la profondeur de la nappe pour analyser sa recharge par les eaux de surface tout simplement parce que la morphologie du terrain peut être très variable. Cette approche est rendue possible ici grâce à la **platitude relative du relief dans le delta** (cf. figure 2.3) qui fait que le repère de mesure de profondeur est relativement uniforme.

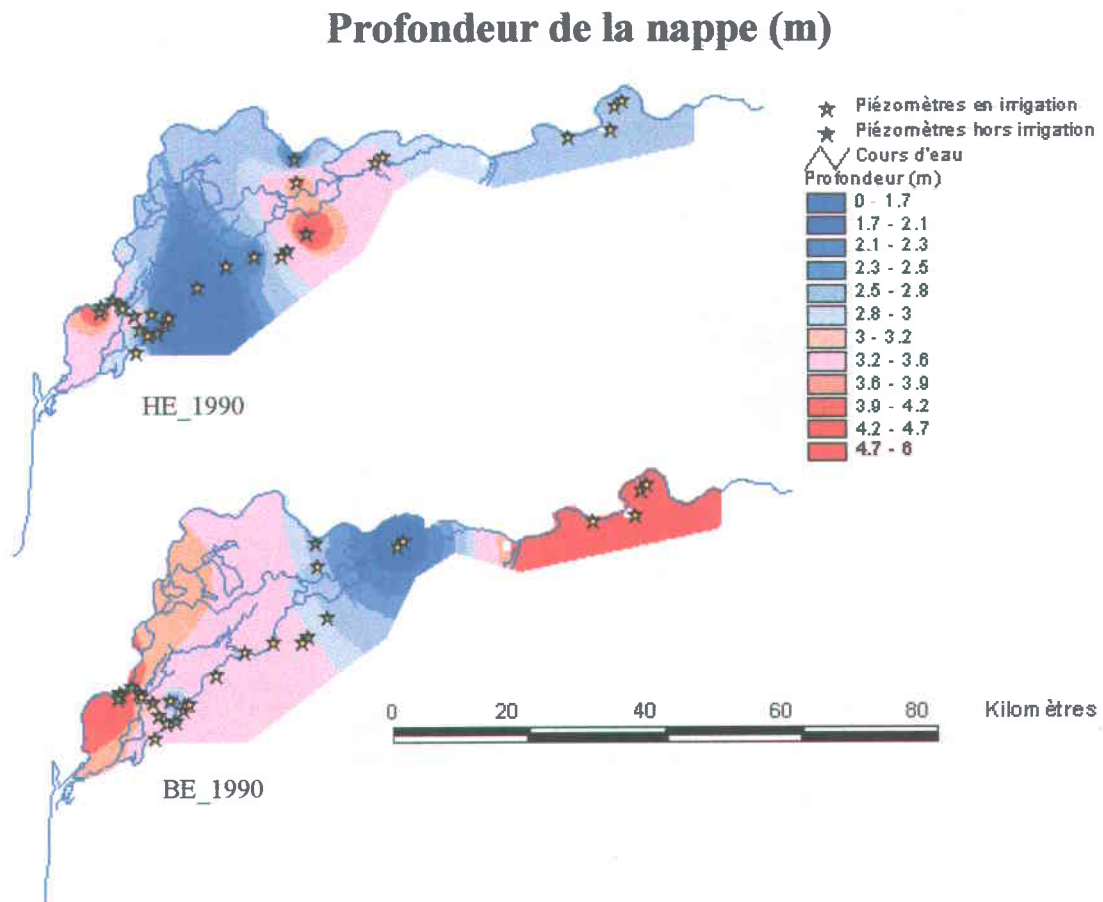


Figure 4.14 : Fluctuations saisonnières de la profondeur de la nappe en 1990

Comme l'indique les figures 4.14, 4.15 et 4.17, la profondeur de la nappe superficielle dans le delta, se comporte différemment d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre. Ce

comportement, déjà expliqué dans la moyenne vallée, est le résultat des variations saisonnières des eaux de surface dans le fleuve Sénégal et les cours d'eau importants.

#### IV. 2. 2. 1. 1 - Régime de hautes eaux

En 1989 dans le delta aval (figure 4.15), le niveau de la nappe a fluctué très sensiblement le long du Lampsar et de la transversale du bas delta qui recoupe le fleuve Sénégal et deux cours d'eau importants notamment le Dieuss et le Lampsar. C'est ainsi que le long de la transversale, la nappe montre deux protubérances ou dômes, correspondant à des zones où son niveau est proche de la surface du sol. La première protubérance (2.19 m) mesurée par le piézomètre hors aménagement GA0007 situé à 1112 m du Dieuss, se trouve entre le Sénégal et le Dieuss. Elle influence les piézomètres GA0003 et GA0004.

### Profondeur de la nappe en hautes eaux (HE) 1989

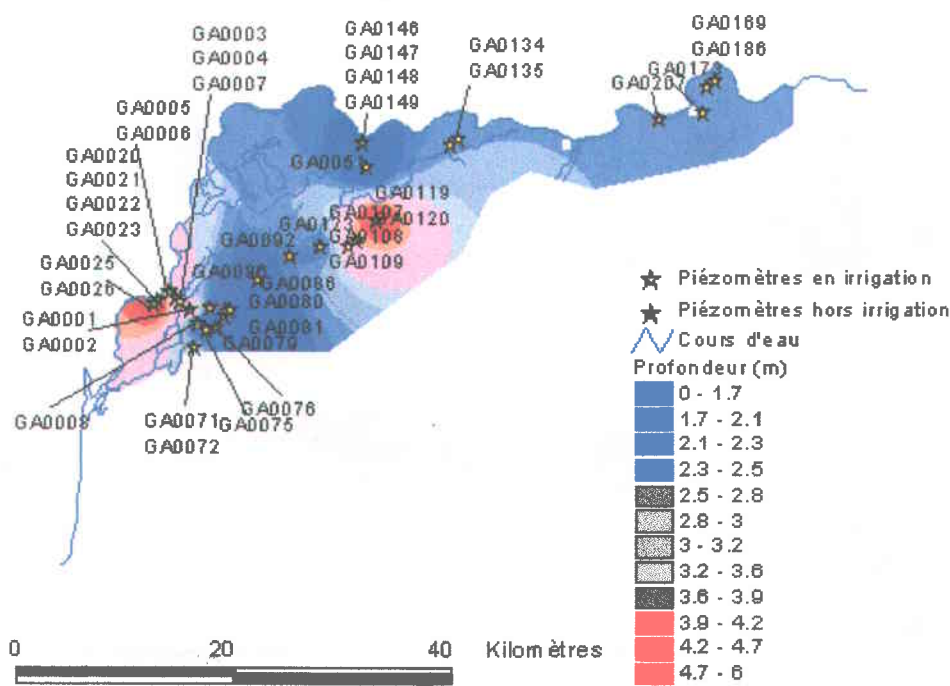


Figure 4.15 : Fluctuation du niveau de la nappe par rapport au sol, en hautes eaux, en 1989

Cette protubérance est une anomalie qui disparaît progressivement à la fois vers le fleuve Sénégal où le niveau s'enfonce jusqu'à 4 ou 5 m de profondeur et en direction d'une dépression localisée entre le Dieuss et le Lampsar et où la nappe descend à 3.95 m

(piézomètres GA0001 et GA0002). La dépression s'élève fortement vers le Lampsar à l'endroit du piézomètre GA0075 implanté à 392 m à l'intérieur d'un aménagement. Cette élévation correspond à une deuxième anomalie qui caractérise aussi une nappe peu profonde à l'endroit du fleuve Lampsar le long duquel le niveau piézométrique est très proche de la surface du sol (profondeur d'environ 1.01m). À partir de cette seconde anomalie de la surface piézométrique, la nappe s'enfonce à la fois vers le Diéri et vers l'intérieur du delta (delta centre). En plus de l'alimentation latérale par le Lampsar, cette anomalie piézométrique serait amplifiée par l'apport en eau d'irrigation étant donnée que presque tous les piézomètres (GA0071, GA0072, GA0075, GA0079, GA0080, et GA0081) présents à ce niveau, sont complètement situés à l'intérieur de zones aménagées en l'occurrence les GAS ou Grands Aménagements SAED. Ainsi le piézomètre GA0079 bien que situé à 1460 m du Lampsar, montre un niveau (1.82 m) sensiblement équivalent à ceux mesurés par les piézomètres GA0075, GA0080 et GA0081 qui se trouvent respectivement à 392 m, 643 m et 661m du cours d'eau. Ce qui démontrent qu'il y a effectivement une influence de l'irrigation dans la zone. La même observation peut-être faite pour les piézomètres GA0072 et GA0096, tous deux localisés respectivement à 1056 m et 1674 m du Lampsar mais qui montrent tous les deux une nappe peu profonde (autour de 2.04 m).

Dans cette partie aval du delta, la profondeur de la nappe n'est généralement très faible (nappe proche de la surface du sol) que dans les zones aménagées. La preuve en est que la nappe est très profonde (3.98 m) dans les piézomètres GA0005, GA0006, GA0020, GA0021, GA0022, GA0022, GA0023, GA0025 et GA0026, situés dans les abords du fleuve Sénégal loin de tout aménagement. Seul le piézomètre GA0007 de la première protubérance fait exception à cette règle, mais il est probable qu'à cet endroit la nappe est influencée par un périmètre irrigué privé (PIP-PIV\_HS) assez proche localisé à 500 m environ et surtout réputé pour son mauvais système de drainage (Cuppens, 1998).

Sur l'axe du Lampsar, en remontant vers le delta centre, la nappe reste proche de la surface comme l'indique vers le nord-est, la profondeur au niveau des piézomètres GA0086 (2 m), GA0092 (2.27 m) et GA0123 (2 m), tous localisés dans des aménagements à des distances respectives de 915 m, 548 m et 424 m du Lampsar. Le premier piézomètre est localisé dans

un GAST (Grands Aménagements SAED Transférés), le second dans un GAS et le troisième à la limite d'un GAS et d'un PIP-PIV\_HS. L'influence du Lampsar et de l'irrigation se fait bien sentir au niveau de ces ouvrages, particulièrement au voisinage du GA0123 où la nappe est à seulement 2 m de la surface du sol. Cela se traduit par une sorte de dôme du niveau de la nappe qui s'enfonce en direction d'une grande dépression où la nappe est très basse (4.99 m). Cette dépression très forte est signalée par les piézomètres GA0119 et GA0120, tous deux très éloignés des cours d'eau : environ 8000 mètres du Lampsar et 3150 m du Kassack et des aménagements. Cette dépression résulterait sans doute d'une profonde reprise évaporatoire non compensée par l'infiltration des eaux pluies. Au nord de cette dépression, un autre dôme de la surface piézométrique (1.01 m) de la nappe est signalé par le piézomètre GA0051 localisé dans des aménagements privés à 1762 m du Gorom Amont dont il subit aussi l'influence. Ce dôme s'enfonce en direction du fleuve vers le nord, et en direction de la grande dépression des piézomètres GA0119 et GA0120 vers le sud.

Dans la partie amont du delta, le long du fleuve Sénégal et des aménagements qui lui sont contigus, la nappe a une profondeur moyenne comprise entre 2.26 m et 2.50 m, puis elle descend vers la grande dépression des piézomètres GA0119 et GA0120.

En 1990 et 1997, la profondeur de la nappe a toujours gardé les mêmes caractéristiques morphologiques avec cette différence qu'en 1990 dans le delta centre, la nappe s'est abaissée à la profondeur de 3.96 m à l'endroit du piézomètre GA0051, soit une baisse de 2.95 m par rapport à 1989. De même, une baisse de niveau est enregistrée au voisinage des piézomètres de la série GA0046 à GA0049. Pendant ce temps, dans le delta aval, le long du Lampsar, la variation annuelle du niveau de la nappe est très élevée dans les piézomètres GA0079, GA0080 et GA0081 qui montrent une hausse significative de leur niveau, respectivement de 0.76 m, 0.12 m et 0.56 m. Cette importante variation annuelle est sûrement la conséquence des apports supplémentaires par l'irrigation. En 1997, la nappe est restée plus proche de la surface du sol partout dans le delta (figure 4.16). À titre d'illustration, la profondeur de la nappe dans les ouvrages GA0080, GA0086, GA092,

GA0108, tous influencés par le Lampsar et l'irrigation, est passée respectivement de 1.87 m, 1.99 m, 2.27 m et 2.99 m à 1.01 m, 1 m, 1.94 m et 2.01 m entre 1989 et 1997.

La structure de la surface de la nappe dans le delta en forme de dômes et de dépressions, rappelle les caractéristiques de la surface piézométrique de la nappe superficielle dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal (cf. figure 4.8). Cette morphologie de la surface piézométrique révèle que la nappe superficielle dans le delta, tout comme dans la moyenne vallée, est rechargée latéralement par les cours d'eau. Elle subit certes l'influence locale de l'irrigation dans le delta comme le montre la profondeur très faible autour du Lampsar où il y a une concentration de périmètres irrigués, mais l'alimentation par les cours d'eau y reste le processus principal de recharge.

### Profondeur (m) et CE (ds/cm) en hautes eaux 1997

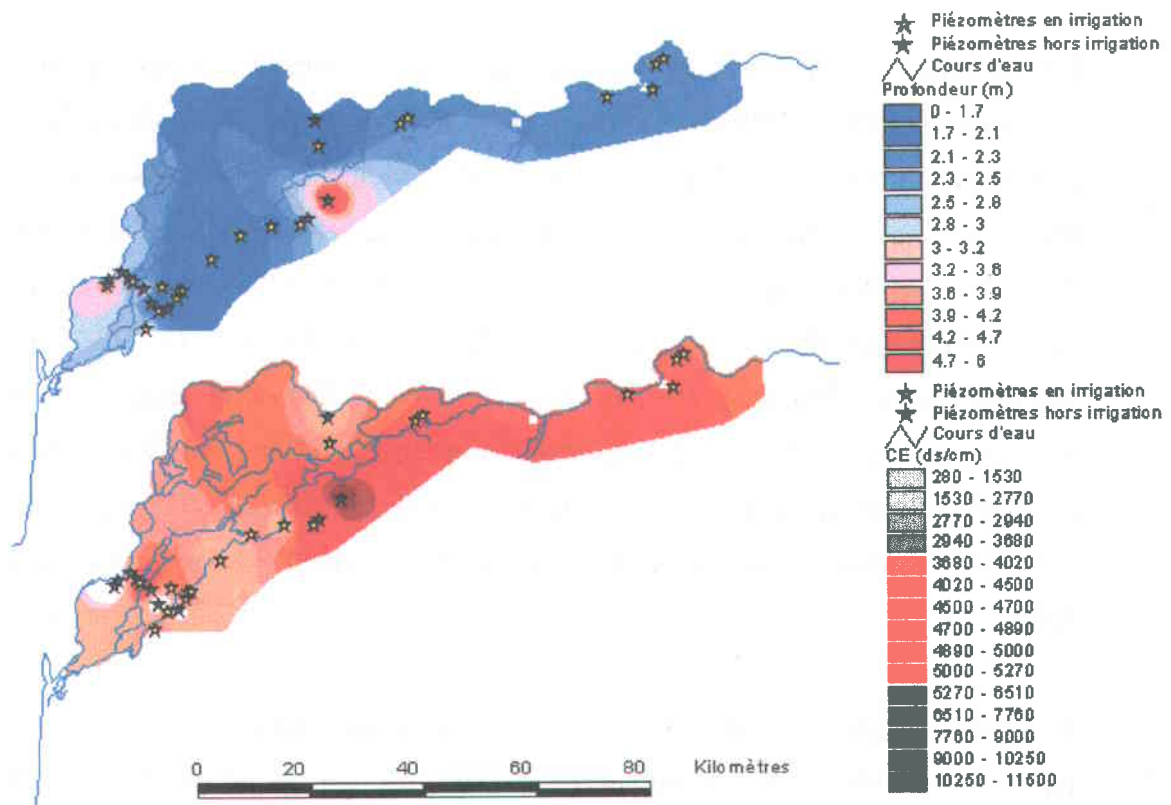


Figure 4.16 : Variations de la profondeur et de la conductivité électrique de la nappe en hautes eaux, 1997

L'analyse des fluctuations de la profondeur, montre que le niveau de la nappe superficielle dans le delta a subi une remontée globale entre 1989 et 1997. Cette remontée aurait été mieux appréciée et précisée si des données complètes avaient été disponibles pour la période précédant la mise en œuvre des barrages, mais aussi pour la période d'étude

#### **IV. 2. 2. 1. 2 - Régime de basses eaux**

Comparativement à la période des hautes eaux, le niveau de la nappe en basses eaux est plus profond (figure 4.17). Dans le bas delta par exemple, bien que toujours élevés, les niveaux de la nappe dans les ouvrages proches du Lampsar ont baissé de 1m (GA0075), 0.68 m (GA0079), 0.91 m (GA0080) et 0.73m (GA0081) par rapport à la situation en hautes eaux de 1989. La surface de l'eau s'enfonce en direction du fleuve suivant la transversale du bas delta. Elle atteint 4.95 m près des piézomètres GA0005 et GA0006 et culmine à 4.98 m dans les piézomètres GA0020 à GA0026.

En remontant vers le centre du delta, la nappe s'est fortement abaissée au voisinage des ouvrages GA0086, GA0092 et GA0123, particulièrement à l'endroit de ce dernier où un approfondissement de 1.23 m a été enregistré. Pareillement une baisse de 2.15 m est enregistrée par le piézomètre GA0051 où la nappe était à 1 m de la surface en hautes eaux 1989. La forte dépression des piézomètres GA0119 et GA0120 n'est plus observée à cause de l'absence de données en basses eaux. Les piézomètres GA0134 et GA0135 respectivement à 754 m et 1090 m du Natchié et du Diovol et situés dans un GAST, montrent une hausse du niveau de la nappe (3 m) en 1989. Cette hausse qui s'est accentuée en 1990, indique que la nappe a subi une recharge plus importante à cet endroit. À partir de cette protubérance, la surface de la nappe diminue graduellement en direction du sud du delta.

En amont du delta, la profondeur de la nappe en basses eaux n'a pratiquement pas changé entre 1989 et 1990. Le niveau est partout resté très bas dans les piézomètres : GA0207 (5.99 m), GA0173 (4 m), GA0169 (4.05 m) et GA0186 (5.92 m).

## Profondeur de la nappe en basses eaux (BE) 1989

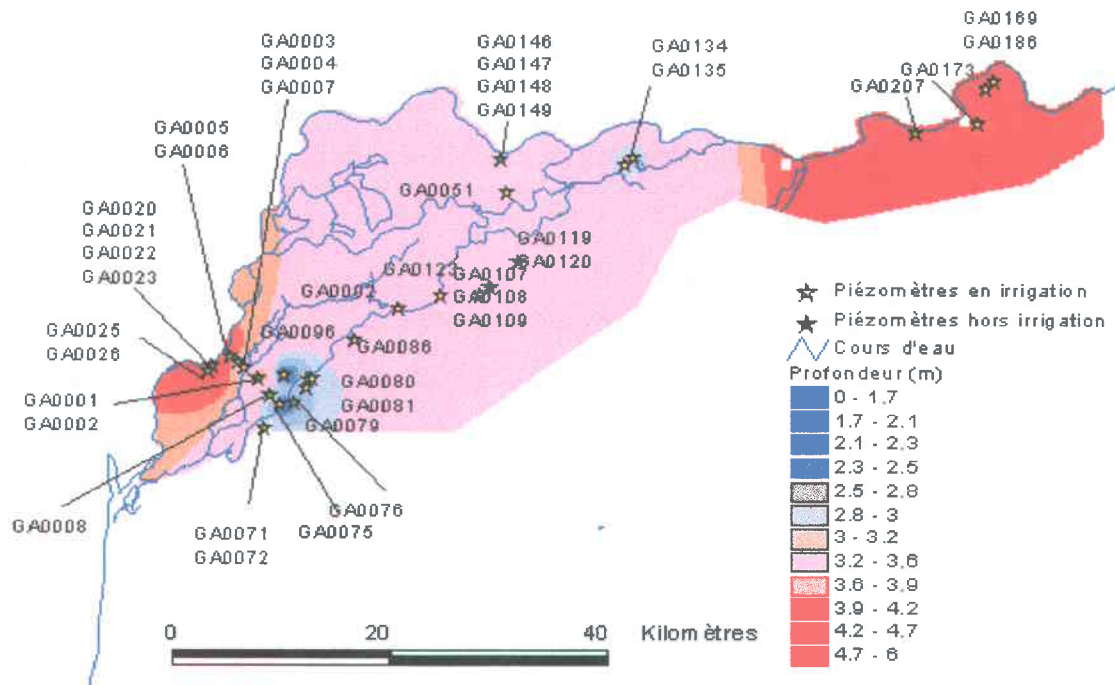


Figure 4.17 : Fluctuations du niveau de la nappe par rapport au sol en basses eaux 1989

Il n'existait pas de données piézométriques disponibles en période de basses eaux concernant l'année 1997.

### IV. 2. 2. 2 - La conductivité électrique de la nappe

La conductivité électrique ou CE correspond dans le texte au paramètre de mesure de la salinité de la nappe. Il ne faut donc pas se laisser confondre par la double terminologie utilisée car les termes CE et salinité font référence tous les deux à la teneur en sels dissous dans l'eau souterraine essentiellement sous forme de chlorures de sodium. L'unité de mesure est le ds/cm (décisiemens par centimètre).

#### IV. 2. 2. 2. 1 - Régime de hautes eaux

Comme l'indique la figure 4.18, la conductivité électrique de la nappe superficielle dans le delta, varie beaucoup avec la saison et l'année. Cette variation semble liée aux fluctuations du niveau de la nappe.

En 1989, dans le bas delta, les ouvrages de la transversale mentionnée précédemment (cf. IV.2.2), sont marquées par une variation spatiale considérable de la CE. Ainsi au voisinage des piézomètres GA0003 et GA0004 situés en zone aménagée, la nappe montre un pic de la CE de 57760 ds/cm. La CE diminue ensuite graduellement le long de la transversale du bas delta jusqu'au Lampsar et au-delà vers le Diéri. Elle diminue progressivement également de l'autre côté du Dieuss en direction du Fleuve Sénégal.

Dans les piézomètres répertoriés autour du Lampsar, la CE est notablement descendue entre 1000 ds/cm (GA0008 et GA0076) et 6000 à 8000 ds/cm (GA0079, GA0080 et GA0081) tandis que du côté du fleuve Sénégal elle ne variait plus qu'entre 3000 et 5000 ds/cm. En remontant le Lampsar vers le centre du delta, la concentration saline croît dans les ouvrages GA0086 (13930 ds/cm), GA0092 (13640 ds/cm), sauf dans GA0123 et GA0109 où elle reste plus faible, de l'ordre de 8000 ds/cm. Curieusement, non loin du piézomètre GA0109, le piézomètre GA0108 distant d'environ 1600 m, reflète une eau souterraine très salée à 37481 ds/cm). Il en est de même des piézomètres GA0119 et GA0120 à l'endroit desquels la CE culmine à 53719 ds/cm. Plus au nord, vers le fleuve Sénégal, la nappe affiche une baisse relative de sa salinité à 18228 ds/cm, à l'endroit du piézomètre GA0051 et de la série GA0046 à GA0049 (8610 ds/cm), tandis qu'en amont du delta, la CE varie uniformément entre 15000 ds/cm et 2000 ds/cm dans la nappe.

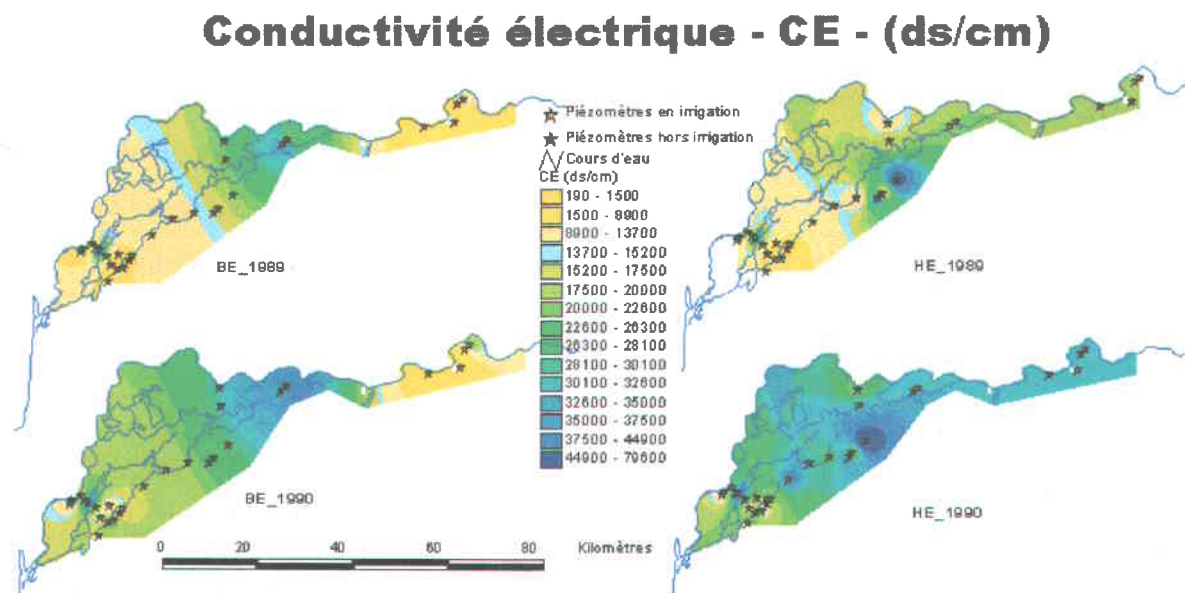


Figure 4.18 : Variations saisonnières de la conductivité électrique de la nappe



En 1990, la salinité de la nappe dans tout le delta est globalement plus élevée qu'en 1989. À titre d'illustration :

- dans le delta aval, la CE varie désormais entre 2000 et 3500 ds/cm au voisinage des piézomètres GA0008 et GA0076 et entre 15000 et 21000 ds/cm dans les piézomètres GA0079, GA0080 et GA0081, proches du Lampsar
- dans le delta centre, la concentration saline est montée à 26118, 16008, 64991, 34581, 32270 ds/cm respectivement dans les piézomètres GA0123, GA0109, GA0119 ou GA0120, GA0051 et GA0134
- dans le delta amont, les concentrations varient dans un intervalle de 30000 à 31000 ds/cm dans les ouvrages GA0169, GA0173, GA0186 et GA0207.

En 1997, partout dans le delta, la CE de la nappe est de loin plus faible qu'en 1989 et 1990. Elle ne varie plus qu'entre 283 et 11245 ds/cm.

Les variations saisonnières de la CE de la nappe dans le delta en hautes eaux, comparées à celles de sa profondeur, révèlent les tendances suivantes :

- la CE est généralement plus faible là où la profondeur de la nappe est la plus faible c'est à dire où la profondeur est plus proche de la surface du sol
- la plupart du temps, la CE a tendance à augmenter dans les endroits où la profondeur cartographiée est la plus forte, c'est à dire où la nappe est plus éloignée de la surface du sol.

Il est cependant difficile d'expliquer les différences énormes existant entre les valeurs de la CE, entre d'une part, l'année 1989 et 1990, et d'autre part, entre ces deux années là et l'année 1997. Néanmoins, il faut signaler que les relevés ont été effectués par deux organismes différents : l'OMVS en 1989 et 1990, et la SAED en 1997. Les méthodes utilisées n'ont cependant pas été livrées avec les données.

#### **IV. 2. 2. 2 - Régime de basses eaux**

La période des basses eaux est caractérisée par des CE faibles par rapport à celles relevées en période de hautes eaux. Cette tendance est observée sur toute la période 1989-1990. Elle

pourrait s'expliquer par une croissance de la minéralisation des eaux lors des périodes de crues.

En comparant les variations de la CE avec les fluctuations du niveau de la nappe en période de basses eaux, il apparaît une tendance pratiquement inverse à celle observée en hautes eaux :

- la CE est relativement plus élevée dans les endroits où la nappe est plus proche de la surface du sol
- la CE a tendance à diminuer dans les autres endroits où la nappe est assez profonde ou particulièrement profonde

L'analyse de la relation entre la profondeur et la CE de la nappe sera approfondie dans le dernier chapitre, mais auparavant, le graphique des variations saisonnières et annuelles de la CE a été tracé pour la période d'étude (figure 4.19).

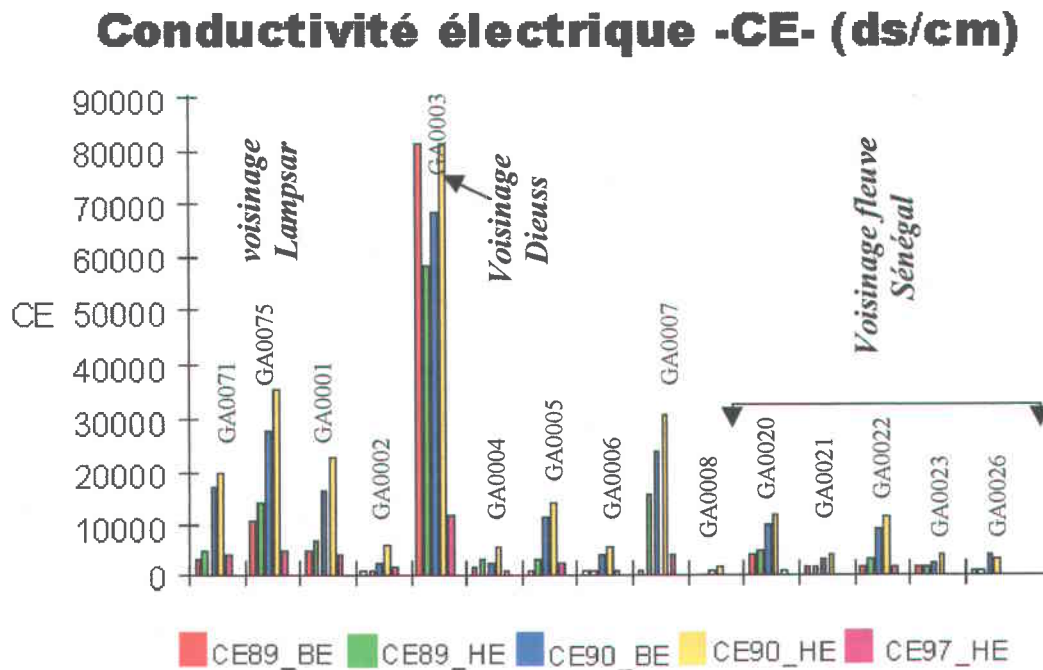


Figure 4.19 : Variations annuelles et saisonnières de la CE en 1989, 1990 et 1997 au niveau de 15 ouvrages, dans le bas delta.

Il confirme que :

- les valeurs de la CE de l'eau sont plus fortes en hautes qu'en basses eaux

- la CE est plus élevée en 1990 qu'en 1989 aussi bien en hautes qu'en basses eaux
- en 1997, la nappe a des valeurs de CE très faibles par rapport aux données obtenues en 1989 et 1990.

#### IV. 2. 2. 3 - Le pH dans le delta

Les mesures de pH portaient uniquement sur les années 1989 et 1990. Les valeurs relevées varient toutes entre 6 et 8 peu importe la saison. Le pH, bien que partout proche de la neutralité, montre des fluctuations saisonnières et annuelles assez nettes (figure 4.20).

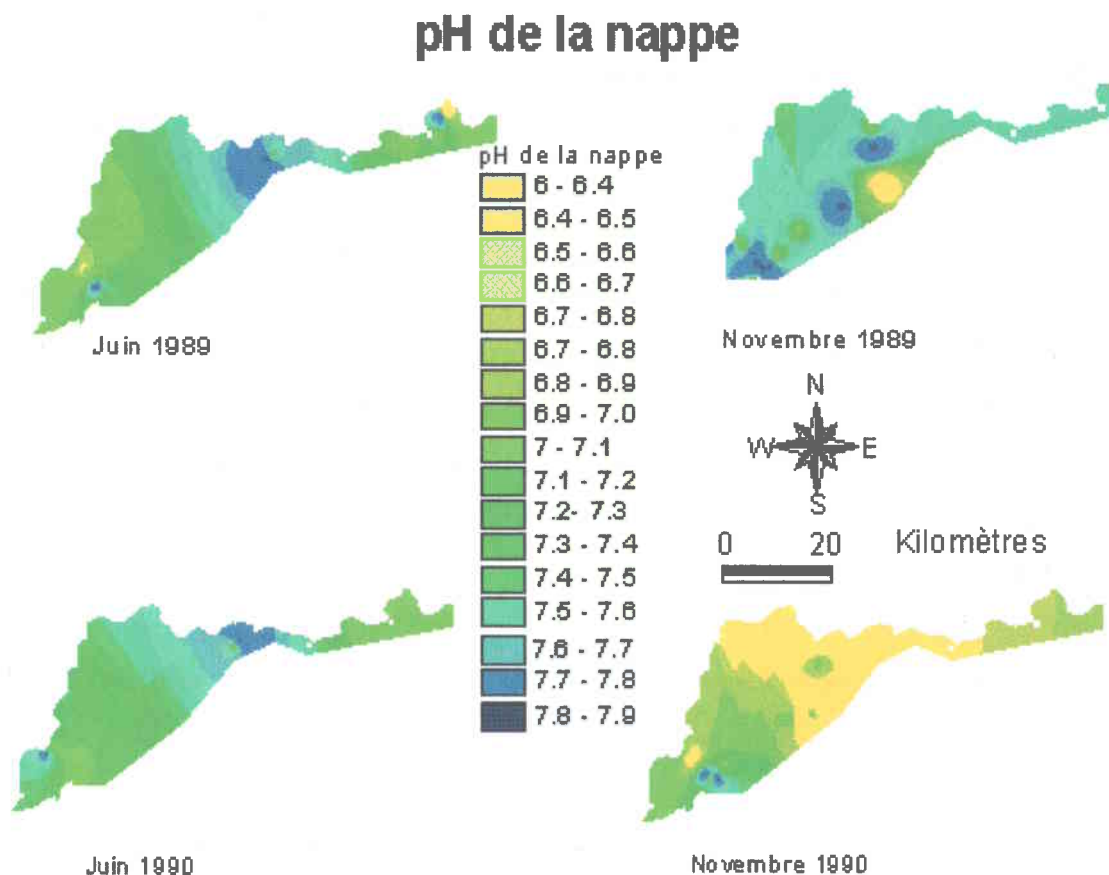


Figure 4.20 : Variations saisonnières du pH de la nappe

Ainsi le pH de la nappe en hautes eaux est en général plus fort en 1989 qu'en 1990 dans le delta. Par contre en basses eaux la différence n'est pas nette.

L'analyse parallèle des fluctuations du pH en rapport avec celles de la CE (cf. figure 4.18) en 1989 et 1990, montre qu'il y a tendance à :

- une diminution du pH dans les zones à salinité élevée en hautes eaux
- une augmentation du pH dans les zones où la salinité est plus élevée en basses eaux.

#### **IV. 2. 2. 4 - Relations entre la profondeur, la salinité, le pH et les cours d'eau**

Ces relations, tout comme les interpolations précédentes, n'ont été analysées qu'au niveau des zones aménagées. Cette procédure se justifie par le fait que les piézomètres échantillonnés sont tous localisés à l'intérieur ou au voisinage d'aménagements.

##### **IV. 2. 2. 4. 1 - Relation entre la nappe et les cours d'eau**

L'analyse précédente des fluctuations de la nappe par rapport à la surface du sol a déjà montré qu'elle était principalement rechargée par les cours d'eau, et que sa salinité (CE) subissait des variations saisonnières importantes. Le mécanisme de cette recharge ainsi que les variations de la CE qu'elle induit ont été étudiés à travers les relations de proximité entre les points échantillonnés et les cours d'eau. Le comportement de la nappe (profondeur, salinité) en hautes et basses eaux durant 1990 (année prise pour exemple), a été analysé en relation avec la distance des cours d'eau (figure 4.21). Pour la profondeur, cette analyse est rendue possible grâce à l'uniformité relative du relief. Comme l'indique la figure 4.21, la nappe s'approfondit avec l'éloignement du cours d'eau aussi bien en période de crue que d'étiage. Cela signifie qu'aux abords des cours d'eau, la nappe est plus proche de la surface du sol et son niveau s'enfonce à mesure qu'on s'en éloigne. Ceci confirme le fait que la nappe est latéralement alimentée de façon permanente par ces cours d'eau dans le delta.

Quant à la teneur en sels dissous dans la nappe, son comportement diffère suivant la saison. Ainsi, durant les hautes eaux, la CE est plus faible à proximité des cours d'eau et augmente cependant avec la distance. Ce qu'il faut saisir ici, c'est que la teneur en sels dissous diminue dans les zones où le niveau est plus proche de la surface du sol c'est à dire où la nappe est plus rechargée.

### Relation profondeur et CE avec la distance à l'eau

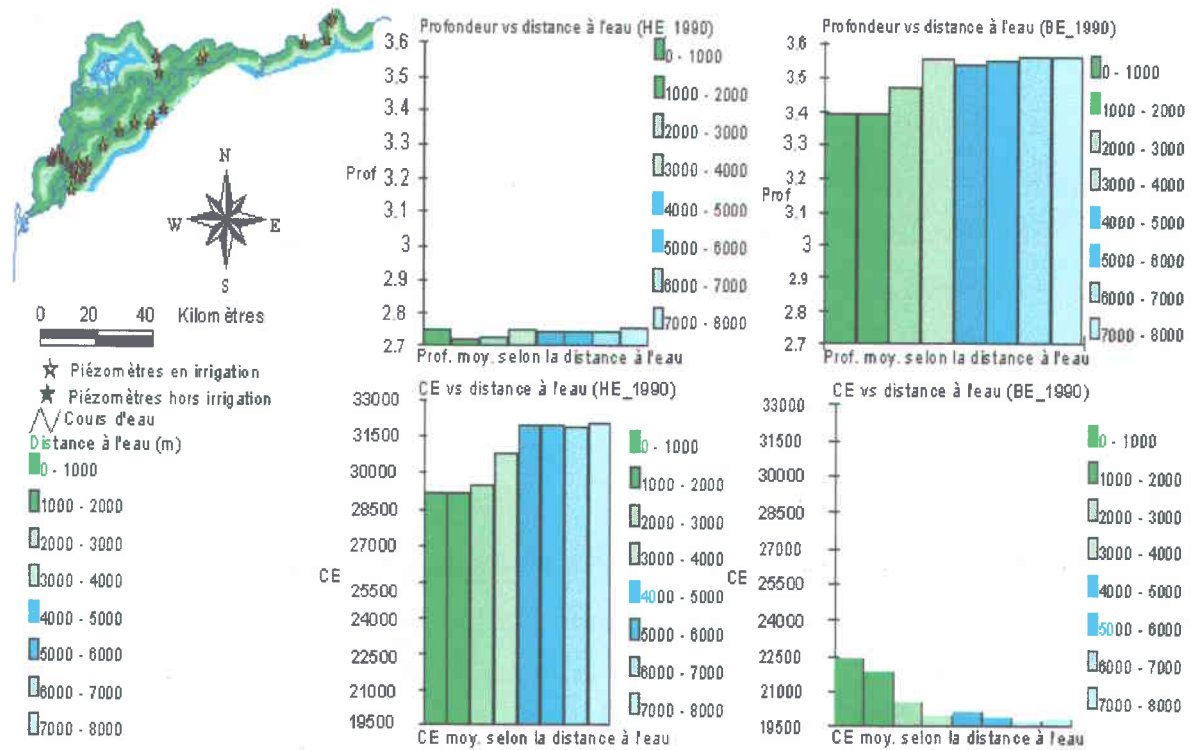


Figure 4.21 : Variations saisonnières de la profondeur et de la salure de la nappe en fonction de la distance au cours d'eau en 1990.

Par contre lors des périodes de basses eaux, c'est le phénomène inverse qui est observé, c'est à dire que la salinité devient plus élevée partout où la nappe est plus proche de la surface du sol et diminue quand la nappe s'enfonce.

Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- en période de crue correspondant également à la principale période de mise en valeur dans le delta ou période d'irrigation, la recharge contribue à diluer les sels dissous dans la nappe. Comme la recharge est généralement plus importante aux abords immédiats des cours d'eau où sont souvent aménagés les périmètres irrigués, cela explique pourquoi la salinité y est plus faible et qu'elle augmente à mesure qu'on s'en éloigne
- en période d'étiage, correspondant à une période hors irrigation, la nappe est soumise à un phénomène de remontée capillaire par laquelle les sels arrivent à la surface des

terres. Naturellement la remontée capillaire est d'autant plus intense que la nappe est proche de la surface du sol ; ce qui explique pourquoi, la salinité de l'eau souterraine est plus élevée à côté des cours d'eau où la nappe est beaucoup moins profonde, et diminue en s'en éloignant. Il est important peut-être de mentionner que la fin du mois de mai et le début du mois de juin sont souvent marqués dans la zone par une forte insolation (températures maximales pouvant atteindre 45°) accompagnée de vents chauds et secs chargés de poussière (SAED, 1996). Ces vents peuvent donc jouer un grand rôle dans l'évaporation qui peut aller chercher l'eau à des niveaux assez profonds; ce qui contribue à accroître la salinité des terres surtout là où la nappe est très peu profonde en l'occurrence les zones qui subissent l'influence des cours d'eau et de l'irrigation.

#### **IV. 2. 2. 4. 2 - Relation entre la profondeur et la salinité (CE)**

Étant donné le comportement à caractère saisonnier de la salinité de la nappe, il était important de vérifier comment la CE était liée aux fluctuations de profondeur de la nappe. Comme le laissait entrevoir les cartes d'interpolation, la figure 4.22 confirme l'existence d'un lien direct entre ces deux paramètres principaux de la nappe. L'exemple est choisi de sorte que l'analyse puisse porter sur les trois années considérées dans la période d'étude. Il montre que quelque soit l'année considérée, la CE diminue quand la profondeur de la nappe est peu élevée en période de crue et qu'elle augmente quand celle-ci est également peu élevée mais cette fois en période d'étiage, autrement dit que la salinité augmente avec la profondeur en hautes eaux et qu'elle diminue avec l'augmentation de cette dernière en basses eaux.

#### **IV. 2. 2. 4. 3 - Relation entre le pH et la salinité (CE)**

Le rapport entre le pH et la salinité a été également abordé même si les mesures montrent qu'il est très peu variable dans le delta. La figure 4.23 confirme la tendance observée dans le chapitre précédent entre ces deux paramètres. Le pH varie quasiment de façon linéaire avec la conductivité électrique de la nappe.

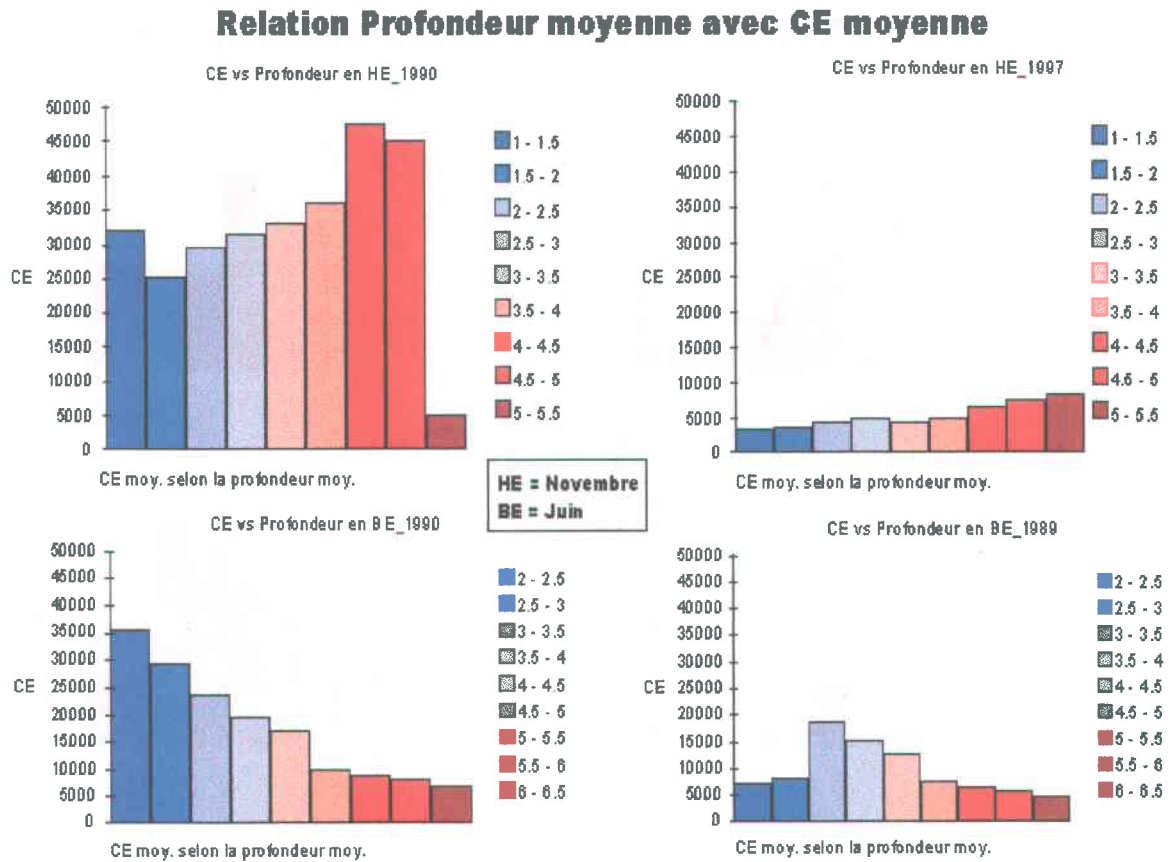


Figure 4.22 : Variations saisonnières de la salinité de la nappe selon la profondeur en 1989, 1990 et 1997

En période de crue et donc de recharge importante, le pH est faible (nappe plus acide) là où la salinité est élevée (c'est à dire en zones profondes) tandis qu'en période de basses eaux, il est plus élevé (nappe moins acide) pratiquement partout où la salinité est élevée. En d'autres termes,

- cela signifie qu'en hautes eaux, la nappe tend à s'acidifier dans les zones plus profondes c'est à dire faiblement rechargées, à l'inverse des zones fortement rechargées comme les alentours des cours d'eaux où l'effet de dilution neutralise la tendance acide
- alors qu'en basses eaux, elle tend à être moins acide dans les zones peu profondes de la nappe où l'accélération de la capillarité augmente la teneur en sels dans l'aquifère. Dans ces zones, le pH est neutralisé par la recharge encore plus significative de la nappe.

### Relation pH moyen avec CE moyenne (ds/cm)

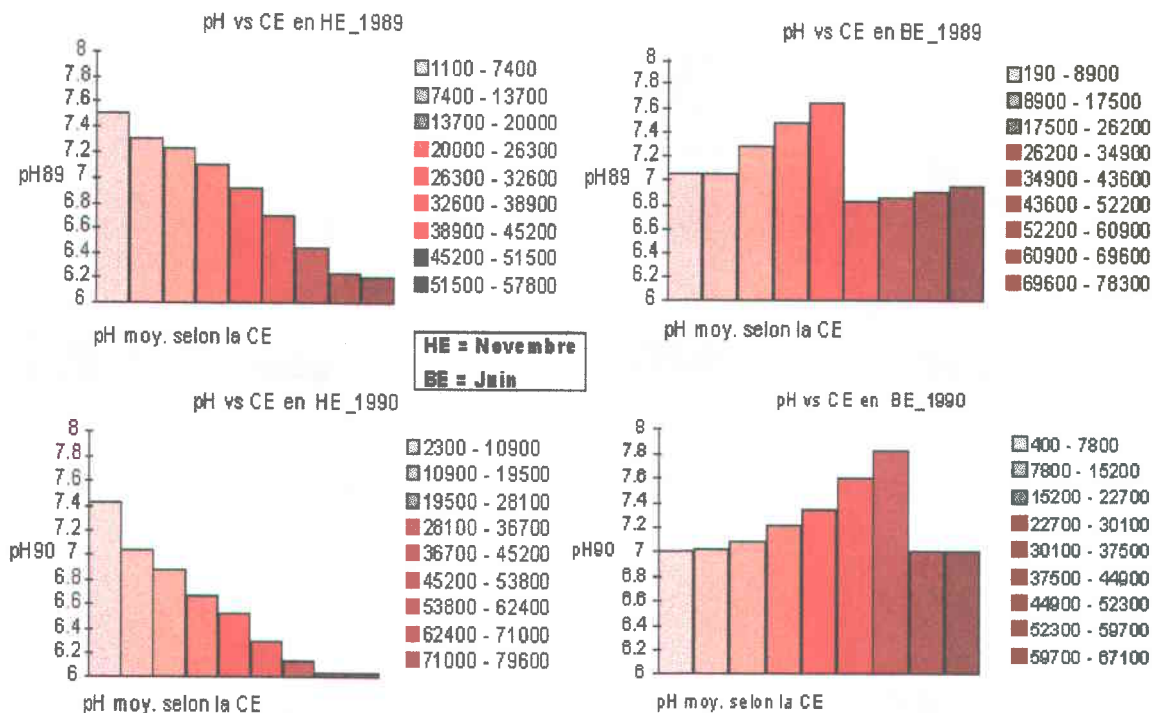


Figure 4.23 : Variations saisonnières du pH selon la salinité de la nappe, en 1989 et 1990

Au terme de ce chapitre, il ressort nettement que les variations de la salinité et finalement du pH dans le delta sont assez bien corrélées avec les fluctuations du niveau de la nappe superficielle. Les valeurs utilisées pour l'analyse sont toutes des valeurs moyennes. Bien entendu, il est clair qu'un maillage plus exhaustif de la zone intégrant toutes les terres vierges et irriguées du delta, la situation des installations et des équipements hydro-agricoles, la quantité (volume) et la qualité (composition chimique) des eaux d'irrigation ainsi que la qualité des eaux dans certains cours et points d'eau, fourniraient probablement plus de détails sur les variations de la CE dans la nappe. De même, une analyse des teneurs en sels dans les matériaux géologiques à des profondeurs variables de l'aquifère ainsi que la connaissance des superficies mises en valeur pourrait sans doute apporter quelques informations supplémentaires à ce sujet. La salure accrue liée aux remontées capillaires en période de basses eaux (qui coïncide ici avec un mois hors irrigation) dans les zones très peu profondes de la nappe, serait la cause probable de la dégradation des terres par



salinisation dans le delta. Après avoir cerné les causes relatives du problème, il était important de le cartographier pour mieux apprécier son ampleur.

#### IV. 2. 2. 5 - Cartographie de la dégradation des terres liée à la salinité

La dégradation a été cartographiée pour la période de basses eaux (juin 1990), ce qui correspond à un mois hors irrigation. En effet l'augmentation durant cette période, de la salinité dans les zones peu profondes favorables à une plus grande ascension capillaire, démontre que l'ascension capillaire aurait un rôle dans cette dégradation. Pour ce faire, le comportement de la nappe (fluctuations moyennes de la profondeur et de la CE) a été directement analysé à l'intérieur des aménagements et en rapport avec la pédologie.

##### IV. 2. 2. 5. 1 - Variation de la profondeur et de la CE à l'intérieur des aménagements

À l'intérieur des catégories d'aménagements, les variations des paramètres de la nappe confirment relativement bien les observations faites précédemment (figure 4.24).

#### Profondeur moy. (m) et CE moy (ds/cm) vs Aménagement

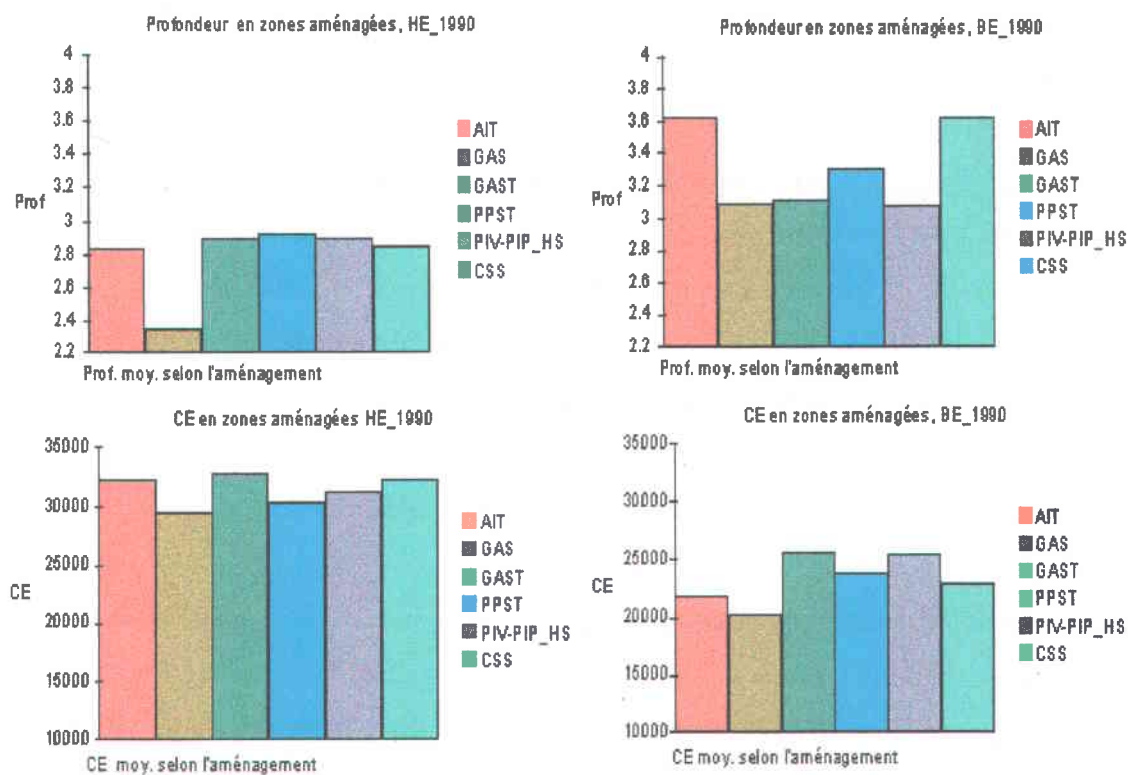


Figure 4.24 : Variations saisonnières de la profondeur et de la CE moyennes à l'intérieur des aménagements en 1990.

En effet, la profondeur moyenne de la nappe est plus faible dans ces zones lors des crues (2.3 à 2.9 m) qu'en période de basses eaux (3 à 3.6 m). De même, à cause de la forte minéralisation en hautes eaux, la CE varie plus fortement qu'en étiage. En outre, la relation entre la CE et le niveau de la nappe est respectée mais plus rigoureusement en basses eaux. Comme l'indique la figure 4.24, la CE moyenne est presque d'autant plus élevée en basses eaux que la profondeur de la nappe est faible sauf dans les GAS. L'hypothèse principale qui expliquerait la faible salinité dans les GAS, serait la proximité du Lampsar à eau permanente et douce autour duquel cette catégorie d'aménagements est concentrée. Durant les hautes eaux, la corrélation entre la CE moyenne et la profondeur moyenne est moins nette principalement dans les catégories PPST (petits périmètres SAED transférés) et PIV-PIP\_HS.

Le fait que la CE dans les aménagements soit moins corrélée à la profondeur en période de crue serait imputable probablement à l'effet local de la mise en valeur (irrigation) qui est prépondérante au même moment dans le delta, mais qui n'a forcément pas lieu dans tous les périmètres.

#### **IV. 2. 2. 5. 2 - Variation de la CE selon la pédologie**

La figure 4.25 montre que la CE varie en fonction de la saison et selon le type de sol. Ainsi en période de basses eaux, la salinité se comporte de la même façon mais avec des teneurs différentes selon l'année. La CE est plus élevée dans le Faux Hollaldé et le Fondé que dans le Hollaldé et le sable dunaire, alors qu'en hautes eaux ou crue, elle varie plus fortement au dans types Fondé et Hollaldé. Il est à noter qu'il n'y a qu'une infime superficie qui est aménagée dans le sable dunaire non favorable à la culture de riz.

Il n'est pas évident de déceler un rapport quelconque entre la pédologie (les trois premiers types sont tous argileux à limoneux avec des degrés différents d'argilosité) et la salinité. Par contre, ce qui se dessine assez clairement, c'est que la variation de la CE dans les types de sols est plutôt fonction des fluctuations du niveau de la nappe.

### CE moyenne (ds/cm) vs type de sol

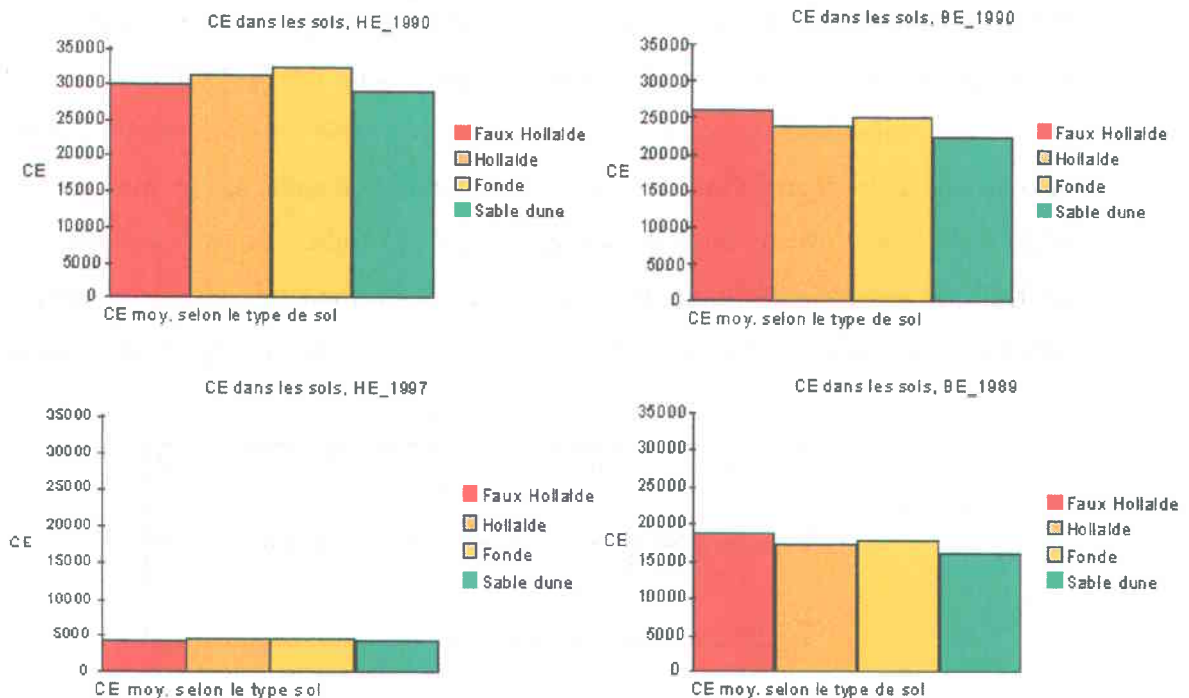


Figure 4.25 : Variations saisonnières de la CE selon le type de sol en 1989, 1990 et 1997.

La cartographie de la dégradation des sols est justement basée sur les variations de la profondeur et de la CE de la nappe, dans les différentes catégories d'aménagements et selon les types de sols. En effet, comme on le voit sur les figures 4.24 et 4.25, les cartes de profondeur et de CE en basses eaux de 1990 ont été transformées pour produire de nouvelles cartes où ces deux paramètres sont reclassés de manière à pouvoir affecter une pondération à chaque classe de profondeurs ou de CE de l'eau. Le but de cette classification est de caractériser la nappe selon les profondeurs et CE plus favorables (très faible dégradation) à plus défavorables (très forte dégradation) à la qualité des sols dans le delta.

#### IV. 2. 2. 5. 3 - Reclassification de la profondeur

Vu qu'en basses eaux, la salinité augmente aux endroits où la nappe est proche de la surface du sol (cf. figure 4.22), les valeurs de profondeur ont été reclassées en se basant essentiellement sur le niveau de la nappe à l'intérieur des aménagements. C'est ainsi qu'en basses eaux de 1990 (cf. figure 4.24), la profondeur moyenne de la nappe est plus élevée (3.62 m) dans les AIT ou Aménagements Intermédiaires Transférés, alors qu'elle est plus

faible (3.07 m) dans les PIV-PIP\_HS. Pour éviter les remontées capillaires ainsi qu'une reprise évaporatoire, il faudrait veiller à ce que la nappe soit maintenue à un niveau suffisamment profond, c'est à dire au moins égal à celui des AIT. Il peut alors être admis que toute profondeur de la nappe supérieure ou égale 3.62 m serait potentiellement défavorable à la dégradation des terres dans les aménagements et que les profondeurs inférieures à cette valeur seraient potentiellement favorables puisqu'elles sont susceptibles de dégrader les sols par salinité. D'où les classes de profondeur suivantes pondérées sur une échelle de 1 (plus favorable à la dégradation) à 10 (plus défavorable à la dégradation) :

0 – 3 m	3 – 3.2 m	3.2 – 3.6 m	3.6 – 3.8 m	3.8 – 6 m
1	3	5	7	10

#### **IV. 2. 2. 5. 4 - Reclassification de la CE**

La CE moyenne à l'intérieur des aménagements en basses eaux 1990 (cf. figure 4.22) varie entre 20300 ds/cm dans les GAS et 25700 ds/cm dans les GAST. Le but visé est d'obtenir une CE la plus faible possible dans les aménagements, c'est à dire une CE au plus équivalente à celle relevée dans les GAS. Pour minimiser tout risque, la CE limite (1500 ds/cm) entre les eaux douce et les eaux salines, a été considérée comme la valeur maximale souhaitable dans un aménagement. Elle est voisine du treizième de la CE moyenne des GAS (1560 ds/cm). Dès lors toute valeur de CE supérieure à 1500 ds/cm serait plus ou moins favorable à la dégradation des terres et toute valeur inférieure ou égale à 1560 ds/cm serait défavorable à cette dégradation. En conférant une pondération entre 1 (plus favorable à la dégradation) et 10 (plus défavorable à la dégradation) à chaque classe de CE ainsi obtenue, on obtient les résultats suivants :

0 – 1500 ds/cm	1500 – 5000 ds/cm	5000 – 13700 ds/cm	13700 - 23500 ds/cm	23500 – 67200 ds/cm
10	7	5	3	1

#### IV. 2. 2. 5. 5 - Reclassification des types de sols selon la CE

La figure 4.25 ci-après indique que la CE moyenne est plus élevée dans le Faux Hollaldé en basses eaux et qu'elle est beaucoup moins importante dans le sable dunaire. Il serait souhaitable naturellement que dans un sol, il y ait une CE la plus faible possible ou au plus égale à la plus faible valeur rencontrée dans le site, ici celle des sables. De ce fait, tout sol où la CE est supérieure à celle des sables peut être considéré comme renfermant plus ou moins un risque de dégradation et que tout endroit où la CE est inférieure ou égale à celle des sables est moins exposée à cette dégradation. Ce qui conduit à pondérer les sols sur une échelle de 10 selon leur potentiel de vulnérabilité à la dégradation par salinité :

Faux Hollaldé	Fondé	Hollaldé	Sable dune
1	2	3	4

Seules les cartes de la profondeur et des types de sols ainsi reclassées selon le risque de dégradation des terres, ont été combinées et leurs indices normalisés sur la même échelle de 1 à 10 avec ArcView en utilisant la formule suivante :

$$( \text{Reclass}_{\text{PROF}} + \text{reclass}_{\text{SOLS}} ) / 2$$

Le reclassement de la salinité a seulement pour objet de définir des classes de CE représentant la dégradation, son intérêt sera démontré lors de la critique de ce mémoire. Le résultat obtenu par cette formule est une carte de dégradation potentielle des terres due à la salinité dans les zones aménagées du delta durant l'année 1990 (figure 4.26). Cette figure indique que plus on est proche de 1, plus la dégradation potentielle est forte, à l'inverse, la dégradation potentielle devient de plus en plus faible à mesure que l'on s'approche de 10. La figure 4.27 permet de mieux caractériser cette dégradation. Elle montre des graphiques où la dégradation a été rapportée par catégorie d'aménagement, par type d'aménagement (par exemple il y a le type SAED constitué par les GAS, le type CSS et le type privé renfermant toutes les autres catégories) et par type de sol. L'ordonnée de ces graphiques représente le nombre de cellules affectées par le phénomène de dégradation.

## Dégradation des terres en 1990

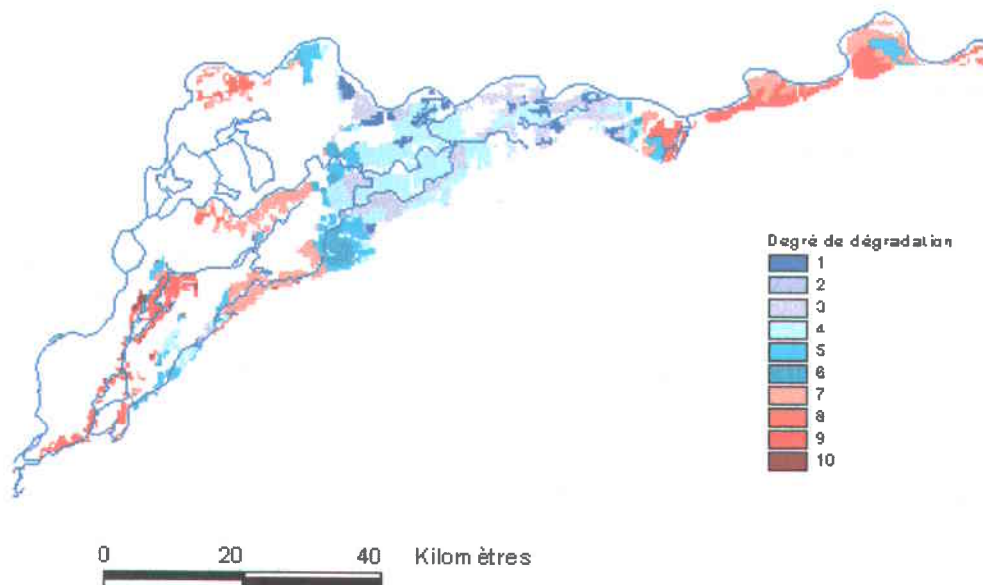


Figure 4.26 : Dégradation potentielle des terres par salinité dans le delta en 1990

## Dégradation potentielle du sol

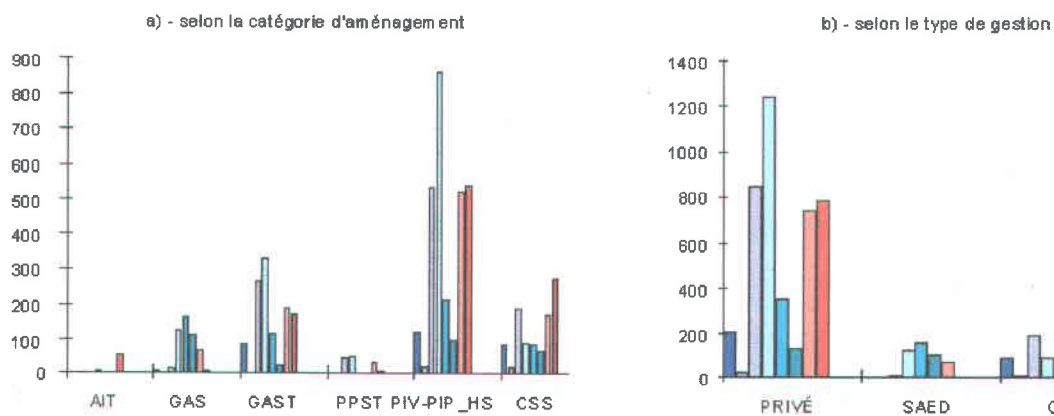


Figure 4.27 : Dégradation potentielle des terres en relation avec le type de sol et le type et la catégorie d'aménagement

Le graphique 4.27 a) montre que les GAS et les AIT étaient moins susceptibles aux niveaux de dégradation les plus sévères (niveaux 1 et 2) qui y sont presque inexistantes, contrairement aux autres catégories d'aménagements où ils occupent une bonne proportion de l'espace disponible (GAST, PIV-PIP\_HS). Le graphique 4.27 b) où les catégories sont regroupés selon le type, confirme cette tendance pour le PRIVÉ et la SAED. En ce qui concerne la CSS, bien que localisée dans le delta, ses conditions d'aménagement n'ont rien avoir avec la situation qui prévaut dans le delta, puisque c'est une agro-industrie sucrière. Les niveaux de dégradation les plus sévères sont rencontrés uniquement à l'intérieur des aménagements privés et sont quasi absents dans les aménagements gérés par la SAED. Cela tend à confirmer les hypothèses des responsables de la SAED, selon lesquelles la gestion privée, du fait de son mauvais système de drainage, favorise une plus grande recharge de la nappe par infiltration de l'eau d'irrigation, et par conséquent une susceptibilité plus élevée à la dégradation des terres dans le delta.

#### **IV. 2. 2. 6 - Conclusion**

Les résultats de cette dernière partie de l'étude, comme ceux de la première, révèlent que le mécanisme de recharge de la nappe superficielle est principalement effectué par les cours d'eau surtout lors des périodes de crues. En plus de ces flux latéraux, la nappe dans le delta, est soumise à une contribution de l'irrigation à travers la riziculture. Cette apport vertical est reflété par les fluctuations saisonnières importantes du niveau de la nappe dans certains piézomètres comme ceux bordant le Lampsar. Les conclusions générales suivantes peuvent être tirées de cette partie de l'étude :

- la nappe est généralement moins profonde dans le bas delta et le long du Lampsar
- la nappe est à la fois influencée par le Lampsar et par l'irrigation dans la zone du Lampsar
- le flux latéral par les cours d'eau reste le phénomène de recharge dominant de la nappe
- la nappe a subi une remontée générale de son niveau entre 1989 et 1997 alors que sa conductivité électrique a connu une hausse en 1990, avant de chuter fortement en 1997
- la conductivité électrique varie en fonction des fluctuations du niveau de l'eau de la nappe par rapport à la surface du sol

- en période de hautes eaux, il y a une forte minéralisation des eaux qui fait que le taux de salinité de la nappe augmente de façon globale
- les variations de la CE sont plus élevées dans les zones faiblement rechargées en hautes eaux, alors qu'en basses eaux, ces variations augmentent dans les zones où la nappe est plus proche de la surface
- la pH de la nappe, partout proche de la neutralité, suit les variations de la CE et donc de la profondeur de l'eau ; il montre que la nappe a une tendance basique en basses et hautes eaux dans les endroits où la profondeur est la plus faible en l'occurrence les zones de recharge importante
- la nappe est alimentée de façon permanente par les cours d'eau quelque soient les saisons
- la dégradation la plus sévère prédomine dans les aménagements privés
- les types de sols Fondé et Faux Hollaldé sont plus susceptibles à la dégradation par salinité



## V - CONCLUSION

L'étude réalisée dans la moyenne vallée et celle réalisée dans le delta portent sur le même aquifère communément appelé l'aquifère superficiel de la vallée du fleuve Sénégal. Au terme de cette étude, on se rend compte que la complexité des interrelations spatiales entre la nappe (profondeur, salinité et pH), les cours d'eau, les sols et les aménagements justifie largement l'utilisation d'un système d'information géographique pour approcher cette problématique. En effet, le SIG est le seul outil qui permet à la fois d'intégrer des données multi-sources dans un environnement unique, de les gérer et de les transformer selon leurs relations dans l'espace pour finalement les visualiser.

Dans la moyenne vallée, les résultats montrent que la recharge de la nappe par les eaux de pluie est quasiment nulle sauf en de rares endroits situés en amont (Bakel) où l'effet combiné du fleuve et des pluies souvent plus importantes, peut occasionner une très légère recharge annuelle. Par contre la recharge de la nappe se fait surtout de façon latérale par les cours d'eau étant donné la forte corrélation trouvée entre le relèvement du niveau d'étiage du fleuve et la variation positive du niveau de la nappe. La présence d'un niveau d'eau constant dans le fleuve en période d'étiage, liée à l'avènement des barrages de Diama et de Manantali, a donc occasionné le relèvement de la surface piézométrique de la nappe superficielle de la vallée du fleuve Sénégal entre 1987 et 1990.

Dans le delta, les résultats sur la recharge de la nappe confirment les conclusions déjà avancées en première partie, à savoir que l'aquifère reçoit une importante recharge latérale par les cours d'eau. Cependant, dans cette région, en plus de cet effet latéral, l'irrigation influence localement la nappe, notamment le long de l'axe du Lampsar où il y a une forte concentration de périmètres irrigués, et par certains endroits aménagés, mais relativement distants des cours d'eau. En effet, la nappe est globalement moins profonde dans les piézomètres autour du Lampsar qui ont connu, durant la période d'étude, les plus fortes fluctuations du niveau de la nappe et dans certains ouvrages en zones irriguées. Globalement la nappe a subi une variation positive de son niveau entre 1989 et 1990 dans le delta.

Comme la profondeur, la conductivité électrique est également tributaire du régime saisonnier des cours d'eau. L'étude montre que ses variations sont fortement corrélées avec les fluctuations de la profondeur de la nappe. Les variations de la CE sont positives entre 1989 et 1990, alors qu'en 1997, elles sont restées beaucoup plus faibles. Cependant l'écart des valeurs entre les deux premières années et l'année 1997 est difficile à expliquer d'autant plus que les relevés n'ont pas été faits par le même organisme et que des métadonnées n'ont pas été fournies pour expliquer les conditions d'échantillonnage, les appareils utilisés et les unités de mesures concernées.

Le pH est presque neutre sur tout le territoire. Il est très corrélé à la conductivité électrique et donc à la variation saisonnière du niveau de la nappe.

La cartographie de la dégradation des terres montre que les aménagements de la SAED comportent moins de risque de dégradation que les aménagements privés où les niveaux de dégradation les plus élevés sont observés.

Comme il a été souligné dans le chapitre de l'introduction, cette étude n'a pas bénéficié de données très complètes et très précises. Ainsi, dans la moyenne vallée, l'étude des mécanismes d'échange entre les eaux souterraines et celles de surface, aurait certainement gagné en précision, si des informations complètes avaient été disponibles pour les trois nappes de la vallée pour la période d'avant-barrages, mais aussi pour une période ultérieure à 1990.

Dans le delta, une qualité identique des données concernant les cours d'eau (chimie, points d'eau permanents, etc.) et les conditions d'irrigation (emplacement des canaux d'irrigation, position des cuvettes éventuelles, système de drainage, etc.), de même qu'une distribution plus uniforme des piézomètres dans le territoire, auraient fourni plus de détails sur le rôle réel joué par l'irrigation sur la nappe et par conséquent sur les variations de la CE et du pH.

### **Critique et pistes de recherche**

Le présent mémoire présente les résultats d'un travail de recherche utilisant des outils de géomatique (SIG et SGBDR) pour réaliser des traitements d'analyse spatiale à des fins d'étude de nappe souterraine et de dégradation des sols par remontée de salinité dans un contexte d'irrigation.

Même si les résultats obtenus au cours de cette étude établissent une certaine corrélation entre la profondeur de la nappe, la dégradation par remontée d'eaux salines et les pratiques d'irrigation dans le delta, il reste qu'il ne faudrait peut-être pas en tirer des conclusions absolues et cela pour des raisons qui tiennent à la fois à la qualité de l'information de base et à la méthodologie employée pour traiter cette information. Les remarques suivantes résument globalement les questions soulevées par le premier point :

- le problème d'intégrité (troncature des décimaux) et d'exhaustivité (32 piézomètres) des données ;
- l'absence de métadonnées expliquant comment les mesures ont été réalisées, avec quels types d'appareils, et dans quels types de conditions ;
- l'absence d'une carte de situation de l'irrigation propre aux années considérées dans l'étude (une approximation a été faite avec la carte de 1994)
- le manque d'information sur les périmètres (volumes d'eau percolés) mis en valeur par rapport à ceux qui ne le sont pas pour les périodes saisonnières.

Quant aux interrogations relatives au deuxième point, elles tiennent pour l'essentiel aux modèles utilisés pour réaliser les interpolations et pour cartographier la dégradation des sols. Au niveau des interpolations d'abords, un seul modèle (IDW) a été utilisé de façon systématique tout au long de l'étude. Ce modèle, bien que très souvent fonctionnel pour l'estimation de variables caractérisant les nappes d'eau souterraines, connaît certaines limites liées à la densité des points échantillonnés, au rayon de recherche des points voisins et aux valeurs extrêmes prises par certaines mesures. Dans le cas présent, la pauvreté des points de mesures et leur structuration selon un patron plutôt linéaire, pourraient entacher les interpolations de certaines erreurs qui se propageraient dans les analyses spatiales subséquentes. Le modèle de dégradation des sols par remontées d'eau saline est basé sur un raisonnement qualitatif principalement dans la pondération des facteurs principaux supposés être responsables de cette dégradation. De ce fait, bien que ce raisonnement

s'apparente beaucoup à des exemples souvent rencontrés dans la littérature (exemple modèle américain de vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC), il n'en demeure pas moins que le caractère intuitif de ce genre de modèle soulève un certain nombre d'objections surtout dans la manière de pondérer les facteurs causatifs du phénomène à cartographier. Il s'y ajoute dans notre cas, comme conséquence à la pauvreté des données obtenues, la probabilité que certains facteurs de dégradation non moins importants soient omis.

Étant entendu que la qualité moyenne des données est acceptable, des améliorations substantielles pourraient être apportées à ce travail notamment au point de vue des traitements. Il pourrait s'agir en premier lieu de régionaliser les variables étudiées en utilisant les techniques de krigeage qui optimisent l'interpolation aux endroits non échantillonnés même pour un échantillonnage clairsemé à l'image du cas étudié. Cette procédure suppose au préalable, d'une part, de vérifier l'autocorrélation spatiale des variables pour déterminer des tendances éventuellement sous-jacentes dans leurs variations, et d'autre part, d'estimer par un variogramme la structure, l'échelle et les pondérations en fonction de la distance à appliquer pour l'interpolation spatiale. Les résultats obtenus pourraient servir au modèle de dégradation des sols, mais cette fois sur une base quantitative. L'approche quantitative déterminerait en effet, les poids réels des facteurs en cause dans la dégradation. Elle consisterait à diviser les valeurs de CE observées, en classes de salinité (cf. IV.2.2.5.4) représentant la fonction de dégradation, et à mettre ces classes en relation dans une échelle de salinité, avec les facteurs de dégradation identifiés comme tel, en considérant les relations individuelles entre ces facteurs et la CE. Ce qui reviendrait alors à étudier la relation entre la salinité et les facteurs de dégradation, et à déterminer les poids de ces facteurs qui ne seraient autre que les coefficients d'une régression multiple salinité vs facteurs. Les facteurs pondérés de cette manière là, permettraient de prédire la dégradation des terres même dans des zones non documentées ; ce qui devrait contribuer à une meilleure gestion de l'irrigation.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aronoff S., 1989. *Geographic Information systems : A Management Perspective*, WDL Publications, Ottawa. 294 p

Bonham-Carter, G. F., 1994. *Geographic information systems for geoscientists : modeling with GIS*. 399p.

Castany, G., 1982. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. 230 p.

Collet C., 1992. *Systèmes d'information géographique en mode image*. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne. 186 p

Cuppens et Kane, 1998. *Suivi des piézomètres dans le Delta du fleuve Sénégal*. Projet Gestion de l'Eau. Bulletin Technique n°15, 1998, SAED, DPDR, St-Louis, Sénégal. 32 p.

Dennis A., 1998. *Surface Water Modeling in South Texas*, December, 1998. GIS Term project, GIS 394-K3. Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin.

Dieng B., 1997. *Synthèse et Analyse de données de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal*. Rapport annexe. OMVS, Direction des infrastructures régionales. 172 p.

Engineering Computer Graphics Laboratory, 1997. *GISHydro97, GMS - Groundwater Modeling System* Brigham Young University. Online paper. 23 p.

*ESRI ARC NEWS*, Winter 1998/1999, Numéro 4, Volume 20, page 10

*ESRI ARC NEWS*, SPRING 1999, Numéro 1, Volume 21, pages 11 et 28

Hellweger F. et Maidment D. R., 1997. HECprepro. Center for Research in Water Resources. The University of Texas at Austin. Online report. 63 p.

King D. et al., 1990. *Description des unités cartographiques des sols (DUCS-DONESOL) - Concepts et glossaire*. I.N.R.A.-S.E.S.C.P.F. 42 p.

King D. et Daroussin J., 1991. *Proposition d'une structure de bases de données géographiques pour l'informatisation de la carte des sols des Communautés Européennes*. Géomètre. n°8-9. pp. 38-44

Loyer J. Y., 1989. *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal*. ORSTOM, Collection Études et Thèses, Paris, France. 137 p.

Maidment D. R., 1996. *GIS and hydrologic modeling - an assessment of progress*. Third international conference/workshop integrating GIS and environmental modeling. Santa Fe, New Mexico, 22-26 Janvier 1996. 63 p. Online report.

Maidment D. R et Wilson L. H, 1999. *Implanting GIS in Chemical Risk Assessment*, April 1999. 96 p. Online presentation.

Maidment D. R. et Reed S. M., 1996. *Exercise 3: Soil water balance in West Africa*. FAO/UNESCO Water Balance in Africa. Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin. November 1996. GIS Class.

Microsoft® Access 1997. Copyright © 1989-1997 Microsoft Corporation. *Aide en ligne de Microsoft Access*.

Niazi S., 1998. *GIS and MODFLOW for Modeling Geographically Referenced Subsurface Systems*. CE 394 K3, December 5, 1998. Online report. 40 p.

Oliviera F. et al., 1995. *Mean-Annual Water Balance of the Niger River, West Africa. Predicting the Water Balance of Surface and Ground Water Resources Over Large Areas*

UNESCO Symposium on Runoff Computations for Water Projects, St. Petersburg, Russia, Oct. 30 - Nov. 3, 1995. Online report.

OMVS, 1990. Repris de Cuppens et Kane 1998. *Suivi des piézomètres dans le Delta du fleuve Sénégal. Projet Gestion de l'Eau*. Bulletin Technique n° 15, 1998, SAED, DPDR, St-Louis, Sénégal. 32 p.

Planification des ressources en eau, 1994. *Bilan-Diagnostic des Ressources en Eau du Sénégal*, 1994. Projet MH/PNUD/DADSG-SEN/87/006., Septembre 1994. Ministère de l'Hydraulique. Programme des Nations Unies pour le Développement.. 200 p

Rochette R. M., 1993. *Planification des ressources en eau. Rapport du consultant socio-géographe*. Dakar, juin 1993. Projet PNUD/DG/DDES/SEN/87/006. Ministère de l'Hydraulique, Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique, Programme des Nations Unies pour le Développement, Département du développement économique et social. 55 p.

Rochette R. M., 1993. *Planification des ressources en eau, Synthèse des ressources en eau. Eaux souterraines, Cartographie des systèmes aquifères (Piézométrie, Géométrie, Salinité)*. Projet PNUD/DG/DADSG/SEN/87/006. Ministère de l'Hydraulique, Direction du Génie Rural et de l'Hydraulique, Programme des Nations Unies pour le Développement, Département d'Appui au Développement et aux Services de Gestion. 48 p.

Rochette R. M., 1994. *Planification des ressources en eau. Rapport du consultant socio-géographe*. Dakar, juin-juillet 1994. Projet SEN/87/006. Ministère de l'Hydraulique, Service de Gestion et de Planification des Ressources en eau (SGPRE), Programme des Nations Unies pour le Développement (U.N.D.A.D.S.G.). 47 p.

SAED, 1995/1996. *Recueil des statistiques de la vallée du fleuve Sénégal. Annuaire 1995/1996*, version résumée. 64 p.

Thériault, M., 1994. *Systèmes d'information géographique Notes de cours*, Marius Thériault et Yves Brousseau. Département de géographie, Université Laval

Valdez P., 1998. *GIS Term Project Estimating Crop Irrigation Needs*, GIS 394-K3 December, 1998. Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin. Online report.

Ye Z. et al, 1996 : *Map-Based Surface Water Simulation Model*. Center for Research in Water Resources The University of Texas at Austin. Online report. 33 p.

Ye Z. et Maidment D. R., 1996. *Map-Based Groundwater Simulation Model*. Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin. Online report. 13 p.



## PAGES WEB VISITÉES

<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment>

*Mapping Environmental Data Stored in Microsoft Access.*

<http://www.engr.utexas.edu/giswr/secure/Module8/exercise/webfiles/riskmap.html>

*Environmental Protection Agency*

<http://www.epa.gov>

*Integrated Risk Information System (IRIS)*

<http://www.epa.gov/iris>

*Pennsylvania Department of Environmental Protection*

(<http://www.dep.state.pa.us>)

*Pennsylvania U.S. Geological Survey for water data*

<http://pa.water.usgs.gov>

*Spatial Analysis of the Marcus Hook Refinery*

<http://www.ce.utexas.edu/stu/kimj/proposal.html>

*Surface Water Modeling for the Marcus Hook Refinery*

<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/grad/romanek/home.html>

*U.S. Geological Survey*

<http://www.usgs.gov>

<http://www.ecgl.byu.edu/software/gms/gms.html>

*Introduction to Spatial Hydrology by David R. Maidment*

<http://campus.esri.com/campus/home/home.cfm>

*Systèmes d'information géographiques GGR-18708 et GGR-60449*

<http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/SIG.html>

## **ANNEXE A**

**Rapports de simulations des lames d'eau de pluies infiltrée à la nappe et ruisselée au niveau des quatre stations pluviométriques de la moyenne vallée**

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**

Feuille: [Optimum.xls]data

MATAM\_1987

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$13	(Pmes-Pcal)^2	74119.97973	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$13	ETP	255	171.9165969
\$G\$13	RFU	280.249848	197.166595
\$H\$13	LR	190	106.916808
\$I\$13	LI	23	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$13	ETP	171.9165969	\$F\$13<=401.5	Non lié	229.5834031
\$H\$13	LR	106.916808	\$H\$13>=0	Non lié	106.916808
\$I\$13	LI	0	\$I\$13>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**

Feuille:

[Optimum.xls]data

MATAM\_1988

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$15	(Pmes-Pcal)^2	107584	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$15	ETP	255	152.6666137
\$G\$15	RFU	280	177.6666817
\$H\$15	LR	190	87.66670461
\$I\$15	LI	21	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$15	LR	87.66670461	\$H\$15>=0	Non lié	87.66670461
\$F\$15	ETP	152.6666137	\$F\$15<=401.5	Non lié	248.8333863
\$I\$15	LI	0	\$I\$15>=0	Lié	0

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation

MATAM\_1989

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$18	(Pmes-Pcal)^2	112,896.00	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$18	ETP	265	155.9997164
\$G\$18	RFU	278	169.0003847
\$H\$18	LR	121	11.99989895
\$I\$18	LI	9	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$18	ETP	155.9997164	\$F\$18<=401.5	Non lié	245.5002836
\$H\$18	LR	11.99989895	\$H\$18>=0	Non lié	11.99989895
\$I\$18	LI	0	\$I\$18>=0	Lié	0

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation

MATAM\_1990

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$19	(Pmes-Pcal)^2	127449	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$19	ETP	260	147.333303
\$G\$19	RFU	290	177.333212
\$H\$19	LR	140	27.33348502
\$I\$19	LI	19	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$19	LR	27.33348502	\$H\$19>=0	Non lié	27.33348502
\$F\$19	ETP	147.333303	\$F\$19<=401.5	Non lié	254.166697
\$I\$19	LI	0	\$I\$19>=0	Lié	0

Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses  
Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation  
PODOR\_1987

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$26	(Pmes-Pcal)^2	171396	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$26	ETP	200	67
\$G\$26	RFU	250	116.9999088
\$H\$26	LR	150	17.00009118
\$I\$26	LI	15	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$26	ETP	67	\$F\$26<=2190	Non lié	2123
\$H\$26	LR	17.00009118	\$H\$26>=0	Non lié	17.00009118
\$I\$26	LI	0	\$I\$26>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**  
**Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation**  
**PODOR\_1988**

Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$27	(Pmes-Pcal)^2	115600	0

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$27	ETP	215	105.0002002
\$G\$27	RFU	250	139.9995084
\$H\$27	LR	170	60.00029141
\$I\$27	LI	10	0

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	Etat	Marge
\$F\$27	ETP	105.0002002	\$F\$27<=2190	Non lié	2084.9998
\$H\$27	LR	60.00029141	\$H\$27>=0	Non lié	60.00029141
\$I\$27	LI	0	\$I\$27>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**  
**Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation**  
**PODOR\_1989**

Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$28	(Pmes-Pcal)^2	38416	0

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$28	ETP	146	82.33337898
\$G\$28	RFU	260	196.3331964
\$H\$28	LR	120	56.33342463
\$I\$28	LI	5	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$28	LR	56.33342463	\$H\$28>=0	Non lié	56.33342463
\$F\$28	ETP	82.33337898	\$F\$28<=2190	Non lié	2107.666621
\$I\$28	LI	0	\$I\$28>=0	Lié	0

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation

PODOR\_1990

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$28	(Pmes-Pcal)^2	149769	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$28	ETP	146	15.00014595
\$G\$28	RFU	260	128.9998541
\$H\$28	LR	120	1.42109E-14
\$I\$28	LI	5	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$28	LR	1.42109E-14	\$H\$28>=0	Lié	0
\$F\$28	ETP	15.00014595	\$F\$28<=2190	Non lié	2174.999854
\$I\$28	LI	0	\$I\$28>=0	Lié	0

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation

DAGANA\_1987

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$36	(Pmes-Pcal)^2	305809	0



## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$36	ETP	292	73.49991433
\$G\$36	RFU	340	121.5000857
\$H\$36	LR	90	7.10543E-15
\$I\$36	LI	26	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$36	ETP	73.49991433	\$F\$36<=693.5	Non lié	620.0000857
\$H\$36	LR	7.10543E-15	\$H\$36>=0	Lié	0
\$I\$36	LI	0	\$I\$36>=0	Lié	0

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille:

[Optimum.xls]data

DAGANA\_1988

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$40	(Pmes-Pcal)^2	109892.25	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$40	ETP	250	150.166541
\$G\$40	RFU	200	100.1666315
\$H\$40	LR	108.5	8.666827491
\$I\$40	LI	32	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$40	ETP	150.166541	\$F\$40<=693.35	Non lié	543.183459
\$H\$40	LR	8.666827491	\$H\$40>=0	Non lié	8.666827491
\$I\$40	LI	0	\$I\$40>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**

Feuille:

[Optimum.xls]data

DAGANA\_1989

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$42	(Pmes-Pcal)^2	96,100.00	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$42	ETP	243	148.9999469
\$G\$42	RFU	200	105.9999249
\$H\$42	LR	110	16.00012818
\$I\$42	LI	28	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$42	ETP	148.9999469	\$F\$42<=693.35	Non lié	544.3500531
\$H\$42	LR	16.00012818	\$H\$42>=0	Non lié	16.00012818
\$I\$42	LI	0	\$I\$42>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**

Feuille: [Optiplusio.xls]Simulation

DAGANA\_1990

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$39	(Pmes-Pcal)^2	327184	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$39	ETP	292	63.99990727
\$G\$39	RFU	339	111.0000927
\$H\$39	LR	90	7.10543E-15
\$I\$39	LI	26	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$39	LR	7.10543E-15	\$H\$39>=0	Lié	0
\$F\$39	ETP	63.99990727	\$F\$39<=693. 5	Non lié	629.5000927
\$I\$39	LI	0	\$I\$39>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**  
**Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation**  
**Semmé\_1987**

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$48	(Pmes-Pcal)^2	89401	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$48	ETP	330	243.6665464
\$G\$48	RFU	205	118.6667268
\$H\$48	LR	200	113.6667268
\$I\$48	LI	40	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$48	ETP	243.6665464	\$F\$48<=1764	Non lié	1520.333454
\$H\$48	LR	113.6667268	\$H\$48>=0	Non lié	113.6667268
\$I\$48	LI	0	\$I\$48>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**  
**Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation**  
**Semmé\_1988**

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$49	(Pmes-Pcal)^2	400	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$49	ETP	326	320.9999827
\$G\$49	RFU	200	194.9999985
\$H\$49	LR	190	184.9999994
\$I\$49	LI	30	25.00001943

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$49	LR	184.9999994	\$H\$49>=0	Non lié	184.9999994
\$F\$49	ETP	320.9999827	\$F\$49<=1764	Non lié	1443.000017
\$I\$49	LI	25.00001943	\$I\$49>=0	Non lié	25.00001943

## Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses

Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation

Semmé\_1989

## Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$50	(Pmes-Pcal)^2	38,416.00	0

## Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$50	ETP	327	273.99987
\$G\$50	RFU	202	149.0000493
\$H\$50	LR	181	128.0000807
\$I\$50	LI	37	0

## Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$F\$50	ETP	273.99987	\$F\$50<=1764	Non lié	1490.00013
\$H\$50	LR	128.0000807	\$H\$50>=0	Non lié	128.0000807
\$I\$50	LI	0	\$I\$50>=0	Lié	0

**Microsoft Excel 8.0 Rapport des réponses**  
**Feuille: [Optipluvio.xls]Simulation**  
**Semmé\_1990**

Cellule cible (Min)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
SE\$51	(Pmes-Pcal)^2	244036	0

Cellules variables

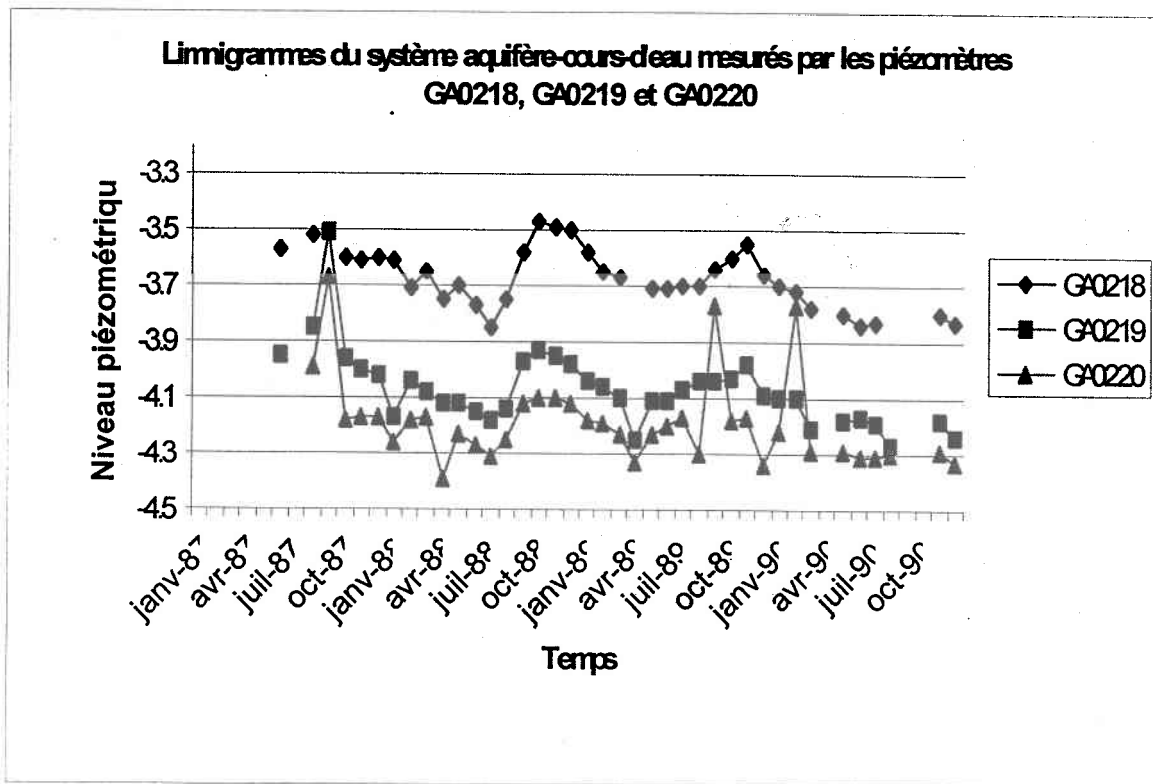
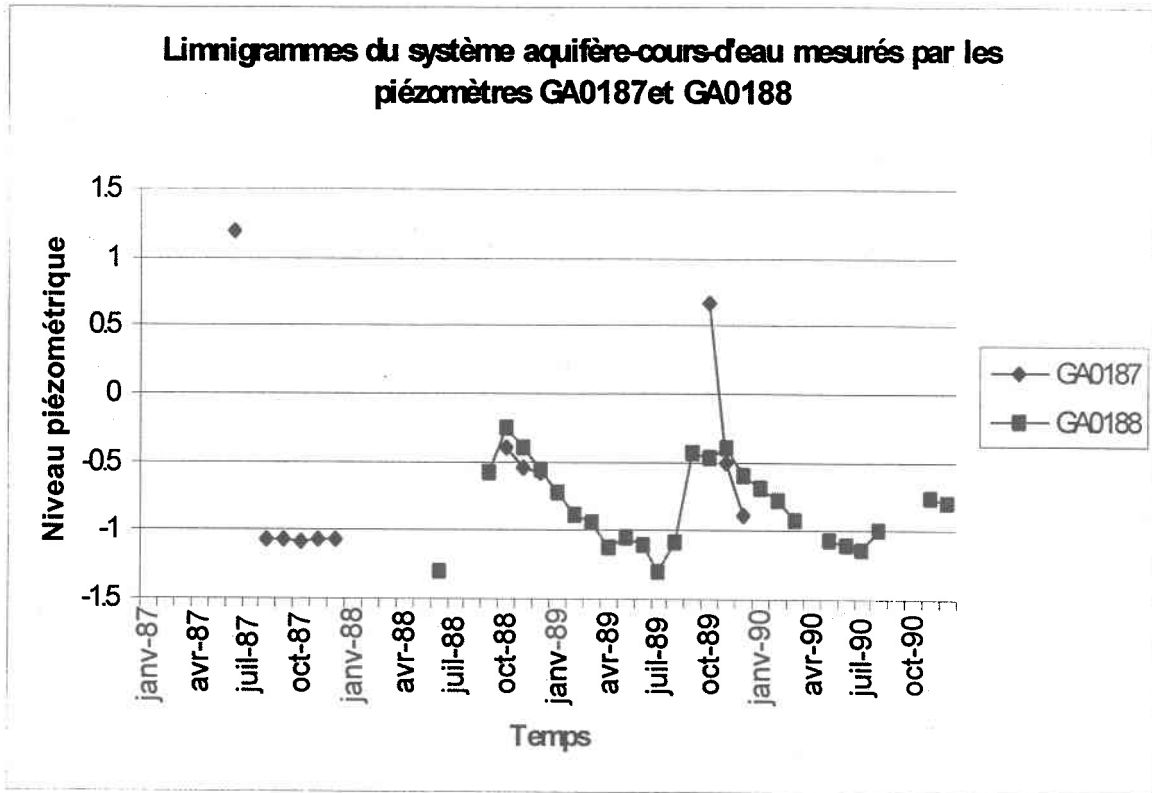
Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	ETP	320	170.3332427
\$G\$51	RFU	250	100.3333333
\$H\$51	LR	210	60.33342396
\$I\$51	LI	45	0

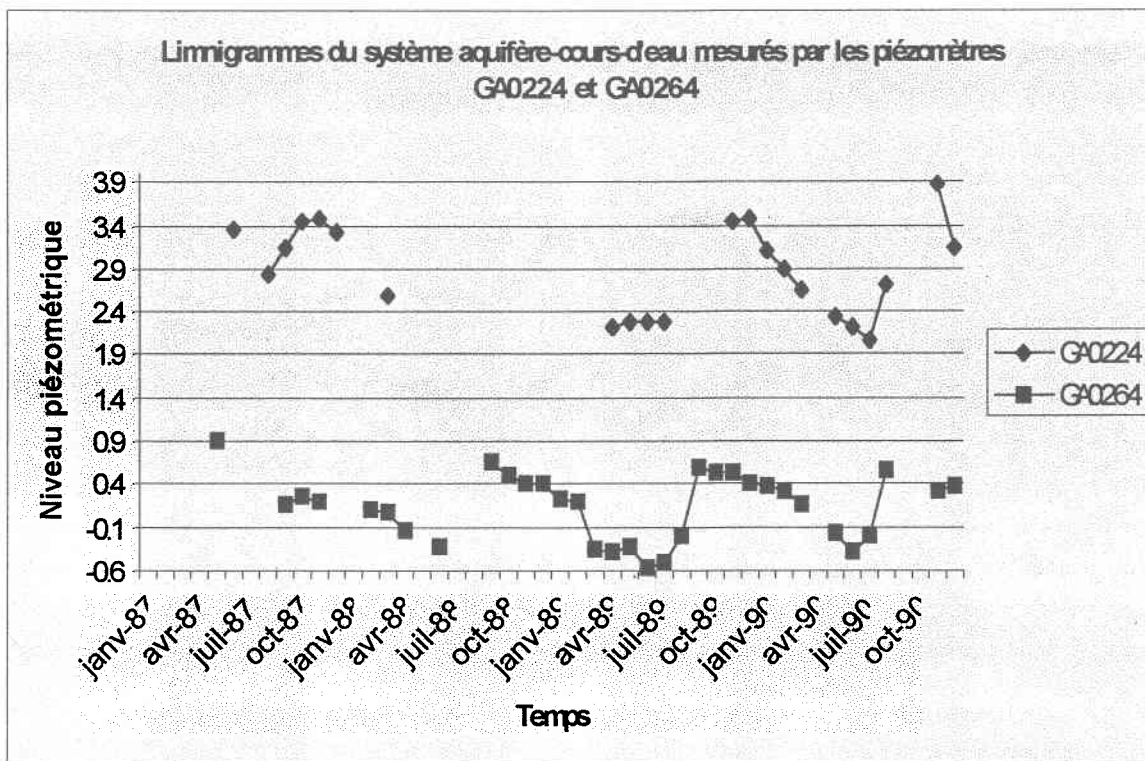
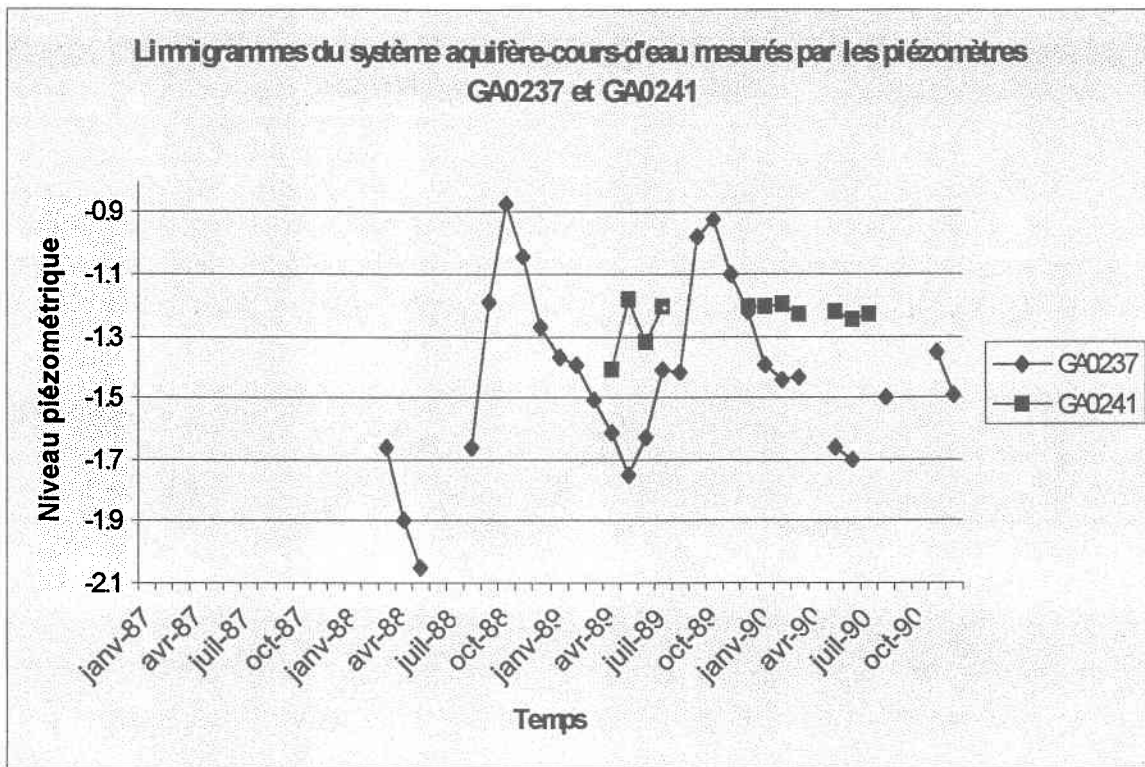
Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$H\$51	LR	60.33342396	\$H\$51>=0	Non lié	60.33342396
\$F\$51	ETP	170.3332427	\$F\$51<=1764	Non lié	1593.666757
\$I\$51	LI	0	\$I\$51>=0	Lié	0

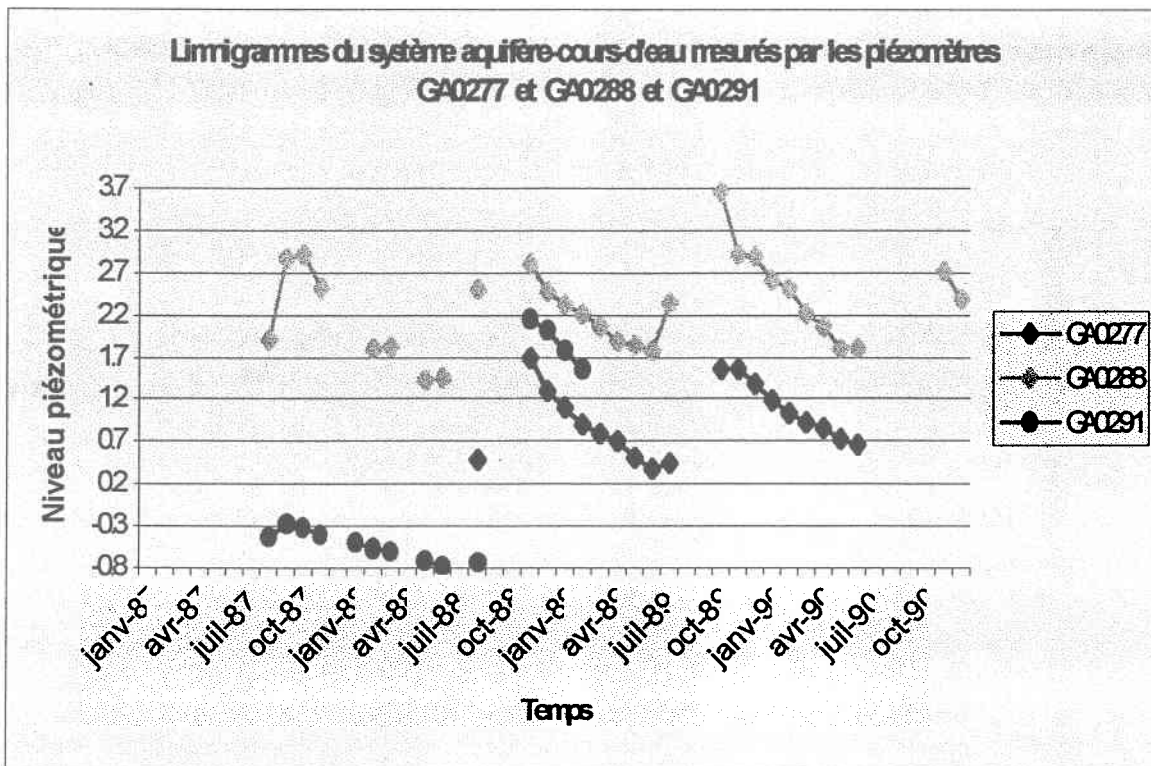
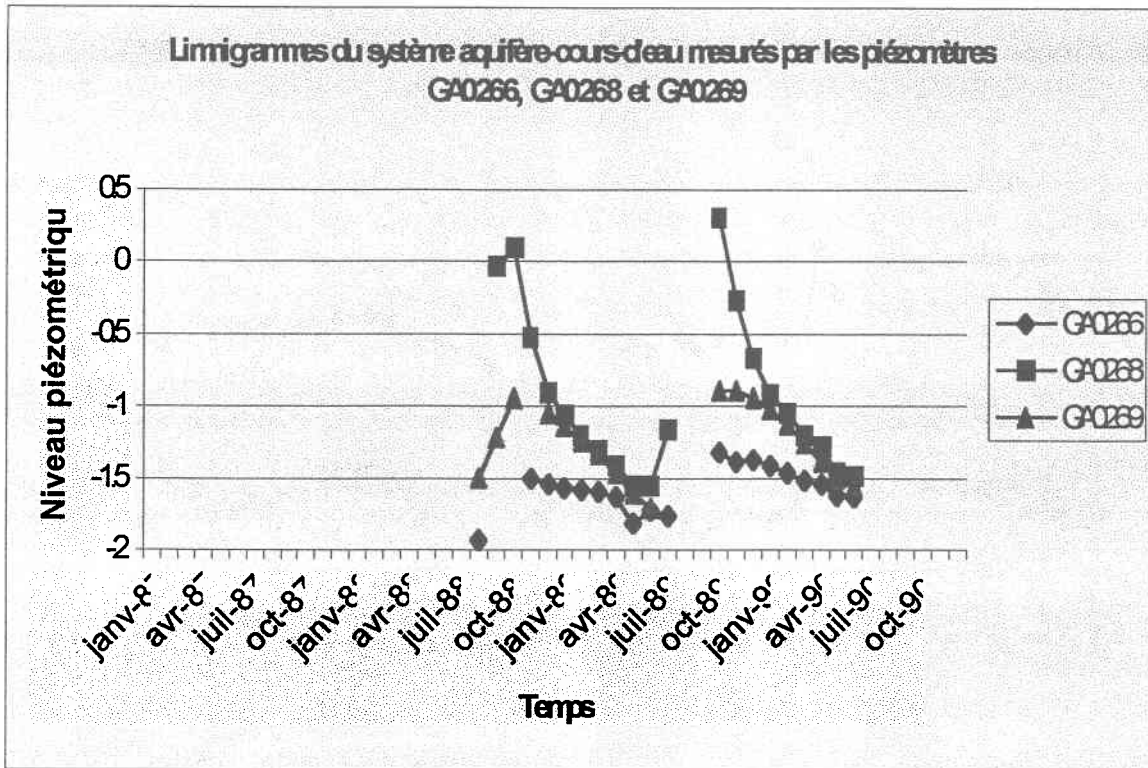
## **ANNEXE B**

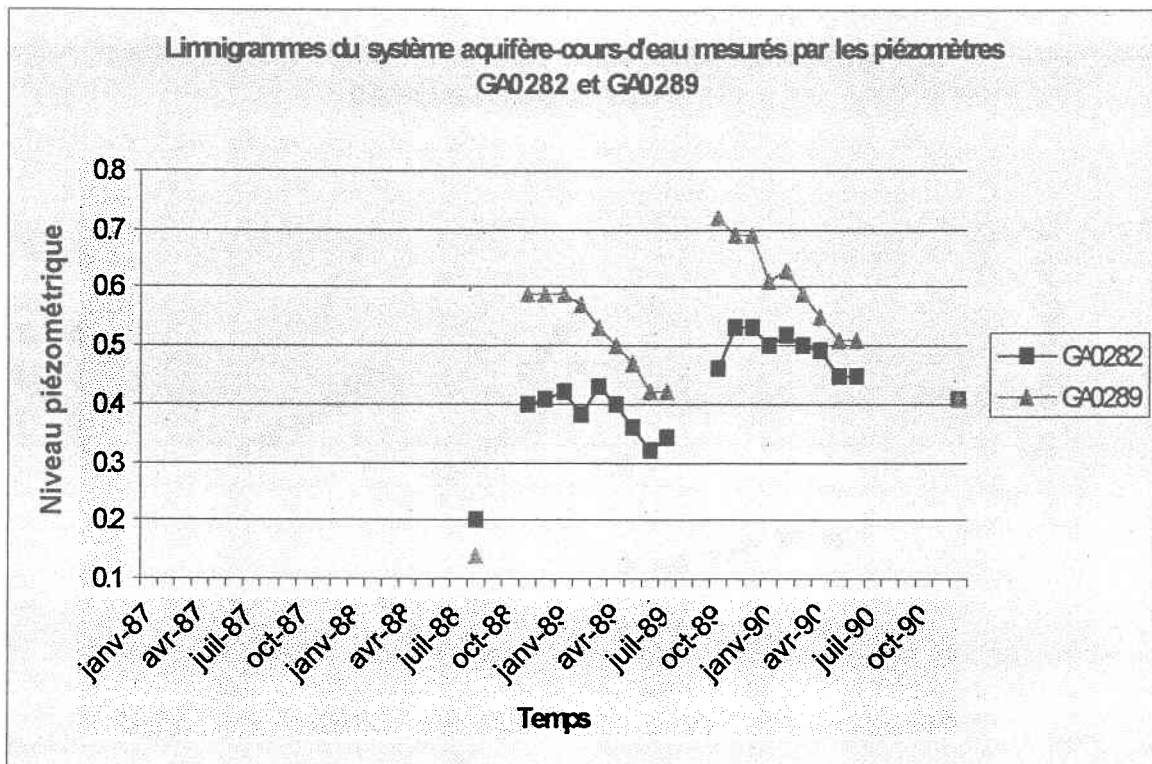
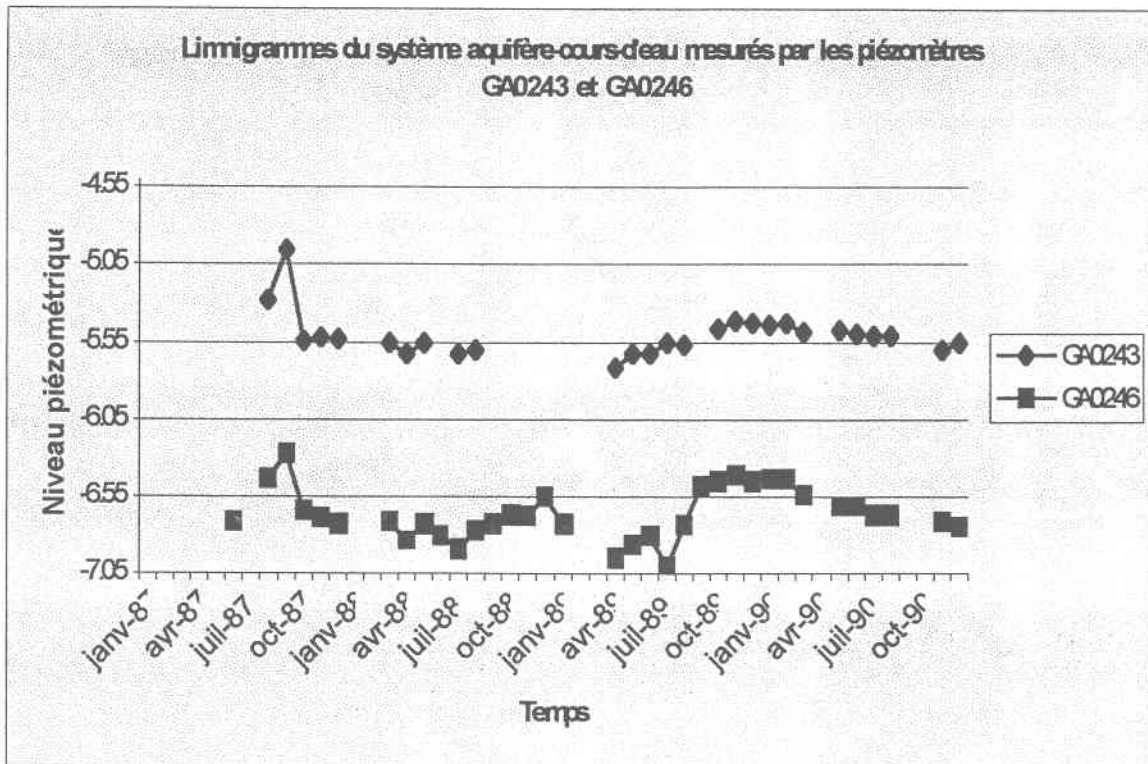
Limnigrammes piézométriques des nappes superficielle (28 piézomètres), intermédiaire (8 piézomètres) et profonde (7 piézomètres)

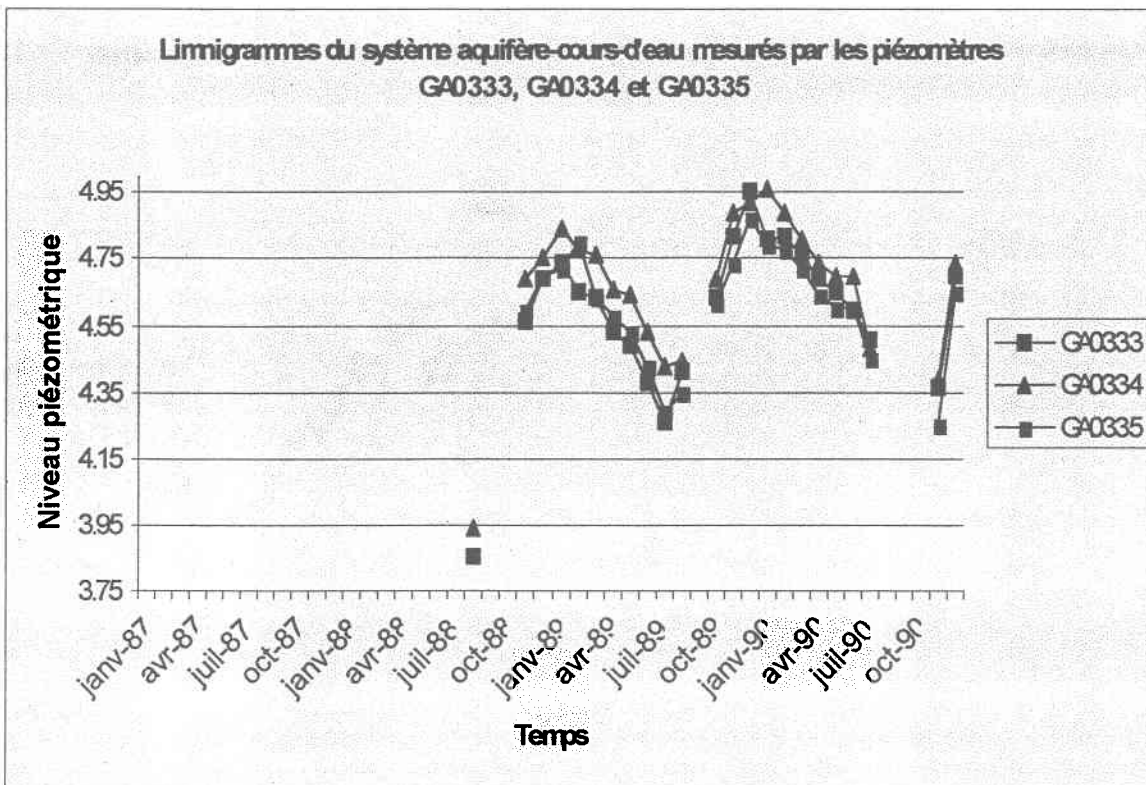
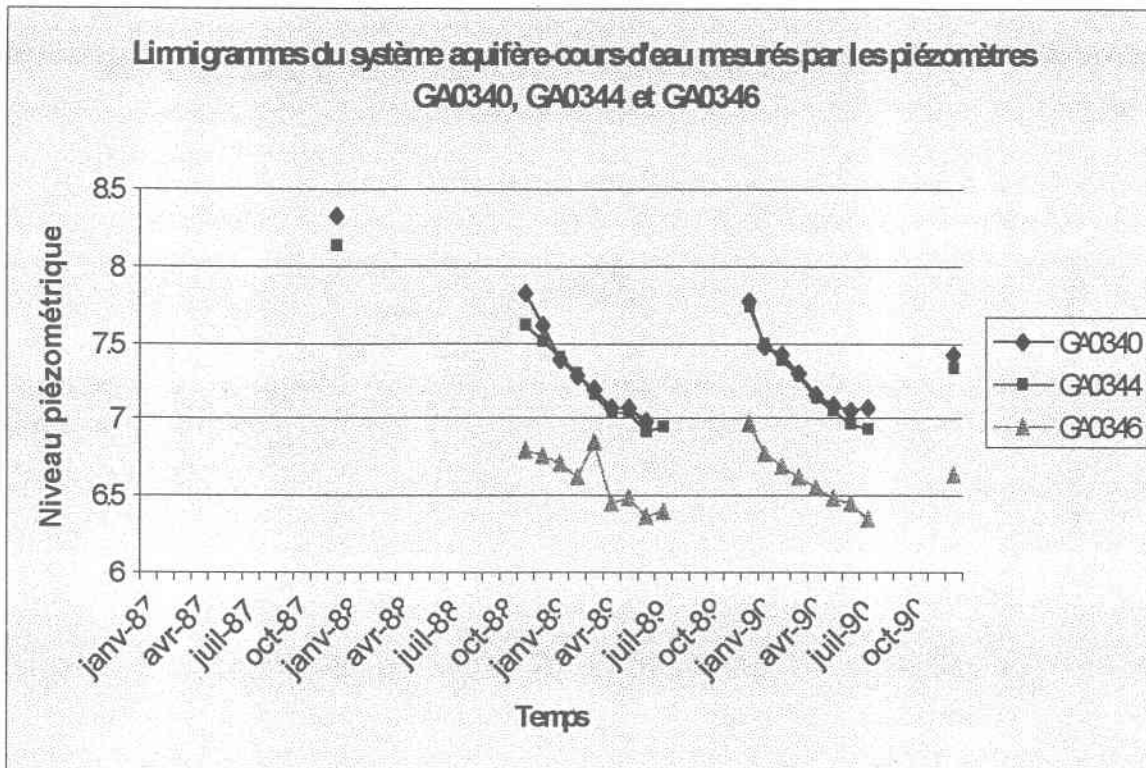


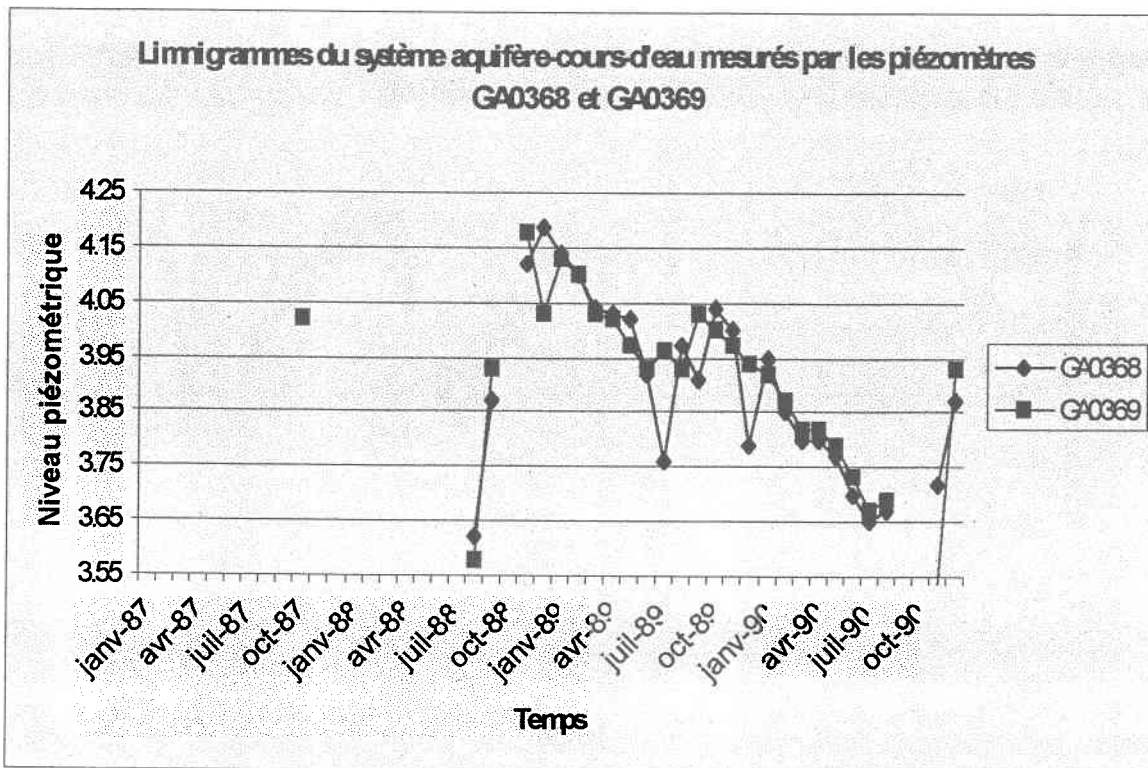
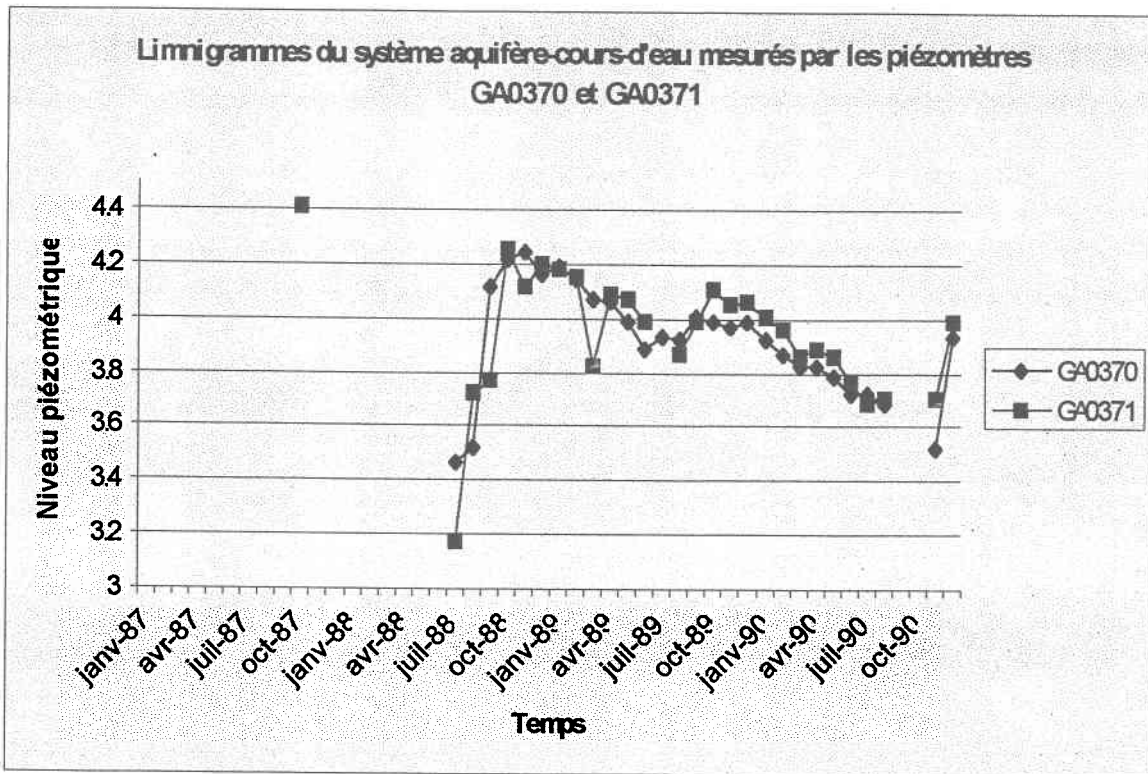


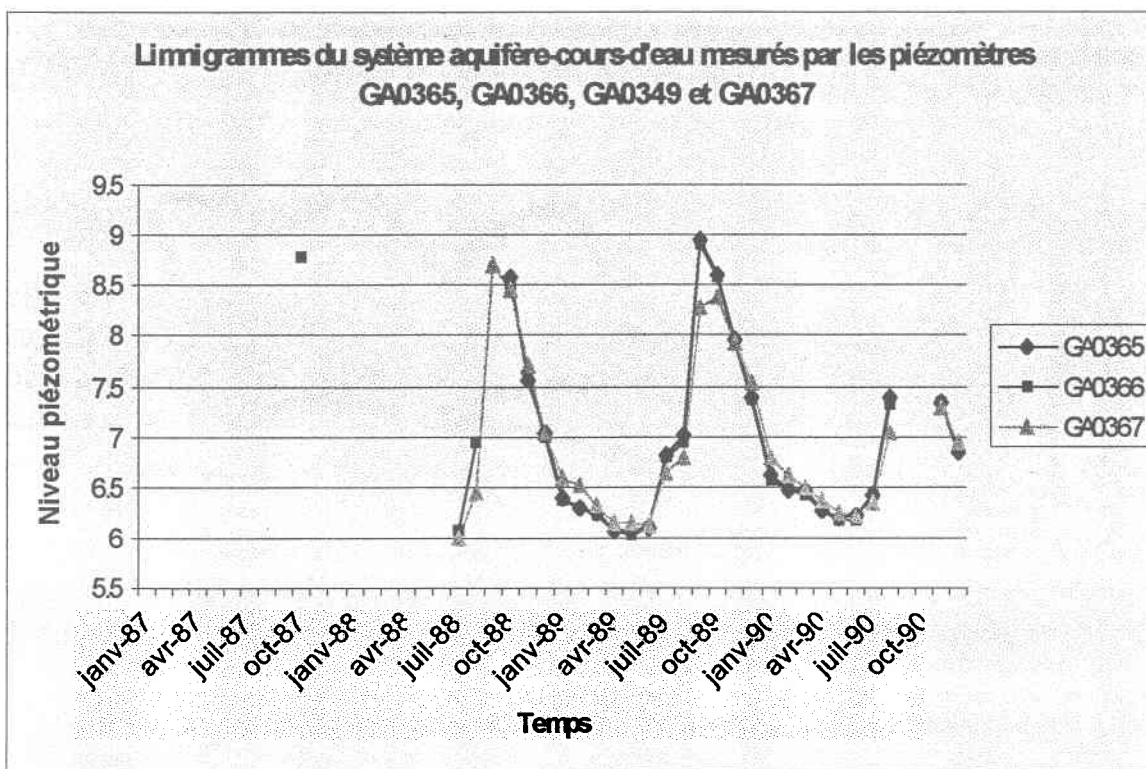
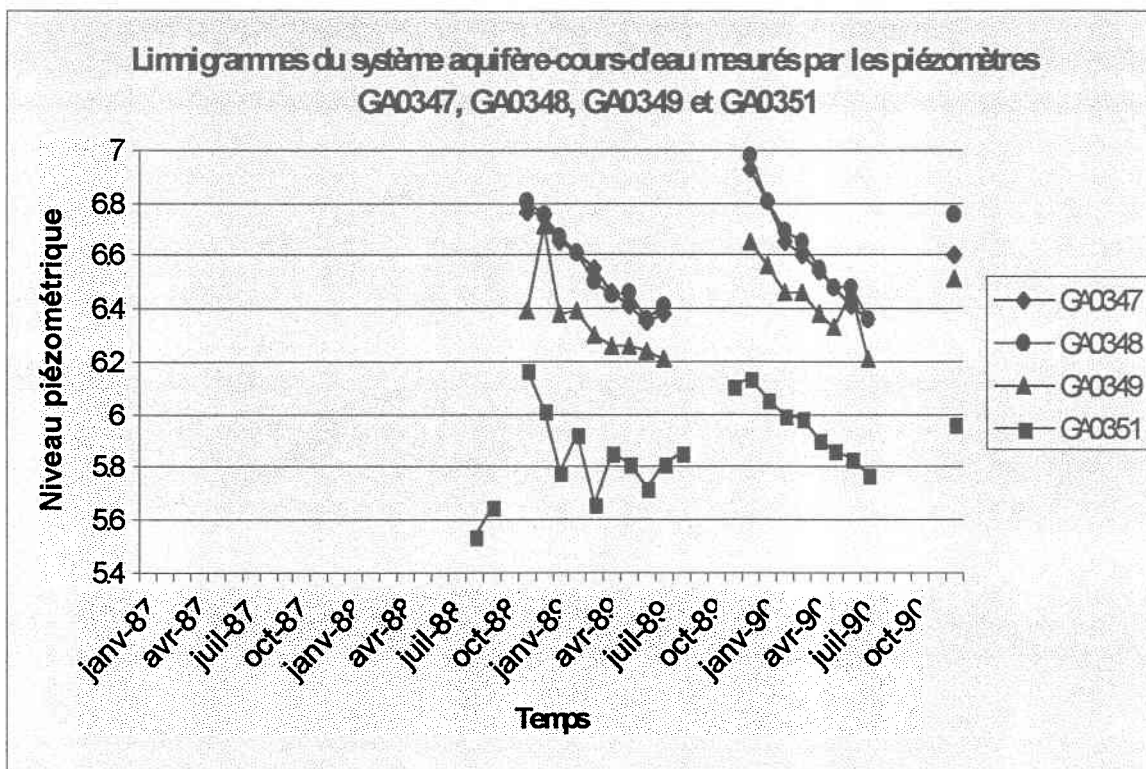


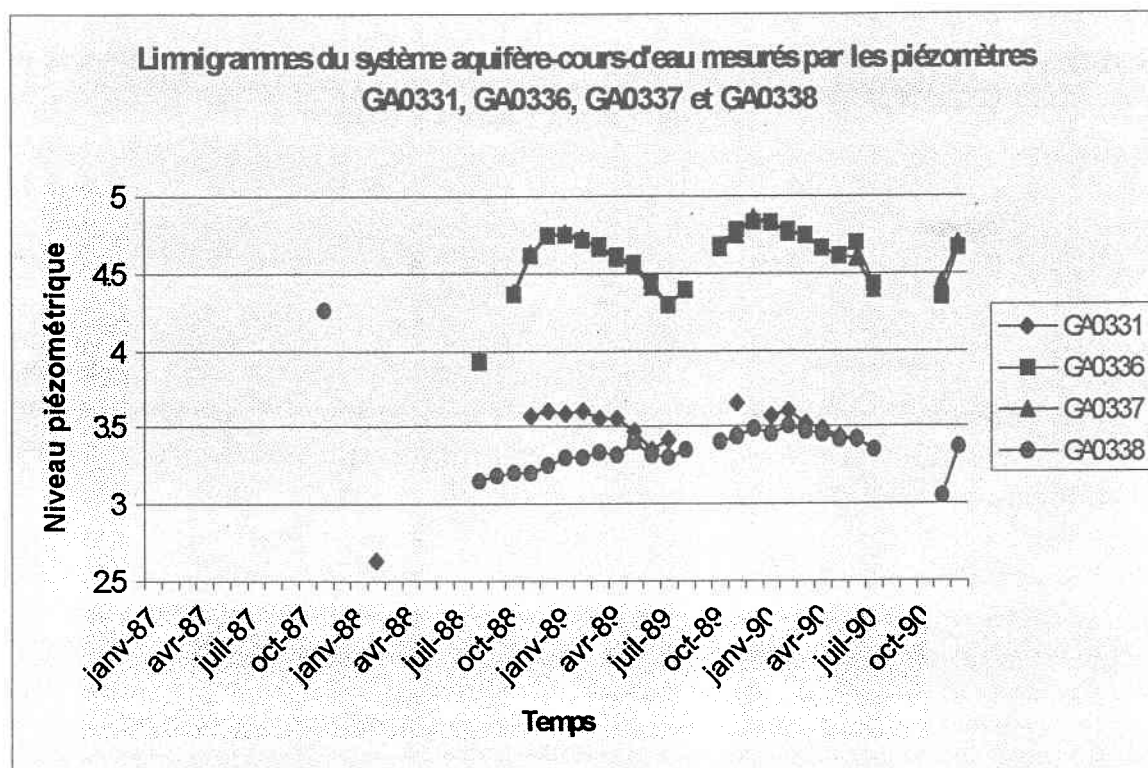
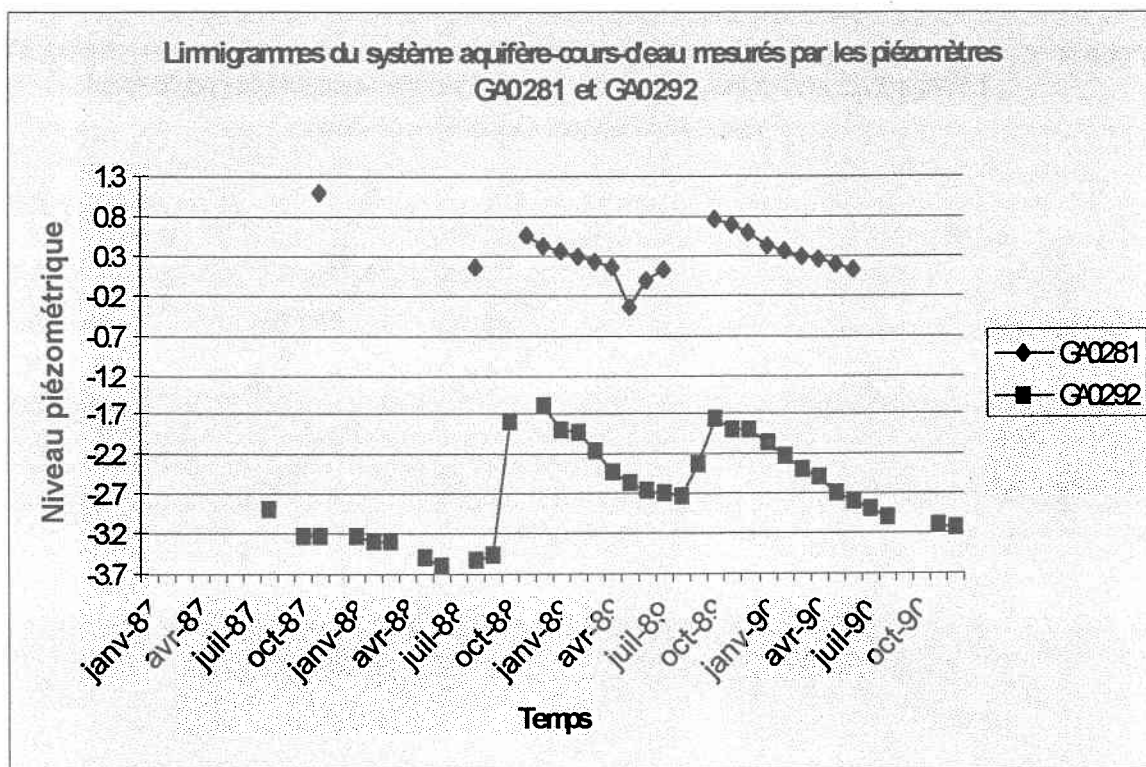












## **ANNEXE C**

**Banque de données de la moyenne vallée**

HAUTEURS LIMNIMÉTRIQUES DU FLEUVE SÉNÉGAL ENTRE 1987 ET 1990

ID_LIMNI	X	Y	STATION	BE_1987	BE_1988	BE_1989	BE_1990	HE_1987	HE_1988	HE_1989	HE_1990
7	-15.8278	16.5014	Rosso	-0.20	0.00	0.00	0.15	1.65	2.30	1.80	1.50
8	-15.5261	16.5217	Dagana	-0.20	0.04	0.05	0.13	1.75	2.73	2.13	1.58
9	-14.9756	16.6553	Podor	-0.06	0.13	0.06	0.25	2.37	4.33	3.50	2.00
11	-14.7542	16.5472	Gu. Chantier	0.31	0.58	0.50	0.63	4.50	6.50	5.82	3.91
12	-13.8861	16.1611	Salde	1.00	-1.34	1.50	-1.00	6.00	9.84	9.00	3.50
16	-12.4569	14.9069	Bakel	12.00	12.00	12.20	12.25	21.25	16.00	19.50	16.00

PLUVIMÉTRIE (P) ET RUISSELLEMENT (R) ENTRE 1987 et 1990

ID_PLUVIO	X	Y	STATION	P_87	P_88	P_89	P_90	R_87	R_88	R_89	R_90
1	-15.5261	16.5217	Dagana	195	259	271	175	0.00	8.67	16.00	0.00
2	-14.9756	16.6553	Podor	201	305	335	144	17.00	60.00	56.33	0.00
3	-13.2917	15.6625	Matam	476	418	337	352	106.92	87.67	12.00	27.33
4	-12.9389	15.1972	Semmé	476	726	551	331	113.67	185.00	128.00	60.33

CARACTÉRISTIQUES DES PIÉZOMÈTRES DE LA NAPPE SUPÉRIEURE

ID_PIEZO	X	Y	Z	REPMES	PROFOUV	AQUIF	DISTEA	COURSDEAU
GA0165	446900	1828600	4.70	8.67	3.69	IN	3300	FL.sn
GA0166	446900	1828600	4.75	19.48	3.70	QT	3300	FL.sn
GA0171	449000	1829400	2.96	6.10	1.94	IN	4100	FL.sn
GA0187	452700	1831800	5.80	6.43	4.81	NK	290	FL.sn
GA0188	452700	1831800	5.84	28.80	4.84	QT	292	FL.sn
GA0218	475600	1827700	5.63	10.49	4.60	QT	21	Ngalenka
GA0220	475600	1826000	10.61	16.44	9.59	QT	1320	FL.sn
GA0224	505600	1833600	5.67	11.46	4.67	QT	800	Doué
GA0237	507200	1836600	4.89	44.20	3.89	QT	800	Doué
GA0241	506900	1831700	5.22	14.60	4.17	QT	2900	Doué
GA0243	508200	1827500	5.11	14.62	4.10	QT	400	Ngalenka
GA0246	509400	1825900	9.83	16.58	8.82	QT	100	Ngalenka
GA0266	547500	1832800	9.07	16.50	8.15	QT	550	Gayo
GA0269	553000	1825900	9.39	14.40	8.41	QT	93	Doué
GA0281	577100	1828400	10.12	19.50	9.14	QT	500	FL.sn
GA0282	577000	1826500	8.30	13.00	7.30	QT	1600	FL.sn
GA0288	574100	1818100	11.01	11.50	9.93	QT	88	Doué
GA0289	575200	1823000	7.96	39.00	7.08	QT	4100	Doué
GA0331	673300	1757500	13.63	29.60	12.66	QT	4800	FL.sn
GA0334	668900	1756100	14.54	29.30	13.50	QT	963	Tialougueul
GA0336	668900	1756100	14.41	29.45	13.46	QT	977	Tialougueul
GA0337	668900	1756100	14.44	11.50	13.47	QT	978	Tialougueul
GA0338	666800	1754700	15.21	29.40	14.14	QT	3300	Tialougueul
GA0344	702500	1720000	15.34	16.45	14.37	QT	2400	FL.sn



GA0346	700700	1718400	16.25	29.10	15.11	QT	3300	FL.sn
GA0348	700700	1718400	16.06	29.60	15.06	QT	3300	FL.sn
GA0349	700700	1718400	16.06	14.60	15.08	QT	3300	FL.sn
GA0351	698000		13.72	12.60	12.74	QT	5200	FL.sn
GA0366	687300	1732800	16.78	29.47	15.79	QT	80	FL.sn
GA0367	687300	1732800	16.75	11.45	15.79	QT	72	FL.sn

#### PIEZOMÉTRIE DE LA NAPPE SUPERFICIELLE

ID_PIEZO	ET_87	ET_88	ET_89	ET_90	HE_87	HE_88	HE_89	HE_90
GA0165	-0.97	-1.13	-1.13	-0.94	0.41	0.79	0.79	0.80
GA0166	-0.91	-1.09	-1.09	-0.91	-0.50	-0.76	0.82	0.82
GA0171	-1.38	-1.38	-1.32	-1.22	0.09	-0.50	-0.74	-0.85
GA0187	-1.08	-1.08	-0.88		1.20	-0.40	0.66	
GA0188			-1.31	-1.31			-0.26	-0.39
GA0218		-4.17	-4.25	-4.25		-3.51	-3.93	-3.98
GA0220		-4.39	-4.39	-4.33		-3.67	-4.10	-3.77
GA0224		2.59		2.06	3.35	3.48		3.48
GA0237			-2.05	-1.75			-0.87	-0.92
GA0241				-1.41				
GA0243		-5.62		-5.72		-4.95		-5.42
GA0246		-6.73	-7.00	-7.00		-6.27	-6.55	-6.41
GA0266			-1.94	-1.82			-1.51	-1.32
GA0269			-1.72	-1.72			-0.75	-0.89
GA0281			-0.33	-0.33			0.55	0.76
GA0282			0.20	0.34			0.43	0.53
GA0288		1.42	1.42	1.78		2.91	2.81	3.66
GA0289			0.14	0.36			0.59	0.72
GA0331			2.63	3.35			3.60	3.66
GA0334			3.94	4.43			4.84	4.96
GA0336			3.93	4.30			4.75	4.83
GA0337			3.94	4.29			4.77	4.86
GA0338		3.16	3.16	3.06		4.26	3.41	3.51
GA0344			6.92	6.92		8.13	7.62	7.74
GA0346			6.36	6.35			6.85	6.97
GA0348			6.36	6.36			6.81	6.98
GA0349			6.21	6.21			6.72	6.66
GA0351			5.54	5.66			6.17	6.14
GA0366		6.08	6.02	6.02		8.79	8.50	8.90
GA0367			6.00	6.13			8.70	8.37

**CARACTÉRISTIQUES DES PIÉZOMÈTRES DE LA NAPPE INTERMÉDIAIRE**

ID_PIEZO	X	Y	Z	REPMES	PROFOUV	AQUIF	DISTEA U	COURSDEAU
GA0219	475600	1826000	4.73	38.80	3.72	EM	690	Ngalenka
GA0264	447800	1807700	2.50	17.45	1.44	EC	85	Gayo
GA0268	553000	1825900	9.39	29.45	8.37	EM	95	Doué
GA0277	576500	1832200	9.48	39.30	8.44	EM	1400	FL.sn
GA0291	573000	1816500	9.70	14.50	8.59	EM	1900	Doué
GA0292	571800	1814100	10.51	25.51	9.45	EM	4500	Doué
GA0340	704100	1721500	16.62	49.50	15.64	EM	700	FL.sn
GA0365	687300	1732800	16.73	49.30	15.73	EC	72	FL.sn

**PIÉZOMÉTRIE NAPPE INTERMÉDIAIRE ENTRE 1987 ET 1990**

ID_PIEZO	ET_87	ET_88	ET_89	ET_90	HE_87	HE_88	HE_89	HE_90
GA0219		-3.85	-3.85	-3.83		-3.52	-3.47	-3.55
GA0264		-0.31	-0.57	-0.57		0.91	0.65	0.59
GA0268		-1.56	-1.56			0.10	0.31	
GA0277		0.38	0.38			1.68	1.57	
GA0291	-0.78	-0.78			-0.28	2.15		
GA0292	-3.60	-3.60	-3.14		-2.89	-1.59	-1.16	
GA0340		6.99	6.99		8.33	7.83	7.77	
GA0365		6.08	6.08			8.57	8.96	

**CARACTÉRISTIQUES DES PIÉZOMÈTRES DE LA NAPPE PROFONDE**

ID_PIEZO	X	Y	Z	REPMES	PROFOUV	AQUIF	DISTEA U	COURSDEAU
GA0333	668900	1756100	14.46	44.00	13.50	M	958	Tialougueul
GA0335	668900	1756100	14.40	49.20	13.42	M	976	Tialougueul
GA0347	700700	1718400	16.01	49.40	15.04	M	3300	FL.sn
GA0368	678300	1730400	21.47	49.30	20.46	M	9000	FL.sn
GA0369	678600	1730500	21.23	49.30	20.26	M	8700	FL.sn
GA0370	678200	1730400	21.37	31.40	20.39	M	8700	FL.sn
GA0371	678000	1730100	21.62	49.10	20.63	M	9200	FL.sn

**PIÉZOMÉTRIE NAPPE PROFONDE ENTRE 1987 ET 1990**

ID_PIEZO	ET_87	ET_88	ET_89	ET_90	HE_87	HE_88	HE_89	HE_90
GA0333			3.85	4.26			4.74	4.95
GA0335			4.29	4.25			4.80	4.87
GA0347			6.35	6.35			6.77	6.93
GA0368			3.62	3.67			4.19	4.04
GA0369			3.58	3.53		4.02	4.18	4.03
GA0370			3.47	3.52			4.24	4.01
GA0371			3.17	3.70		4.41	4.25	4.11

## DISTANCE PLUVIMÈTRES ET LIMNIMÈTRES PAR RAPPORT AUX PIÉZOMÈTRES (EN MÈTRES)

ID_PIEZO	ID_CDEAU	ID_LIMNI	ID_PLUVIO	DIST_LIMNI	DIST_PIUVIO	DISTEAU
GA0165	SEN01	8	1	1.3	1.3	3300
GA0166	SEN01	8	1	1.3	1.3	3300
GA0171	SEN01	7	1	32200	2.9	4100
GA0187	SEN01	8	1	6.8	6.8	290
GA0188	SEN01	8	1	6.8	6.8	292
GA0218	SEN02	9		31.9	1.3	21
GA0219	SEN02	9		32.1	0.3	690
GA0220	SEN01	9		32.1	0.3	1320
GA0224	SEN03	11	2	20.5	8	800
GA0237	SEN03	11	2	20	5.6	800
GA0241	SEN03	11	2	19.1	10.1	2900
GA0243	SEN02	11	2	17.7	14.5	400
GA0246	SEN02	11	2	17	16.6	100
GA0264	SEN04	11		21.6	11.2	85
GA0266	SEN04	11		21.6	11.2	550
GA0268	SEN03	11		26.9	14.5	95
GA0269	SEN03	11		26.9	14.5	93
GA0277	SEN01	10		1.7	2.2	1400
GA0281	SEN01	10		5.6	6.1	500
GA0282	SEN01	10		7.5	7.9	1600
GA0288	SEN03	11		50.2	5.6	88
GA0289	SEN03	10		12.7	10.7	4100
GA0291	SEN03	11		49.6	3.7	1900
GA0292	SEN03	11		49.5	1	4500
GA0331	SEN01	14		29.9	29.9	4800
GA0333	SEN05	14		29.3	29.3	958
GA0334	SEN05	14		29.3	29.3	963
GA0335	SEN05	14		29.3	29.3	976
GA0336	SEN05	14		29.3	29.3	977
GA0337	SEN05	14		29.3	29.3	978
GA0338	SEN05	12		57600	30.5	3300
GA0340	SEN01	15		19.7	11.6	700
GA0344	SEN01	15		19.8	9.5	2400
GA0346	SEN01	15		19.2	7.1	3300
GA0347	SEN01	15		19.2	7.1	3300
GA0348	SEN01	16		98800	7.1	3300
GA0349	SEN01	15		19.2	7.1	3300
GA0351	SEN01	15	4	20	41200	5200
GA0365	SEN01	15	3	0.4	0.4	72
GA0366	SEN01	15	3	0.4	0.4	80
GA0367	SEN01	15	3	0.4	0.4	72
GA0368	SEN01	15	3	8.9	8.9	9000
GA0369	SEN01	15	3	8.6	8.6	8700
GA0370	SEN01	15	3	8.6	8.6	8700
GA0371	SEN01	15	3	9.2	9.2	9200

## **ANNEXE D**

**Banque de données du delta**

## CARACTÉRISTIQUES DES PIÉZOMÈTRES

ID_OUV	CODE_OUV	MTUX	MTUY	CODE_OUV	PROF_OUV	Z_OUV	REPMES	AQUIF	TYPE_SOL	INDICE_MOR
GA0003	HP	355700	1792400	HP	1900.000000	2.580000	1.280000	QT	Q	2
GA0004	HP	355700	1792400	HP	1200.000000	2.592000	1.228000	QT	Q	2
GA0051	LP	388600	1816500							
GA0071	LP	358200	1784300	LP	1960.000000	3.031000	1.826000	QT	L	3
GA0072	LP	358200	1784300							
GA0075	LP	360400	1787400	LP	545.000000	2.031000	0.861000	NK	Q	2
GA0079	LP	363600	1789800							
GA0080	LP	363800	1790900							
GA0081	LP	364400	1790900							
GA0086	LP	369600	1796400							
GA0092	LP	375000	1800600							
GA0096	LP	360900	1791500	LP	650.000000	2.056000	0.750000	QT	A	1
GA0107	LP	385500	1802400							
GA0108	LP	385500	1802400							
GA0123	LP	380400	1802300							
GA0134	LP	404600	1821200	LP	548.000000	3.272000	2.264000	NK	M'	6
GA0135	LP	403400	1820200	LP	548.000000	3.467000	2.427000	NK	A	1
GA0169	LP	448600	1830600	LP	840.000000	3.930000	2.898000	QT	HL	7
GA0173	LP	447700	1826000	LP	849.000000	4.362000	3.360000	CT	A	1
GA0186	LP	449800	1831700	LP	755.000000	5.673000	4.674000	NK	HL	7
GA0207	LP	439900	1824800	LP	1665.000000	4.700000	3.690000	NK	DRup	9
GA0076	LP	362100	1787800		1942.00000	2.200000	0.953000	QT	A	1
GA0077	LP	362100	1787800		664.00000	2.097000	0.908000	NK	A	1
GA0109	LP	386700	1803400		945.00000	2.569000	1.458000	QT	A	1
GA0119	HP	390300	1806800							
GA0120	HP	390300	1806800		545.00000	3.437000	2.353000	NK	A	1
GA0001	HP	357600	1791100	HP	2000.00000	3.672000	2.403000	QT	A	1
GA0002	HP	357600	1791100	HP	1000.00000	3.636000	2.357000	NK	A	1
GA0005	LP	353900	1794100	LP	1900.00000	4.965000	3.756000	QT	L	3
GA0006	LP	353900	1794100	LP	1300.00000	4.888000	3.650000	QT	L	3
GA0007	HP	355100	1793200	HP	4350.00000	3.134000	1.836000	QT	Q	2
GA0008	LP	358900	1788700	LP	4918.00000	3.034000	1.657000	QT	Q	2
GA0020	HP	351700	1792900	HP	1900.00000	4.791000	3.684000	QT	K	4
GA0021	HP	351700	1792900	HP	1300.00000	4.891000	3.703000	QT	K	4
GA0022	HP	351700	1792800	HP	1900.00000	4.289000	3.009000	QT	K	4
GA0023	HP	351700	1792800	HP	1300.00000	4.276000	3.046000	QT	K	4
GA0025	HP	351300	1792000	HP						
GA0026	HP	351300	1792000	HP	1400.00000	5.098000	3.913000	QT	P	5
GA0046	LP	388000	1820800		2993.00000	3.202000	2.097000	QT	M'	6
GA0047	LP	388000	1820800		555.00000	3.172000	2.134000	NK	M'	6
GA0048	LP	388000	1820800		535.00000	3.183000	2.113000	NK	M'	6
GA0049	LP	388000	1820800		560.00000	3.058000	2.041000	NK	M'	6



## PROFONDEUR, CE ET pH EN PÉRIODE DE HAUTES EAUX 1989 ET 1990

ID_OUV	DATE	PROF88_HE	CE88HE	PH88_HE	PROF89_HE	CE89_H E	PH89_H E	PROF90_HE	CE90_H E	PH90_HE
GA0003	11/89	2.000000	23000		3.000000	59040	7.000000	2.000000	81700	6.000000
GA0004	11/89		3400	6.000000	2.000000	3240	8.000000	2.000000	5900	8.000000
GA0051	11/89	2.000000	13000		1.000000	18230	8.000000	4.000000	34600	7.000000
GA0071	11/89	3.000000	15000		3.000000	5150	7.000000	3.000000	19720	7.000000
GA0072										
GA0075	11/89	2.000000	4800		1.000000	13930	8.000000	2.000000	35300	7.000000
GA0079	11/89	2.000000	6500		2.000000	7390	7.000000	1.000000	13800	7.000000
GA0080	11/89	1.000000	8000		0.000000	8760	7.000000	1.000000	21600	7.000000
GA0081	11/89	2.000000	10000		2.000000	6290	7.000000	2.000000	22200	7.000000
GA0086	11/89	2.000000	15500		2.000000	13940	7.000000	1.000000	41400	7.000000
GA0092										
GA0096										
GA0107	11/89	3.000000	13500		3.000000	40200	7.000000	3.000000	44000	6.000000
GA0108	11/89	4.000000	17000		4.000000	49920	7.000000	4.000000	56700	7.000000
GA0123	11/89	2.000000	5000		2.000000	7920	8.000000	2.000000	26020	7.000000
GA0134										
GA0135										
GA0169										
GA0173										
GA0186										
GA0207										
GA0076	11/89	2.000000	4000		2.000000	1110	8.000000	2.000000	2250	8.000000
GA0077	11/89	2.000000	900		2.000000	2780	8.000000	1.000000	5070	8.000000
GA0109	11/89	4.000000	11000		4.000000	7480	7.000000	3.000000	15550	7.000000
GA0119										
GA0120	11/89	5.000000	21500		5.000000	53760	6.000000	5.000000	65300	6.000000
GA0001	11/89	4.000000	15000		4.000000	7300	8.000000	4.000000	23000	7.000000
GA0002	11/89	4.000000	13000		4.000000	1630	8.000000	4.000000	6200	8.000000
GA0005	11/89	4.000000	17000		4.000000	3420	7.000000	4.000000	14200	7.000000
GA0006	11/89	4.000000	13000		4.000000	1680	8.000000	4.000000	5400	7.000000
GA0007	11/89	2.000000	8000		2.000000	15380	7.000000	2.000000	30600	6.000000
GA0008	11/89	2.000000	900		2.000000	1010	8.000000		1800	8.000000
GA0020	11/89	4.000000	6000		4.000000	4620	7.000000	4.000000	12000	7.000000
GA0021	11/89	4.000000	1100		4.000000	1830	8.000000	4.000000	4400	8.000000
GA0022	11/89	4.000000	2300		4.000000	3580	8.000000	3.000000	11000	7.000000
GA0023	11/89	4.000000	2300		4.000000	1880	8.000000	3.000000	3900	8.000000
GA0025										
GA0026	11/89	6.000000	3000		6.000000	1330	7.000000	6.000000	3300	7.000000
GA0046	11/89	2.000000	11000		2.000000	8520	7.000000	2.000000	18320	6.000000
GA0047	11/89	2.000000	6000		2.000000	3240	8.000000	3.000000	5280	7.000000
GA0048	11/89	2.000000	5000		2.000000	4670	8.000000	3.000000	7780	7.000000
GA0049	11/89	2.000000	2800		2.000000	2740	8.000000	3.000000	4270	7.000000

## PROFONDEUR, CE ET pH EN PÉRIODE DE BASSES EAUX 1997

ID_OUV	DATE	PROF97_HE	CE97_HE
GA0003	11/89	2.000000	11800
GA0004	11/89	2.000000	1600
GA0051	11/89	1.000000	3700
GA0071	11/89	3.000000	4400
GA0072			
GA0075	11/89	2.000000	4800
GA0079	11/89	2.000000	4900
GA0080	11/89	2.000000	6100
GA0081	11/89	1.000000	1800
GA0086	11/89	1.000000	2900
GA0092			
GA0096			
GA0107	11/89	2.000000	6300
GA0108	11/89	3.000000	6000
GA0123	11/89	2.000000	3100
GA0134			
GA0135			
GA0169			
GA0173			
GA0186			
GA0207			
GA0076	11/89	2.000000	600
GA0077	11/89	1.000000	900
GA0109	11/89	3.000000	4200
GA0119			
GA0120	11/89	5.000000	9400
GA0001	11/89	3.000000	4000
GA0002	11/89	3.000000	1900
GA0005	11/89	3.000000	2900
GA0006	11/89	3.000000	1400
GA0007	11/89	2.000000	4000
GA0008	11/89	2.000000	200
GA0020	11/89	3.000000	1700
GA0021	11/89	3.000000	700
GA0022	11/89	3.000000	2200
GA0023	11/89	3.000000	500
GA0025			
GA0026	11/89	5.000000	800
GA0046	11/89	2.000000	3200
GA0047	11/89	2.000000	500
GA0048	11/89	2.000000	800
GA0049	11/89	2.000000	600



**DISTANCE AU COURS D'EAU**

ID_OUV	DISTANCE	ID_COUR S D'EAU	COURSDEAU
GA0003	390.393	5	Le Dieuss
GA0004	390.393	5	Le Dieuss
GA0051	1762.660	3	Le Gorm amont
GA0071	1055.929	4	Le Lampsar
GA0072	1055.929	4	Le Lampsar
GA0075	392.026	4	Le Lampsar
GA0079	1460.554	4	Le Lampsar
GA0080	643.420	4	Le Lampsar
GA0081	661.190	4	Le Lampsar
GA0086	914.563	4	Le Lampsar
GA0092	548.285	4	Le Lampsar
GA0096	1673.592	4	Le Lampsar
GA0107	5006.314	4	Le Lampsar
GA0108	5006.314	4	Le Lampsar
GA0123	423.961	4	Le Lampsar
GA0134	754.559	8	Le Natchié
GA0135	1090.485	8	Le Natchié
GA0169	1956.394	1	Le Sénégal
GA0173	2115.285	1	Le Sénégal
GA0186	1591.758	1	Le Sénégal
GA0207	316.176	1	Le Sénégal
GA0076	1038.531	4	Le Lampsar
GA0077	1038.531	4	Le Lampsar
GA0109	5859.553	4	Le Lampsar
GA0119	3115.671	6	Le Kassack
GA0120	3115.671	6	Le Kassack
GA0001	1781.093	5	Le Dieuss
GA0002	1781.093	5	Le Dieuss
GA0005	772.618	1	Le Sénégal
GA0006	772.618	1	Le Sénégal
GA0007	1112.382	5	Le Dieuss
GA0008	2245.546	4	Le Lampsar
GA0020	208.974	1	Le Sénégal
GA0021	208.974	1	Le Sénégal
GA0022	300.011	1	Le Sénégal
GA0023	300.011	1	Le Sénégal
GA0025	879.857	1	Le Sénégal
GA0026	879.857	1	Le Sénégal
GA0046	862.171	1	Le Sénégal
GA0047	862.171	1	Le Sénégal
GA0048	862.171	1	Le Sénégal
GA0049	862.171	1	Le Sénégal

**HYDROGRAPHIE****ID COURS\_EAU**

- 9 Point d'eau temporaire
- 3 Le Gorom amont
- 5 Le Dieuss
- 7 Le Diovol
- 6 Le Kassack
- 8 Le Natchié
- 4 Le Lampsar
- 1 Le Sénégal
- 2 Le Gorom aval
- 11 Point d'eau permanent
- 10 Le Lac du Diouthie
- 14 Le Taouey rectifié
- 12 Le Lac de Guiers
- 13 Le Taouey

## TYPE D'AMÉNAGEMENTS, CATÉGORIES D'AMÉNAGEMENTS ET TYPE DE SOLS

ID_TYPE_AME N	TYPE_AMEN	IND_TYP E	ID_CATEG_AME N	CATEG_AME N	IND_CATE G	ID_SOL	TYPE_SOL	IND_SO L
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG001	AIT	1	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN001	Aménagements Publics	1	CATEG005	GAS	5	PED001	Hollalde	1
AMEN001	Aménagements Publics	1	CATEG005	GAS	5	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN001	Aménagements Publics	1	CATEG005	GAS	5	PED003	Fonde	3
AMEN001	Aménagements Publics	1	CATEG005	GAS	5	PED004	Sable dune	4
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG002	GAST	2	PED001	Hollalde	1
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG002	GAST	2	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG002	GAST	2	PED003	Fonde	3
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG002	GAST	2	PED004	Sable dune	4
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG001	GAST	1	PED001	Hollalde	1
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG003	PPST	3	PED004	Sable dune	4
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG003	PPST	3	PED003	Fonde	3
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG003	PPST	3	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG003	PPST	3	PED001	Hollalde	1
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG004	PIV-PIP_HS	4	PED001	Hollalde	1
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG004	PIV-PIP_HS	4	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG004	PIV-PIP_HS	4	PED003	Fonde	3
AMEN002	Aménagements Privés	2	CATEG004	PIV-PIP_HS	4	PED004	Sable dune	4
AMEN003	Agro-Industrie	3	CATEG006	CSS	6	PED001	Hollalde	1
AMEN003	Agro-Industrie	3	CATEG006	CSS	6	PED002	Faux Hollalde	2
AMEN003	Agro-Industrie	3	CATEG006	CSS	6	PED003	Fonde	3