

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
CENTRE DE THIES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



GC.0146

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

*DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'INFORMATION
GEOGRAPHIQUE "RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES"
DANS LA ZONE DE MBOUR - FATICK*

Présenté par : Mlle Agnès Anna Sanou NDIAYE

Directeur Interne : M. Babacar NDIAYE

Directeurs Externes : M. Mamadou SARR (S.G.P.R.E)
M. Samba BA (S.G.P.R.E)

Invitée: Mme Labaye BA, (E.L.S)

Année Académique : 2001/2002

DEDICACES

*Je rends grâce à Dieu et dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont
proches*

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui de près ou de loin, de par leurs actes ou leurs conseils ont aidé à la réalisation de cet ouvrage.

En particulier nous adressons nos plus vifs remerciements à :

- ❖ Monsieur Babacar NDIAYE, professeur à l'ESP pour avoir bien voulu diriger ce projet, pour ses conseils, son soutien constant et sa disponibilité tout au long de cette étude;
- ❖ Monsieur Mamadou SARR, Hydrogéologue à la Direction Hydraulique – Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau du Sénégal (SGPRE) à Dakar;
- ❖ Monsieur Samba BA, Ingénieur Hydrologue, Chef du Bureau Planification et Informatique (SGPRE) pour avoir bien voulu nous confier ce projet et nous donner libre accès à toutes les données nécessaires pour le mener à bien;
- ❖ Monsieur Moussa CISSE, au SGPRE, qui nous a témoigné d'un soutien et d'une disponibilité sans précédent tout au long de cette étude, et pour notre apprentissage au logiciel Arcview;
- ❖ Monsieur SY, au SGPRE pour son appui;
- ❖ Monsieur Alassane BA, professeur de Topographie à l'ESP, pour son appui logistique;

Nos remerciements vont aussi à :

- ❖ Madame Labaye BA, Kaisa HÄRKÖNEN, vice – représentante, résidente de la Mission Luthérienne du Sénégal;
- ❖ Monsieur Hanu, responsable du Projet Puits de l'Eglise Luthérienne;
- ❖ Monsieur Paul SENE, responsable de la brigade des puits de l'Eglise Luthérienne;

qui n'ont ménagé aucun effort et qui ont fait preuve d'une parfaite collaboration tout au long de ce projet.

RESUME

La présente étude qui a été menée grâce à une documentation diversifiée sur l'hydrogéologie du Sénégal a pour principal objectif d'apporter un outil d'aide à la décision concernant le programme hydraulique de l'Eglise Luthérienne du Sénégal.

En effet ce programme rentre dans le cadre des œuvres sociales de la Mission Luthérienne au Sénégal. Il est financé par le Gouvernement finlandais et est réalisé par l'Eglise Luthérienne du Sénégal. Il consiste à réaliser des puits neufs et à réparer des puits anciens à la demande des populations en vue d'améliorer leurs conditions d'approvisionnement en eau potable.

Toutefois la contrainte majeure de la zone cible de l'Eglise est la rareté de l'eau douce à cause du contexte physique de la zone d'étude.

D'où l'objet de cette étude qui devrait permettre une meilleure orientation du projet et que nous articulons en trois principales parties:

- d'abord une première phase consistant en une présentation de la zone d'étude dans son contexte socio-économique, physique et hydrogéologique;
- ensuite en la mise en œuvre du Système d'Information Géographique: cette dernière phase nous a permis de dresser des cartes visant à analyser l'impact de l'ensemble des paramètres physico-chimiques.
- enfin en une étude approfondie des eaux souterraines sur la base des données collectées au niveau du SGPRE d'une part, et d'autre part en une étude géophysique basée sur quelques essais effectués sur le terrain;

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
LISTE DES ANNEXES	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
INTRODUCTION	1
I. Présentation de la zone d'étude	2
I.1 Données Générales	2
I.2 Aspects physique et hydrographique	5
I.2.1 Relief - sols	5
I.2.2 Climat – Pluviométrie	6
I.2.3 Hydrographie	7
I.3 Structures géologiques	8
I.3.1 Aperçu sur la géologie du Sénégal	8
I.3.2 Géologie de la zone Mbour - Fatick	10
II. Mise en œuvre et conception du SIG	12
II.1 Données de base	12
II.2 SIG Arcview	12
II.3 Création des cartes	14
III. Hydrogéologie	15
III.1 Les couches aquifères profondes	16
III.1.1 La couche aquifère du Maestrichtien	16
III.1.2 La couche aquifère du Paléocène	17
III.1.3 La couche aquifère de l'Eocène	19
III.2 La couche aquifère peu profonde	20
III.2.1 Le continental terminal	21
III.2.2 Les puits du programme hydraulique de l'ELS	22

III.2.3	Les autres ouvrages	25
IV.	Hydrochimie.....	29
IV.1	Eléments statistiques sur la chimie	30
IV.2	Paramètres physico-chimiques	35
IV.2.1	Le potentiel Hydrogène (pH).....	35
IV.2.2	La conductivité	35
IV.2.3	Le résidu sec	40
IV.2.4	Le magnésium.....	47
IV.2.5	Les nitrates.....	50
IV.2.6	Les chlorures.....	50
IV.2.7	Les sulfates	53
IV.2.8	Les fluorures	53
IV.2.9	Le fer	62
V.	Etude Géophysique.....	63
V.1	Principe de la méthode par sondage électrique	63
V.1.1	Principe des résistivités	63
V.1.2	Le sondage électrique.....	65
V.2	Interprétation des résultats.....	67
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	69
	BIBLIOGRPAHIE	71
	ANNEXES	72

LISTE DES ANNEXES

Annexe A: Tableaux des données de base	72
Annexe B: Tableaux sur les normes de potabilité de l'eau	73
Annexe C: Résultats des essais géophysiques	74

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de situation de la zone d'étude	3
Figure 2: Coupes Géologiques (sous forme de plan)	11
Figure 3: Carte des puits du Programme de l'Eglise luthérienne du Sénégal (ELS)	26
Figure 4: Carte des différents types d'ouvrages	27
Figure 5: Carte des ouvrages suivant le type de formation captée	28
Figure 6: Carte du pH pour les puits captant dans les sables	36
Figure 7: Carte du pH pour les puits captant dans les calcaires	37
Figure 8: Carte du pH-labo pour la nappe du Paléocène	38
Figure 9: Carte du pH-labo pour la nappe du Maestrichtien	39
Figure 10: Carte des conductivités pour les puits captant dans les sables	41
Figure 11: Carte des conductivités pour les puits captant dans les calcaires	42
Figure 12: Carte des résidus secs pour les puits captant dans les sables	43
Figure 13: Carte des résidus secs pour les puits captant dans les calcaires	44
Figure 14: Carte des résidus secs pour la nappe du Paléocène	45
Figure 15: Carte des résidus secs pour la nappe du Maestrichtien	46
Figure 16: Carte du magnésium pour la nappe du Paléocène	48
Figure 17: Carte du magnésium pour la nappe du Maestrichtien	49
Figure 18: Carte des nitrates pour la nappe du Paléocène	51
Figure 19: Carte des nitrates pour la nappe du Maestrichtien	52
Figure 20: Carte des chlorures pour la nappe du Paléocène	54
Figure 21: Carte des chlorures pour la nappe du Maestrichtien	55
Figure 22: Carte des sulfates pour la nappe du Paléocène	56
Figure 23: Carte des sulfates pour la nappe du Maestrichtien	57
Figure 24: Carte des fluorures pour la nappe du Paléocène	59
Figure 25: Carte des fluorures pour la nappe du Maestrichtien	60
Figure 26: Carte du fer total pour la nappe du Maestrichtien	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Thiès	2
Tableau 2: Structure de la région de Thiès	4
Tableau 3: Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Fatick	5
Tableau 4: Pluviométrie (mm)	6
Tableau 5: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Maestrichtien	17
Tableau 6: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Paléocène	19
Tableau 7: Eléments statistiques sur la couche aquifère de l'Eocène	20
Tableau 8: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Continental Terminal (C.T)	22
Tableau 9: Eléments statistiques pour les puits – sables	24
Tableau 10: Eléments statistiques pour les puits – calcaires	25
Tableau 11: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du Paléocène	31
Tableau 12: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du Maestrichtien	33
Tableau 13: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du C.T	35
Tableau 14: Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités	65
Tableau 15: Caractéristiques des aquifères	68

INTRODUCTION

Le Sénégal à l'image des autres pays sahéliens est confronté à des problèmes d'eau parfois assez graves dans certaines localités. Certes le pays est traversé par d'importants cours d'eau et recèle par ailleurs de nappes souterraines appréciables. Toutefois se pose le problème de la maîtrise de la ressource et de l'approvisionnement des différents consommateurs aussi bien en ville qu'en milieu rural.

Dans le cadre de l'hydraulique rural, la politique mise en place par l'Etat a permis de passer de 107 forages en 1981 à 3297 en 2000 auxquels il faut ajouter des milliers de forage-puits équipés ou non de pompes manuelles. Ce patrimoine devrait offrir une capacité de production qui se traduirait par un taux de desserte dépassant les 35 litres/jour/hbt recommandé par l'OMS pour l'an 2000. Les efforts sont par ailleurs à poursuivre surtout dans le domaine de l'hydraulique rurale, eu égard à la croissance démographique.

D'où l'intérêt de mener une bonne politique de gestion des ressources en eau vue la péjoration des conditions climatiques qui sévit au Sahel depuis plus de 20 ans et qui est marquée au Sénégal par des périodes de sécheresse particulièrement sévères.

Dans le cas de ce projet d'Études nous nous intéresserons particulièrement aux ressources en eau souterraines ; et c'est dans cet esprit de politique de gestion que nous sommes appelés à mettre en place un Système d'Information Géographique (SIG) " Ressources en eau souterraines" dans la zone de Mbour –Fatick. Son but est de fournir aux planificateurs une aide à la décision pour l'implantation de nouveaux forages en fonction de différents critères (besoins, études d'impact, qualité des eaux, environnement hydrogéologique, etc.)

En effet dans le cadre de ce travail, qui pourrait permettre une meilleure orientation du projet mené par l'Eglise Luthérienne du Sénégal, en collaboration avec le Service de Gestion et de Planification des Ressources en Eau du Sénégal (SGPRE), nous procéderons dans un premier temps à une présentation et à une définition de quelques généralités sur la zone d'étude (caractéristiques physiques, climatologiques, hydrologiques), ensuite à la conception et à la mise en œuvre du Système d'Information Géographique (SIG); et enfin à une étude hydrogéologique (comportement hydrodynamique des différentes nappes, leur alimentation).

I. Présentation de la zone d'étude

Nous étudierons dans cette partie la région de Thiès dans sa globalité et celle de Fatick en essayant de donner le maximum d'informations sur le département de Mbour qui constitue ici en plus de celui de Fatick la zone d'étude.

(Fig1: Carte de situation de la zone d'étude)

I.1 Données Générales

Région de Thiès

Située à 70 km de Dakar, la région de Thiès est limitée: au nord par la région de Louga, au sud par la région de Fatick, à l'est par les régions de Diourbel et Fatick et à l'ouest par la région de Dakar et l'Océan Atlantique.

La région est peu étendue et très peuplée. Après Dakar, Thiès est la deuxième région avec 1.176.654 habitants (en 1996) réparties sur une étendue de 6601,8 km², soit une densité moyenne de 178 hbts/km². Elle est également assez urbanisée avec un taux atteignant 35.4% ce qui la place en troisième position après Dakar et Ziguinchor.

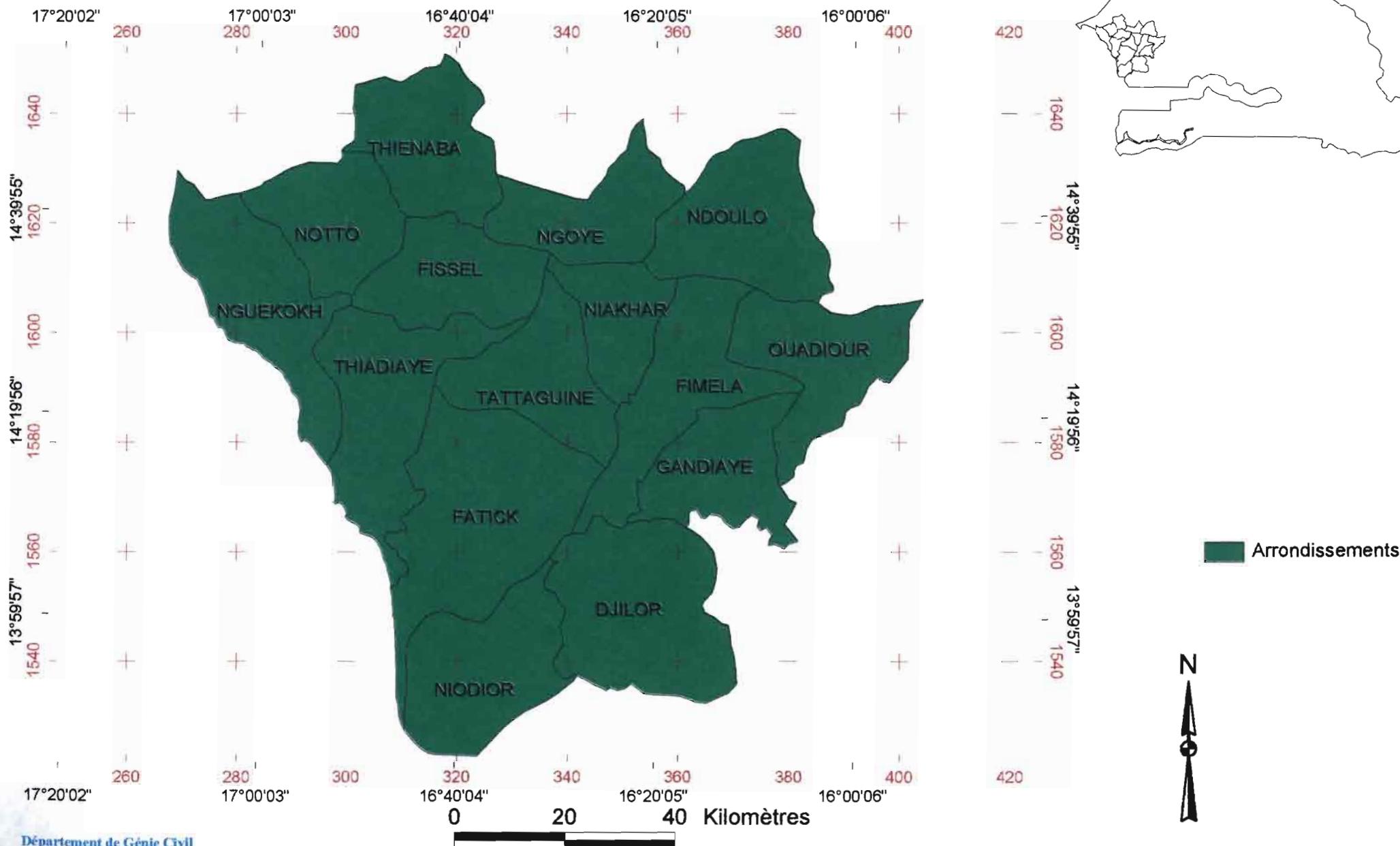
La population est essentiellement concentrée en zone rurale; son taux de croissance étant estimé à 2.9% par an.

Caractéristiques	Thiès	Mbour	Fatick
Population (1988)	367429	280424	293298
Superficie	1873	1607	3121
Densité (hbts/km²)	196.2	174.5	94

Tableau1: Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Thiès

La région constitue un important carrefour routier et ferroviaire. Elle est le siège de la Société Nationale des Chemins de fer. Sur le plan économique Thiès tire l'essentiel de ces ressources dans l'extraction minière, la pêche, le tourisme, et dans le secteur agricole (15% du PNB). Ces trois dernières constituant les principales activités économiques de la ville de Mbour.

Fig1: Carte de situation de la zone d'étude



La région compte trois départements (Thiès, Mbour, Tivaoauane), 10 arrondissements, 9 communes et 31 communautés rurales.

Caractéristiques	Thiès	Mbour	Tivaoauane
Arrondissements	3 arrondissements: Notto, Keur-Moussa et Thiénaba	3 arrondissements: Sésséne, Fissel, Sindia.	4 arrondissements: Méouane, Mérina, Dakhar, Niakhéne, Pambal
Communes	3 communes: Thiès, Khombole, Pout	4 communes: Mbour, Joal-Fadiouth, Thiadiaye, Nguékokh	Tivaoauane-Mékhé
Communautés rurales	9 communautés rurales: Diender, Keur-Moussa, Fandéne, Touba-Toul, Thiénaba, Ngoudiane, Ndiéyéne-Sirakh, Notto, Tassette	8 communautés rurales: Sésséne, Sandiara, Nguéniéne, Fissel, Ndiaganiao, Sindia, Malicounda, Diass.	14 communautés rurales: Méouane, Mboro, Taïba-Ndiaye, Mérina, Dakhar, Koul, Pékesse, Niakhéne, Thilmakha, Mbayenne, Ngandiouf, Mont- Rolland, Notto- Gouye-Diama, Chérif-Lô, Pire- Gouréye

Tableau2: Structure de la Région de Thiès

D'un autre côté elle offre diverses opportunités:

- importante zone des Niayes pour le développement de l'horticulture;
- deuxième région industrielle du pays.

Elle bénéficie de la politique de la décentralisation du fait de la proximité des infrastructures: ports, chemin de fer, télécommunications; etc.

Elle renferme également l'essentiel des industries extractives du pays avec l'exploitation des phosphates, de l'attalugite, et des carrières.

Région de Fatick

La région de Fatick a été créée en juillet 1984 avec la partition de l'ex région du Sine Saloum en deux entités administratives. Elle est limitée au nord et nord-est par les régions de Thiès, Diourbel et Louga, au sud par la République de Gambie, à l'ouest par l'Océan Atlantique et la région de Thiès.

C'est une région caractérisée par une population de 608.706 habitants (1998) réparties sur une superficie de 7340 km², soit une densité de 77 hbts/km² et un taux d'urbanisation assez faible de l'ordre de 11%. Le taux de croissance de la population est estimé à 1.9% (entre 1976 et 1988).

Caractéristique	Fatick	Fatick	Fatick
Population (1988)	207856	138816	159817
Superficie	2638	2922	1980
Densité (hbts/km²)	78.8	47.5	80.7

Tableau3: Répartition spatiale de la population en 1988 – Région de Fatick

La population, essentiellement rurale, vit surtout d'agriculture (90%) et d'élevage.

D'une autre part la majeure partie des industries régionales est localisée à Kahone à proximité de la ville de Kaolack. Elle offre également quelques opportunités notamment: agriculture vivrière développée, potentiel halieutique important, importante capacité de production de sel, énergie solaire pour l'électrification des zones rurales.

Sur le plan ethnique la zone d'étude est constituée de Sérères qui est le groupe majoritaire suivis des wolofs et des pulaars.

I.2 Aspects physique et hydrographique

I.2.1 Relief - sols

La zone d'étude présente un relief relativement plat avec différents types de sols tels que:

- les sols ferrugineux non lessivés ou sols dior: ils sont peu profonds et bien drainés grâce à leur matériel sableux, mais leur horizon humifère est souvent érodé par le vent ou par ruissellement;
- les sols calcaires et vertisols (classe des sols noirs contenant au moins 30% d'argile que l'on trouve dans les régions chaudes à saison sèche prononcée);
- les sols ferrugineux lessivés: ils se caractérisent par des horizons bien tranchés, clairs en surface, colorés en profondeur par l'accumulation du fer sous forme de tâches, concrétions ou cuirasse;

En dehors de ces sols tropicaux on trouve les sols des mangroves, les sols halomorphes et les sols hydromorphes des vallées.

I.2.2 Climat – Pluviométrie

La zone d'étude est essentiellement située dans la région de la Petite côte et du Saloum dont le climat est du type tropical soudanien, caractérisé par une saison sèche de sept mois, donc plus longue que dans l'intérieur du pays, au cours de laquelle la petite côte est envahie par l'alizé maritime. La saison des pluies n'y commence en général qu'en juin avec des pluies insignifiantes issues de lignes de grains affaiblies.

Hormis l'alizé maritime qui souffle dans les zones estuaires, il existe deux autres types de vent il s'agit de l'harmattan, vent chaud et sec, et de la mousson qui souffle d'avril à octobre et qui apporte les pluies.

Quant à la pluviométrie, elle varie entre 400 et 600 mm et est marquée depuis plus d'une décennie par son irrégularité.

Station	Période	Moyenne annuelle
Mbour	1961 - 1990	557.4
Fatick	1961 - 1990	565.4

Tableau4: Pluviométrie (mm)

La température varie également, oscillant, dans le cas de la région de Fatick par exemple, entre 24°C au mois de janvier et 39°C au mois d'avril / mai. Dans le cas de la région de Thiès la température moyenne est de l'ordre de 32°C.

Quant à la végétation, la zone d'étude se trouve essentiellement dans le domaine soudanien celui du bassin arachidier dont les principaux types de formations végétales sont: parc arboré, steppe arbustive, terres cultivées; les principales cultures étant l'arachide, le mil, le sorgho, le maïs, le souna en plus de quelques cultures maraîchères.

I.2.3 Hydrographie

Le réseau hydrographique du Sénégal résulte d'une part de la configuration géologique et géomorphologique du pays et d'autre part du régime et de la répartition de la pluviométrie dans la sous région.

L'essentiel de ce réseau national est relatif aux bassins des fleuves Sénégal et Gambie dont les eaux proviennent du massif du Fouta-Djalou en République de Guinée.

A côté de ces deux grands fleuves, il y'a quelques petits cours d'eau comme la Casamance, la Kayanga, l'Anambé, le Sine, le Saloum et des bassins côtiers dont les écoulements sont intermittents.

De plus un certain nombre de lacs et de mares complète ce réseau hydrographique dont les plus importants sont: le lac de Guiers, les bolongs des zones estuariennes et les mares de la région des Niayes.

Par ailleurs il y'a les zones humides qui le plus souvent sont associées au réseau hydrographique fonctionnel ou dégradé.

Dans la zone proprement dite, précisément dans la région de Fatick nous citerons comme cours d'eau important le Sine (et ses affluents) qui comme le Saloum connaissait auparavant une activité hydrologique relativement importante. Aujourd'hui ils sont pratiquement occupés par les eaux de mer pendant toute l'année alors qu'avant la sécheresse des années 1970, la partie continentale de leurs bassins connaissait des écoulements significatifs notamment en saison des pluies.

I.3 Structures géologiques

I.3.1 Aperçu sur la géologie du Sénégal

De façon générale, à l'exception du Sénégal oriental où apparaît le socle précambrien, la majeure partie du territoire sénégalais appartient au grand bassin sédimentaire Ségalo-mauritanien où se sont entassés les dépôts du secondaire et du Tertiaire. Les formations qui composent essentiellement ce bassin sont: le Maestrichtien, le Paléocène, l'Eocène, le Continental Terminal, et le Quaternaire.

Le Maestrichtien

Il est constitué sur la majeure partie du Sénégal par des sables plus ou moins grossiers et plus ou moins argileux. Localement ces sables s'indurent et passent à des grés. On observe comme pour toutes les formations sédimentaires que le caractère argileux du Maestrichtien s'affirme au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'océan en même temps que s'accroissent à la fois la profondeur et l'épaisseur de cette formation. Le rôle hydrogéologique de cette formation est extrêmement important.

Les sables maestrichtiens contiennent une immense nappe qui forme la plus grande réserve d'eau dont dispose le Sénégal.

Le Paléocène

Cette formation est représentée essentiellement par des calcaires, des marno-calcaires et des marnes. Dans l'ouest du pays les calcaires paléocènes ont subi le phénomène de la karstification et forment alors un excellent réservoir.

De tels calcaires caverneux contiennent par exemple les deux importantes nappes de Sébikhotane et de Pout dans la région de Dakar et qui sont exploitées pour l'alimentation en eau des populations.

L'Eocène

Suivant les étapes en présence on distingue l'éocène inférieur, moyen et supérieur.

- l'éocène inférieur

Mieux connu dans l'ouest du pays il présente de bas en haut la succession suivante:

- attapulgites: hydrogéologiquement, totalement défavorable;
- marnes à Ostracodes qui constituent un aquifère peu intéressant sauf dans la zone du Sine-Saloum;
- marnes à lits de calcaires fossilifères de l'Yprésien qui constituent le niveau le plus favorable. En revanche la fissuration et les variations rapides en font un aquifère généralisé et incertain.

- l'éocène moyen (lutétien)

Le lutétien inférieur est constitué de marnes et de calcaires. Le lutétien supérieur est essentiellement calcaire. Sa richesse en niveau calcaire en fait néanmoins un aquifère intéressant notamment dans le Nord-ouest du Sénégal où les ouvrages qui le captent ont de bons débits et une profondeur moyenne.

- l'éocène supérieur

Les formations de cet étage sont essentiellement argileux et n'ont qu'un rôle négligeable dans l'hydrogéologie du Sénégal.

Le Continental Terminal

Recouvrant la presque totalité du pays, il se présente sous forme de grès argileux et d'argile sableuse jaune et rouge, d'argile bariolée, lie-de-vin et blanche. Son épaisseur varie de quelques dizaines de mètres à 150 mètres vers Tambacounda.

Sa lithologie est hétérogène et les passages de faciès nombreux. La perméabilité est souvent bonne voire très bonne, quand les niveaux de latérite ou de grès à canaux sont recoupés.

Le Quaternaire

Les diverses formations quaternaires jouent un rôle hydrogéologique important au Sénégal, qu'il s'agisse de dépôts (limons, dunes) ou de produits de transformations récentes de terrains plus anciens (latérites, produits d'altération du Sénégal Oriental).

Les dépôts sableux très développés près des côtes atlantiques constituent un réservoir très intéressant, nous y distinguons de bas en haut:

- des dunes anciennes rouges de l'Ogolien;
- une plage à Arca sénélist du Nouakchottien;
- des dunes jaunes, des dunes blanches actuelles.

I.3.2 Géologie de la zone Mbour - Fatick

Après cet aperçu global de la géologie du Sénégal nous allons tenter de faire une description plus précise des principaux faciès de la zone d'étude, correspondant aux différents étages géologiques à partir des coupes présentées à la suite de ce paragraphe.

Ces coupes géologiques ont été réalisées, à partir des coupes lithologiques des principaux forages de la zone, par le Service hydrogéologique (Direction des Etudes Hydrauliques – DEH) lors d'une étude hydrogéologique des calcaires paléocènes de la région de Mbour (novembre 1980).

On constate à travers chacune d'elles, à des niveaux très variables, une couche de terrains détritiques à prédominance argilo-sableuse qui constituent les couches du Quaternaire et celui du Continental Terminal. Ces couches qui sont pour la plupart assez minces recouvrent les couches de l'Eocène inférieur (avec un niveau phosphaté à la base, marqué par le fluor) constituées sur la partie supérieure, de façon assez irrégulière, de marno-calcaires et dans sa partie inférieure d'argiles et de marnes. Cette dernière, assez présente sur cette zone, affleure à certains endroits surtout sur l'axe Soussoum Sando – Dabdior - Keur Yerim – Nobandane dans le département de Mbour.

En dessous de cet étage nous avons les couches de calcaires francs et marno-calcaires du Paléocène avec ces fractures qui sont ici assez présentes sur l'axe central de la zone (en allant

de Nguéniène vers Tasset). Sous cette formation se trouvent les argiles et sables du Maestrichtien

(Fig2: Coupes géologiques (sous forme de plan))

II. Mise en œuvre et conception du SIG

II.1 Données de base

Comme nous les avons annexés sous forme de tableau à la fin de ce document, nous disposons des données (relatives à la zone étudiée) suivantes:

- tableau des puits du Programme de l'ELS
- tableau des ouvrages
- tableau des aquifères
- tableau des villages
- tableau de liste administrative
- tableau de la chimie des ouvrages
- tableau du suivi des nappes.

L'acquisition des données s'est essentiellement fait au niveau du SGPRE qui, dans le cadre de ces activités de gestion des ressources en eau, dispose des bases de données répertoriant l'ensemble des paramètres ayant trait aux eaux souterraines et superficielles du Sénégal.

Nous avons donc recueilli un certain nombre de données concernant la zone Mbour - Fatick afin de pouvoir établir les cartes présentées dans les paragraphes suivants à partir du système d'information géographique (SIG) Arcview.

II.2 SIG Arcview

Le système d'information géographique (SIG) Arcview est devenu le logiciel cartographique et le SIG bureautique de référence. ArcView est un logiciel développé par Environmental Systems Research Institute (ESRI), les créateurs d'ARC/INFO, ces derniers se consacrent

depuis plus de vingt ans à apporter des solutions géomatiques à tous ceux qui cherchent à résoudre des problèmes d'ordre spatial.

Outil puissant permettant de visualiser, explorer, interroger et analyser des données géographiques, il permet, très rapidement, de manipuler les données de manière totalement différente.

Vues

Avec ArcView, nous travaillons avec des données géographiques dans des cartes interactives appelées vues. Chaque vue possède une 'Table des matières' géographique propre à ArcView, pour comprendre et contrôler plus facilement ce qui s'affiche

Tables

Lorsque nous travaillons avec des données tabulaires dans des tables d'ArcView, il nous est possible de cliquer sur des entités d'une vue pour que leurs enregistrements se mettent en surbrillance dans la table, nous montrant leurs attributs. Il suffit également de sélectionner des enregistrements de la table pour que les entités qu'ils représentent se mettent en surbrillance sur la vue. Les tables d'ArcView proposent également tout un éventail de fonctions permettant d'obtenir des récapitulatives statistiques, d'effectuer des tris et de soumettre des requêtes.

Diagrammes

Les diagrammes d'ArcView constituent une option de visualisation de graphiques et de données puissantes, totalement intégrée dans l'environnement géographique d'ArcView. Il suffit simplement de cliquer sur des entités d'une vue pour les ajouter au diagramme. ArcView nous permet de travailler simultanément avec des diagrammes, des représentations géographiques et des représentations tabulaires de nos données.

Mises en page

Les mises en page d'ArcView nous permettent de créer des cartes, en organisant les divers éléments graphiques sur l'écran selon l'utilisateur. Les mises en page sont intelligentes car elles disposent d'une liaison active aux données qu'elles représentent. Lorsque nous imprimons une mise en page, toute modification apportée aux données est automatiquement incluse.

Scripts

Les scripts d'ArcView sont des macros écrites dans Avenue, le langage de programmation et l'environnement de développement d'Arcview. Avec Avenue, nous pouvons personnaliser presque tout aspect d'ArcView, depuis l'ajout d'un nouveau bouton pour exécuter un script que nous rédigeons, jusqu'à la création d'une application entièrement personnalisée que nous distribuons.

Projets

Tous les composants de notre session ArcView : vues, tables, diagrammes, mises en page et scripts sont commodément stockés dans un fichier appelé projet. La fenêtre du projet d'ArcView nous montre le contenu de notre projet et facilite la gestion de tout notre travail.

II.3 Création des cartes

Le procédé de création étant le même pour chacune des cartes citées et représentées dans les paragraphes suivants nous n'avons pas jugé nécessaire de détailler l'ensemble des manipulations propres au logiciel, et effectuées carte par carte.

Après l'acquisition des données, qui nous ont été fournies sous forme de fichier Windows (Excel), nous avons procédé à un changement du format du fichier sous l'extension Texte (Txt.), afin de pouvoir les utiliser lors des créations des tables correspondantes sous Arcview.

Nous pouvons alors créer les tables suivant le type de représentation recherchée, dans le cas de notre étude les données se présentent sous forme de table avec leurs champs respectifs.

Nous pouvons alors ouvrir la vue dans laquelle nous voulons utiliser ces données tout en indiquant auparavant à Arcview le système de projection dans lequel nous souhaitons évoluer. Dans le cas de notre étude nous avons choisi celui de l'UTM 1983 (Zone 28 qui est celle du Sénégal).

Sur chaque vue nous ajoutons un fichier au format Arcview dit "format de fichier de formes", indiqué par l'extension .shp (pour "shape"), et qui donne une représentation des différents arrondissements de la zone étudiée. Au-dessus de cette première couche, ajoutée comme thème à la vue géographique, nous ajoutons les points définis par des coordonnées x, y

exprimées en degrés décimaux. En effet bien que nous disposions des coordonnées en UTM nous avons préféré utiliser celles en degrés décimaux puisque avec ces dernières le choix du système de projection devient facultatif. Par ailleurs dans le cas de notre étude nous nous intéressons principalement à la situation des entités les unes par rapport aux autres et non aux valeurs absolues de leur situation géographique et des distances qui les séparent.

Sur ces mêmes vues nous avons eu à effectuer un certain nombre de requêtes qui nous ont permis d'obtenir les cartes présentées aux prochains paragraphes.

L'autre volet, lors de l'utilisation de ce logiciel, consiste en l'analyse spatiale des entités sélectionnées; cela nous a permis de mener l'étude hydrochimique des différentes nappes. Le travail s'est fait à partir d'une des extensions de Arcview nommée "Arcview Spatial Analyst". Il consiste essentiellement à tracer des courbes de niveau ou des classes de valeur des différents paramètres chimiques étudiés, suivant la méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighted).

III. Hydrogéologie

La plupart des nappes du Sénégal sont alimentées par le fleuve Sénégal et son défluent le lac de Guiers et pour une part peu importante par les pluies, du fait du déficit pluviométrique.

Nous distinguons dans cette étude hydrogéologique de la région en question deux catégories principales de ressources en eau:

- les nappes profondes et exploitées par des forages;
- les nappes superficielles ou phréatiques: ce sont les ressources en eau qui alimentent les puits traditionnels ou non et sont donc les premières que l'on rencontre à partir de la surface.

Hormis ces deux principales nappes, on note la présence également de nappes intermédiaires telles que la nappe du Paléocène, la nappe de l'Eocène, la nappe du Continental Terminal exploitées elles aussi par des forages dans certaines localités

III.1 Les couches aquifères profondes

Les couches aquifères profondes au Sénégal sont toutes des formations sédimentaires datant du Crétacé au Tertiaire. La plus profonde est connue sous le nom de "nappe profonde du Maestrichtien". Deux autres moins profondes et moins continues prennent place dans le Paléocène et l'Eocène.

III.1.1 La couche aquifère du Maestrichtien

Le nom Maestrichtien réfère à l'âge relatif (Crétacé Supérieur) de cette formation qui couvre en profondeur presque tout le Bassin Sédimentaire Sénégalais.

Dans le cas de notre étude elle est présente partout dans la région.

Sa lithologie présente essentiellement des sables continentaux et des sables grossiers avec à l'occasion des intercalations de matériaux argileux et calcaires.

Elle couvre une superficie, à l'échelle nationale, de 150 000 km² environ et présente une profondeur variant entre 200 et 450 mètres. Sa perméabilité est en général bonne; et l'eau à l'occasion artésienne dans la vallée du Saloum monte souvent à 40 m de la surface, (comme c'est le cas d'un des forages captant la nappe à une profondeur de 71 m à Mbourokh dans le département de Nguekokh), ce qui permet un échange entre puits profonds et peu profonds (puits-forages).

Sur la base des informations, dont nous disposons sur quelques ouvrages de la zone d'étude nous avons pu établir ce tableau statistique:

Dénomination	Effectif	Moyenne	Minimum	Maximum	Écart-type	Variance	Norme type
Profondeur totale (m)	25	71	500	429	254.5	7530.5	86.8
Niveau Statique (m)	36	0.3	22.3	22	9.58	30.9	5.6
Rabattement (m)	29	0.3	88.3	88	28	382.4	19.6

Débit spécifique (m³/h)	19	0.47	200	199.53	13.5	2045.4	45.2
Température (°C)	6	28	36	8	33	7	3
Profondeur toit (m)	30	9	282	273	145.9	4758	68.9
Profondeur mur (m)	4	225	350	125	301.8	3045.6	55.2

Tableau 5: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Maestrichtien (67 ouvrages)

D'autres caractéristiques de la nappe montrent qu'elle est essentiellement captive sur cette zone et présente une bonne porosité dans l'ensemble.

Selon le Rapport d'évaluation Programme AEP il ressort que la qualité des eaux est mauvaise dans la partie ouest de la ligne Sokone – Niakhar, acceptable dans l'arrondissement de Colobane, mais partout ailleurs, elle est moyenne et des poches de fortes teneur en fluor existent partout (5.5 mg/l à Ndiol Mangane et Ndock Saré, 3.4 mg/l à Gossas et Fatick). Nous essayerons d'apporter d'autres éléments caractéristiques de la qualité de l'eau lors de l'étude hydrochimique dans le chapitre suivant.

III.1.2 La couche aquifère du Paléocène

La couche aquifère du Paléocène consiste essentiellement en calcaires, argiles et en sables calcaires. Cette nappe fournit de l'eau à une vaste portion du Sénégal occidental, en particulier au sud de Thiès et dans la péninsule du Cap-vert là où des canaux karstiques dans les calcaires du Paléocène sont réalimentés par la couche sous-jacente de sables du Maestrichtien.

Selon le Rapport d'évaluation elle est captée à des profondeurs variant entre 60 et 150 mètres voire parfois 200 mètres, n'est aquifère que dans le département de Fatick plus précisément dans les arrondissements de Fimela, Tattaguine et Niakhar.

A partir des informations dont nous disposons, il ressort qu'elle est captée par plus de la moitié des ouvrages répertoriés sur cette zone à des profondeurs variant entre 11 et 365 mètres

environ. Cette dernière est la profondeur maximale captée par un seul forage localisé à Nianning.

Sur la zone d'étude c'est une nappe de type semi-captive sur une grande partie de celle-ci et captive sur une autre, sa lithologie est essentiellement constituée de calcaires, et de calcaires marneux, avec une porosité de type fissuré mais aussi karstique (sur une partie de l'arrondissement de Fissel).

En effet les roches carbonatées, comme les calcaires par exemple, présentent à l'origine des fissures. L'action mécanique (corrosion) et chimique (dissolution des carbonates) des eaux souterraines agrandissent les fissures pour aboutir à des conduits, chenaux et cavités, pouvant atteindre de grandes dimensions. C'est le phénomène de karstification, donnant naissance à des réseaux de chenaux (réseaux karstiques). Ces types de formations hydrogéologiques renferment des aquifères importants, constituant la principale ressource en eau.

D'autres éléments caractéristiques de la nappe sont regroupés dans le tableau statistique suivant:

Désignation	Effort	Minimum	Maximum	Écart	Minimum	Maximum	Écart type
Profondeur totale (m)	139	10.66	365	354.34	94.3	1899.16	43.58
Niveau Statique (m)	124	1.8	39.74	41.54	13.65	55.89	7.48
Rabattement (m)	77	0.04	49.06	49.02	8.59	113.56	10.66
Débit spécifique (m³/h)	46	0.110	900	899.89	40.210	18651.33	136.57
Transmissivité (m²/s)	18	6.80E-05	7.4	7.4	0.64	3.73	1.93
Température (°C)	3	30	32	2	31	1	1

Profondeur toit (m)	104	2	119	117	48.72	677.88	26.04
Profondeur mur (m)	4	55	140	85	88.5	1452.33	38.11

Tableau6: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Paléocène (161 ouvrages)

Il apparaît à partir de ce tableau une valeur maximale du débit spécifique (mesurée sur un forage localisé à Keur Cheikh Madiop dans la communauté de Tasset) qui n'est pas habituel pour ce type de nappe; en effet en dehors de celui –ci le débit spécifique maximal serait de l'ordre de 209 m³/h.

Quant à la qualité des eaux elle est comparable à celle du Maestrichtien. Elle est partout saumâtre.

En effet les sédiments du Paléocène qui affleurent le long de la petite côte permettent un apport d'eau marine salée dans les canaux karstiques du paléocène.

Nous tenterons d'apporter d'autres éléments de caractérisation dans le chapitre traitant l'hydrochimie des nappes.

III.1.3 La couche aquifère de l'Eocène

C'est une nappe qui n'est pas très productive dans la région, en effet seul 16 forages sur l'ensemble des ouvrages répertoriés la captent.

Datant de l'Yprésien et du Lutétien, sa lithologie, fortement variable sur les plans vertical et horizontal, est composée essentiellement de marnes et de calcaires d'origine et de composition variables. Les modifications latérales affectant la lithologie gênent de façon considérable la recherche pour l'eau.

La profondeur de la nappe d'eau est variable, elle affleure par endroits dans le Sénégal occidental et le long du fleuve Sénégal. Dans l'ouest et le centre-ouest du Sénégal, cette séquence alimente de nombreux puits et se situe entre 20 à 60 m de la surface.

Quant à la qualité de l'eau elle est variable, souvent fortement alcaline et parfois salé. Son origine est probablement issue de l'eau d'infiltration provenant des couches supérieures à une période de précipitations plus abondantes.

La nappe, qui sur cette zone d'étude est essentiellement captive, présente une porosité de type fissuré. Quant aux autres caractéristiques physiques de la nappe nous avons tenté de les regrouper dans le tableau statistique suivant.

Désignation	Effectif	Minimum	Maximum	Ecart	Moyenne	Variance	Écart type
Profondeur totale (m)	16	15.4	138	122.6	69.72	993.42	31.52
Niveau Statique (m)	15	3.4	40.14	36.74	15.31	77.54	8.81
Rabattement (m)	7	0.05	17.33	17.28	4.92	36.37	6.03
Débit spécifique (m³/h)	4	2.19	1564	1561.81	463.753	55879.741	745.573
Profondeur toit (m)	15	1	67	66	33.81	502.44	22.42
Profondeur mur (m)	3	16.8	74.67	57.87	47.49	846.47	29.09

Tableau7: Eléments statistiques sur la couche aquifère de l'Eocène (16 ouvrages)

III.2 La couche aquifère peu profonde

Les couches aquifères peu profondes du Sénégal constituent la source majeure de la plupart des villages. Ces couches aquifères correspondent à des formations superficielles tertiaires; quaternaires, et de la Période Récente. Elles sont formées de sédiments de l'Eocène Supérieur et du Mio-Pliocène dans la dépression de la Casamance, des dépôts de l'omniprésent "Continental Terminal" à l'est du bassin, de dunes et de sédiments interdunaires dans la région des niayes, de sables subvolcaniques (infrabasaltiques) dans la région de Dakar, de sédiments

alluviaux des fleuves Gambie et Sénégal et des autres cours d'eau et de dépôts alluviaux fossiles dans le Ferlo, le Saloum et le Sénégal occidental.

Dans le cas de cette étude nous intéresserons particulièrement à la nappe du Continental terminal.

III.2.1 Le continental terminal

De vastes portions du sud et de l'est du Bassin Sédimentaire Sénégalais sont couvertes par des dépôts continentaux désignés sous le nom de "Continental Terminal". Des travaux ont indiqué que ces sédiments datent du Mio-pliocène et qu'ils ont au moins en partie une origine marine. Ces sédiments sont en général des sables ou des sables argileux; à cause de leur porosité et de leur perméabilité, ils absorbent la plus grande part des eaux de pluies et forment ainsi l'une des principales couches aquifères peu profondes.

Le Continental terminal est souvent recouvert par des latérites qui forment une croûte relativement imperméable à l'eau; celle-ci tend à encourager le ruissellement jusqu'en des zones où ces latérites ont été érodées et disséquées. Les eaux de ruissellement sont recueillies par ces vallées et pénètrent le Continental Terminal suivant des directions préférentielles qui le plus souvent correspondent à des fractures ou à des failles.

D'autres études indiquent que le Continental Terminal couvre probablement 80000 km² et a en moyenne 40 m d'épaisseur. La qualité de l'eau est bonne et les quantités de solides dissous ne sont pas excessives. Le potentiel en eau de cette couche aquifère est difficile à estimer mais elle constitue actuellement la source en eau de première importance au Sénégal, compte tenu de son rôle de collecteur initial des eaux de pluies.

Dans le cas de notre étude cet aquifère s'étend sur toute la région et est essentiellement captée par tous les puits du Programme. Comme nous l'avons déjà signalé plus haut, elle est constituée des eaux d'infiltration des pluies qui viennent se reposer en état d'équilibre sur une eau saumâtre d'origine maritime consécutive à la dernière invasion marine de la zone survenue au Quaternaire (Nouakchottien). (*Rapport d'Evaluation Programme AEP – 95 – 2000 – ELS - MLS/BUREST - 02/2001*)

Peu d'ouvrages, captant cette nappe libre sur cette zone d'étude, sont répertoriés au SGPRE; ils sont au nombre de 4 ouvrages (3 forages et 1 puits) dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau statistique suivant, l'un étant non exploité:

Désignation	Effectif	Minimum	Maximum	Standard	Moyenne	Variance	Index type
Profondeur totale (m)	4	18.8	350	331.2	177.32	31370.98	177.12
Niveau Statique (m)	4	1.76	16.94	15.18	10.45	57.7	7.6
Rabattement (m)	3	1.52	55.46	53.94	21.5	873.96	29.56
Débit spécifique (m³/h)							
Profondeur toit (m)							
Profondeur mur (m)	2	19	23	4	21	8	2.83

Tableau8: Eléments statistiques sur la couche aquifère du Continental Terminal (4 ouvrages)

La nappe captée par ces quelques ouvrages, et dont la lithologie est essentiellement constituée de sable argileux, présente en général une bonne porosité.

III.2.2 Les puits du programme hydraulique de l'ELS

Le cuvelage des puits

L'étude porte sur un nombre de 72 puits sur un total de 184 puits réalisés et répertoriés.

Selon le rapport d'évaluation Programme AEP réalisé par le BUREST (Bureau de Recherches et d'Etudes Scientifiques et Techniques), il s'agit essentiellement de puits hydrauliques à parois cimentées. Le cuvelage est armé par 20 barres de fer de 6 mm de diamètre espacées de 50 cm.

Cette armature est noyée dans un mortier de ciment de 7 cm d'épaisseur.

La hauteur des passes varie selon la cohérence des terrains traversés entre 0,5 et 2 mètres. Les parois sont maintenues solidaires par un système de crochets. Tous les 7 mètres, le cuvelage est fixé à la roche encaissante par des étriers d'ancrage confectionnés par les puisatiers à l'aide de fer 6.

Ce qui n'est pas conforme à la norme qui consacre l'emploi de 22 ou de 28 barres de fer lisse de 8 cm de diamètre intérieur. Cette armature est croisée horizontalement par des cercles de fer de 6 mm suivant un espacement de 15 cm et sont disposés à l'intérieur des puits.

Ainsi la plupart des puits présente un cuvelage fissuré faisant apparaître les fers rouillés par les eaux qui s'échappent des puisettes. Ceci constitue une source de pollution à l'hydroxyde de fer et témoigne d'une mauvaise mise en œuvre des spécifications techniques par les puisatiers

Une autre contrainte est que ces fers finissent par affleurer dans le puits et retiennent les puisettes en cassant les cordes.

En outre, le cuvelage n'est pas ancré sur le toit de la nappe mais plutôt reste suspendu ce qui peut provoquer des éboulements de terrains et le comblement du puits.

Le captage des puits

Le captage est réalisé généralement dans les sables aquifères par des buses trouées préfabriquées en atelier par l'équipe du Centre de Puits. Les buses sont descendues dans le puits au moyen d'une grue élévateur.

Les hauteurs d'eau sont généralement faibles (1 à 2 mètres) du fait du captage manuel mais surtout de la faible épaisseur de l'eau douce dans la nappe phréatique dans la plupart des villages.

En effet plus de la moitié des puits capte la partie superficielle de la nappe constituée d'une lentille d'eau douce sur une eau saumâtre assez abondante.

Lorsque l'aquifère est constituée par une roche cohérente comme les calcaires, le captage est formé par des buses pleines moulées sur place (le coffrage est descendu dans les puits).

Ces buses ne sont pas perforées et les arrivées d'eau dans les puits se font au travers de l'espace laissé entre deux buses (5 à 10 cm environ).

La margelle et la dalle de propreté

Elle est faite en maçonnerie d'agglomérés pleins de 15 cm d'épaisseur. Ainsi la plupart des margelles sont facilement entaillées par les cordes de puisage ce qui donne rapidement aux puits un aspect abîmé.

Autour des puits est aménagé une espace en béton armé de 1mètre de rayon. Ce perron est conçu pour empêcher les eaux perdues de stagner et de former un borbier autour du puits d'où son nom de dalle anti-borbier.

D'autres paramètres, caractérisant les puits du programme et mesurés lors d'une mission effectuée sur le terrain par une équipe du SGPRE, sont regroupés dans les deux tableaux suivants; ils concernent en tout 72 puits localisés dans la région suivant le type de captage, à savoir dans les sables ou les calcaires(*voir carte des puits du Programme de l'ELS fig3*):

Désignation	Effectif	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Variance	Coef. type
Ns- repère (m)	21	2.86	12.17	9.31	5.89	7.44	2.73
Margelle (m)	21	0.61	1.07	0.46	0.85	0.01	0.1
Ns-sol (m)	21	2.06	11.37	9.31	5.04	7.52	2.74
Conductivité (µs/cm)	21	118	5000	4882	1294	1369139	1170
pH	20	5.9	8.1	2.2	6.7	0.3	0.6
Résidu sec (mg/l)	21	71	3000	2929	776	492928	702

Tableau9: Eléments statistiques pour les puits – sables (21 puits)

Désignation	Effectif	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Variance	Coef. type
Ns- repère (m)	43	3.22	45.18	41.96	13.42	81.97	9.04
Margelle (m)	43	0.6	1.1	0.5	0.84	0.01	0.09
Ns-sol (m)	43	2.37	44.88	42.21	12.58	81.99	9.05

Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	43	5	7530	7525	1394	1581831	1258
pH	40	5.9	8.4	2.5	7.4	0.4	0.6
Résidu sec (mg/l)	43	3	4518	4515	837	569407	755

Tableau10: Eléments statistiques pour les puits – calcaires (44 puits)

III.2.3 Les autres ouvrages

Nous retrouvons dans la même zone d'autres ouvrages répertoriés au SGPRES tels que des forages (170), des forages-puits (12), des piézomètres (24), des puits-forages (4), des sondages (5), ainsi que des forages-reconnaitances (2) mais aussi des puits (22) déjà implantés, que ceux du programme de l'ELS viennent compléter.

Ce sont des ouvrages qui, à des profondeurs et des débits variables suivant le type de nappe, captent essentiellement la nappe du Paléocène comme nous pouvons le constater sur la carte (page suivante) suivi de celle du Maestrichtien; viennent ensuite les nappes de l'Eocène, du Continental terminal et du Quaternaire.

Dans le contexte de la pérennité de ces ouvrages, bien que certains soit en service ou exploités d'autres par contre sont abandonnés, hors service, secs ou non exploités. Ils servent en grande partie à l'approvisionnement en eau potable des populations (AEP) mais aussi, bien que faible à l'irrigation, à la mesure piézométrique et à l'industrie (un seul forage répertorié dans l'arrondissement de Ngoye).

L'approvisionnement en eau se fait également dans les céanes (puits traditionnels à paroi non cimentée), mais depuis l'avènement du programme de l'ELS cette tendance a largement diminué, la population préférant largement utiliser les puits.

(Fig3: Carte des puits du Programme de l'Eglise Luthérienne du Sénégal)

(Fig4: Carte des différents types d'ouvrages)

(Fig5: Carte des ouvrages suivant les types de nappe captée)

Fig3: Carte des puits du Programme de l'Eglise Luthérienne du Sénégal

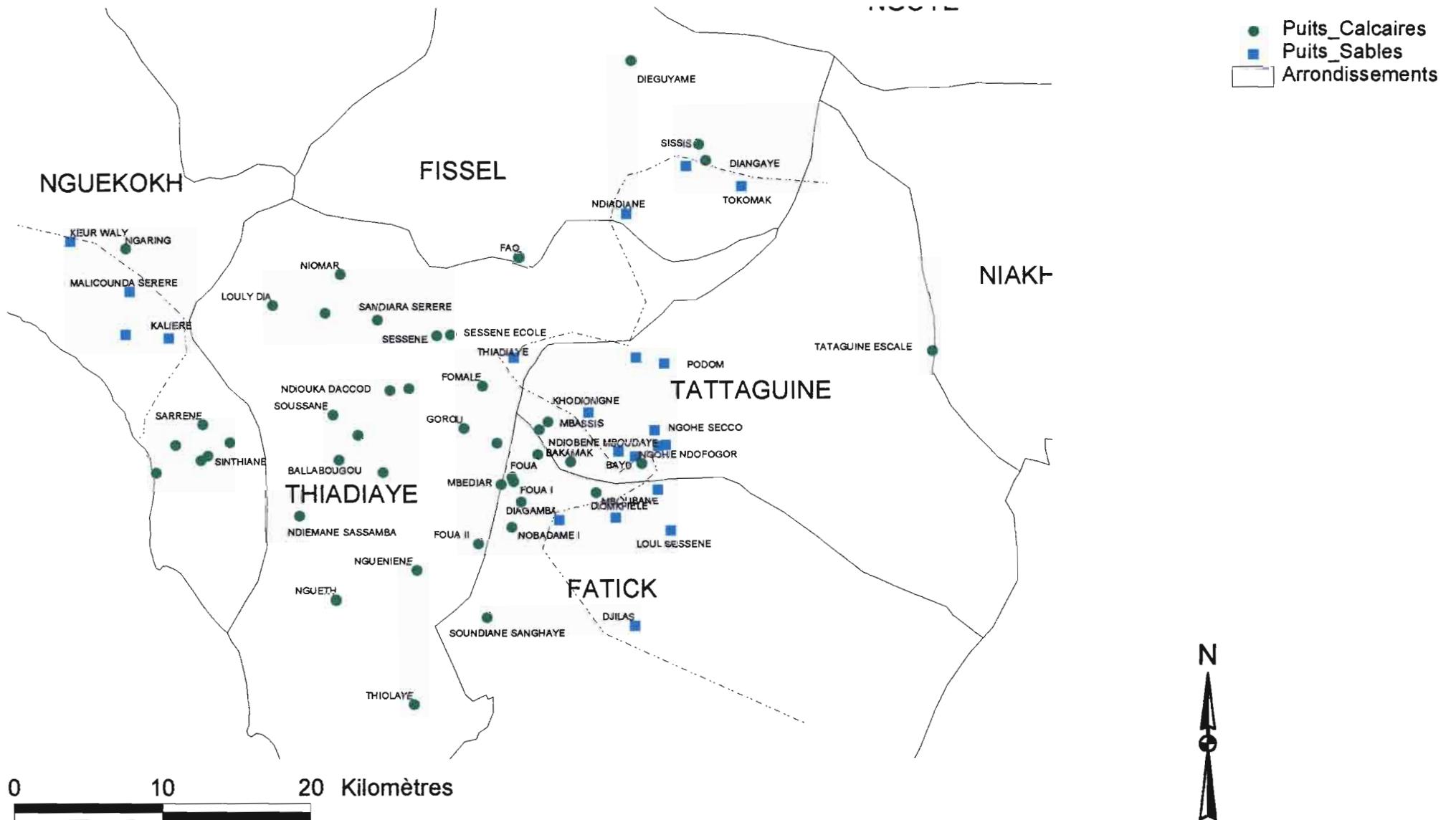
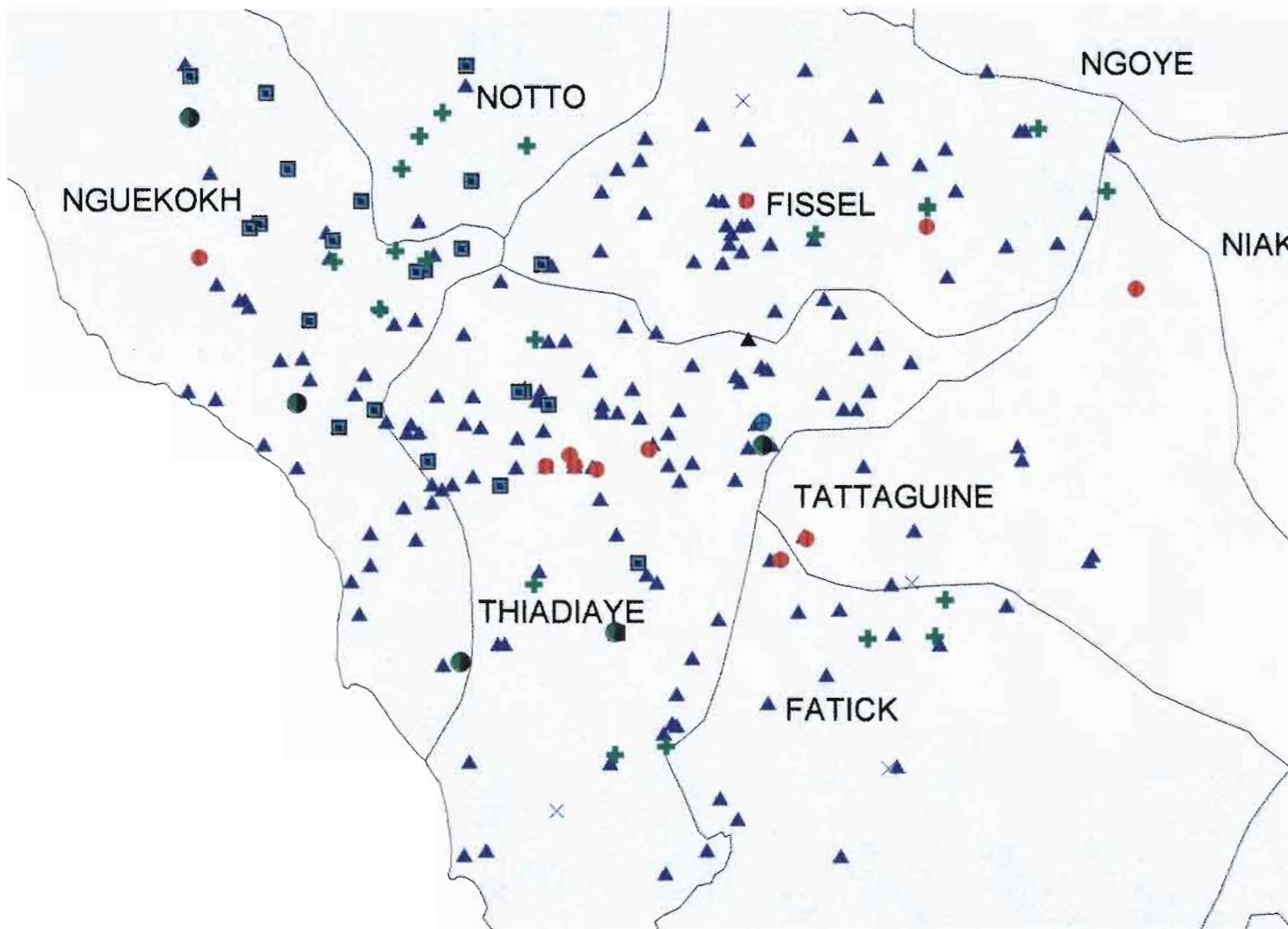


Fig4: Carte des différents types d'ouvrages



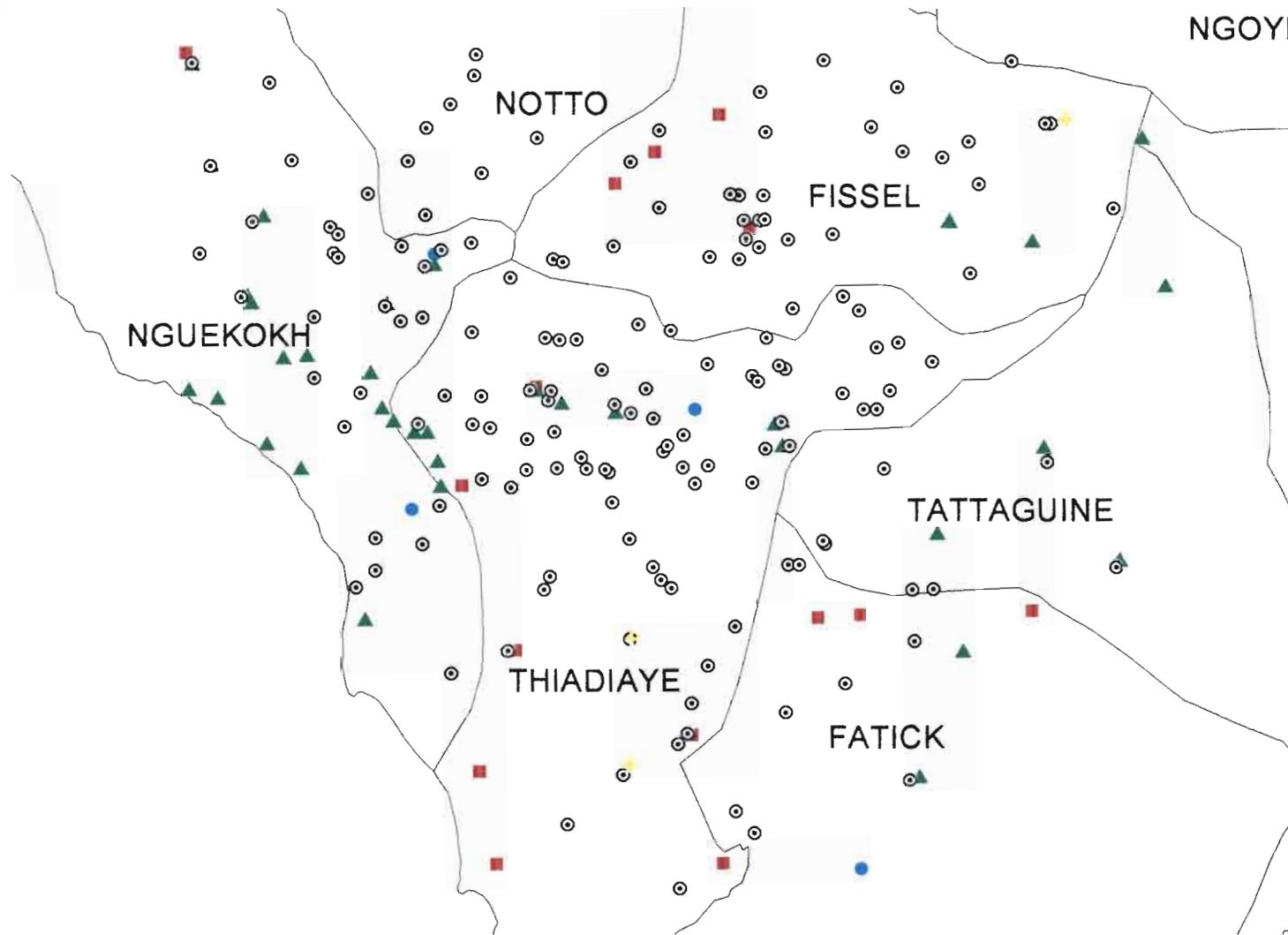
- Sondage
- × Puits-forage
- + puits
- piézomètre
- forage-reconnaissance
- forage-puit
- ▲ forage
- Arrondissement

0 10 20 Kilomètres



- ◆ Ouvrages de la nappe du Quaternaire
- Ouvrages de la nappe du Paléocène
- ▲ Ouvrages de la nappe du Maestrichtien
- Ouvrages de la nappe de l'Eocène
- Ouvrages de la nappe du Continental Terminal
- Arrondissements

Fig5: Carte des ouvrages suivant la formation captée



NGOYE

0 6 12 Kilomètres



IV. Hydrochimie

La détermination des caractéristiques chimiques des eaux de la région proprement dite s'est faite essentiellement d'une part à partir de la nappe superficielle du Continental Terminal (captée par tous les puits du Programme) et d'autre part à partir des nappes profondes du Paléocène et du Maestrichtien qui sont les plus captées sur cette zone.

Les caractères retenus nous permettant de définir les différentes eaux suivant leur famille chimique ou leur degré de potabilité sont les suivants:

- le résidu sec;
- la conductivité;
- le potentiel hydrogène;
- les ions prépondérants: Cl, Mg, NH₄, NO₃, SO₄, F, Fe.

Pour chacun de ces paramètres nous dresserons une carte qui nous servira de base pour effectuer les analyses chimiques des différents types de nappes captées. Nous effectuerons pour cela une comparaison entre les teneurs obtenues et les normes préconisées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ou à défaut l'Institut Sénégalaise de Normalisation (ISN), vis à vis des eaux de boisson en vue de suggérer des méthodes de traitement visant à améliorer la qualité des eaux.

Un autre paramètre important à prendre en compte mais que nous n'avons pas étudié vu le manque de données, il s'agit de la température.

En effet elle constitue un critère très apprécié pour les eaux de consommation. Les eaux souterraines sont en général plus fraîches que les eaux de surface, leur température est pratiquement constante, alors qu'il n'en va pas de même pour les eaux de surface, sujettes à des variations de températures saisonnières. D'un autre côté le développement planctonique, s'il est limité en zone froide ou tempérée, sera accéléré là où la température sera plus élevée.

Les données dont nous disposons nous ont été fournies par le SGPRE, elles concernent aussi bien les différents ouvrages répertoriés au niveau du service mais également les puits du programme. Les plus récentes datent de l'année 1999.

IV.1 Eléments statistiques sur la chimie

Ils concernent la nappe du Paléocène, celle du Maestrichtien et du Continental Terminal qui sont les plus captées dans cette zone. Pour chacune d'elle nous avons dressé un tableau statistique regroupant l'ensemble des paramètres chimiques qui les constituent:

Designation	Echant	Minimum	Maximum	Etendue	Moyenne	Variance	Écart- type
pH-situ mesuré in situ	27	7.1	8.1	1	7.6	0.1	0.3
pH-labo mesuré au labo	114	7	8.4	1.4	7.6	0.1	0.3
Conductivité (µs/cm)	6	800	1566	766	1093	100187	317
Résidu sec (mg/l)	120	336	6840	6504	1459.85	1454702.68	1206.11
Cl (chlorure) (mg/l)	116	24.10	3340.30	3316.20	503.50	375066.3	612.43
SO₄ (sulfates) (mg/l)	109	-0.5	730.1	730.6	142.32	32191.52	179.42
HCO₃ (mg/l) CO₃ (bicarbonates) (mg/l)	109	201.4	720	518.6	403.5	8895.9	94.3
NO₃ (nitrate) (mg/l)	96	-2	451.3	453.30	6.47	2206.55	46.97

F (fluorure) (mg/l)	114	-0.1	12	12.1	3.39	7.59	2.76
P₂O₅ (phosphate) (mg/l)							
Ca (calcium) (mg/l)	114	7.6	596.4	588.8	92.36	6705.13	81.88
Mg (magnésium) (mg/l)	114	1	202.3	201.3	68.71	1678.74	40.97
Na (sodium) (mg/l)	114	3.5	1795	1791.5	303.91	123424.53	351.32
K (potassium) (mg/l)	114	0	639	639	15.13	3619.18	60.16
NH₄ (ammonium) (mg/l)	88	-0.1	20.1	20.2	0.39	5.08	2.25
Fe (fer total) (mg/l)	10	-0.1	4	4.1	0.77	1.93	1.39

Tableau 1: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du Paléocène (161 ouvrages)

	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
pH-situ mesuré in situ	12	7.4	8.3	0.9	7.9	0.1	0.3	

pH-labo mesuré au labo	33	6.1	8.6	2.5	7.8	0.2	0.5
Conductivité (µs/cm)	4	2	2747	2745	1182	1595518	1263
Résidu sec (mg/l)	34	93.06	10112	10018.94	1823.15	3919395.78	1979.75
Cl (chlorure) (mg/l)	34	14.15	5248.1	5233.95	786.56	1128866.76	1062.48
SO₄ (sulfates) (mg/l)	29	7.6	703.2	695.6	93.38	25112.84	158.47
HCO₃ (mg/l)	30	34.9	1087.3	1052.4	403.2	48340.8	219.9
CO₃ (bicarbonates) (mg/l)	5	0	150	150	41	3800	62
NO₃ (nitrate) (mg/l)	30	-2	18	20	-0.02	19.58	4.43
F (fluorure) (mg/l)	31	-0.1	5.8	5.9	1.21	1.98	1.41
P₂O₅ (phosphate) (mg/l)							
Ca (calcium) (mg/l)	33	6.8	426.9	420.1	54.88	5561.95	74.58

Mg (magnésium) (mg/l)	33	2.1	294.8	292.70	30.86	3283.3	57.3
Na (sodium) (mg/l)	33	11.5	2690	2678.5	574.3	372852.12	610.62
K (potassium) (mg/l)	32	-0.4	68	68.4	9.43	229.29	15.14
NH₄ (ammonium) (mg/l)	27	-0.1	1.4	1.5	0.12	0.24	0.49
Fe (fer total) (mg/l)	21	-0.5	2	2.5	0.27	0.39	0.62

Tableau12: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du Maestrichtien (37 ouvrages)

Designation	Effectif	Minimum	Maximum	Ecart	Moyenne	Variance	Ecart type
pH-situ mesuré in situ							
pH-labo mesuré au labo	3	5.3	7.9	2.6	7	2.2	1.5
Conductivité (µs/cm)							
Résidu sec (mg/l)	3	622	2792	2170	1754.67	1184041.33	1088.14
Cl (chlorure) (mg/l)	3	112.8	1428.63	1315.83	745.48	434763.07	659.37

SO₄ (sulfates) (mg/l)	2	75.84	83.6	7.76	79.72	30.11	5.49
HCO₃ (mg/l)	3	8.5	634.6	626.1	346.5	99872.8	316
CO₃ (bicarbonates) (mg/l)							
NO₃ (nitrate) (mg/l)	3	-2	320	322	105.93	34369.21	185.39
F (fluorure) (mg/l)							
P₂O₅ (phosphate) (mg/l)							
Ca (calcium) (mg/l)	3	15.2	58.5	43.3	33.12	510.54	22.6
Mg (magnésium) (mg/l)	3	13.36	34.5	21.14	21.39	131.13	11.45
Na (sodium) (mg/l)	3	59	1042	983	590	246253	496.24
K (potassium) (mg/l)	3	6.50	24.8	18.3	17.93	99.36	9.97
NH₄ (ammonium) (mg/l)							

Fe							
(fer total)	2	0.23	0.88	0.65	0.56	0.21	0.46
(mg/l)							

Tableau13: Eléments statistiques sur la chimie de la couche aquifère du Continental Terminal (4 ouvrages)

N.B: les valeurs négatives correspondent à des teneurs inférieures à celle indiquée après le signe "-".

IV.2 Paramètres physico-chimiques

IV.2.1 Le potentiel Hydrogène (pH)

C'est un coefficient caractérisant l'acidité ou la basicité d'une solution. Dans le cas des eaux de consommation les normes de l'ISN recommandent un maximum entre 6.5 et 8.5.

Pour les puits du programme de cette région leur pH varie respectivement entre 5.9 et 8.1 pour les puits captant dans les sables, et 8.4 et 5.9 pour les puits captant dans les calcaires. Ce qui est admissible vis à vis des normes préconisées.

Pour les nappes du Paléocène et du Maestrichtien nous disposons pour chacune d'elle du pH-situ (mesuré in situ) et du pH-labo (mesuré au labo). Et comme nous pouvons le constater sur les tableaux précédents et les cartes suivantes elles respectent toutes les deux en général les normes de l'ISN.

(Fig6: Carte du pH pour les puits de l'ELS captant dans les sables)

(Fig7: Carte du pH pour les puits de l'ELS captant dans les calcaires)

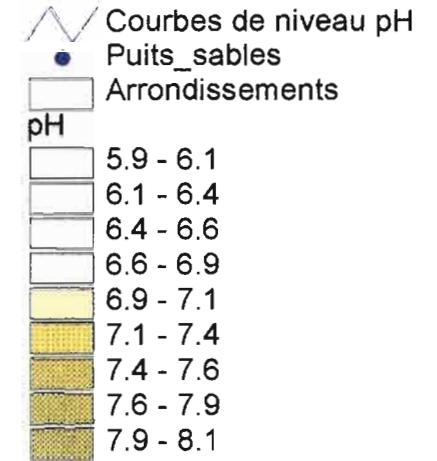
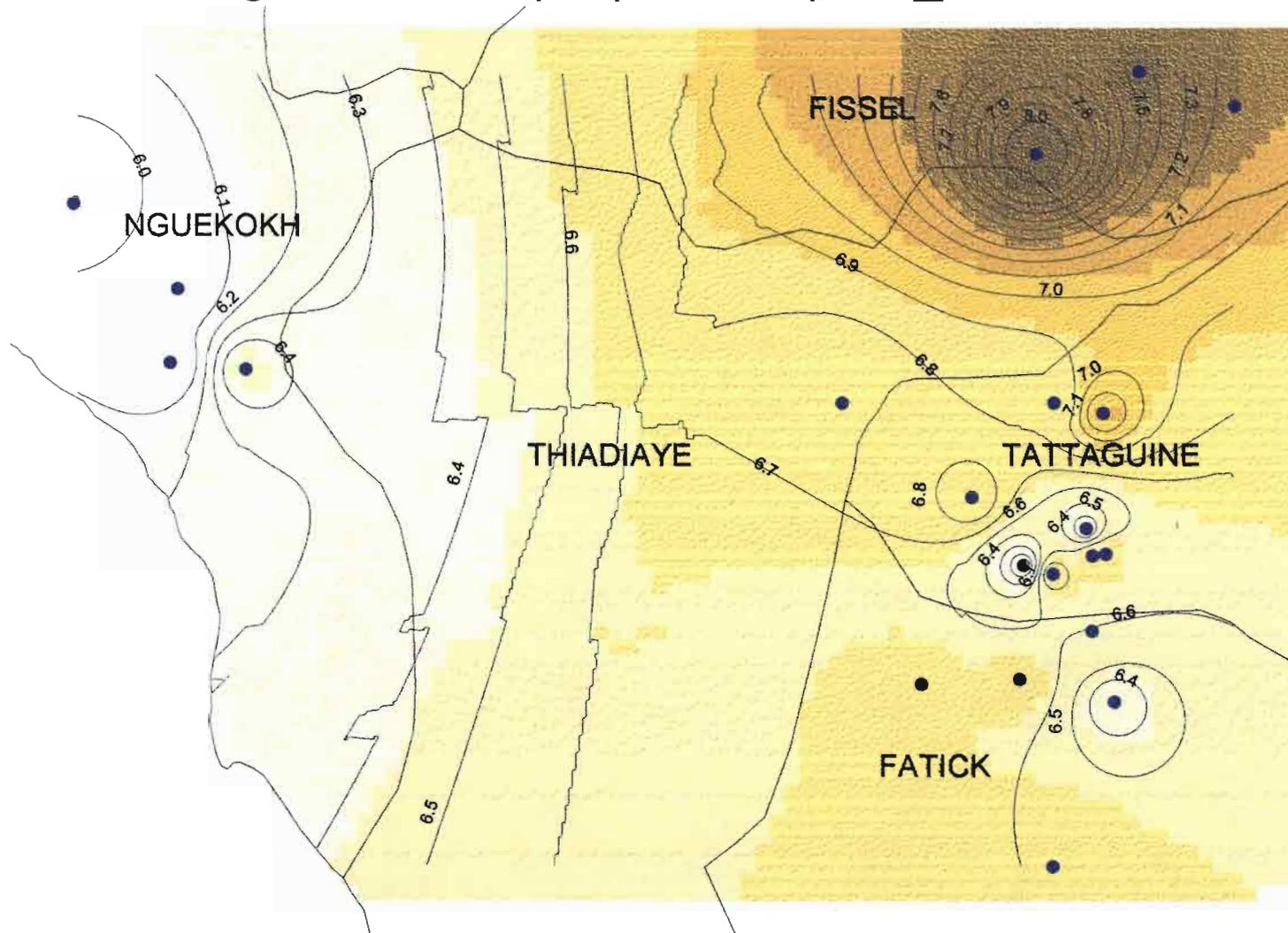
(Fig8: Carte du pH-labo pour la nappe du Paléocène)

(Fig9: Carte du pH-labo pour la nappe du Maestrichtien)

IV.2.2 La conductivité

La propriété de l'eau à conduire le courant électrique est liée à la concentration totale des substances ionisées ainsi qu'à la température à laquelle sont effectuées les mesures. La mobilité de chacun des ces ions dissous, leurs valences, ainsi que leurs concentrations affectent la conductivité.

Fig6: Carte du pH pour les puits_sables



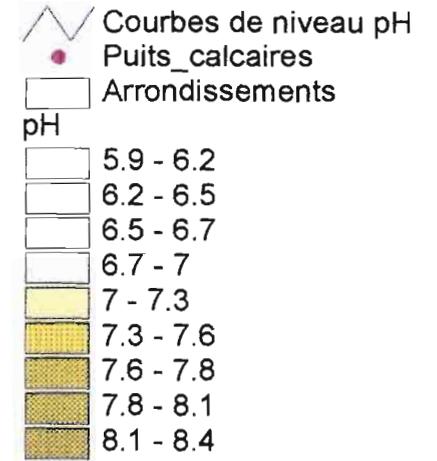
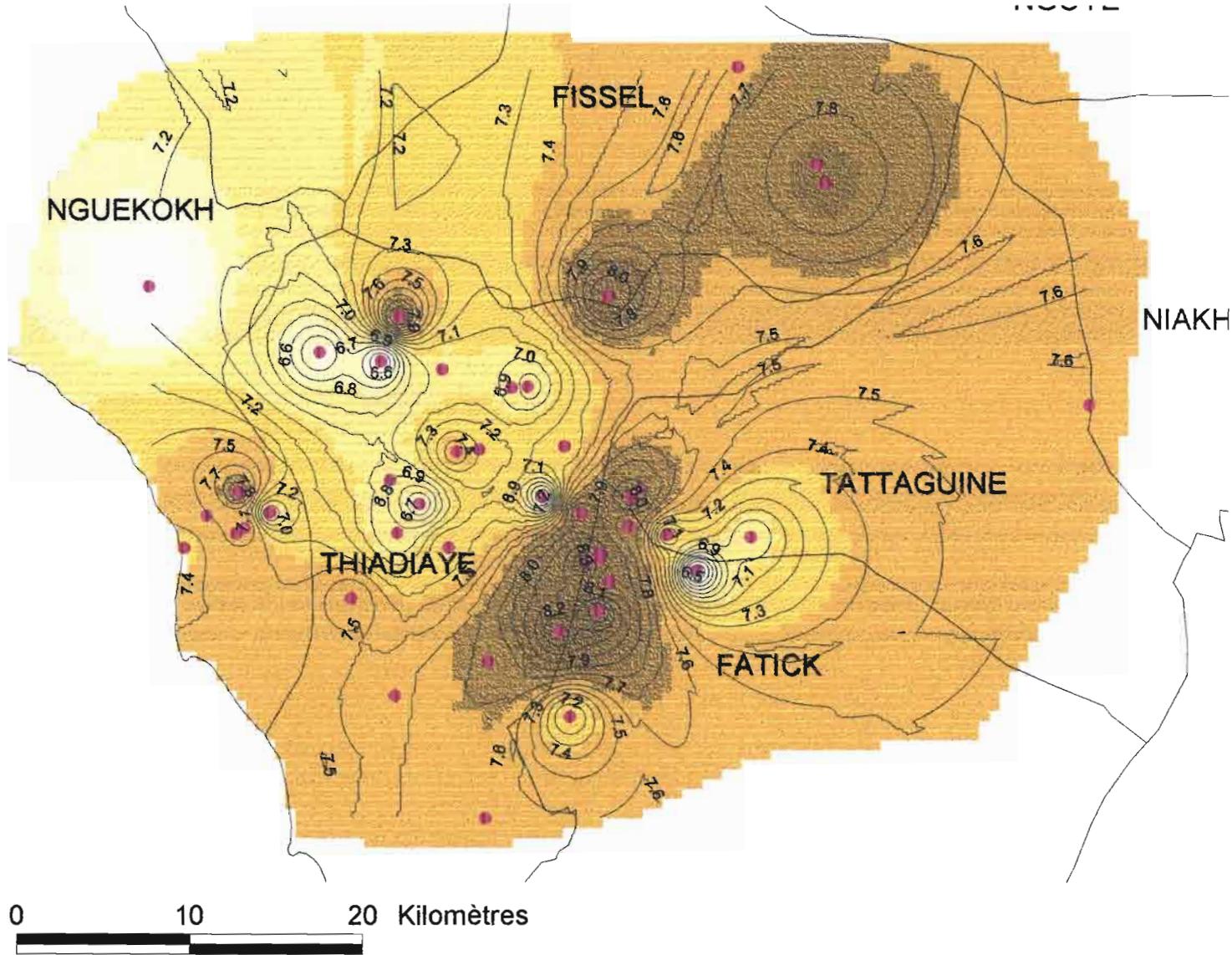


Fig7: Carte du pH pour les puits_calcaires



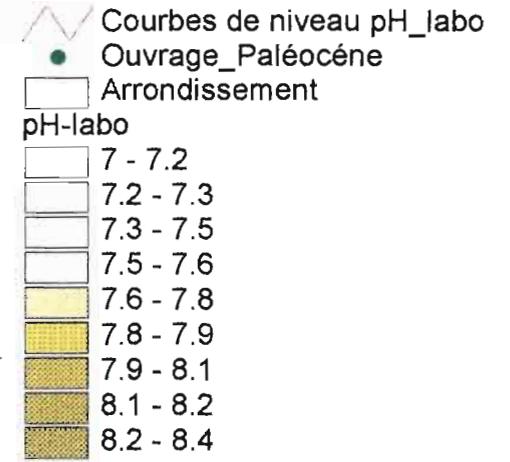


Fig8: Carte du pH-labo pour la nappe du Paléocène

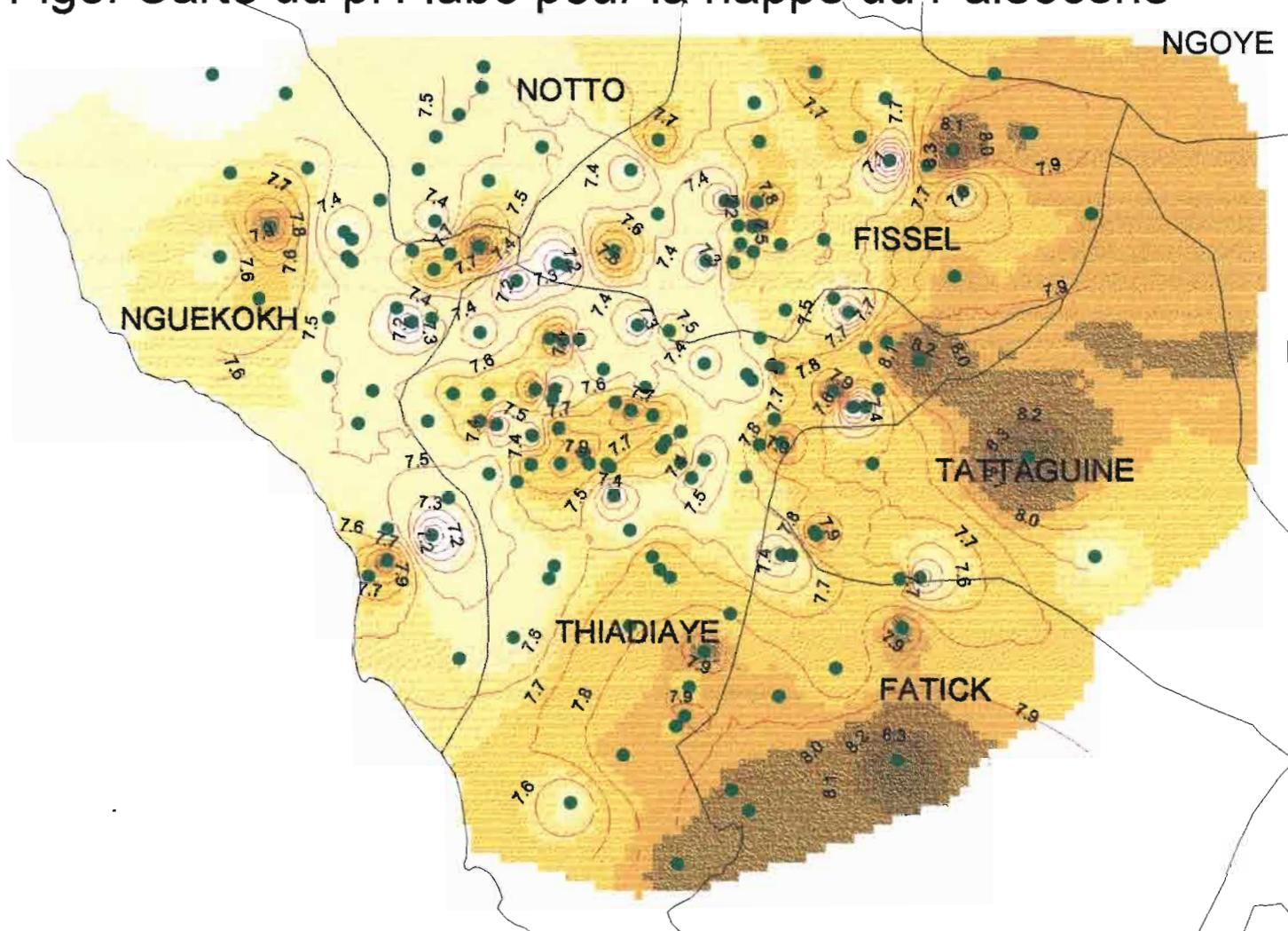
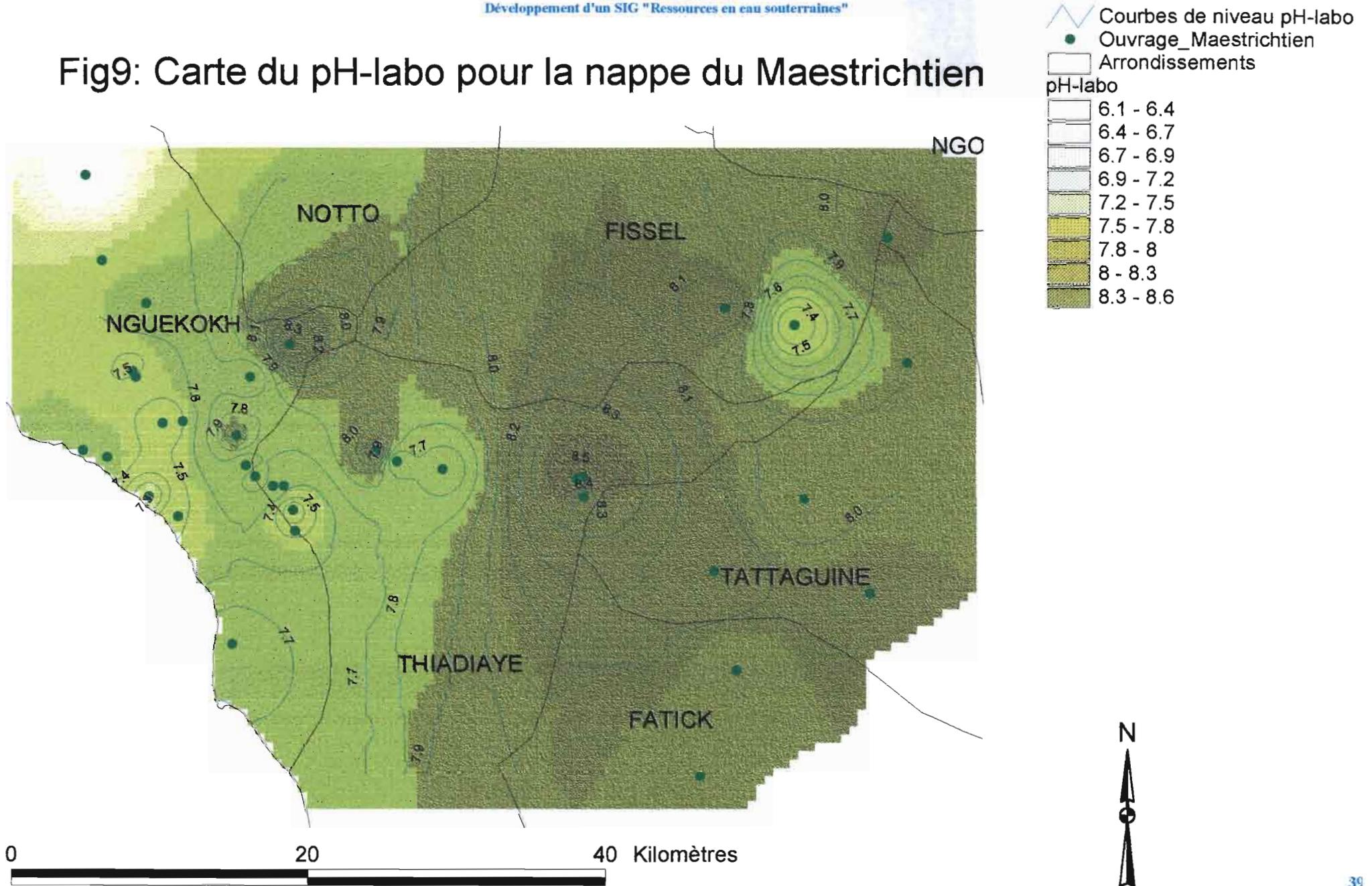


Fig9: Carte du pH-labo pour la nappe du Maestrichtien



La mesure de ce paramètre important peut servir à mesurer les variations de concentration des substances minérales dissoutes dans les eaux brutes. Les normes de l'ISN fixe un maximum admissible de l'ordre de 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 20°C.

Dans le cas des puits du programme captant dans les sables ou les calcaires, ces derniers présentent respectivement une conductivité moyenne de l'ordre de 1294 et 1394 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Les rares valeurs ne respectant pas la norme sont enregistrées dans les villages suivants: Nianning (Ecole), Soundiane Sanghaye, Thiolaye, Loul Sesséne, et Ngohe Secco.

(Fig10: Carte des conductivités pour les puits de l'ELS captant dans les sables)

(Fig11: Carte des conductivités pour les puits de l'ELS captant dans les calcaires)

IV.2.3 Le résidu sec

Le résidu sec ou concentration totale donne la quantité de matières solides en suspension dans un échantillon d'eau. En ce qui concerne les eaux captées par les puits du programme nous avons un résidu sec moyen de 817 mg/l. Tenant compte du maximum admissible par les normes de l'ISN qui classe comme eaux de bonne qualité, celle dont le résidu sec est inférieur à 2000 mg/l et cela malgré quelques fortes valeurs observées dans les villages suivants: Nianning (Ecole), Soundiane Sanguaye, Thiolaye, Loul Sesséne, nous pouvons dire que les nappes phréatiques de cette région ne sont pas en général minéralisées.

Mais ce faible taux de résidus de l'eau mesurée dans les puits ne signifie pas une sécurité de la qualité de l'eau.

Quant aux aquifères les plus captées à savoir la nappe du Paléocène et celle du Maestrichtien leur teneur moyenne en résidus est respectivement de 1459.85 mg/l et de 1823.15 mg/l; ce qui est acceptable compte tenu de la valeur indiquée par les normes de l'ISN.

Mais comme nous pouvons l'observer sur la carte de répartition des résidus pour chacune des nappes, il existe des zones présentant de fortes valeurs de résidus secs. Il s'agit pour la nappe du paléocène de quelques villages des communautés de Nguekokh, Ndiagagniao, Fissel, Ngueniéne, et Sandiara dans le département de Mbour, et une partie de la communauté de Tattaguine dans le département de Fatick. Quant à la nappe du Maestrichtien les zones

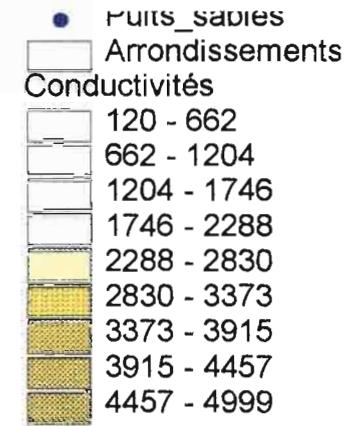


Fig10: Carte des conductivités pour les puits_sables

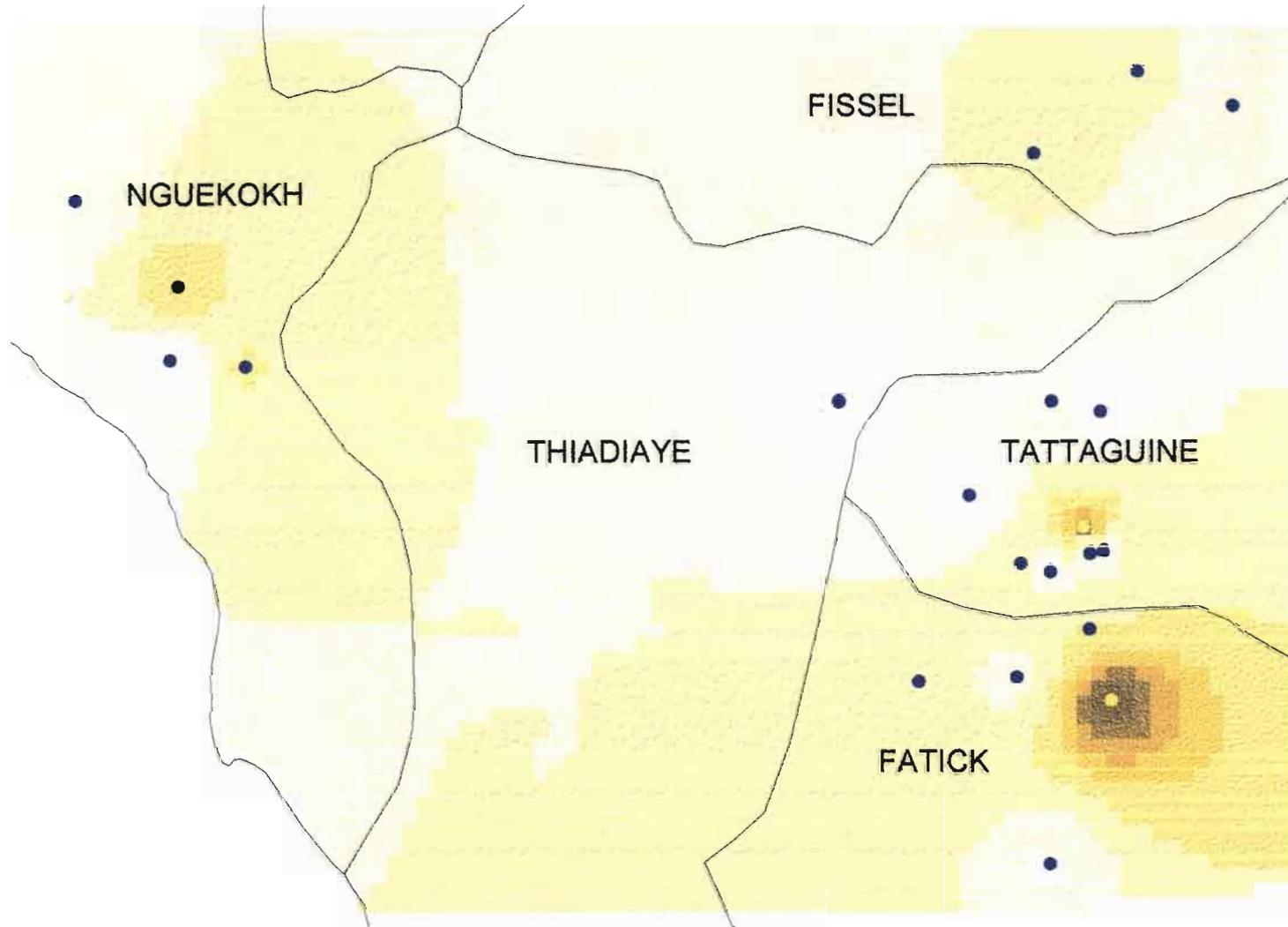


Fig11: Carte des conductivités pour les puits_calcaires

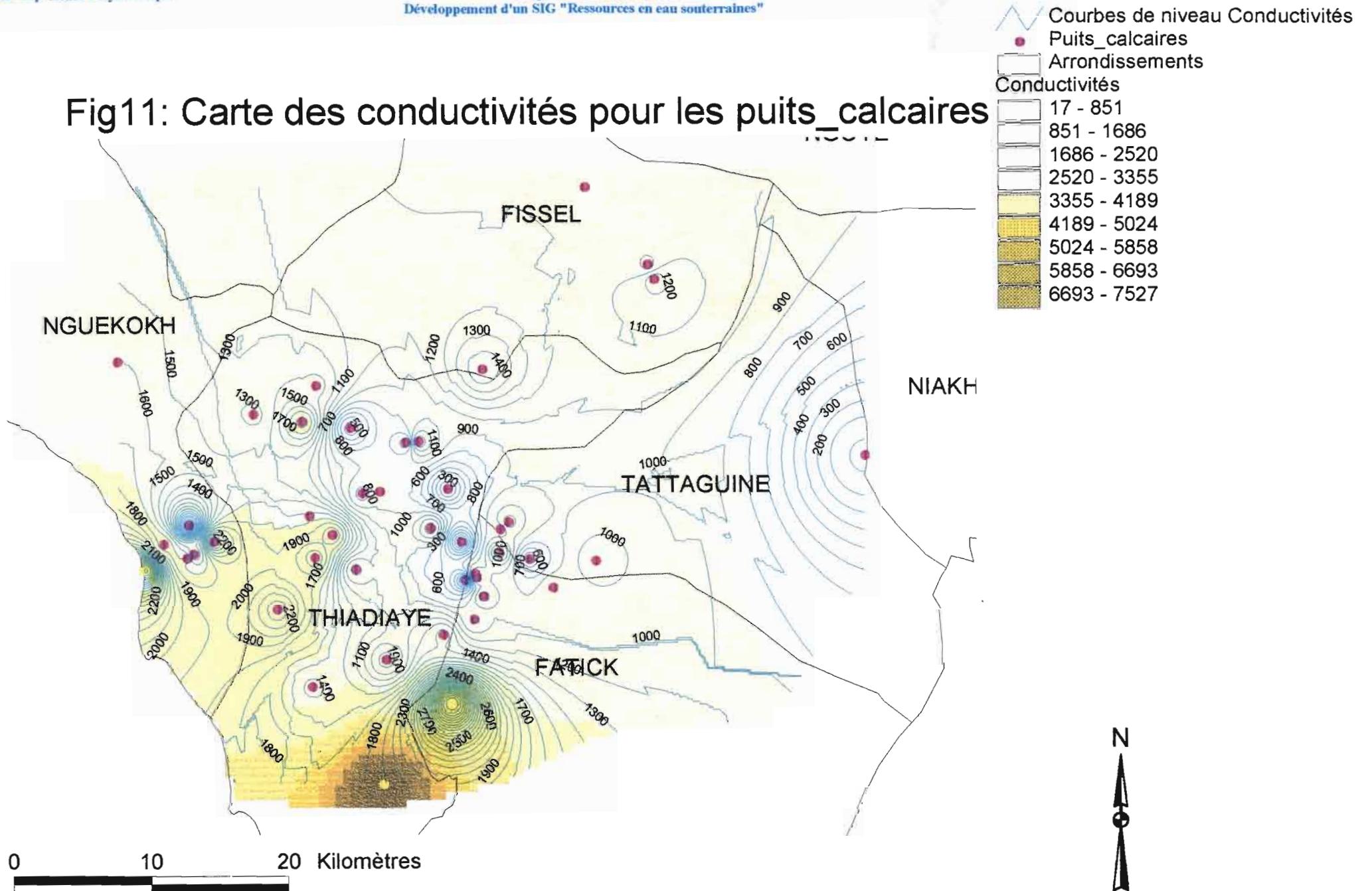


Fig12: Carte des résidus secs pour les puits_sables

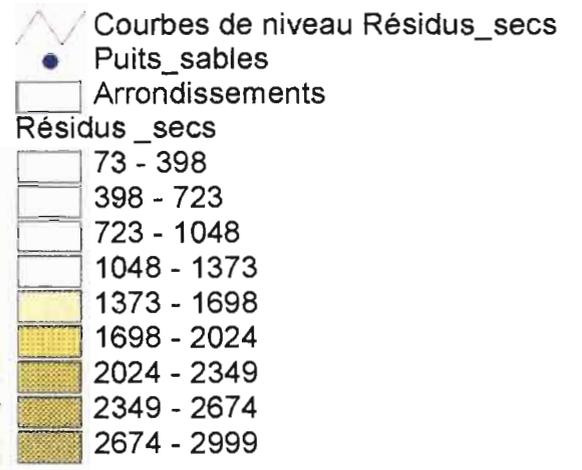
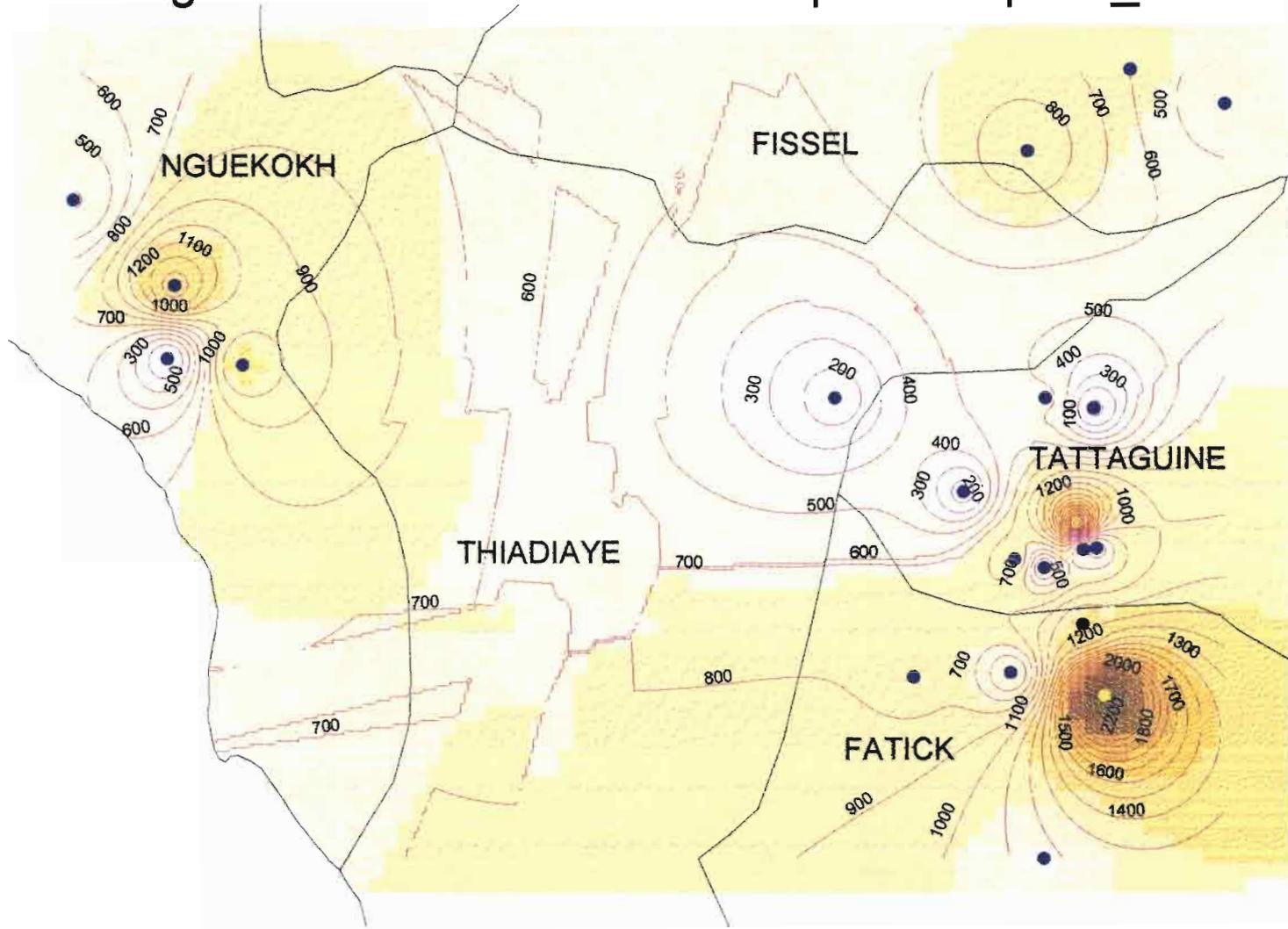




Fig13: Carte des résidus secs pour les puits_calcaires

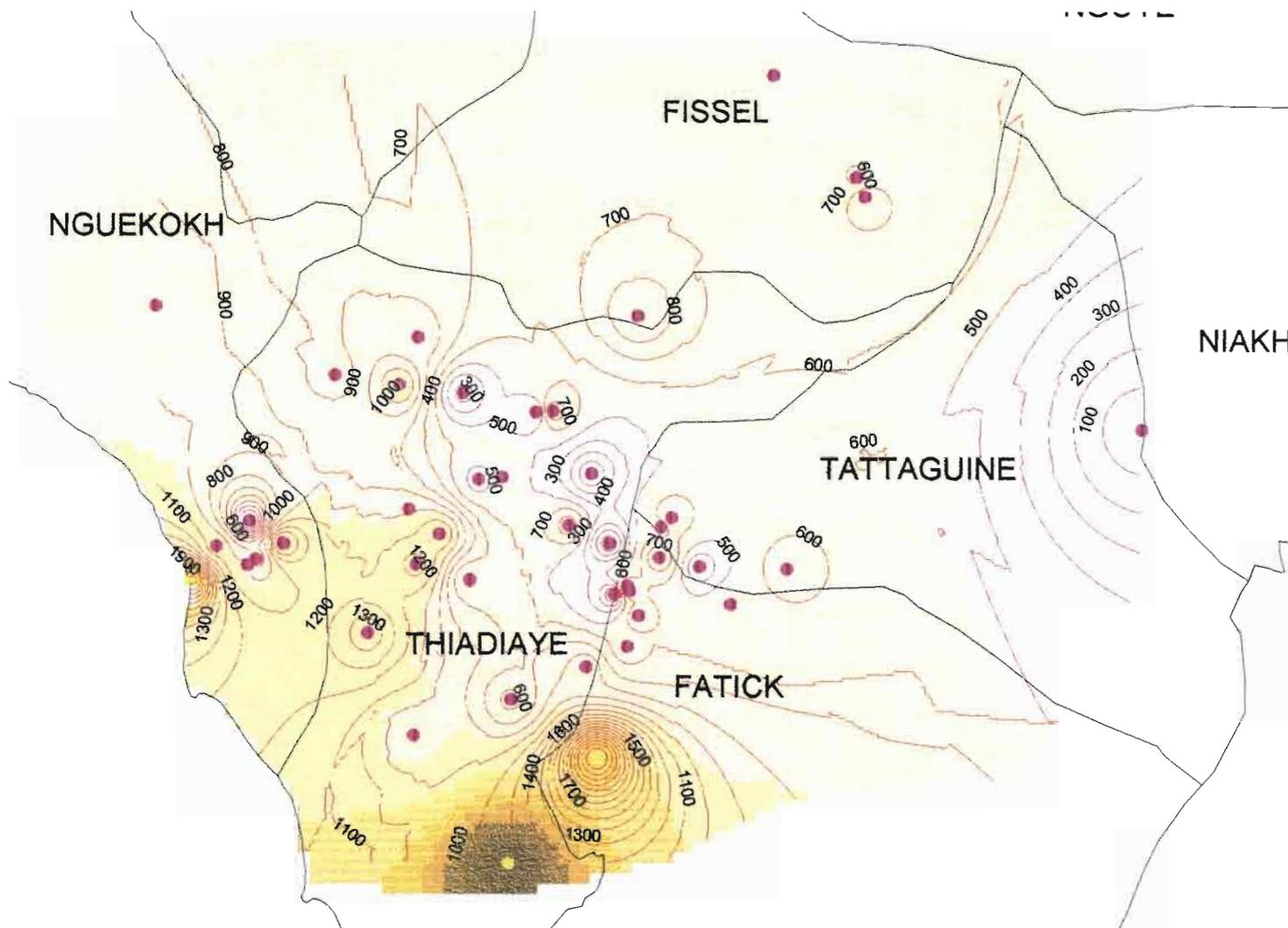


Fig14: Carte des résidus secs pour la nappe du Paléocène

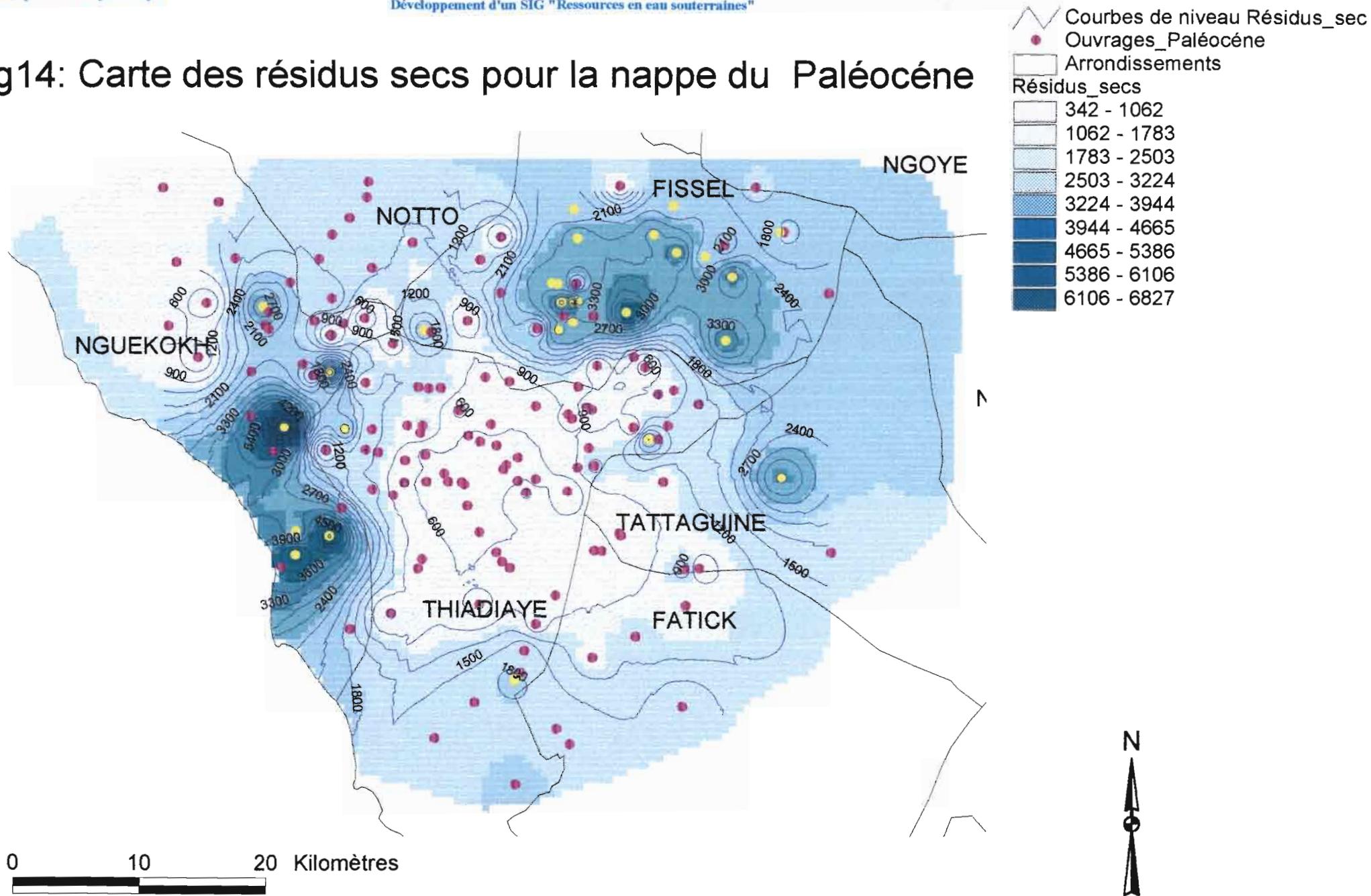
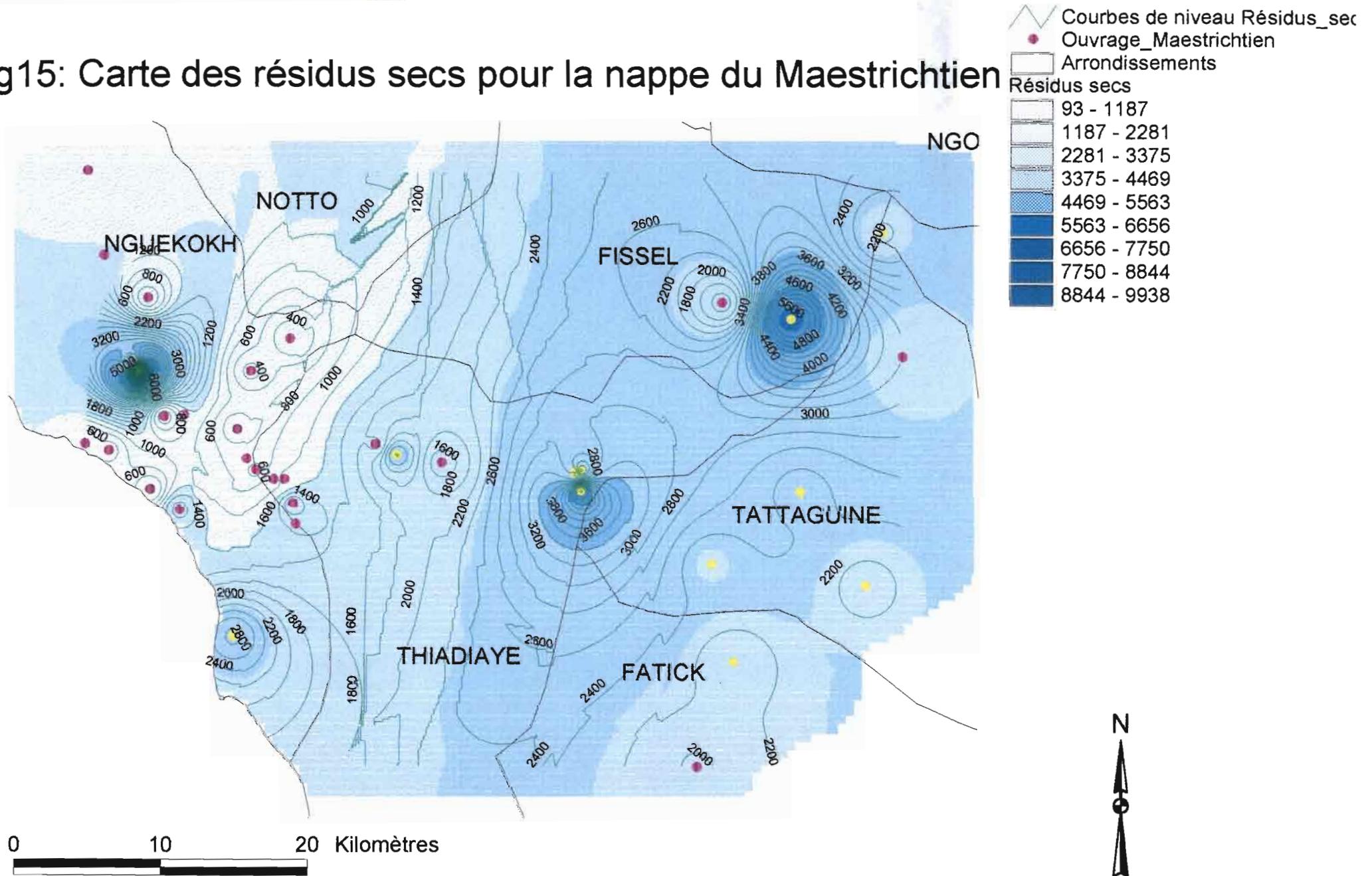


Fig15: Carte des résidus secs pour la nappe du Maestrichtien



présentant des résidus élevés se trouvent essentiellement dans les villages des communautés suivantes: Nguekokh, Thiadiaye, Malicounda, Fissel pour le département de Mbour; Tattaguine, Diouroup, et Loul sessène pour le département de Fatick..

(Fig12: Carte des résidus secs pour les puits de l'ELS captant dans les sables)

(Fig13: Carte des résidus secs pour les puits de l'ELS captant dans les calcaires)

(Fig14: Carte des résidus secs pour la nappe du Paléocène)

(Fig15: Carte des résidus secs pour la nappe du Maestrichtien)

IV.2.4 Le magnésium

Certaines études indiquent qu'à partir de la concentration de 100 mg/l pour des sujets sensibles, le magnésium donne un goût désagréable à l'eau. S'ils ne provoquent pas d'effets toxiques, les sels de magnésium ont un effet laxatif à partir de 500 mg/l. Cette action diminue rapidement avec l'accoutumance. L'interprétation du rôle du magnésium doit se faire en liaison avec les sulfates. Dans les zones arides, il est arrivé que les populations consomment couramment sans problèmes majeurs des eaux contenant 200 mg/l de magnésium avec des teneurs élevées en sulfates.

Dans le cas de notre étude les teneurs moyennes varient respectivement pour la nappe du Paléocène et celle du Maestrichtien entre 30.86 et 68.71 mg/l. En tenant du maximum admissible fixé par l'ISN qui est de l'ordre de 150 mg/l, nous notons que les eaux de ces deux types de nappes ne présentent pas en général une forte teneur en magnésium, sauf dans les quelques villages, du département de Mbour, suivants: à Gandigal et Langhomak pour la nappe du Maestrichtien; à Bath Escale, Guittyr Ouolof, Ndandiaye, Thiandéne, Mbalakhate, Falokh Sérère, et à Nguéniéne Sérère pour la nappe du Paléocène

(Fig16: Carte du magnésium pour la nappe du Paléocène)

(Fig17: Carte du magnésium pour la nappe du Maestrichtien)

Fig16: Carte du magnésium pour la nappe du Paléocène

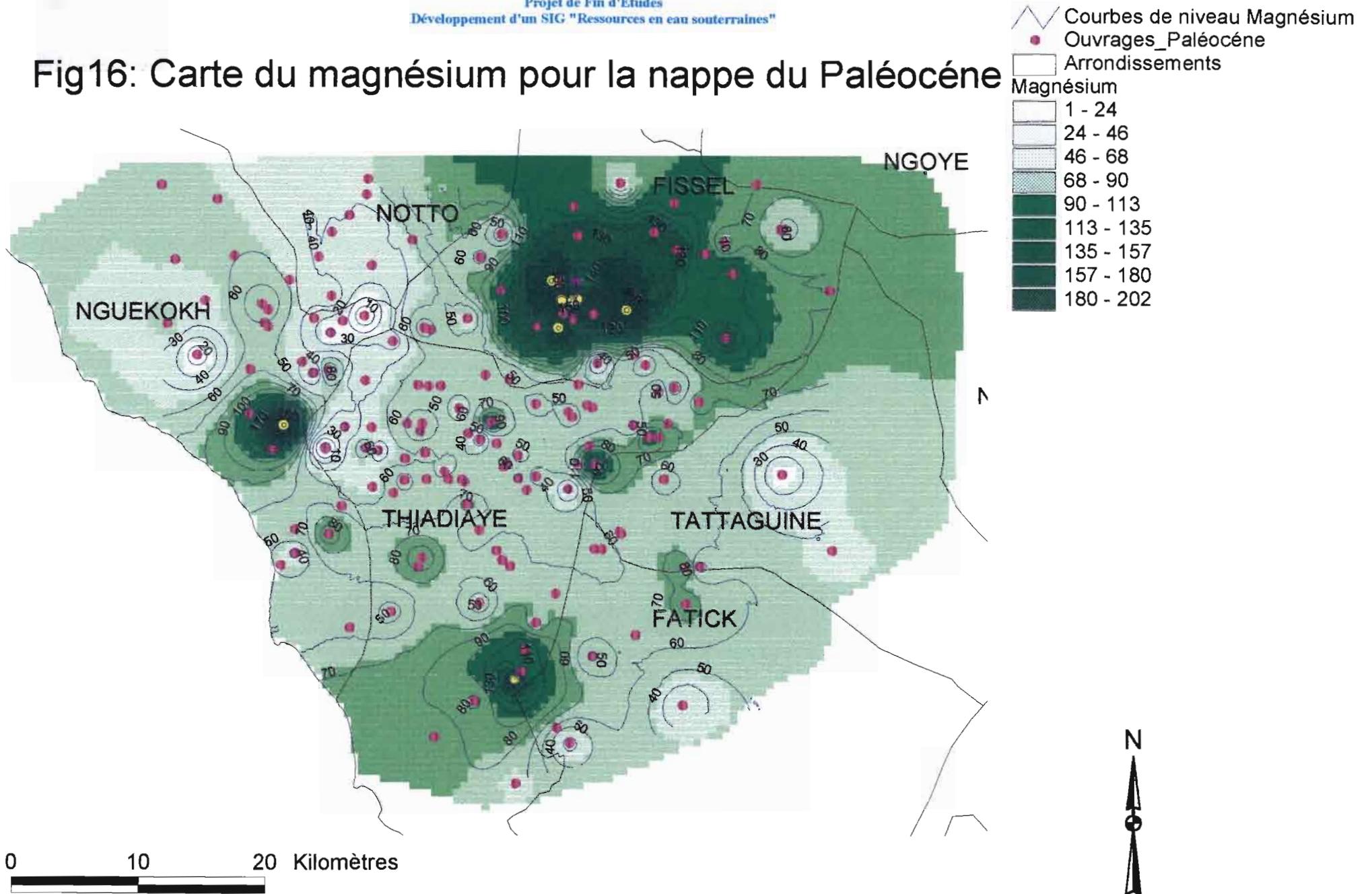
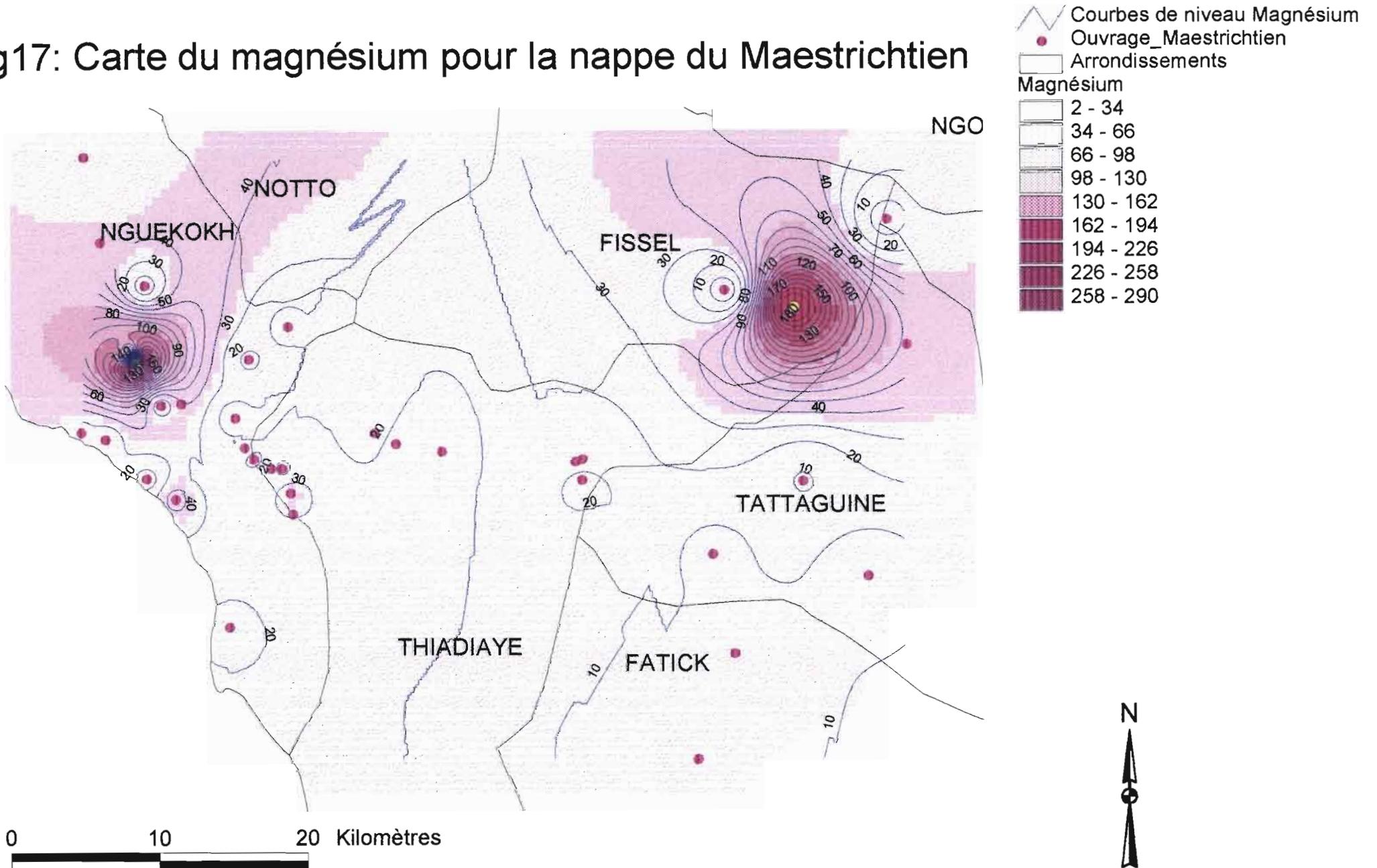


Fig17: Carte du magnésium pour la nappe du Maestrichtien



IV.2.5 Les nitrates

Comme pour les nitrites, l'engrais et la décomposition des matières organiques animales ou végétales, sont à l'origine des fortes concentrations des eaux en ces éléments.

Le danger que représentent les nitrates pour la santé réside dans leur réduction en nitrites.

En effet, ce phénomène qui se manifeste au niveau de la bouche et de l'estomac conduit à la transformation de l'hémoglobine du sang en méthémoglobine, laquelle est inapte au transport de l'oxygène.

Il en résulte une maladie particulièrement grave pour les nourrissons, la méthémoglobinémie.

Les normes de l'OMS indiquent une valeur de l'ordre de 50 mg/l à respecter pour les eaux de consommation.

Dans le cas des principaux aquifères captés sur cette zone, ils présentent en générale de faibles valeurs sauf dans quelques villages comme à Ndollor et à Ndiouk Thiorokh dans le département de Thiadiaye où l'un des forages exploités et qui capte la nappe du Paléocène, enregistre une teneur en nitrates très élevée de l'ordre de 451.3 mg/l.

(Fig18: Carte des nitrates pour la nappe du Paléocène)

(Fig19: Carte des nitrates pour la nappe du Maestrichtien)

IV.2.6 Les chlorures

L'OMS préconise une teneur en chlorures maximale de 250 mg/l. Cependant comme l'indique l'étude menée par le Professeur Oumar Faye ces teneurs peuvent être largement dépassés, plus de 1000 mg/l sans autre inconvénient qu'un goût désagréable moins marqué en présence de calcium et de magnésium. Cependant on peut observer l'augmentation des accidents vasculaires chez les personnes présentant une hypertension artérielle.

Dans le cas des nappes profondes de cette région elles présentent en générale, comme nous pouvons le voir sur les cartes, des zones très chlorurées. Les rares teneurs en chlorures respectant la norme sont enregistrées, pour le cas de la nappe du paléocène, essentiellement dans l'arrondissement de Thiadiaye et pour celui de la nappe du Maestrichtien la zone à

Fig18: Carte des nitrates pour la nappe du Paléocène

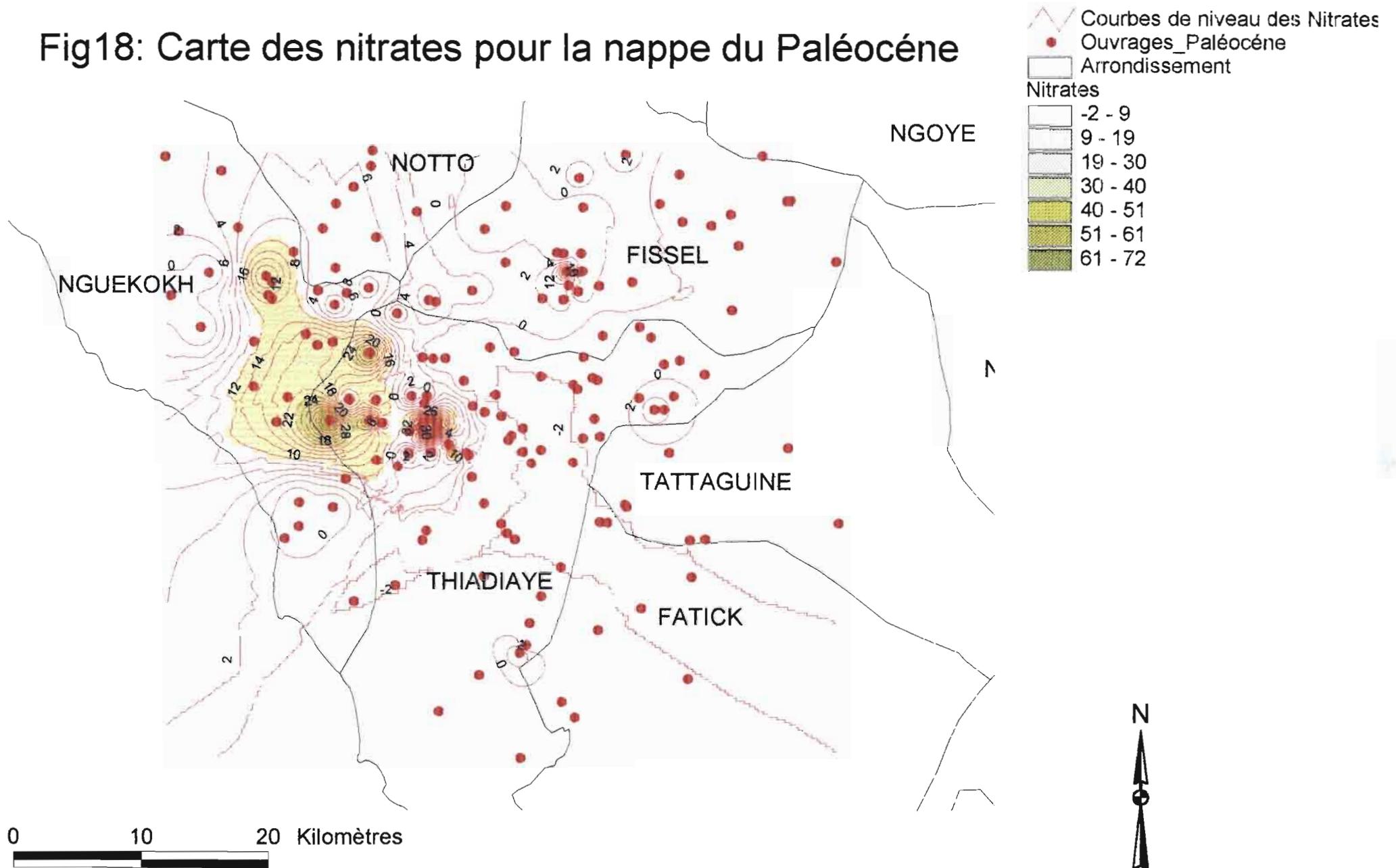
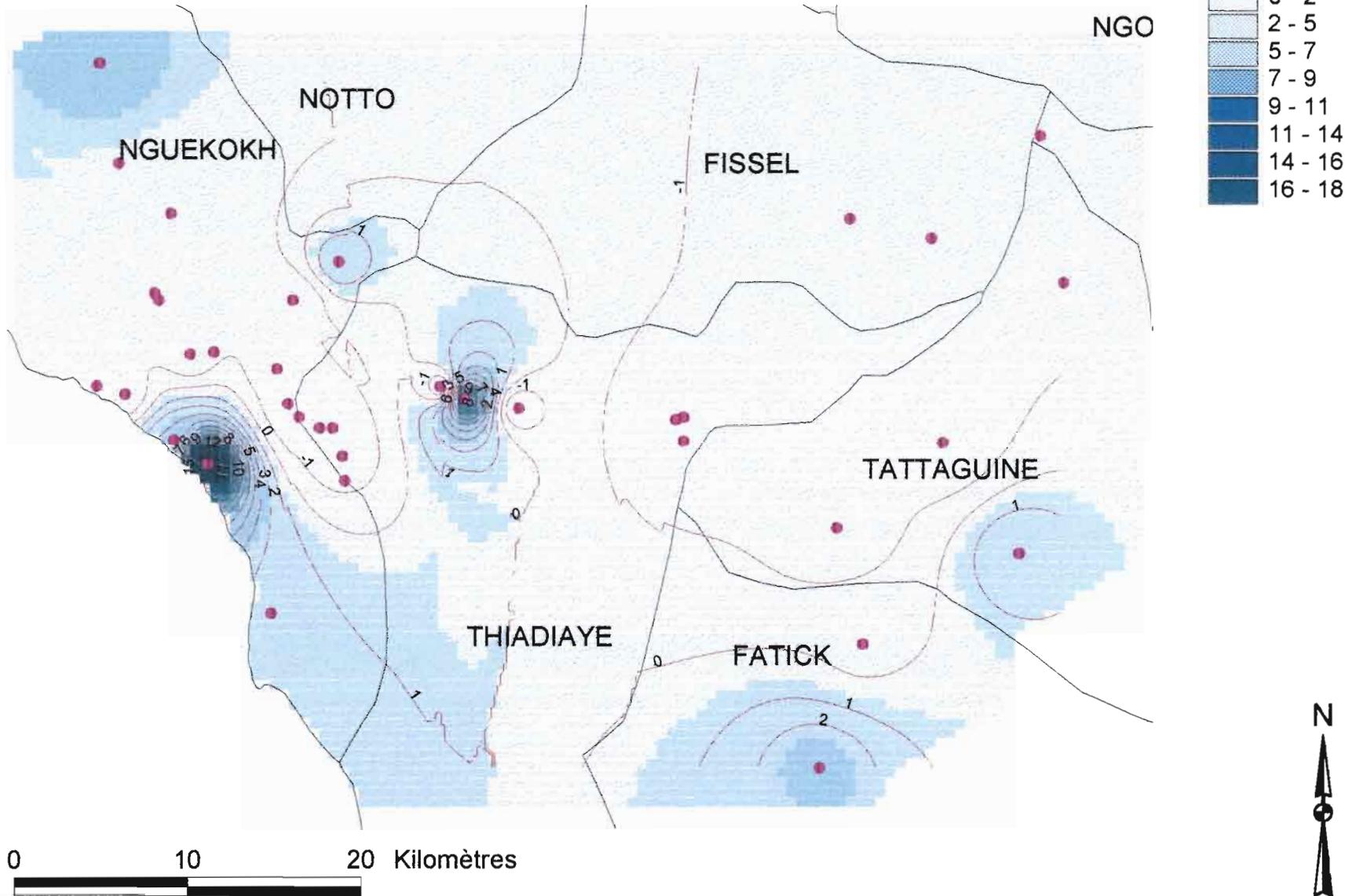


Fig19: Carte des nitrates pour la nappe du Maestrichtien



faibles teneurs est plus restreinte et se situe essentiellement sur une partie de la communauté de Malincounda dans le département de Nguekhoh.

(Fig20: Carte des chlorures pour la nappe du Paléocène)

(Fig21: Carte des chlorures pour la nappe du Maastrichtien)

IV.2.7 Les sulfates

La teneur en sulfates en eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation. Suivant ceux-ci et selon l'intolérance des consommateurs, il est susceptible d'en résulter des troubles gastro-intestinaux, en particulier chez l'enfant. Toutefois l'action laxative plus importante en présence de magnésium s'estompe rapidement avec l'accoutumance. L'OMS indique une valeur acceptable de 250 mg/l pour les eaux de consommation.

Comme nous pouvons l'observer sur les cartes les zones à fortes teneurs en sulfates ne sont pas si importantes et correspondent en générale à celles à fortes teneurs en magnésium.

(Fig22: Carte des sulfates pour la nappe du Paléocène)

(Fig23: Carte des sulfates pour la nappe du Maastrichtien)

IV.2.8 Les fluorures

Si à faibles doses le fluor est un élément protecteur de l'émail des dents, à fortes doses il entraîne des lésions dentaires, osseuses, et présente même une toxicité aiguë.

Une étude particulière sera menée par rapport à ce paramètre pour lequel l'OMS fixe la teneur limite à 1.5 mg/l; les affections provoquées par son excès dans l'eau figurent parmi celles les plus fréquentes sur cette zone.

- La fluorose dentaire

Elle se définit comme étant une hypo-minéralisation de l'émail dentaire induite par le fluor à proximité de la dent en développement pendant les phases sécrétoires et / ou de maturation de l'amélogénèse (phénomène embryologiques menant à la formation de

Fig20: Carte des chlorures pour la nappe du Paléocène

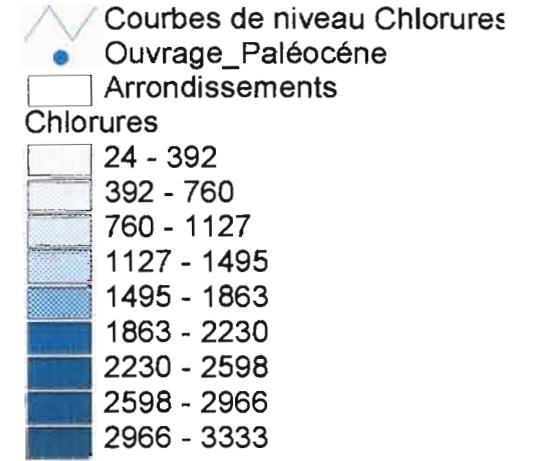
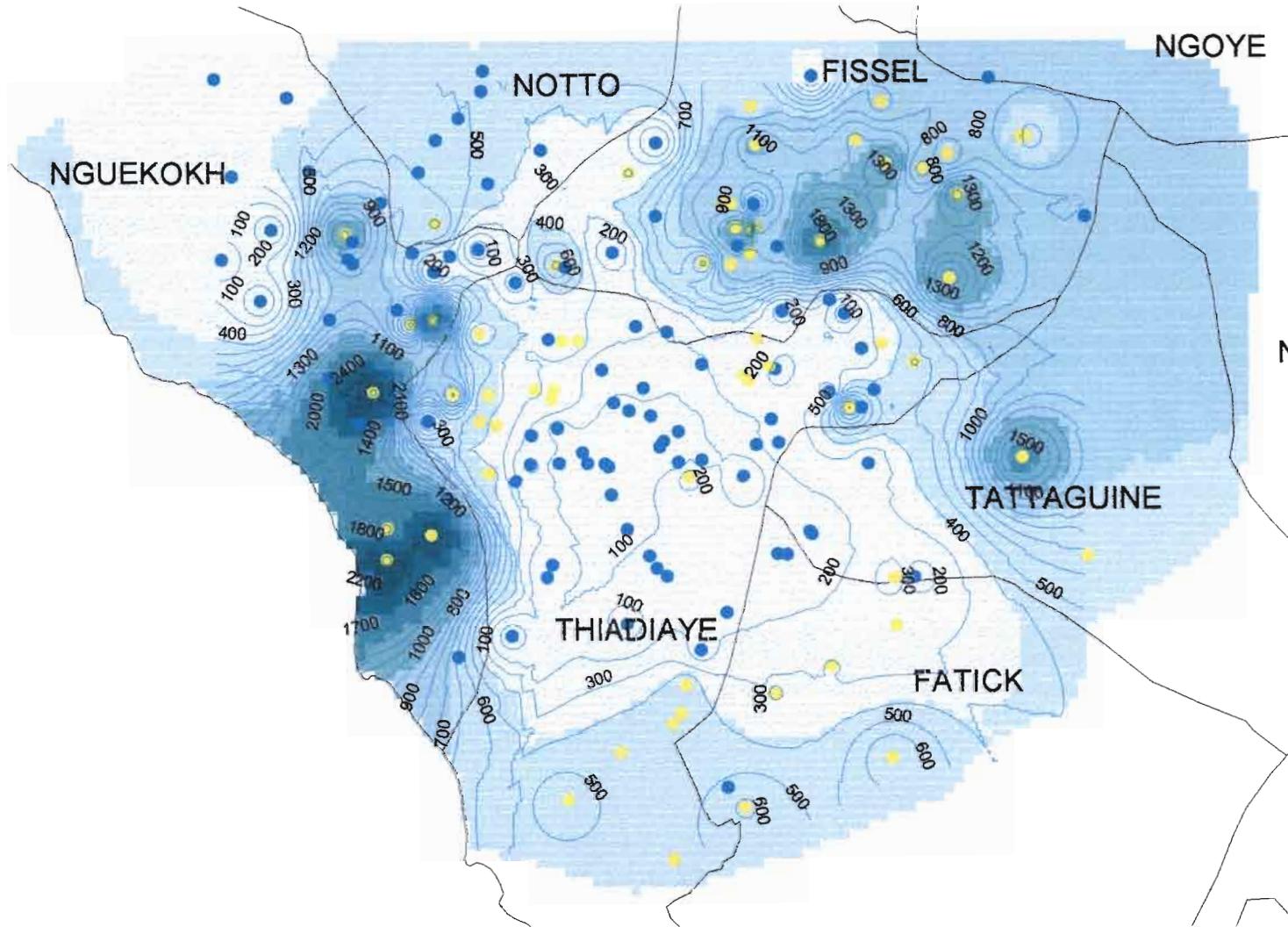
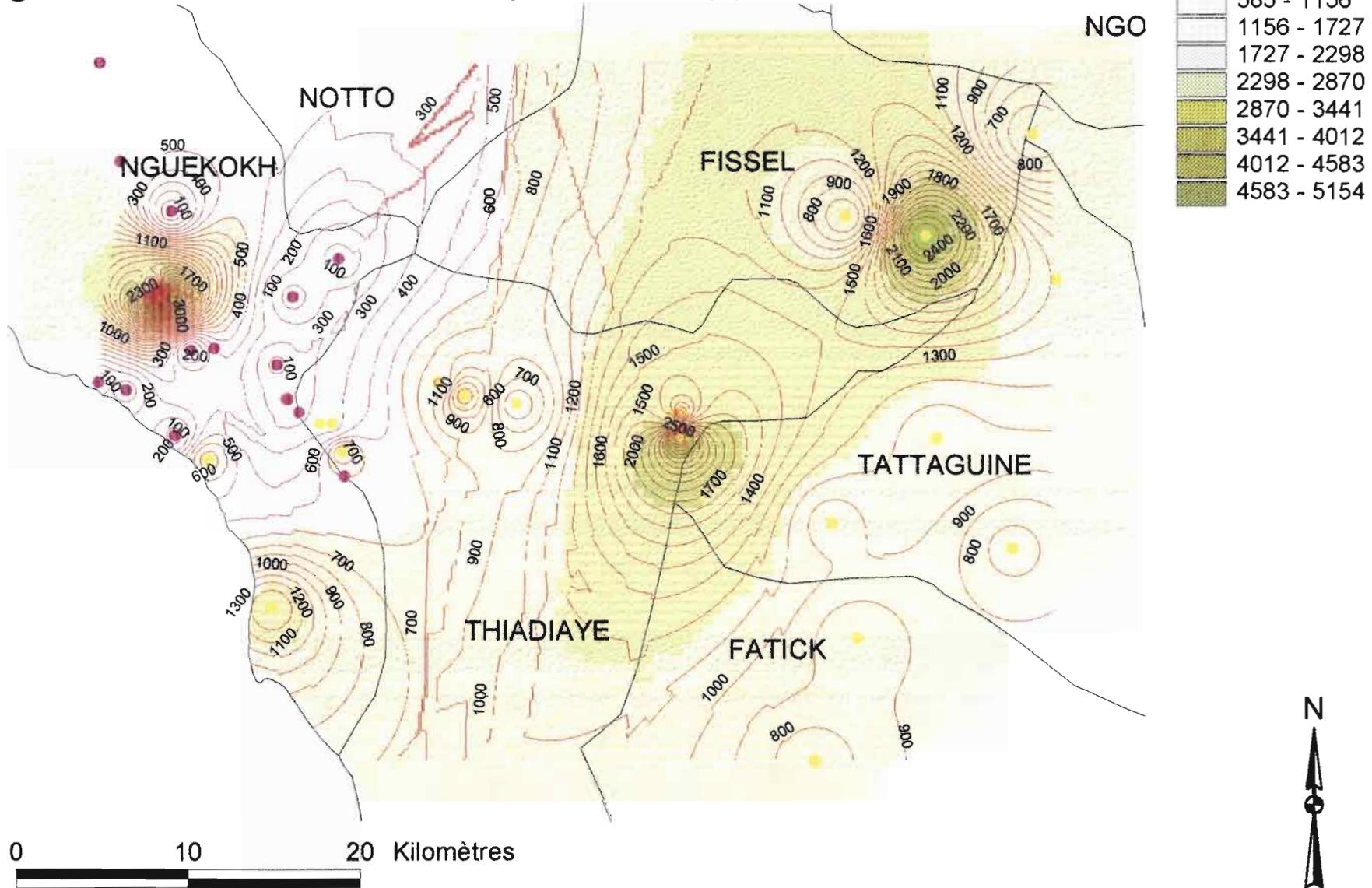


Fig21: Carte des chlorures pour la nappe du Maestrichtien



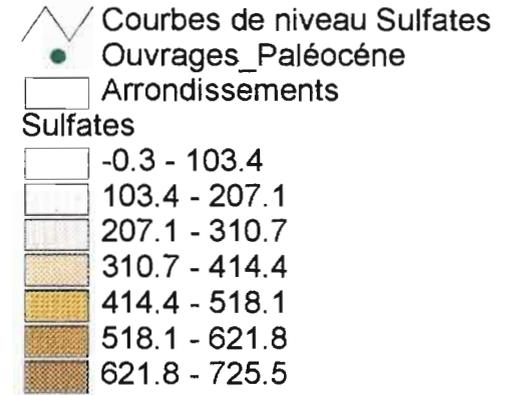


Fig22: Carte des Sulfates pour la nappe du Paléocène

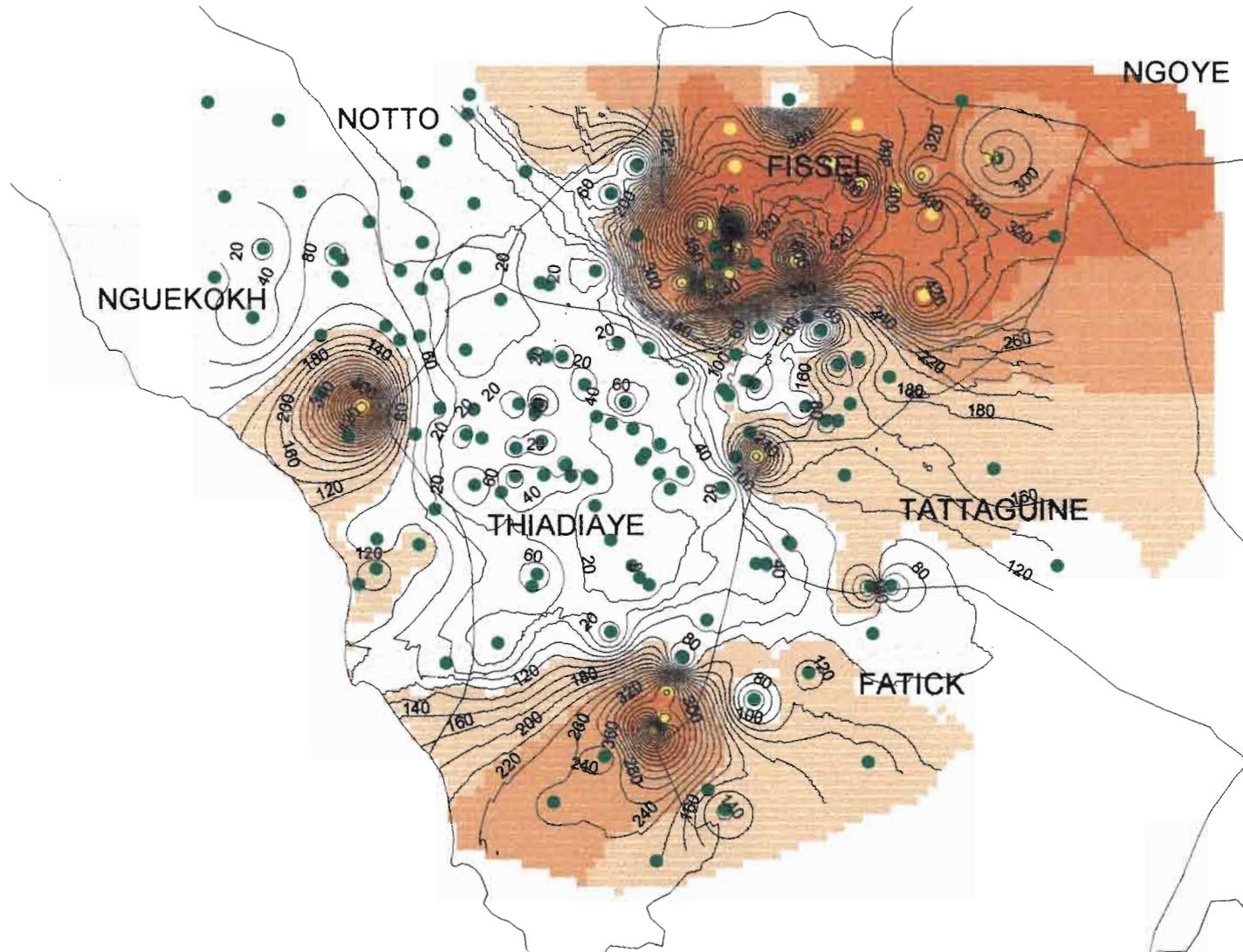
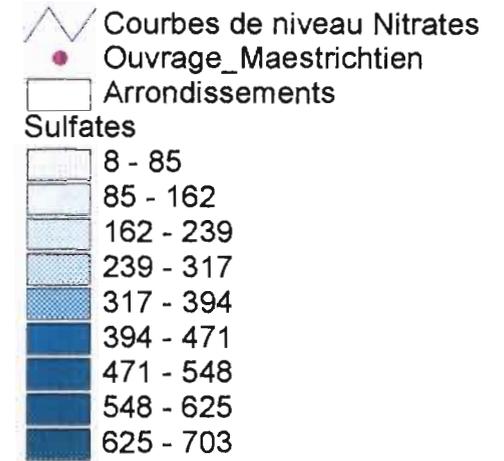
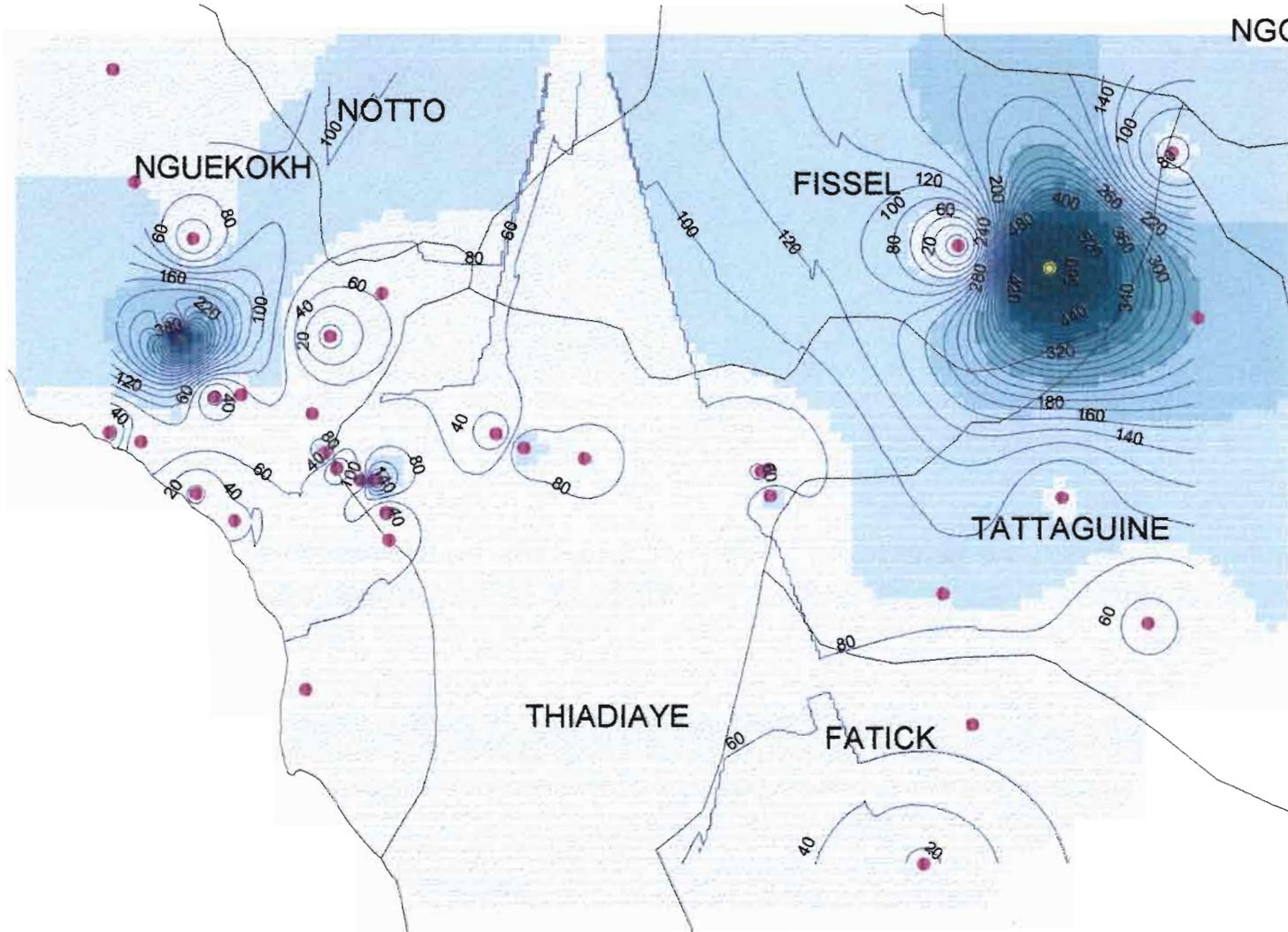


Fig23: Carte des sulfates pour la nappe du Maestrichtien



l'émail). La sévérité et la distribution dépendent de la concentration du fluor, de la durée d'exposition, du stade de l'activité des améloblastes et de la variation de la susceptibilité individuelle. Par conséquent, elle ne concerne que les enfants consommant quotidiennement une eau contenant plus de 2 mg/l de fluor pendant les six premières années de leur vie.

Les signes cliniques sont assez significatifs; en effet la fluorose dentaire se caractérise par la présence de taches blanches, opaques et ternes sur l'émail dentaire qui peut être strié, moucheté ou piqué ou prendre une coloration jaune ou marron foncé. Dans les cas les plus graves, on peut observer des fosses isolées et des zones plus étendues d'hypoplasie (confluence des fosses) de l'émail entraînant ainsi une disparition de la morphologie normale.

- La fluorose osseuse

Elle se définit comme étant une atteinte du squelette liée à une intoxication chronique au fluor. La source de l'intoxication peut être hydrotellurique, alimentaire, professionnelle ou médicamenteuse. Les ingestions à doses excessives et surtout prolongées du fluor sont susceptibles d'entraîner à la longue des lésions osseuses, voire articulaires. Les altérations osseuses sont d'évolution lente. Ce n'est qu'après 2 ans au moins d'exposition pour des concentrations hydriques au-dessus de 3 mg/l. Il n'y a pas cependant corrélation entre la concentration du fluor dans l'eau de boisson et la sévérité des lésions rencontrées. Cela fait suspecter l'intervention d'autres facteurs individuels tels que la malnutrition.

Dans le cas de notre étude plus de la moitié des ouvrages captant la nappe du Paléocène présente des teneurs en fluorures qui ne respectent pas la norme et se situent principalement sur l'axe Nguéniéne – Ndiagagniao (dans le département de Mbour) à celui Djilasse – Tattaguine (dans le département de Fatick) comme nous pouvons l'observer sur la carte des fluorures de cette nappe.

Quant à la nappe du Maestrichtien les zones à fortes teneurs deviennent moins importantes sauf pour quelques villages comme: Sandiara Sérère, Langhomak, Lambayéne, et Nianning pour le département de Mbour; Diohine, Ngohe Mbadatte, Loul Sesséne et Djilass pour le département de Fatick.

Fig24: Carte des fluorures pour la nappe du Paléocène

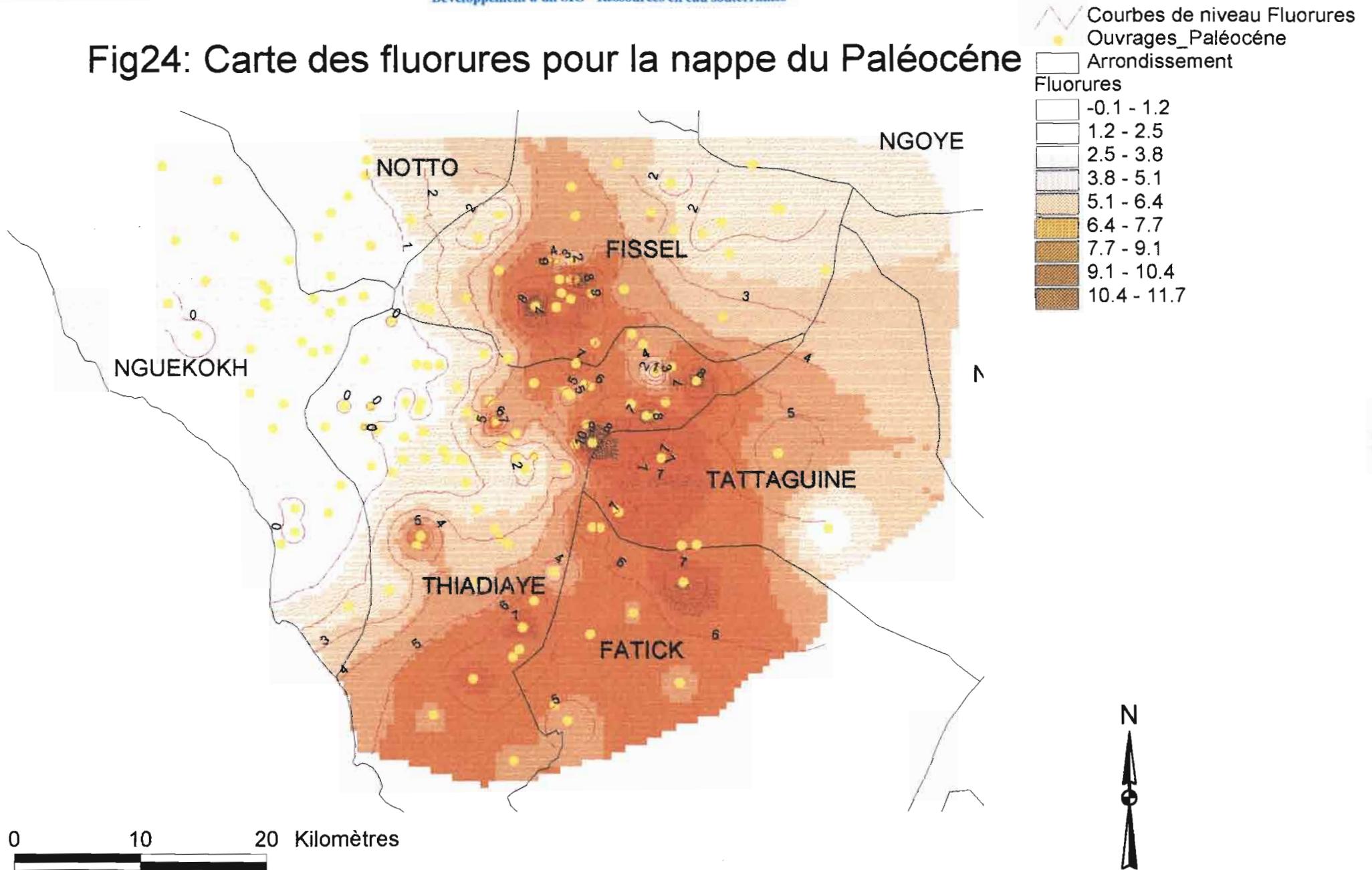


Fig25: Carte des fluorures pour la nappe du Maestrichtien

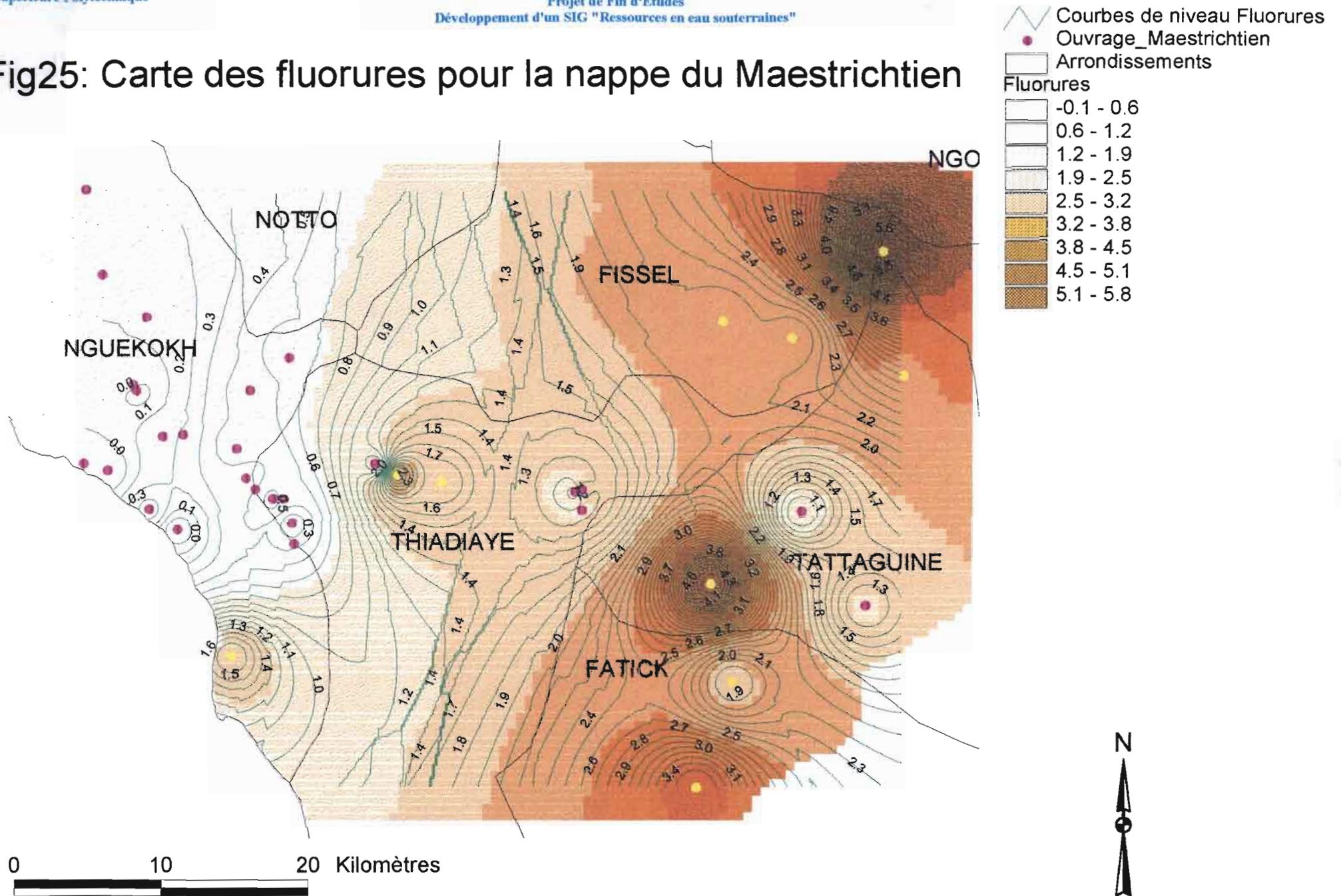
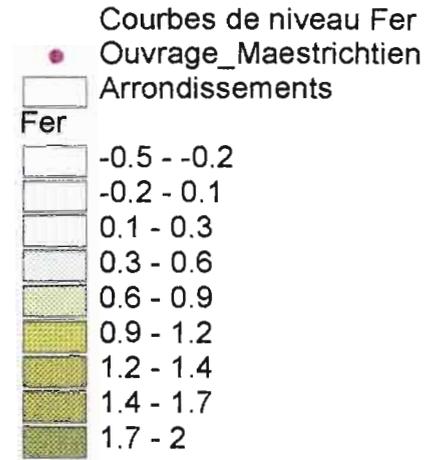
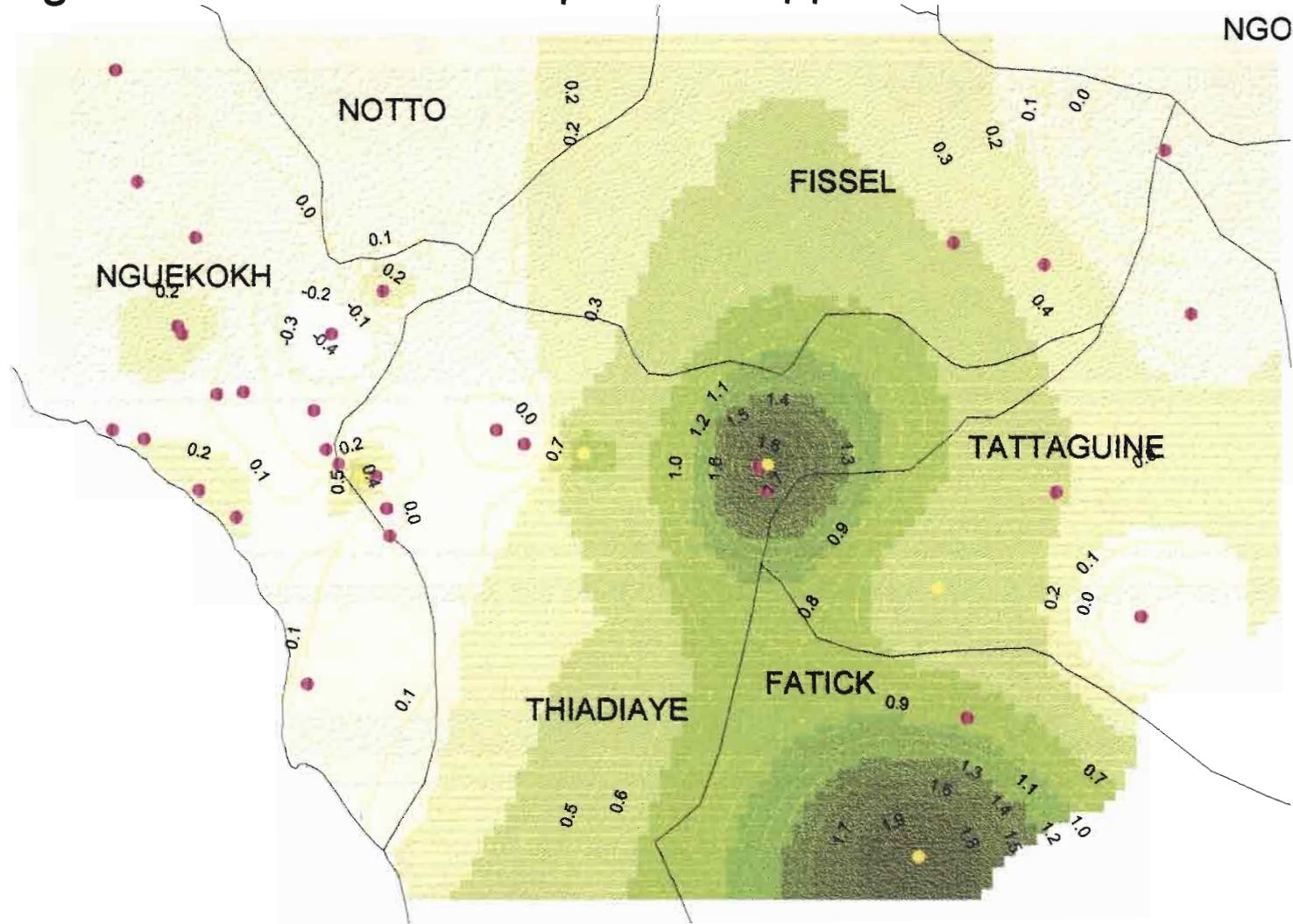


Fig26: Carte du Fer total pour la nappe du Maestrichtien



0 10 20 Kilomètres



(Fig24: Carte des fluorures pour la nappe du Paléocène)

(Fig25: Carte des fluorures pour la nappe du Maestrichtien)

IV.2.9 Le fer

La présence excessive de fer dans l'eau entraîne souvent des inconvénients parmi lesquels on peut citer :

- une coloration parasite;
- un goût désagréable
- des dépôts et prolifération de ferrobactéries etc.

L'organisation mondiale de la santé (OMS) fixe une valeur indicative de 0.3 mg/l pour les eaux de consommation.

Sur la base des quelques valeurs dont nous disposons sur les ouvrages de captage de cette zone nous avons constaté que ceux de la nappe du paléocène ont une teneur en fer moyenne de l'ordre de 0.77 mg/l qui respecte les normes de l'OMS. Sauf dans quelques villages comme: Kop Goyane, Médine, Bak, Ngueniéne dans le département de Mbour. Il faut noter que nous n'avons pas pu représenter la distribution du fer pour cette nappe vu le manque de données. Seul 10 ouvrages sur 161 ouvrages répertoriés ont leur teneur en fer enregistrée.

Quant à ceux de la nappe du Maestrichtien ils ont une teneur moyenne et acceptable de l'ordre de 0.27 mg/l sauf pour les villages de Sandiara Sérère, Louly Sindiane dans le département de Mbour; Ngohe Mbadate, et Djilass dans le département de Fatick.

(Fig26: Carte du fer total pour la nappe du Maestrichtien)

Quant à la nappe phréatique nous ne disposons pas de données relatives à ces quatre derniers paramètres chimiques, faute d'une étude chimique plus poussée qui n'est pas prévue dans le budget de cette année, mais qui probablement sera menée lors de la prochaine campagne de 2003.

En effet comme nous l'avons signalé plus haut, les faibles taux de résidus de l'eau mesurée dans les puits ne signifient pas une sécurité de la qualité de l'eau, il est alors nécessaire de déterminer l'influence de chacun des éléments chimiques les plus prépondérants étudiés

précédemment. Un autre paramètre à prendre en compte, vu la proximité de la mer, est l'influence de la langue salée qui progresse au fur et à mesure que la nappe phréatique baisse (phénomène causé par le déficit pluviométrique) tendant ainsi à remplir le vide laissé par celle-ci.

D'où l'objet des quelques essais géophysiques (3) que nous avons mené sur la zone en vue d'évaluer localement les possibilités de la méthode de prospection par sondage électrique dans le but de déterminer la potabilité des nappes phréatiques.

V. Etude Géophysique

L'étude hydrogéologique requiert non seulement l'utilisation des méthodes classiques (pluviométrie, piézométrie, lithologie, hydrodynamique etc....) mais également des méthodes d'investigation faisant appel à la géophysique.

Nous disposons pour cela des principales méthodes qui sont l'électrique et la sismique réflexion (marteau). Dans le cas de notre étude nous avons utilisé exclusivement la méthode de sondage électrique en courant continu avec le dispositif Schlumberger. Les acquisitions de données ont été réalisées dans les localités de Thiamène Peulh, Gandiol et Carrière dans le département de Mbour.

Le sondage électrique permet dans les cas favorables, de déterminer la profondeur de l'aquifère, sa résistivité électrique et également obtenir une idée sur le niveau de minéralisation des eaux souterraines.

V.1 Principe de la méthode par sondage électrique

V.1.1 Principe des résistivités

La méthode de prospection électrique est basée sur l'injection de courant artificiel dans le sous-sol et sur l'étude de la conductibilité électrique des couches traversées.

La conductibilité électrique ou propriété de conduire le courant électrique est exprimée par la conductivité ou son inverse, la résistivité.

La résistivité ou conductivité des terrains est dans le cas de formations sédimentaires, essentiellement limitée à une conductivité électrolytique qui est due au déplacement des ions contenus dans l'eau d'imbibition de la formation.

La résistivité des formations saturées est fonction:

- de la porosité totale communicante
- de la quantité de sels dissous dans l'eau d'imbibition.

La formule d'Archie synthétise ces relations et permet dans les cas favorables, d'estimer la porosité et le taux de saturation du sous-sol.

$$\rho_r = a \frac{\rho_w \cdot \Phi^m}{\text{saturation}^2}$$

$$F = \frac{a}{\Phi^m} = \frac{\rho_r}{\rho_w}$$

pour les roches saturées on peut à partir de cette formule, définir le facteur de formation F.

F: facteur de formation

ρ_r : résistivité de la roche

ρ_w : résistivité de l'eau d'imbibition

Φ : porosité

a: facteur proche de 1

m: facteur proche de 2

La saturation s'exprime en pour-cent.

Il faut noter qu'une complète absence d'eau entraîne des résistivités infinies; d'autre part l'expérience montre que la présence d'argiles fait baisser la résistivité d'une formation.

Par contre si le taux d'argiles reste constant, on peut appliquer la loi d'Archie.

$$F = 1 / \Phi^2 = \rho_r / \rho_w \text{ soit } \rho_r = \rho_w / \Phi^2$$

Si ρ_w diminue, ρ_r diminue

Si ρ_w augmente, ρ_r augmente

En présence de sable avec $\Phi 1$ constante, ou en présence de calcaires avec $\Phi 2$ constante, la variation de la résistivité au sein d'une formation saturée, ne dépend que de la quantité de sels dissous dans l'eau d'imbibition.

On peut ainsi savoir dans une formation, si la salinité de l'eau augmente en fonction de la profondeur.

<i>Roches</i>	<i>Porosité totaux %</i>	<i>Porosité efficaces %</i>	<i>Perméabilité (cm/s)</i>	<i>Résistivité apparente (ohm.m)</i>
Graviers	45	35	3.10^{-4}	200
Graviers et sables	35	20	1.10^{-5}	160
Sable	40	30	6.10^{-4}	125
Sable silteux	32	5	1.10^{-9}	60
Silt	36	3	3.10^{-8}	30
Argile	47	0	5.10^{-10}	10
Calcaires fissurés		30		83
Calcaires non fissurés		3	$1.10^{-10} - 1.10^{-12}$	2000 – 10000
Marnes consolidées		27	$1.10^{-7} - 1.10^{-9}$	20 – 20

Tableau 14: Valeurs empiriques des résistivités, porosités et perméabilités pour divers terrains (d'après Meyer de Stradelhofen, C. 1991)

Les valeurs rapportées sur ce tableau font apparaître une corrélation entre perméabilités, porosités efficaces et résistivités. Elles montrent ainsi que l'électrique est en mesure de fournir des renseignements précieux non seulement sur la porosité mais également sur la perméabilité des formations.

V.1.2 Le sondage électrique

Il consiste à établir la courbe de variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction de la profondeur, grâce à un dispositif quadripôle AMNB en surface (*voir en annexe*).

La profondeur d'investigation est proportionnelle à la distance entre les électrodes d'injection A et B. Le dispositif de mesure choisi est du type Schlumberger c'est à dire de rapport AB / MN maintenu aussi grand possible ($4 < AB / MN < 20$).

Dans ce cas, la résistivité apparente s'exprime par la formule

$$\rho = \frac{K \cdot V}{I} \quad (\text{en ohm}\cdot\text{m})$$

V: différence de potentiel entre M et N

I: intensité de courant injecté

K: coefficient géométrique, dépend des dimensions du dispositif de mesure ($K = \frac{\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$).

La profondeur d'investigation est théoriquement comprise entre $AB/4$ et $AB/12$.

La longueur de ligne de courant maximum tirée est de 300 m, ce qui permet d'atteindre une profondeur d'investigation théorique comprise entre 25 m et 70 m suivant les valeurs de résistivité moyenne de la zone.

L'interprétation des sondages électriques permet d'obtenir la résistivité vraie des formations et leurs épaisseurs, dans le cas idéal de couches homogènes de faible pendage. Les épaisseurs sont de 30% supérieures aux épaisseurs réelles.

Initialement un programme d'inversion est utilisé pour sortir un modèle de départ qu'il faut améliorer avec le programme d'interprétation des sondages électriques PISE4 élaboré par l'ORSTOM et le CNRS.

Les aquifères de résistivité inférieure à 5 ohm.m sont salées; entre 5 et 10 ohm.m environ l'eau est dite saumâtre et douce au-delà de 10 ohm.m.

Pour mener cette étude nous disposons des éléments suivants :

- 01 résistivimètre TERRAMETER SAS 300C Abem
- 01 survolteur BOOSTER SAS 2000 Abem
- 04 accumulateurs de 12 V au Ni-Cd
- 02 rouleaux de câble d'injection AB de 700 m
- 02 rouleaux de câble de réception MN de 300 m

- 04 chargeurs de batteries Abem
- 01 multimètre
- 10 électrodes en acier inoxydable
- 03 masses de 3 kg

En vue de diminuer les résistances de prise une solution d'eau salée est utilisée systématiquement pour arroser les contacts sols-électrodes.

V.2 Interprétation des résultats

Trois sondages ont été réalisés dans le département de Mbour à Thiaméne Peulh, Gandiol et Carrière. Pour chacune de ces localités où sont implantés quelques puits du Programme de l'ELS nous disposons d'une feuille de sondage avec K précalculés (comme celles annexées à la fin de ce document) sur laquelle nous reportons l'ensemble des mesures effectuées sur le terrain, et d'un papier millimétré à échelle logarithmique sur lequel nous effectuons manuellement une première représentation graphique des données recueillies.

Les variations de forme des courbes de sondage sont liées à la nature physique du site de mesure. De par la forme des courbes on peut distinguer deux zones principales.

- **zone de Thiaméne Peulh et Carrière**

dans cette zone, la forme des courbes de sondage est comparable, c'est une forme dite en "cloche". Les valeurs de résistivité apparente sont comprises dans une décade, de 10 ohm.m à 100 ohm.m environ et le second palier est relativement étalé.

- **zone de Gandiol**

pour le site de Gandiol, la forme de la courbe de sondage met en évidence un contraste très net de résistivité entre la surface et la profondeur beaucoup plus conductrice. La branche descendante confirme la forte salinité de la nappe phréatique. Les résistivités apparentes sont comprises entre deux décades de 8 ohm.m à 430 ohm.m.

Après dépouillement des données l'utilisation du logiciel de modélisation PISE4 s'est faite et a permis d'obtenir les graphiques annexés à la fin du document. Sur chaque graphique sont mentionnées les valeurs de résistivité vraie et les épaisseurs de chaque couche du modèle, les

valeurs mesurées sous forme de croix et la courbe de sondage théorique correspondant au modèle géo-électrique.

Les valeurs de résistivité des sables superficiels vont globalement de 35 à 460 ohm.m sur l'ensemble des trois sites. A Thiamene Peulh les sables superficiels sont très argileux et les valeurs de résistivités descendent jusqu'à 25 ohm.m. les calcaires paléocènes sont de résistivité moins élevée à Thiamene Peulh (environ 50 ohm.m) qu'à Gandiol et Carrière (plus de 100 ohm.m); ce qui suppose une variation latérale assez importante au sein de cette couche de calcaire qui est probablement due aux différences de teneur en argile

Vient alors l'interprétation proprement dite sur la base des graphiques obtenus et des résultats relatifs à la profondeur, l'épaisseur et la résistivité des aquifères, qui sont résumés par le tableau suivant:

Localisation	Thiamene Peulh	Gandiol	Carrière
Profondeur (m)	9.6	6.9	5.1
Épaisseur (m)	26	17.5	3.5
Résistivité (ohm.m)	11.6	6.4	84.7

Tableau 15: Caractéristiques des aquifères

Pour les valeurs de résistivités inférieures ou égales à 6 ohm.m, on considère que le biseau salé est atteint, comme c'est le cas à Gandiol. Avec une résistivité de l'aquifère de 84.7 ohm.m l'eau obtenue à Carrière est potable avec une minéralisation négligeable. Quant à la valeur de résistivité de 11.6 ohm.m obtenue à Thiamène Peulh, elle montre la présence d'une eau saumâtre de qualité probablement médiocre.

Conclusion

Les aquifères de la zone étudiée montrent une grande diversité du point de vue de la qualité ainsi que de l'épaisseur et la profondeur. Le paramètre de résistivité électrique met assez bien en évidence, comme indiqué plus haut, les types de nappes que nous rencontrons sur chacune des localités. La variation de la teneur en argile des calcaires joue très sensiblement sur la valeur globale de résistivité de l'aquifère. Les profondeurs des nappes vont de 5.1 m à 9.6 m et leur épaisseur de 3.5 m à 26 m. En définitive la méthode de prospection électrique des aquifères peut être considérée comme une méthode efficace pour le diagnostic des nappes phréatiques dans le contexte de cette étude.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au terme de ce projet, qui en quelque sorte fait état de l'hydrogéologie de la zone Mbour – Fatick, nous avons pu dresser un bilan partiel mais assez intéressant des ressources en eau de la région considérée.

En fait l'étude s'est effectuée principalement à partir des nappes profondes du Paléocène et du Maestrichtien dans une large mesure, et dans une moindre mesure à partir de la nappe superficielle du Continental Terminal. Le bilan serait beaucoup plus intéressant si l'on était parvenu à étudier de façon plus complète la qualité des eaux dans la nappe superficielle qui intéresse les membres du Programme puits.

Toutefois quoique partiel, ce bilan nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions assez pratiques sur la qualité des eaux des nappes exploitées pour l'alimentation en eau des populations.

En effet, comme nous pouvons le remarquer sur les cartes il n'existerait vraisemblablement pas un ouvrage qui capte une nappe respectant toutes les normes de potabilité de l'eau. D'où la difficulté d'indiquer une ou des zones totalement favorables à l'implantation d'un puits ou d'un forage. La contamination principale est celle provoquée par la salinité tantôt d'origine marine, tantôt d'origine géologique.

Dans le cas de notre étude ces zones à eaux polluées (salées ou alcalines) ne se présentent pas de façon régulière, mais plutôt sous forme de zones que nous pourrions nommer "tampons". Et il s'agit principalement, pour les nappes profondes, de quelques villages longeant la petite côte en allant vers Fatick, mais aussi une partie de Fissel et Nguekhoh.

Quant aux nappes superficielles du Continental Terminal les teneurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de quelques puits calcaires localisés pas très loin de la mer (à Thiolaye, Soundiane Sanghaye, et Nianning).

Une fois ces quelques conclusions pratiques dégagées, un certain nombre de recommandations s'avère nécessaire en vue d'améliorer la qualité des eaux voire même de trouver des solutions à l'ensemble des problèmes posés par l'alimentation en eau des populations.

Il consisterait en la protection et l'entretien des puits, en l'établissement d'une fiche annuelle pour chaque puits afin de suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques, en un suivi constant de l'évolution du biseau; mais aussi à inciter, dans certaines localités, les populations à se regrouper en villages assez importants ce qui permettrait d'assurer une alimentation globale par la construction de forages profonds dotés de réseaux d'adduction performants. Les membres du Programme gagneraient ainsi à réorienter leurs activités dans ce sens; et donc à ne pas se limiter uniquement à la réalisation de puits vue les caractéristiques des zones d'intervention sur le plan hydrogéologique.

Il serait également nécessaire d'effectuer des essais de perméabilité pour connaître les débits d'exploitation des nappes phréatiques de la zone, mais aussi des relevés topographiques afin d'avoir une idée sur les variations saisonnières du niveau statique de ces dernières.

L'autre recommandation à faire consisterait en l'utilisation de la méthode géophysique par sondage électrique en vue de détecter, avant la creusée des puits, l'interface eau douce – eau salée. Ceci permettrait aux membres du programme puits d'éviter les pertes économiques occasionnées par la construction de puits destinés à être abandonnés, vu la mauvaise qualité d'eau (souvent salée) qu'ils offrent.

BIBLIOGRAPHIES ET REFERENCES

- 1- Centre de Suivi Ecologique (C.S.E) Annuaire sur l'Environnement et les Ressources naturelles du Sénégal, Première Edition novembre 2000
- 2- STANCIOFF, Andrew (Géologie et hydrologie) Cartographie et Télédétection des Ressources de la République du Sénégal, (1982 – 19985)
- 3- CASTANY, Gilbert Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod Université, BORDAS, Paris, 1982
- 4- MLS/BUREST Rapport d'évaluation Programme AEP – 95 – 2000 – ELS, 02/2001
- 5- FAYE, Oumar (Professeur UCAD Dakar) Impact de la consommation d'eau contenant de fortes concentrations de fluor, nitrates, chlorures, sulfates, magnésium sur la santé des populations, Version Provisoire, juillet 2000
- 6- PIMIANTA, Jean Le Captage des eaux souterraines, Editions EYROLLES, 1972
- 7- DIOUF, Same Application de la Géophysique (Electrique et Sismique) à l'étude de la géométrie du réservoir de l'aquifère du littoral nord Sénégal (de Taïba à Rao), janvier 1995
- 8- MEYER DE STADELHOFEN, C. Applications de la géophysique aux recherches d'eau, Technique et Documentation – Lavoisier, 1991

Annexe A

Tableaux des données de base

Annexe B

Tableaux sur les normes de potabilité de l'eau

Facteurs physico-chimiques (1)

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeur indicative OMS	Valeurs proposées
✓ Potentiel hydrogène	pH	6,5 à 8,5	9,2	-	6,5 à 8,5
✓ Conductivité	µS/cm à 20°C	1300	2700	-	110 à 2700
✓ Minéralisation totale	résidu sec mg/l	1000	2000	-	100 à 2000
Dureté totale	meg/l	6	10	-	2 à 10
Oxygène dissous	O2 mg/l	5 à 8	-	-	5 à 8

Facteurs physico-chimiques (2)

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeur indicative OMS	Valeurs proposées
Magnésium	Mg (mg/l)	100	30-150	-	< 150
Aluminium	Al (mg/l)	0.05	-	0,2	0,2
Ammonium	NH4 (mg/l)	0.05	0.5	-	< 0,5
Nitrites	NO2 (mg/l)	-	0,1	3	3
Nitrates	NO3 (mg/l)	-	50	50	50
Chlorures	Cl (mg/l)	300	750	250	250
Sulfates	SO4 (mg/l)	200	450	250	250

Facteurs toxiques (2)

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeur indicative OMS	Valeurs proposées
Fluorures	F (mg/l)	0,6	0,8	1,5	2
Mercure	Hg (mg/l)	-	0,001	0,001	0,001
Plomb	Pb (mg/l)	-	0,05	0,01	0,01
Sélénium	Se (mg/l)	-	0,01	0,01	0,01

Facteurs indésirables

Paramètre	Unité	Maximum recommandé ISN	Maximum admissible ISN	Valeur indicative OMS	Valeurs proposées
Fer	Fe (mg/l)	-	0,3	0,3	0,3
Manganèse	Mn (mg/l)	-	0,1	0,5	0,5
Zinc	Zn (mg/l)	-	5	3	3

Annexe C

Résultats des essais géophysiques