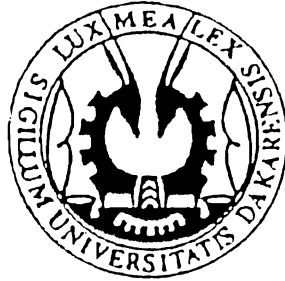


UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE



**THESE**

Pour obtenir le grade de docteur  
de 3ème cycle en géologie appliquée

Mention **HYDROGEOLOGIE**

**ETUDES HYDROGEOLOGIQUES DANS LA VALLEE DU  
FLEUVE SENEGAL DE BAKEL A PODOR:  
RELATIONS EAUX DE SURFACE / EAUX SOUTERRAINES**

Présentée par

Amadou **DIAGANA**

Le 17 Juin 1994 devant le jury:

MM.	C. B. GAYE :	Président	U.C.A.D.
	A. FAYE :	Rapporteur	U.C.A.D.
	J. L. SAOS :	Rapporteur	O.R.S.T.O.M.
	A. LY :	Examineur	U.C.A.D.
	M. FALL :	Examineur	U.C.A.D.
	J. ALBERGEL:	Examineur	O.R.S.T.O.M.
	O. NGOM:	Examineur	O.M.V.S.

*Thèse réalisée avec le concours de l'ORSTOM et le soutien financier  
de la CEE dans le cadre du projet EQUESSEN N°TS2-0198-F-EBD.*

## DEDICACES

Je dédie ce travail:

A la mémoire de mes cousins:

Yacouba Diagana dit Bassila Oumarou

Yacouba Diagana dit Sylla Cheikhna Hady

Oumar Koïta dit Barou

arrachés à notre affection à la fleur de l'âge.

A la Mauritanie mon pays natal, et au Sénégal mon pays d'accueil, que la paix et la concorde demeurent entre les peuples.

A tous ceux qui ont souffert ou qui souffrent de l'injustice de leurs semblables.

A mes familles: Diagana, Tandia, Koïta, Maréga, Wagué, Diakhité, Mangassouba, Bathily, Gallédou, Séméga, Diaby, Fadé, Kébé, Tiréra, Baradji, Coulibaly, Sakhanokho, Traoré, Konaté, Kanté et toutes les autres, de Kaédi ou de Djéol, en Mauritanie.

A mes frères et cousins d'enfance: Cheikhna Diagana, Bayakhouba Diagana, Mouhamadou Diagana, Moussa Diagana, Abdourahmane Tandia, Aliou Wagué, Ousmane Wagué, Moussa Diaby, Mouhamadou Djeynaba Wagué, Bakary Konaté, Brahim Coulibaly et tant d'autres.

A tous mes amis parmi lesquels: Youssef Dièw, Abou Oumar Dia, Abdou Karim Ba, Aly Ba, Banding Diawara, Lansana Diakité, Mamadou Cissoko, Jacques Sarr, Abdoul Aziz Tandia, Raymond Malou, Seydina Oumar Ould Ely, Sanou Diallo, Mohamed El Moctar et Abdoul Kader BA.

A toute la communauté mauritanienne au Sénégal.

A tous mes promotionnaires, de sciences naturelles et du 3ème cycle d'hydrogéologie, pour les années d'effort que le destin nous a amenés à partager ensemble.

A mes compagnons et amis de stage à l'ORSTOM: Malou, Diao, Koussoubé, Daboit, Landing, Patricia, Véronique, Miriame et Coudy pour leur soutien moral.

## RESUME

Cette étude est destinée à mieux cerner les types d'échanges hydriques, qui existent entre les différents aquifères et les eaux de surface, dans la vallée du Sénégal.

Deux types d'aquifères multicouches ont été identifiés dans la vallée. L'un continu, et qui comprend des formations maastrichtiennes, éocènes et quaternaires, se trouve en zone amont entre Manaël et Saldé, l'autre discontinu, dans les formations quaternaires, se trouve dans la zone aval entre Saldé et Podor.

Ces aquifères contiennent des nappes libres à semi-captives en zone amont et des nappes libres à captives dans la zone aval. Ils sont alimentés pendant l'hivernage et se vidangent en saison sèche.

La rareté des pluies et leur courte période annuelle (trois mois), associées à un état de surface favorable au ruissellement, ne favorise pas la recharge de la nappe alluviale par les eaux de pluies. Les recharges annuelles de la nappe, observables sur les graphiques de niveaux piézométriques, seraient principalement l'oeuvre des eaux du fleuve et de ses affluents.

La recharge de la nappe, qui s'effectue principalement à travers la berge, ne correspond plus, depuis la mise en fonction des barrages de Manantali et Diama, à la seule période des pluies.

En effet le plan d'eau du fleuve, dont le niveau de base se relève avec l'avènement des barrages, fluctue plus longtemps au dessus du niveau de la nappe, ce qui a pour conséquence une meilleure recharge de la nappe.

En moyenne le volume d'eau perdu entre Bakel et Dagana par an avoisine les  $4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . De 1988 à 1991 seulement 6 % de ce volume a alimenté la nappe. En raison des conditions climatiques défavorables dans la vallée, cette recharge de la nappe est reprise à 98 %, notamment par phénomène évaporatoire.

Mots clés: fleuve Sénégal; Vallée alluviale; Aquifères; lithologie; Corrélation; Isotopes; Nappes; Recharge; Décharge; Etat de surface; Bilan.

## AVANT PROPOS

C'est dans le cadre d'une collaboration entre l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) et l'Institut Français de Recherche Scientifique Pour le Développement en Coopération (ORSTOM), à travers le projet Environnement et Qualité des Eaux au Sénégal (EQUESEN), que cette thèse de 3<sup>ème</sup> cycle nous a été proposée en février 1991.

A l'origine, de la collaboration UCAD/ORSTOM pour la présente étude, se trouvent deux noms auxquels nous adressons nos sincères remerciements:

- Monsieur Cheikh Bécaye Gaye, maître de conférence, responsable du 3<sup>ème</sup> cycle au Département de Géologie, vous faites partie de ceux qui nous ont initié aux études hydrogéologiques depuis le DEA, et vous nous avez mis en train pour la présente étude. Nous vous disons merci pour tout, notamment pour les nombreuses sollicitations et d'avoir accepté de juger ce travail. Vos remarques et suggestions nous seront de grande utilité.

- Monsieur Jean Luc Saos, chargé de recherche à l'ORSTOM responsable du laboratoire d'hydrogéologie. Nous vous adressons nos sincères remerciements pour nous avoir accueilli, mis dans de bonnes conditions de travail et avoir accepté d'assurer l'encadrement externe de ce travail. Par votre franche collaboration loyale, votre esprit d'équipe et votre générosité vous avez su maintenir une atmosphère amicale et fraternelle, au sein de votre laboratoire, favorable à la recherche scientifique. Ceci nous a facilité la tâche, et nous a permis de surmonter les obstacles. Nous vous disons, une fois de plus, merci.

Monsieur Abdoulaye Faye, maître assistant au Département de Géologie, malgré vos multiples occupations vous avez accepté d'encadrer ce travail, comme vous l'aviez fait au DEA, dans un climat amical, ceci par votre capacité de vous rabaisser au niveau de votre interlocuteur afin de mieux faire passer le. Nous vous disons merci beaucoup pour les nombreuses discussions fructueuses qui nous ont permis de trouver le bon chemin.

Nos remerciements vont à Monsieur Ababacar Ly, Maître de conférence et chef du Département de Géologie, pour sa grande disponibilité et d'avoir maintenu la collaboration entre le département de géologie (UCAD) avec l'ORSTOM ce qui nous a permis d'accomplir le présent travail d'une part, mais aussi pour l'aide qu'il nous a apportée dans l'étude pédologique. Vos remarques nous seront d'un intérêt notoire.

Nous remercions Monsieur Jean Albergel directeur de recherche, chef de la section hydrologie de l'ORSTOM à Dakar. Votre goût du travail, qui témoigne votre qualité de chercheur, nous a servi et nous servira d'exemple, vos conseils et suggestions en tant que modéliste nous ont été de grande utilité. Merci d' avoir accepté de juger ce travail.

Monsieur Mamadou FALL maître assistant au département de Géologie, nous vous adressons nos sincères remerciements pour le soutien moral et pour avoir accepté de juger ce travail et d'y apporter des critiques, malgré vos nombreuses occupations.

Monsieur Ousmane Ngom chef de la cellule eaux souterraines de l'OMVS à Saint-Louis du Sénégal, par votre disponibilité permanente et votre facilité de contact nous avons su tirer profit de votre banque de données. Nous vous disons merci pour avoir accepté d'encadrer et de juger ce travail.

Nos remerciements à Philippe Mathieu Représentant de l'ORSTOM au Sénégal pour nous avoir accepté au sein de l'institut aussi bien en qualité de collaborateur dans le projet EQUESEN qu'en qualité de stagiaire au laboratoire d'hydrogéologie.

Au Professeur Oussaynou Dia, ancien chef du Département de Géologie, pour avoir agréé la mise sur pied d'un 3ème cycle d'hydrogéologie au Département, ce qui nous a permis d'accomplir le présent travail, nous vous disons merci.

A Monsieur Abdoulaye Dia, Directeur de l'Institut des Sciences de la Terre (IST), nous adressons également nos remerciements pour le soutien moral.

Nos sincères remerciements vont à Monsieur Jean Pierre Thiébaux technicien hydrologue à la section hydrogéologie pour son aide à la maîtrise de l'outil informatique et des travaux de terrain pendant les nombreuses missions.

Nos remerciements vont à toute l'ancienne équipe du projet "eaux souterraines" de l'OMVS/USAID à Saint-Louis, notamment Richard, Diakité, Dione, Moussa, et Sangharé. Nous remercions également Monsieur Ouattara coordinateur de projets à l'O.M.V.S.

Nous adressons également nos sincères remerciements à J. C. Bader, L. Séguis, Y. PEPIN et Honoré Dacosta de la section hydrologie et à J. L. Duprey responsable du laboratoire d'analyse chimique et ses collaborateurs, tous à L'ORSTOM et au Docteur Akpo assistant au département de Bilologie végétale pour la collaboration scientifique.

Sont associés à, ces remerciements J. Y. Gac, M. Carn, A. Kane et F. X. Cogels du laboratoire de géochimie à l'ORSTOM et collaborateurs du projet EQUESSEN, pour également la collaboration scientifique.

Nous exprimons ici toute notre reconnaissance à Jean Jacques Collin, et à Jacques Mudry, anciens responsables du 3ème cycle d'hydrogéologie au Département de Géologie ainsi qu'à Lucien Rouquet ancien maître assistant au Département de Géologie pour avoir été parmi nos initiateurs aux études hydrogéologiques.

Nous remercions Amadou Cissé et Pape Ndiaye, respectivement cartographe et reprographe, et en même temps l'ensemble du personnel de l'ORSTOM à Dakar.

Nos remerciements à Babacar Ndiaye, et Abdoul Aziz Tandia et R. Malou, assistants au Département de Géologie pour leur contribution à l'élaboration de ce travail.

A tous les enseignants de la faculté des sciences et techniques, en particuliers à ceux du département de Géologie, nous disons merci. Que chacun trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Aux Familles Wagué, Tandia et Diallo à Saint-Louis, et aux Familles Tandia, Diagana, Cissé, Tiréra, Koïta, Gallédou Sakho, Touré, Ba, Dabo, Diallo, Sèye, Thiam à Dakar, Doucouré à Malicounda et Niang à Kaolack, nous disons merci pour le soutien moral sans faille.

## INTRODUCTION

La moyenne vallée du Sénégal correspond à une unité de découpage géomorphologique d'un ensemble intitulé "le bassin du fleuve Sénégal". Par sa position géographique et son intérêt économique, ce bassin a fait l'objet de plusieurs études dans des disciplines variées, notamment au Mali, en Mauritanie et au Sénégal. Ces études n'ont cessé de prendre de l'ampleur depuis l'installation de la sécheresse au début des années soixante-dix, cette sécheresse qui a entraîné successivement une baisse du niveau de base du fleuve mais aussi celui des nappes souterraines et favorisé ainsi les aménagements hydroagricoles comme moyens de substitution aux cultures sous pluies devenues hypothétiques.

L'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (O.M.V.S.) a entrepris la réalisation d'ouvrages dans la vallée destinés à un meilleur suivi des impacts de la sécheresse et des aménagements hydroagricoles.

Ainsi elle a procédé dans un premier temps à la construction de deux barrages sur le cours du fleuve l'un, le barrage de Diama à 50 km de l'embouchure communément appelé "barrage anti-sel" prévu pour empêcher la remontée de la langue salée pendant l'étiage; et l'autre, le barrage de Manantali à 800km de l'embouchure destiné à régulariser le débit du fleuve, et en même temps à produire de l'énergie électrique.

Dans un deuxième temps elle s'est attelée à la mise en place d'un réseau de suivi piézométrique constitué de:

237 piézomètres et 166 puits villageois sur la rive droite dans la vallée alluviale

332 piézomètres et 416 puits villageois sur la rive gauche dans la vallée alluviale

20 piézomètres et 3 forages dans le haut bassin aux environs de Manantali

soit au total un réseau d'observation de 1174 ouvrages piézométriques,

et à la constitution d'une banque informatisée de données hydrogéologiques et hydro-climatologiques de la vallée de 1987 à 1990.

En complément, à cette banque, l'ORSTOM (l'institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération) a poursuivi en 1990, 1991, 1992 dans le cadre du projet EQUASEN (Environnement et Qualité des Eaux du Sénégal) N°TS2-0198-F-EBD, la collecte de données piézométriques dans la moyenne et basse vallée.

Le dépouillement de toutes ces données a constitué la base de l'étude du présent sujet intitulé: "Etudes hydrogéologiques dans la vallée du Sénégal, de Bakel à Podor: relations eaux de surface - eaux souterraines".

La zone d'étude appartient dans sa majorité à la bordure est de l'ensemble géologique du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien; tandis que son extrémité est appartient au socle en bordure de ce bassin. Le domaine spécifique de l'étude se limite à la vallée alluviale de part et d'autre du fleuve Sénégal. Cette vallée est découpée en quatre principaux domaines (la haute vallée, la moyenne vallée, la basse vallée et le delta). La moyenne vallée est découpée en zone amont et zone aval (fig.1).

- la zone Bakel- Manaél du socle appartient au haut bassin du fleuve Sénégal.
- La zone Manaél-Saldé, d'allure rectangulaire et d'orientation SE-NW, qui comprend un bras est à son extrémité nord-est appartient à la vallée alluviale du marigot le Gorgol.
- la zone Podor correspond, quant à elle, à un découpage rectangulaire dans la vallée alluviale au droit de Podor (fig. 2).

Les zones Manaél-Saldé et Podor appartiennent respectivement à la moyenne vallée amont et à la moyenne vallée aval.

Cette étude comprend:

une partie géologique dans laquelle est entreprise une description lithologique et structurale des formations maastrichtiennes, éocènes, et quaternaires.

Après un bref aperçu hydroclimatologique; une synthèse hydrogéologique a permis de délimiter les différents aquifères, de déterminer leurs caractéristiques hydrodynamiques et d'établir les types de relations inter-nappes d'une part et entre nappes et cours d'eau d'autre part.

Une étude approfondie des relations eaux de surface et eaux souterraines a permis de mettre en évidence l'influence directe des premières sur les secondes, et de ressortir des zones d'influence majeure sur la nappe.

Une étude physico-chimique des eaux souterraines a permis de mettre en évidence une conductivité électrique particulière des eaux souterraines dans la moyenne vallée amont d'une part et d'autre part d'établir la recharge des nappes par les eaux de surface et les possibilités d'échange inter-nappes.

Et en dernier il est entrepris une tentative d'interprétation du fonctionnement hydrique dans la vallée, ceci par un modèle de synthèse de bilans hydriques partiels, qui a permis de confirmer une large prédominance de la recharge des nappes par les cours d'eau plutôt que par les pluies, mais aussi l'importance de la reprise évaporatoire sur ces nappes.

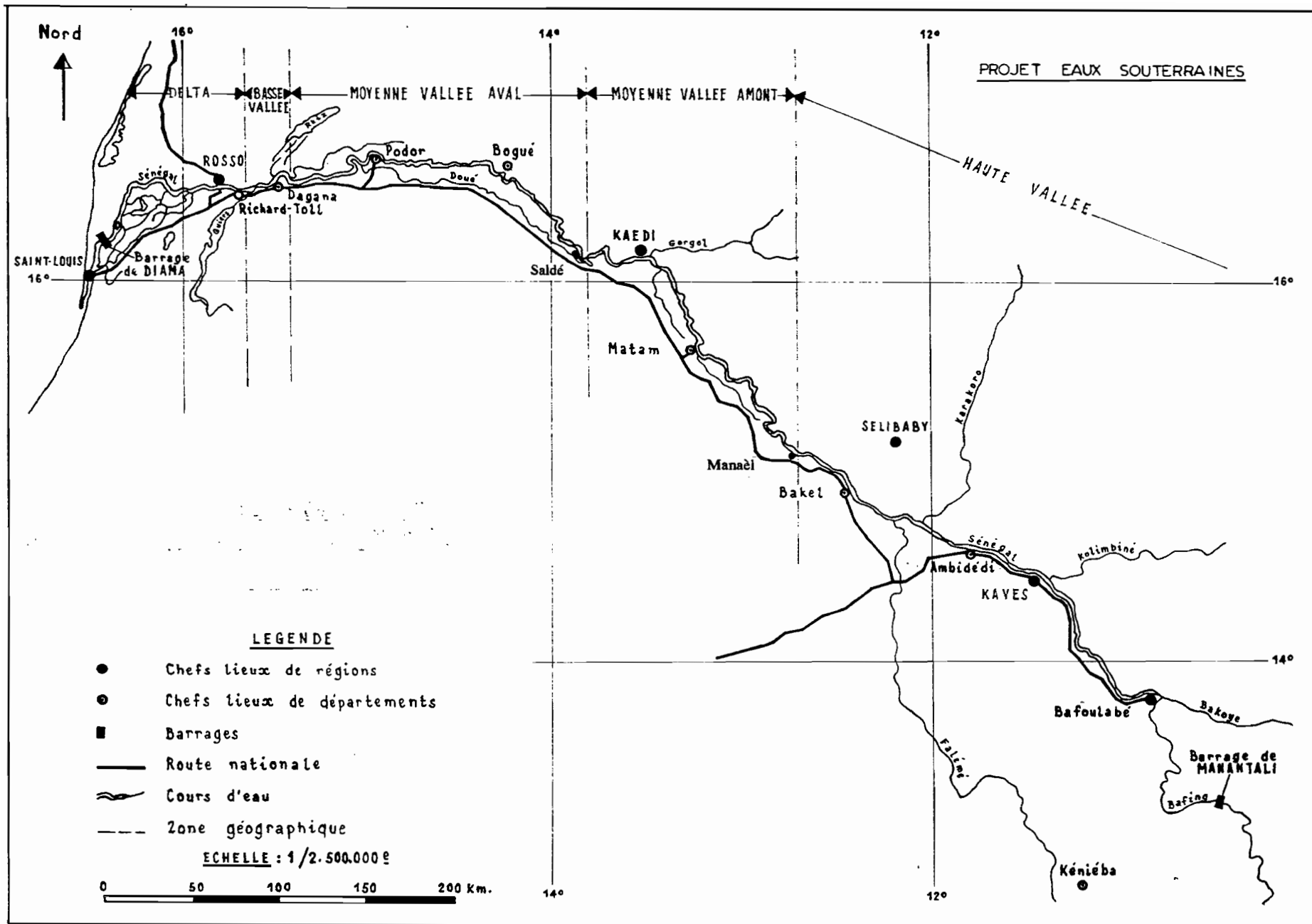


FIG. 1: CARTE DE LOCALISATION DES ZONES GEOGRAPHIQUES  
(d'après projet eaux souterraines OMVS 1986)



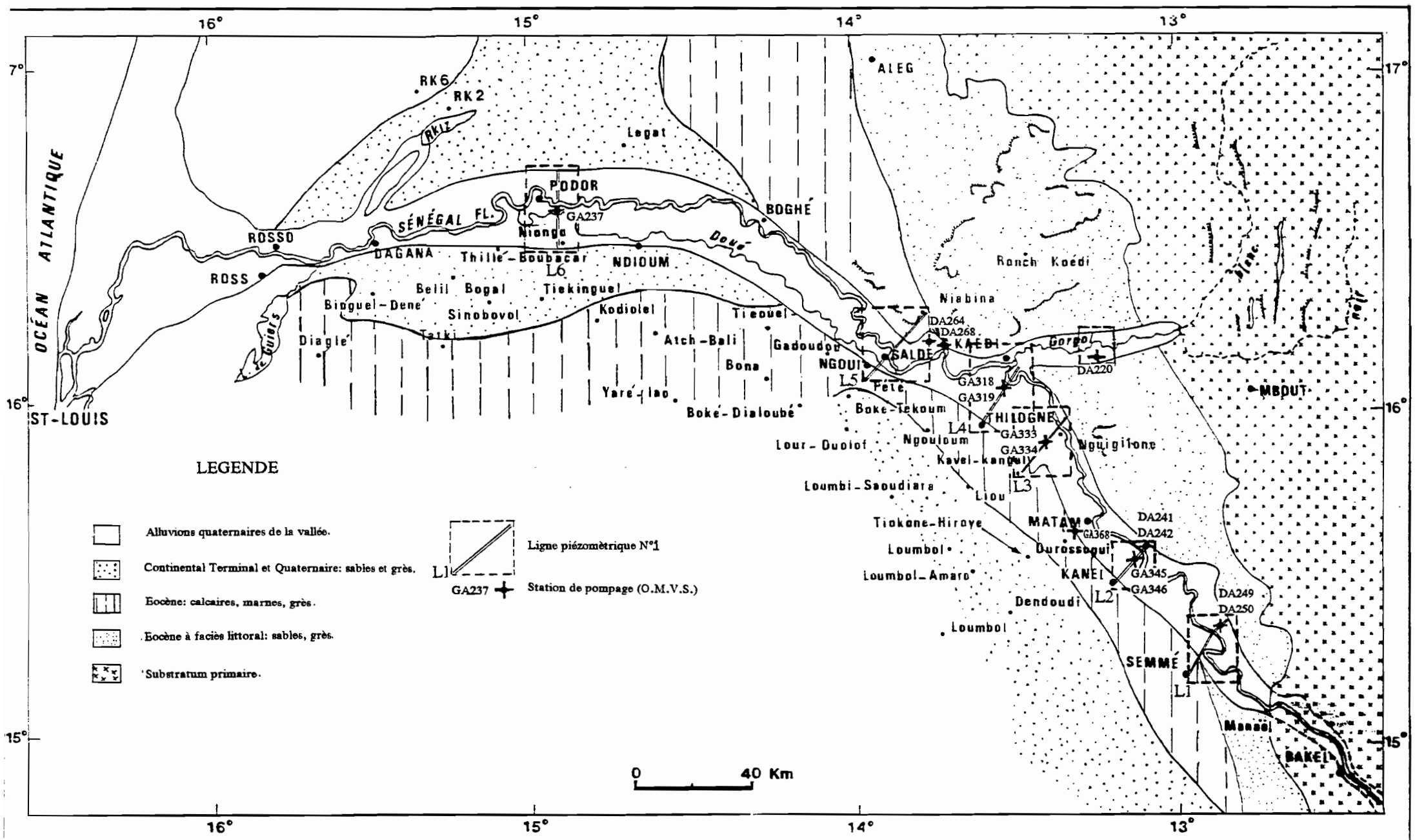


FIG. 2: CARTE GEOLOGIQUE ET DE LOCALISATION DES LIGNES PIEZOMETRIQUES  
(d'après Illy, 1973; modifié par Diagana, 1994)

# A

**SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE**

## 1 GEOLOGIE REGIONALE

Le domaine d'étude Bakel-Podor appartient à deux ensembles géologiques distincts. De nombreuses études parmi lesquelles celles de: Tessier et *al.*, 1961, 1975; Sougy, 1962 a, 1962 b, 1969; de Spengler et *al.*, 1966; Dia et *al.*, 1969, 1979; Dia, 1986; Ponsard, 1985; ont permis de connaître la structure géologique du bouclier ouest africain. On distingue à l'Ouest le bassin méso-cénozoïque sénégalo-mauritanien bordé à l'Est par la bande plissée de la chaîne des Mauritanides sur lequel il repose en partie (fig. a-1).

## 2 LE BASSIN SENEGALO-MAURITANIEN

Seules les formations du Crétacé supérieur et du Tertiaire affleurent dans le bassin, elles sont constituées par des terrains tabulaires discordants sur les formations géologiques plus anciennes (fig. a-2).

Dans les régions occidentales du Sénégal la puissance des séries sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire se chiffre à plusieurs milliers de mètres. Elle diminue vers l'Est pour atteindre 400 et 600m dans le Ferlo oriental et la haute Casamance. Ainsi les formations métamorphiques de la série de Bakel-Mbout, attribuées au Paléozoïque, en bordure est du bassin, se situeraient d'après les sondages pétroliers à plus de 7000m en basse Casamance et vers 6000m dans la région de Saint-Louis (de Spengler et *al.*, 1966).

### 2 - 1 LITHOSTRATIGRAPHIE

Le découpage lithostratigraphique du bassin sédimentaire peut se résumer en trois ensembles

#### 2 - 1 - 1 Les dépôts jurassiques et crétacés

Ils sont constitués à l'Est par des faciès détritiques, surtout gréseux. Dans la région de Kolda et Linguère ces dépôts détritiques deviennent plus grossiers vers la partie supérieure du Crétacé (Maastrichtien) avec une extension sous la vallée du fleuve Sénégal jusque dans la région de Kaédi (Michel, 1973).

#### 2 - 1 - 2 Les dépôts paléo-éocènes

Les formations anté-lutésiennes affleurent à l'Ouest dans les environs de Mbour et à la périphérie du massif de Ndiass. Elles sont représentées par des calcaires et des marnes qui deviennent gréseux dans la partie orientale du bassin. Divers niveaux du Lutétien inférieur affleurent dans la vallée du Sénégal entre Dembakané (village situé à 25km en aval de Bakel) et Boghé, de même dans la vallée du Gorgol. Ils forment plusieurs seuils de grès quartzite ou de calcaire dans le lit du fleuve Sénégal. Au contact avec la série de Bakel-Mbout les dépôts éocènes débutent souvent par un conglomérat de base (Gouzes, 1962 a).

A l'Eocène supérieur, les sédiments sont formés d'Est en Ouest par des dépôts argilo-sableux, argileux et carbonates en Casamance et Gambie, tandis qu'en Mauritanie ils sont surtout argileux.

#### 2 - 1 - 3 Les formations post-éocènes

Ce sont essentiellement les formations du Continental terminal dont le principal faciès est un grès hétérométrique, argileux, bariolé; il contient aussi des niveaux et des lentilles de sable, souvent bien triés des bancs d'argiles kaoliniques et des passées de gravillons ferrugineux. Dans la vallée du fleuve Sénégal, les apports alluviaux constituent les formations quaternaires.

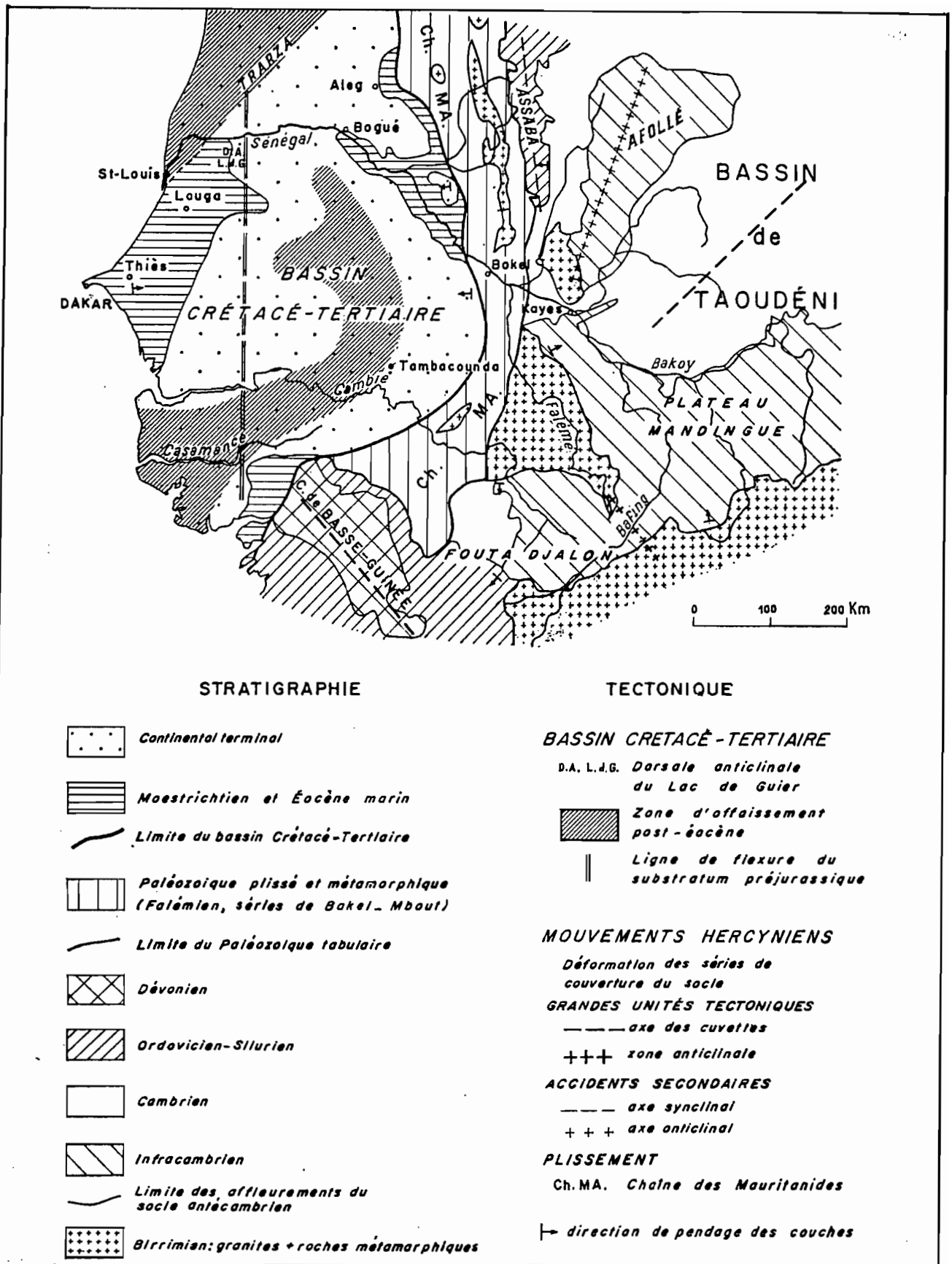
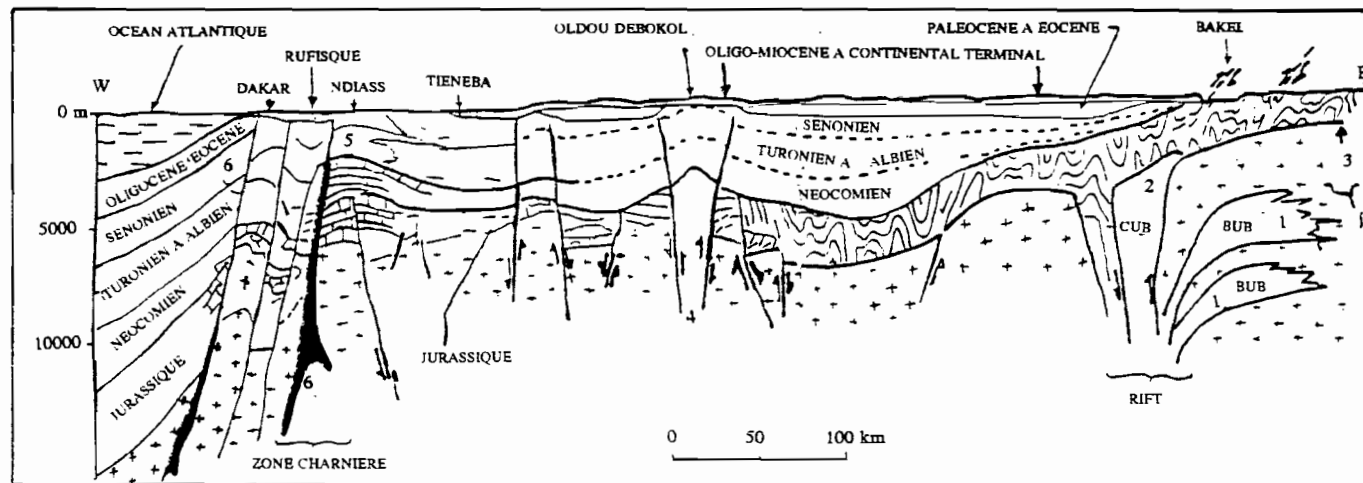


FIG. a-1: CROQUIS STRUCTURAL DES BASSINS-VERSANTS DU SENEGAL ET DE LA GAMBIE ( d'après Michel, 1969)



LEGENDE

- Argiles
- Calcaires
- Calcaires gréseux
- Grès dolomitiques
- Sables ou grès
- Alternance de sables ou argiles
- Roches volcaniques
- Roches métamorphiques du Paléozoïque
- Roches ophiolitiques de l'Infracambrien et du Cambrien
- Roches ophiolitiques du Birrimien
- Roches cristallines et métamorphiques

1. fermeture du RIFT birrimien et charnage vers (= 2000 million )
2. Fermeture du RIFT infracambrien et cambrien charnage vers l'Est
3. Plissement herynien et calédonien
4. intrusion crétacée d'Oldou Debokal
5. Compression Oligocène - Horst de Ndiass
6. Volcanisme du Tertiaire et Quaternaire

FIG. a-2: COUPE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE DU SENEGAL (Dakar - Bakel) d'après . de Spengler et al 1988 (Partin)  
Modifié d'après interprétation Landsat et tectoniques: Projet Télédetection 1985.

Il existe peu d'alluvions sur la haute vallée du Sénégal, on les retrouve sur la moyenne et la basse Vallée de part et d'autre du fleuve et de ses affluents.

Ces dépôts fins comprennent en général à la base des argiles très finement sableuses, bariolées, puis des argiles très compactes brunes à taches gris-bleuté ou verdâtres. Ces dépôts argileux, épais de 5 à 35m, correspondent à l'alluvionnement d'un fleuve ne transportant que les éléments très fins en solution ou en suspension.

## 2 - 2 ASPECT STRUCTURAL

Certaines parties du bassin sont soumises à une subsidence tandis que d'autres ont tendance à se soulever (fig. a-2).

Ainsi à l'Ouest du bassin sénégal-mauritanien, la Basse et Moyenne-Casamance et la région de Saint-louis se sont affaissées à plusieurs reprises. Les régions de Thiès et de Louga, situées entre ces deux premières se sont soulevées depuis l'Eocène supérieur. Dans la région centrale du bassin: le Ferlo et le Trarza se sont affaissés après l'Eocène et les dépôts gréseux du Continental terminal s'y sont entassés pendant le Néogène. Alors que la bordure orientale du bassin a été relevée et attaquée par l'érosion, les formations du socle et du Paléozoïque en cette bordure présentent un ensemble structural plus complexe avec des séries plissées.

En conclusion on peut dire que, le bassin présente deux zones d'affaissement (Ouest et Est), de part et d'autre d'une ligne de flexure méridienne passant près de Dagana, Linguère, et à l'ouest de Kolda en moyenne-Casamance (fig. a-1).

La zone ouest présente des faciès variés où des niveaux calcaires alternent avec des marnes et des argiles; certaines couches sont riches en Phosphates.

La zone est présente elle des dépôts à faciès plus détritiques.

## 3 GEOLOGIE DE LA VALLEE ALLUVIALE

L'étude géologique locale s'appuyera davantage sur les coupes géologiques des différents sondages sur les lignes piézométriques que le projet O.M.V.S./U.S.A.I.D. a réalisées de 1986 à 1987 dans la vallée, de même que celles des sondages anciens qui se trouvent dans ces zones.

Les cutings des sondages de l'OMVS, que nous avons récupérés, pour la zone Bakel-Kaédi, ont été observés et analysés. Ceci a permis d'apporter des rectificatifs aux descriptions lithologiques anciennes. Par contre faute d'arguments nous avons respecté les anciennes délimitations, des différents étages géologiques sur les logs, données par leurs auteurs

Les logs des sondages ont été portés sur des lignes transversales au fleuve Sénégal, et ont fait l'objet d'essais de corrélation par leurs formations lithologiques. Ils ont permis d'établir les différentes coupes géologiques dans la vallée.

A partir des coupes géologiques récentes de l'O.M.V.S. et celles établies par LE PRIOL et DIENG (85) dans la vallée, nous avons entrepris une description lithostratigraphique locale de la moyenne vallée à travers ses différents étages.

### 3 - 1 LA STRUCTURE GEOLOGIQUE

La sédimentation dans le bassin, en général a pour origine une subsidence qui se traduit par un affaissement continu du bassin depuis le Jurassique, et par le jeu de compartiments délimités par des fractures qui découpent les roches dures du socle ancien et la couverture sédimentaire qui le surmonte jusqu'à l'Eocène. Les formations quaternaires, notamment celles alluviales du Sénégal, postérieures au phénomène tectonique, reposent sur un substratum alors accidenté.

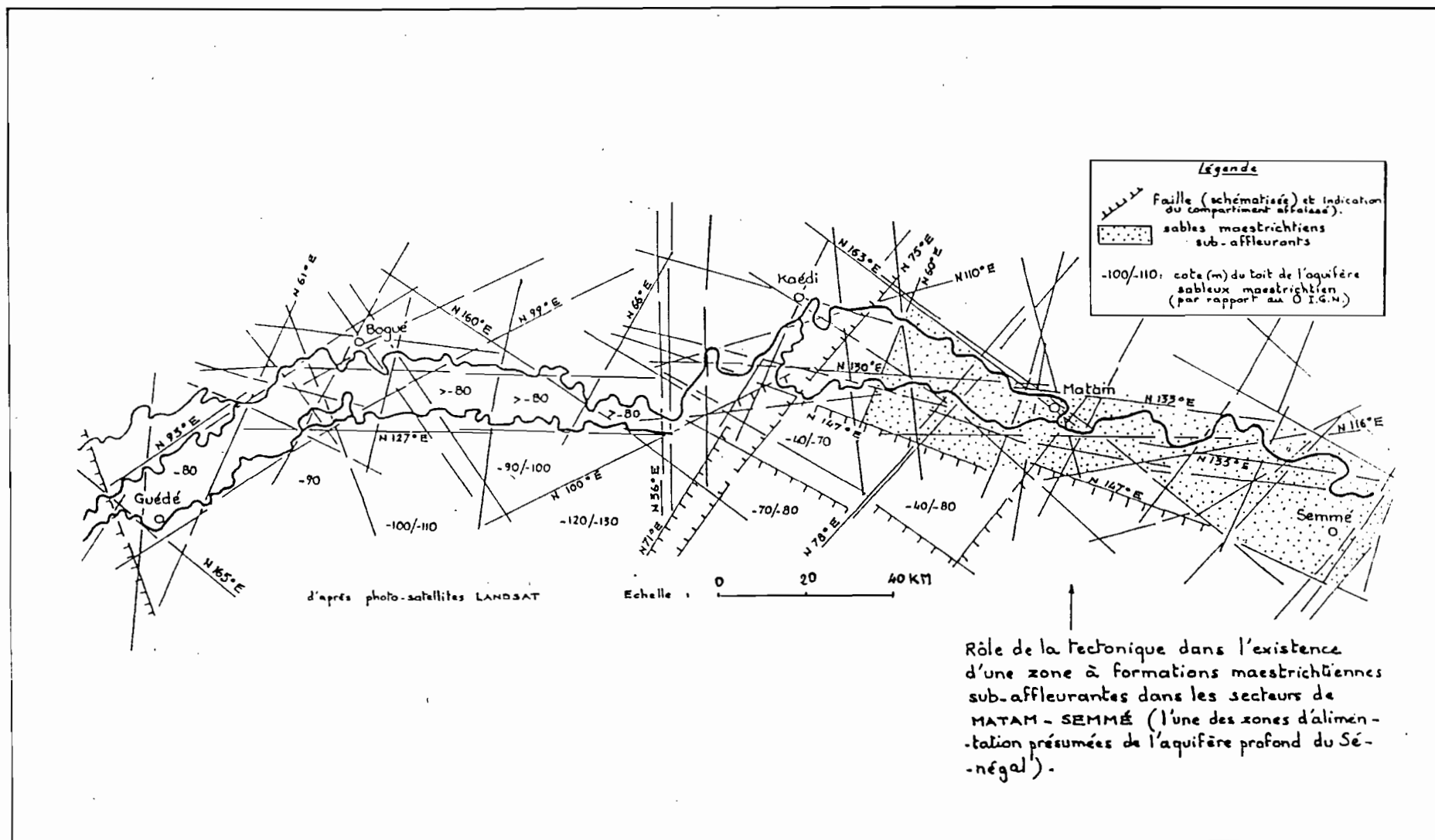


FIG. a-3: INFLUENCE DE LA FRACTURATION SUR LE TRACE DU FLEUVE (entre Semmé et Guédé) d'après Le Priol et Dieng; 1985

C'est ainsi que par examen des photo-satellites, Lepriol *et al*, (1985) ont pu établir le lien étroit qui existe entre les directions de fractures et le tracé de la vallée du fleuve Sénégal (fig. a3). Les directions majeures de faille sont:

N 133-135°E et N 115°E entre Sémmé et Matam

N 163°E, N 130°E, N 110°E et N 70°-75°E entre Matam et Kaëdi

N 130°-147°E, N 127°E, N 110°E et N 70°-75°E entre Kaëdi et Bogué

N 165°E et N 93°E entre Bogué et Guédé.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, des failles de direction N 60°-75°E et N 135-147°E différencient deux zones où le Maastrichtien est subaffleurant, mettant en contact direct les sables maastrichtiens et les formations sablo-argileuses paléo-éocènes et plio-quaternaires superficielles dans les secteurs, comme Sémmé-Matam et Thilogne, qui seront décrites plus en détail au paragraphe suivant.

### 3 - 2 LA LITHOSTRATIGRAPHIE

La lithostratigraphie de la vallée a été établie grâce aux différentes corrélations lithologiques, réalisées dans la vallée. Ainsi on distingue de bas en haut.

#### 3 - 2 - 1 Maastrichtien

Il a été atteint par tous les sondages effectués sur les cinq lignes piézométriques dans la zone Manaël-Saldé.

##### 3-2-1-1 Coupes transversales (fig. a-4 et a-5)

- Ligne n°1: SEMME (an.1 et 8)

Son toit forme un sommet au droit du marigot le Diouloul à moins de 30m de la surface du sol sur la rive gauche et à 60m sur la rive droite. Il est représenté par des formations sableuses, sablo-argileuses ou graviers-marneux.

- Ligne n°2: KANEL (an. 2 et 9)

Son toit est situé à moins de 30m dans le Dièri à Kanel sous l'Eocène, il s'enfonce vers l'Est sous les formations alluviales à plus de 40m sur la rive gauche. Il comprend des sables grossiers et du graviers.

- Ligne n°3: NGUIGILOGNE (an. 3 et 10)

Son toit situé à plus de 70m, n'est atteint que par le seul sondage de Kavel avec un faciès sableux.

- Ligne n°4: THILOGNE (an. 4 et 11)

Son toit, situé à moins de 15m du sol à Thilogne à la limite de la vallée alluviale, s'enfonce vers l'Est. IL est composé en majeure partie de sables et de graviers quartzeux.

- Ligne n°5: SALDE (an. 5 et 12)

Contrairement aux lignes piézométriques précédentes le toit est ici le plus profond. Ce toit, sur les deux sondages anciens (Pété et Niabina ) qui encadrent la vallée alluviale, se situe



respectivement à 110m et 90m du sol sous les formations de l' Eocène. Il est formé de sables et de graviers.

- Ligne n°6: PODOR (an. 6 et 13)

Son toit n'a été nulle part atteint sur la ligne par les sondages qui, parfois sont profonds de 50m. Par ailleurs à Thillé-Boubacar, environ 20km à l'Ouest de la ligne, son toit se situe à 100m du sol.

### 3 - 2 - 1 - 2 Coupes longitudinales de la vallée

- Ligne n°7: coupe longitudinale (fig. a-6)

Le toit du Maastrichtien dessine des dômes et des creux sur la coupe parallèle à la vallée entre Haéré-Lao et Doundé-Kassem.

De Haéré Lao à Galoya, les sables maastrichtiens présentant des failles se sont affaissés. Ces sables forment une dépression de -70 à -100m dans laquelle se sont déposés des sédiments marno-calcaires d'âge éocène.

Entre Thilogne et Goudoubé, les sables maastrichtiens en dôme sont en continuité directe avec la série sablo-argileuse superficielle.

Entre Kanel et Sémmé, Les sables maastrichtiens, sont recouverts par une épaisse formation argilo-sableuse (sauf dans le secteur de Kanel où ces sables sont quasi affleurants).

- ligne n°8: coupe longitudinale (fig. a-7)

Le toit du Maastrichtien se relève aux deux extrémités de la coupe à Thilogne et Sémmé où il se met en contact avec le Quaternaire.

### 3 - 2 - 2 L'Eocène

L'extension de l'Eocène est discontinue, elle présente des lacunes en certains endroits.

#### 3-2-2-1 Coupes transversales (fig. a-4 et a-5)

- Ligne n°1: SEMME (an. 1 et 8)

L'Eocène présente une lacune au niveau du sommet maastrichtien où il serait probablement érodé. Au SW dans le Diéri, son toit se trouve à 5m alors qu'au NE à la limite de la vallée il est à plus de 20m.

Il repose directement sur le Maastrichtien, et présente un faciès argilo-sableux au SW et un faciès graviers-marneux et sableux au NE.

- ligne n°2: KANEL (an. 2 et 9)

Comme précédemment, il présente une lacune en dessous des formations alluviales. Au SW dans le Diéri, son toit se situe à 3m du sol. A l'extrémité NE sur la rive droite il est à 15m. Il est formé de sables grossiers, sables argileux et argiles sableuses.

- ligne n°3: NGUIGILONE (an. 3 et 10)

Au SW son toit se trouve à 20m du sol, il s'enfonce vers le NE. Son épaisseur connue au seul sondage de Kavel, est de 50m.

Il présente un faciès à dominance calcaire au SW et sableux au NE.

- ligne n°4: THILOGNE (an. 4 et 11)

Il est absent à l'extrémité SW de la vallée, au niveau du dôme du Maastrichtien, par contre il est régulièrement signalé sur la rive gauche à environ 30m. Il présente un faciès à sables grossiers.

- ligne n°5: SALDE (an. 5 et 12)

Il ne repose pas directement sur le Maastrichtien. Il en est séparé par le Paléocène à faciès marno-sableux et argilo-sableuse, dont le toit se situe à 70m du sol et épais de 40m.

Quant à l'Eocène, son toit situé à moins de 10m du sol aux bords de la vallée, atteint les 30m au centre.

Son épaisseur est de 60m au sondage de PETE, son faciès varié est en majorité calcaire.

- ligne n°6: PODOR (an. 6 et 13)

Il a été partiellement atteint, sur la rive gauche, à la profondeur de 40m aux sondages F10 et GA237. Son épaisseur à Thilé-Boubacar est de 30m. Son faciès comprend de l'argile, du calcaire et du calcaire marneux.

### 3 - 2 - 2 - 2 Coupes longitudinales

- Ligne n°7: coupe longitudinale (fig. a-6)

Il est absent au niveau des dômes du Maastrichtien. On le trouve entre Haéré Lao et Galoya où les sables maastrichtiens forment une dépression. Il se présente sous forme de dépôts marno-calcaires d'épaisseur variable de 40 à 70m environ.

Entre Sédo-Sébé, Ourossogui et Sinthiou Garba: les sables maastrichtiens sont recouverts par une série marno-calcaire éocène de 15 à 40m d'épaisseur.

- Ligne n°8: coupe longitudinale (fig. a-7)

L'Eocène est présent entre Thilogne et Kanel avec une épaisseur maximale de 25m à Matam.

### 3 - 2 - 3 Le Quaternaire

Il se résume en grande partie aux dépôts alluviaux du fleuve Sénégal et ses affluents.

#### 3 - 2 - 3 - 1 Coupes transversales (fig. a-4 et a-5)

- Ligne n°1: SEMME (an. 1 et 8)

Il se présente régulièrement du SW au NE reposant tantôt sur l'Eocène autour du dôme, tantôt directement sur un Maastrichtien en dôme, avec une épaisseur moyenne de 30m.

Son faciès varié comprend de l'argile du sable et du silt. Ses formations de base sont sableuses.

- Ligne n°2: KANEL (an. 2 et 9)

De même que la ligne n°1, on le trouve de part et d'autre du dôme sur l'Eocène et au centre du dôme sur le Maastrichtien.

Son épaisseur, faible en bordure du Diéri, atteint les 30m au niveau de contact avec le Maastrichtien.

Ses formations supérieures sont plus ou moins argileuses alors que celles inférieures sont sableuses.

- Ligne n°3: NGUIGILOGNE (an. 3 et 10)

Contrairement aux deux premières coupes, ici le Quaternaire ne repose pas sur le Maastrichtien, mais seulement sur l'Eocène.

Son épaisseur très faible au SW (5m) augmente vers le SE pour dépasser les 15m au GA330. Ses formations sont argileuses au dessus et sableuses en dessous.

- Ligne n°4: THILOGNE (an. 4 et 11)

Il repose sur l'Eocène avec une épaisseur faible (10m) au SW qui augmente pour atteindre 30m au NE. Ses formations sont argileuses au dessus et sableuses en dessous.

- Ligne n°5: SALDE (an. 5 et 12)

Le Quaternaire repose sur l'Eocène par sa formation sableuse inférieure. Son épaisseur faible en bordure du Diéri (10m), atteint les 30m au droit du fleuve.

- Ligne n°6: PODOR (an. 6 et 13)

Il se présente régulièrement au dessus de l'Eocène, avec une épaisseur moyenne de 40m. Il comprend une succession de bandes argileuses et sableuses.

### 3 - 2 - 3 - 2 Coupes longitudinales

- Ligne n°7: Coupe longitudinale (fig. a-6)

- Ligne n°8: Coupe longitudinale (fig. a-7)

Il est constitué en majeure partie par les formations alluviales qui reposent tantôt sur le Maastrichtien tantôt sur l'Eocène.

### 3-3 REMARQUES ET CONCLUSION

L'étude géologique locale de la moyenne vallée, permet de distinguer d'amont en aval quatre secteurs que nous allons appeler A, B, C et D.

Le secteur A correspond aux lignes n°1, n°2 et le secteur C à la ligne n°4. A ces deux endroits on observe un Maastrichtien en dôme, au sommet duquel reposent en discordance les formations alluviales du Quaternaire, tandis que celles de l'Eocène reposent sur les flancs.

Le secteur B correspond à la ligne n°3 le secteur D aux lignes n°5 et n°6, contrairement aux secteurs précédents, les trois étages se superposent régulièrement sans lacune.

La coupe réalisée dans la vallée du Gorgol (an. 7) montre les mêmes formations alluviales et éocènes que celles de la vallée du fleuve (fig. a-8).

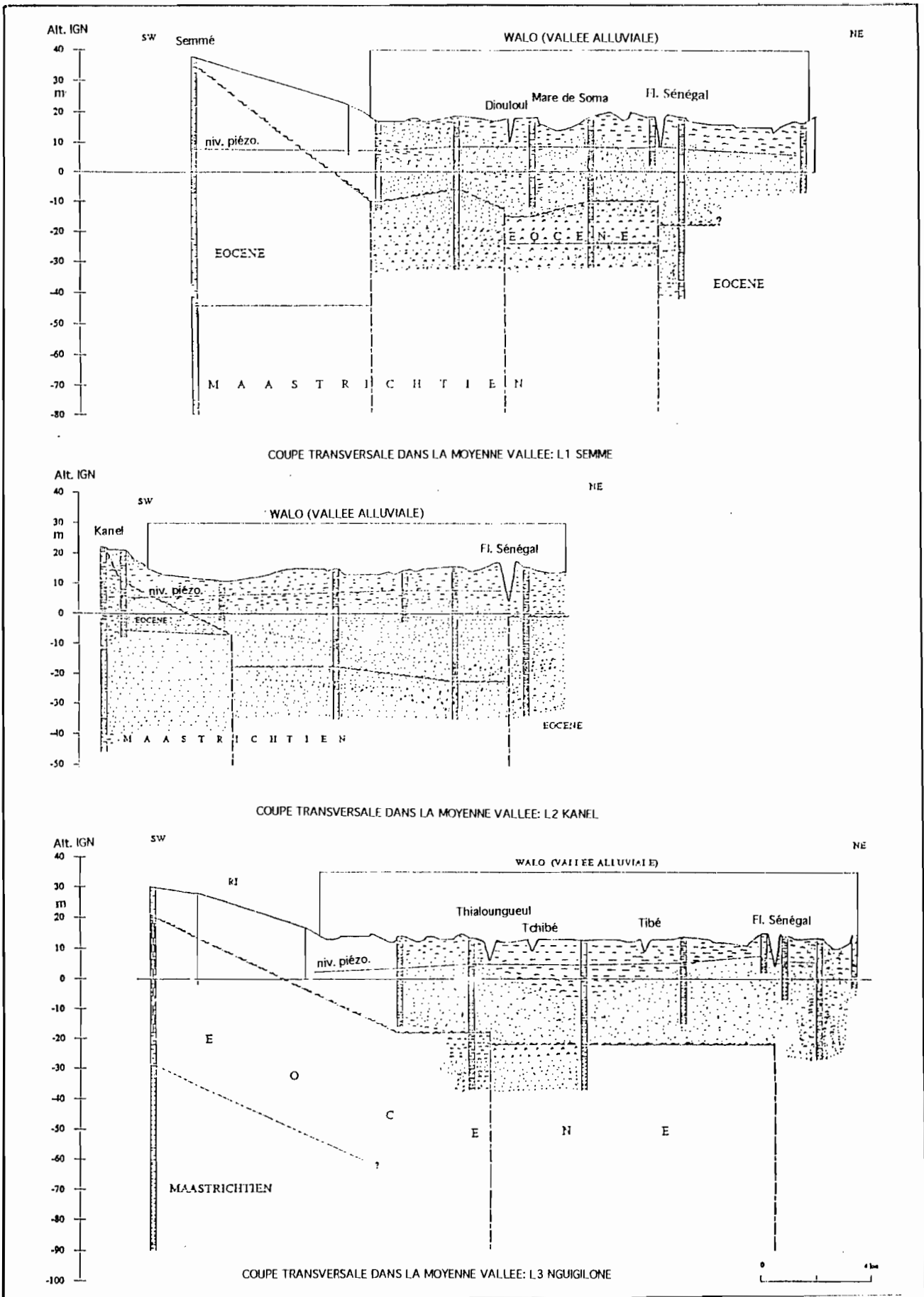


FIG. a-4: Coupes transversales dans la moyenne vallée (lignes 1, 2 et 3)

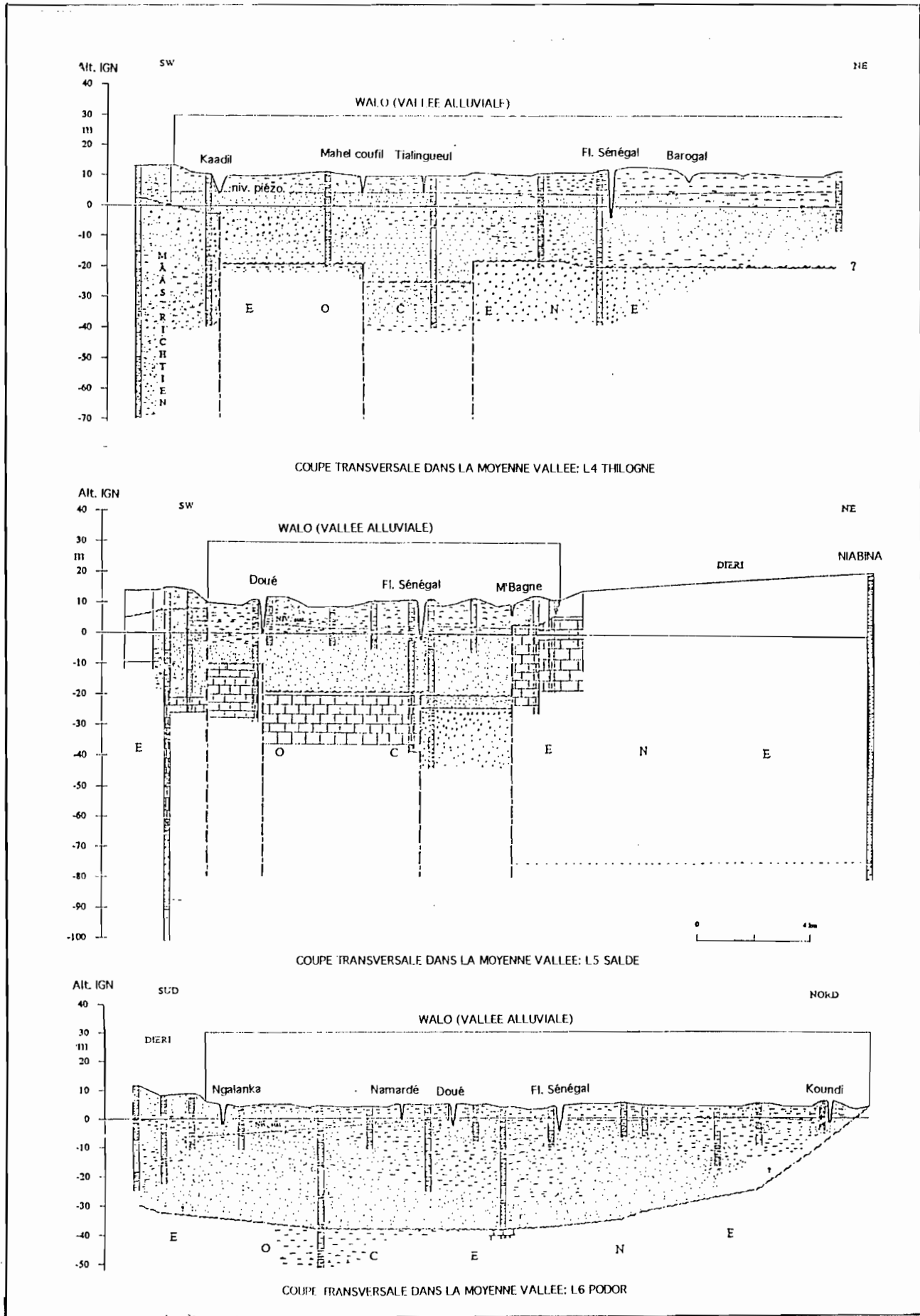


FIG. a-5: Coupes transversales dans la moyenne vallée (lignes 4, 5 et 6)

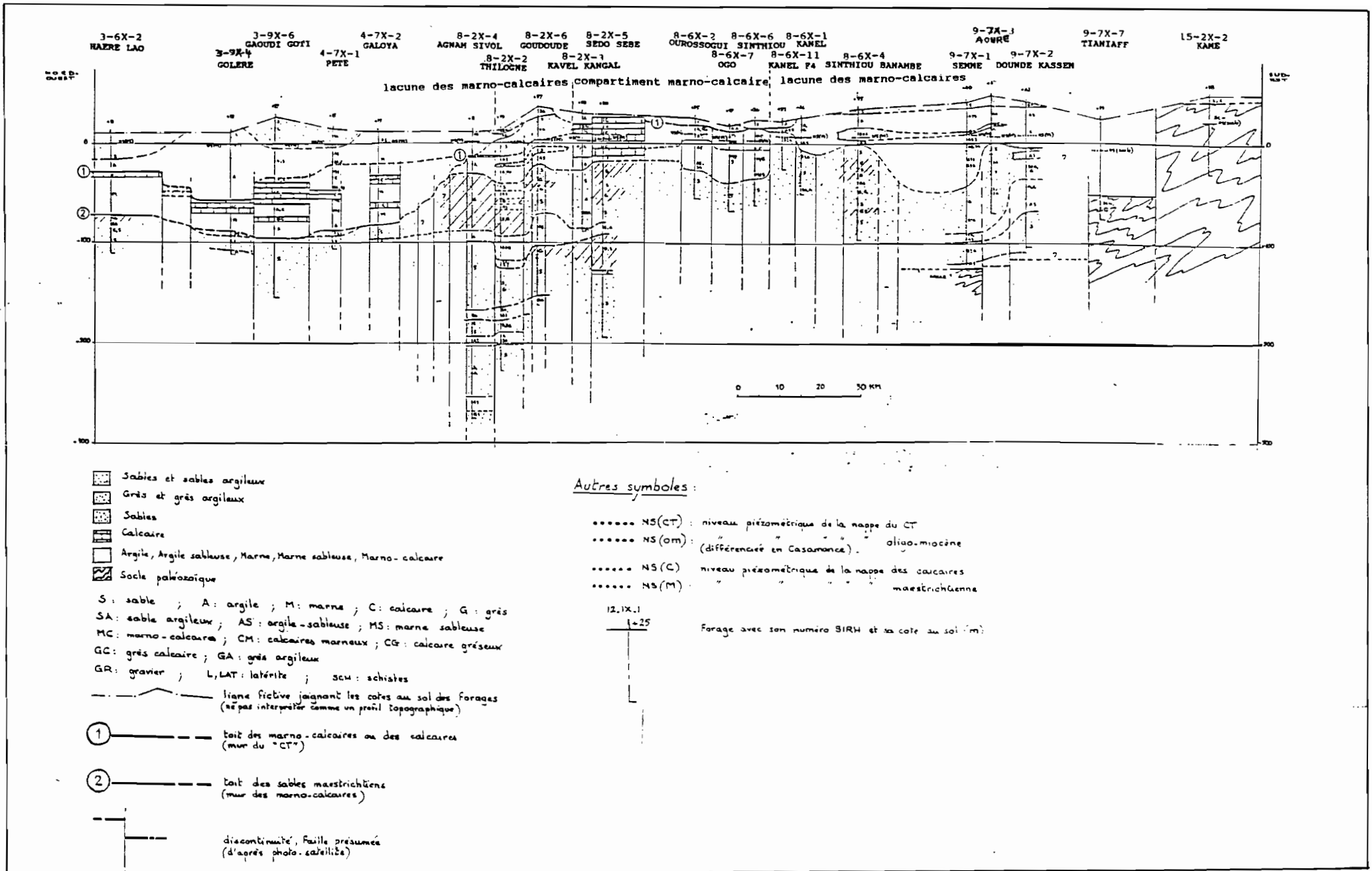


FIG. a-6: COUPE GEOLOGIQUE LE LONG DE LA VALLEE ALLUVIALE DU FLEUVE SENEGAL (de Haéré Lao à Kamé) d'après Le Priol et Dieng; 1985.

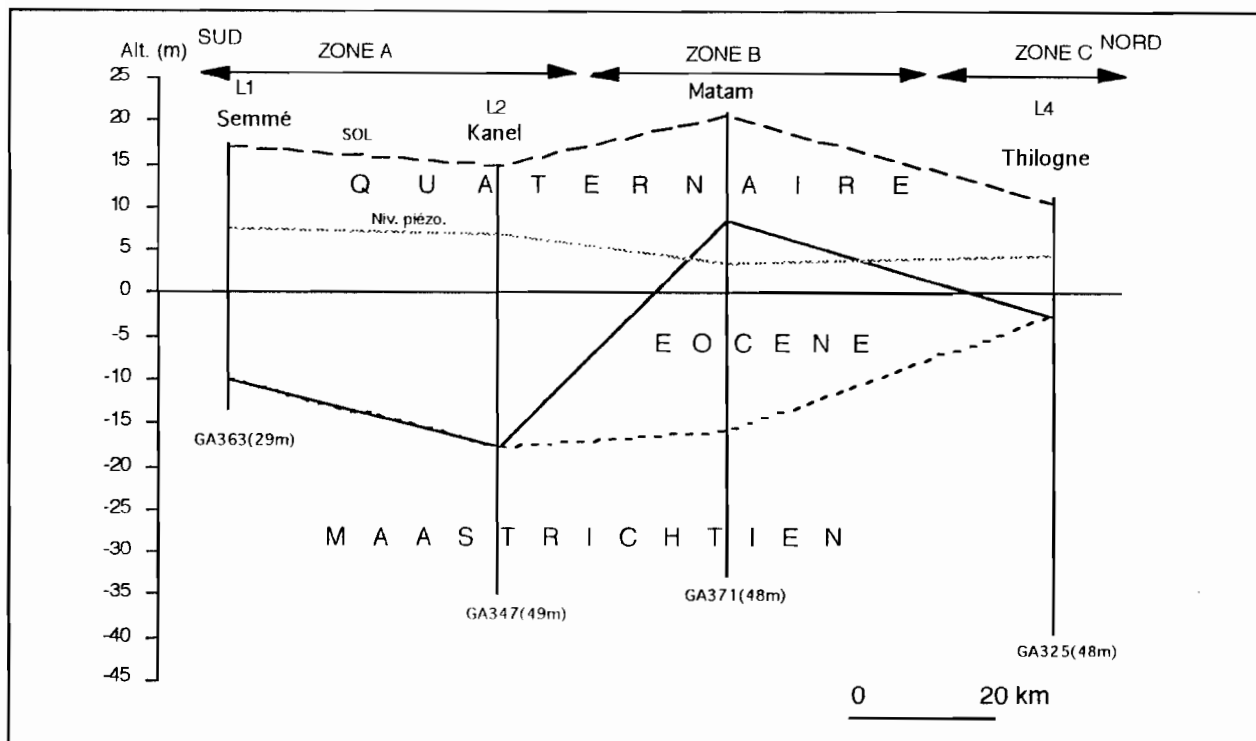


FIG. a-7: Coupe longitudinale de la moyenne vallée (Semmé - Thilogne)

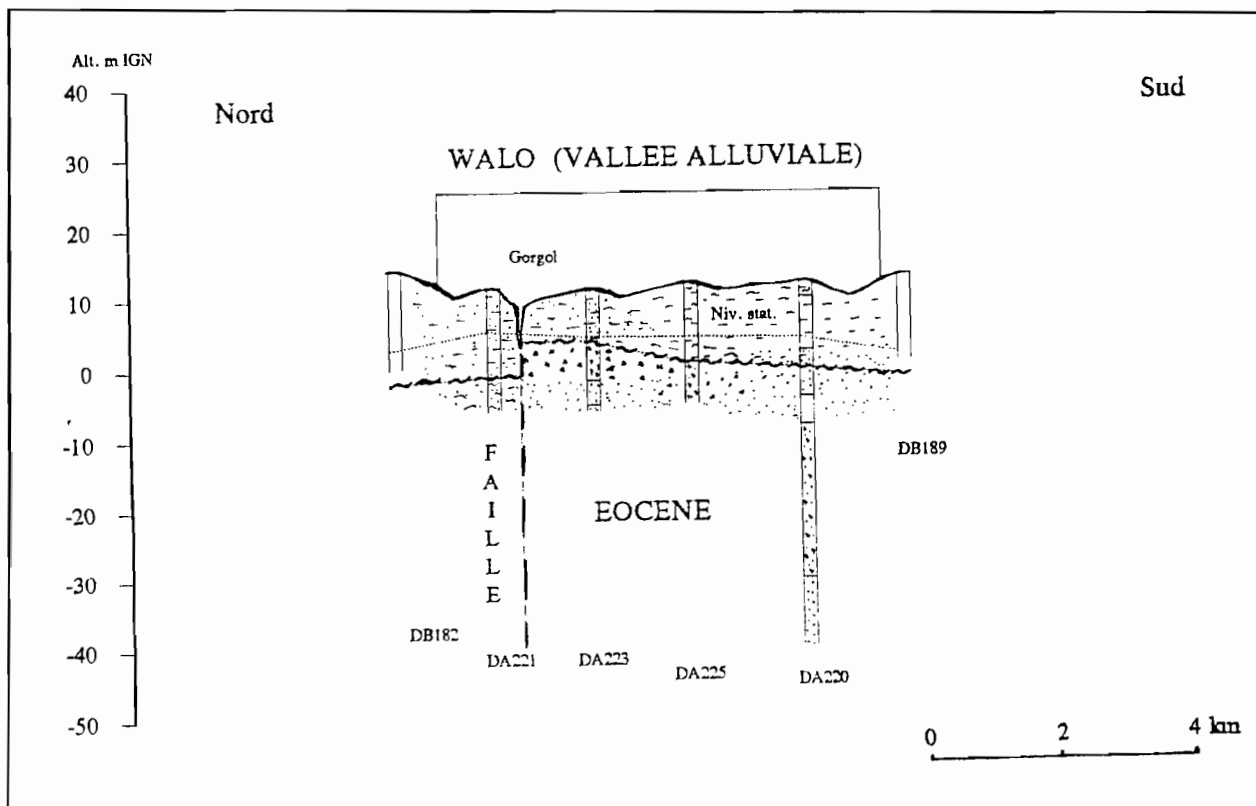


FIG. a-8: Coupe transversale de la vallée alluviale du Gorgol

**B**

**HYDRO-CLIMATOLOGIE**



# 1 HYDROLOGIE

## 1 - 1 LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE.

Un réseau hydrographique est fonction à la fois des pluies, du soubassement rocheux et de l'allure du modelé de sa zone.

La moyenne vallée est avant tout tributaire du réseau hiérarchisé du haut bassin qui constitue aussi son réceptacle pluvial, bien arrosé et au relief vigoureux où affleurent les terrains du socle birrimien et de sa couverture paléozoïque, plus ou moins imperméable.

La moyenne vallée a un réseau réduit par rapport à la haute vallée, à cause d'une part de la faible pluviosité 500 mm/an mais aussi de sa faible pente (0,03 ‰) en moyenne. La topographie du fond du lit du fleuve se présente en cascades de Bakel à St-Louis. (fig. b-1).

Dans la haute vallée le cours du fleuve est celui du Bafing (le cours le plus long) auquel vient s'ajouter celui de Bakoye à Bafoulabé (fig.1) et donnant ainsi lieu au Fleuve Sénégal.

Dans la moyenne vallée de Bakel à Podor, les principaux cours d'eau secondaires sont:

### Rive Gauche

- Le marigot de Diouloul: il prend sa source à Balé, qui après un parcours latéral au fleuve, rejoint ce dernier à environ 40 km en aval.

- Le Thialougueul ou Woni : il prend sa source aux environs de Diamel, à 2km en aval de Matam, il est latéral au fleuve. Il se dédouble en deux autres marigots: le Lougueul Garoudi ou Mahel Goufil et le Kaadil. Ce dernier atteint Thilogne où il rejoint le fleuve en période de crue.

- Le marigot du Doué: il prend sa source à environ 10 km en amont de Saldé, c'est un dédoublement du fleuve il le rejoint quelques kilomètres en aval de Podor, il délimite avec le fleuve une zone appelée "Ile à Morfil". Contrairement aux précédents marigots, il est permanent.

- Le Wali- Diala et le Namardé sont des affluents du Doué qui traversent le périmètre irrigué de Nianga. Leur système de fonctionnement est soumis à l'activation de vannes.

### Rive Droite

- L'Oued-El-garfa: il prend sa source en face du village de Ornodé sur la rive gauche.

- Le Gorgol: il prend sa source à Kaédi. Contrairement aux précédents, il est perpendiculaire au fleuve, et récolte ses eaux depuis le socle paléozoïque de l'Assaba au niveau duquel il se dédouble en Gorgol blanc et Gorgol noir.

A l'image du fleuve, il possède une vallée alluviale pouvant atteindre 10km de large (fig. 2) et 15m d'épaisseur(fig. a-8).

- le Koundi: prend sa source en face de Ndiarem près de Dagana.

Tous les affluents sont temporaires, excepté le Doué qui avec le fleuve demeurent permanents.

### Remarque

En dehors de ces principaux marigots on observe un enchevêtrement de petits marigots sur presque toute la surface de la vallée, qui sont inondés pendant l'hivernage.

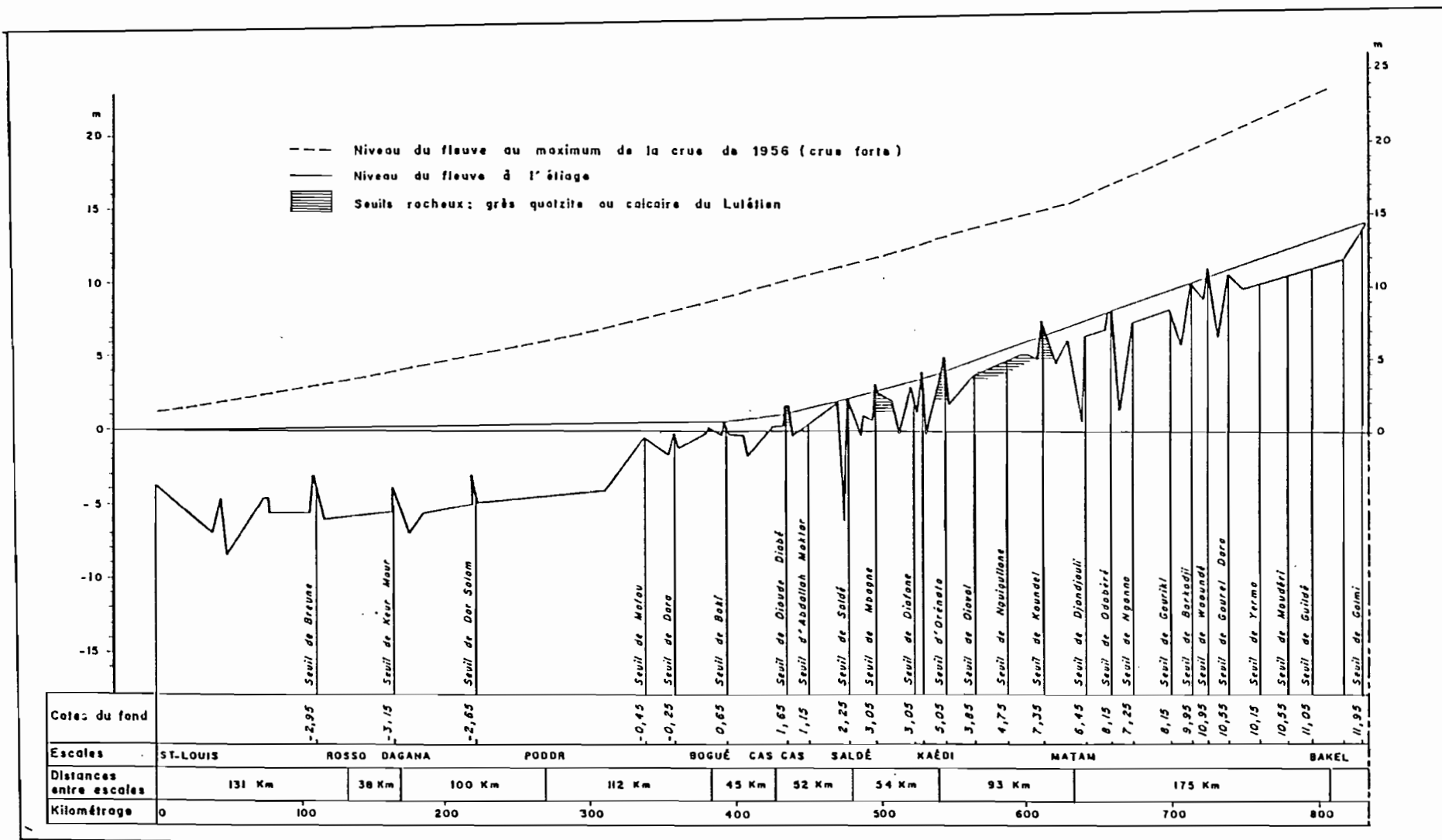


FIG. b-1: PROFIL EN LONG DU FLEUVE SENEGAL DE BAKEL A SAINT LOUIS  
(d'après la mission d'aménagement du Senegal)

## 1 - 2 IMPACTS DES BARRAGES SUR LE NIVEAU DES COURS D'EAU

Avant la mise en service du barrage de Diama en Novembre 1986 et des bouchons-barrages de Kheune en 1983 et 1984, le niveau de base correspondait au niveau moyen de la mer. Après la fermeture de Diama, le fleuve, à l' étiage, est isolé du bief maritime et son niveau de base est dépendant du stockage dans la retenue. L'altitude du plan d'eau de cette retenue est fixée à +2.50m à l'optimum du fonctionnement des deux barrages et des deux digues .

Pour une retenue à la cote zéro IGN le plan d'eau s'étend sur 350km, jusqu'à Bogué, pour une cote de 2.5m, il devrait s'étendre sur 450km, pour atteindre Saldé.

Les hauteurs d'eau aux stations situées dans la zone d'influence de la retenue de Diama, sont extrêmement basses. A Rosso l'étiage 1986 et 1987 les hauteurs respectives sont: (-0.48m et -0.42m). Ce niveau bas est dû à la retenue de Diama qui empêche la remontée de la langue salée.

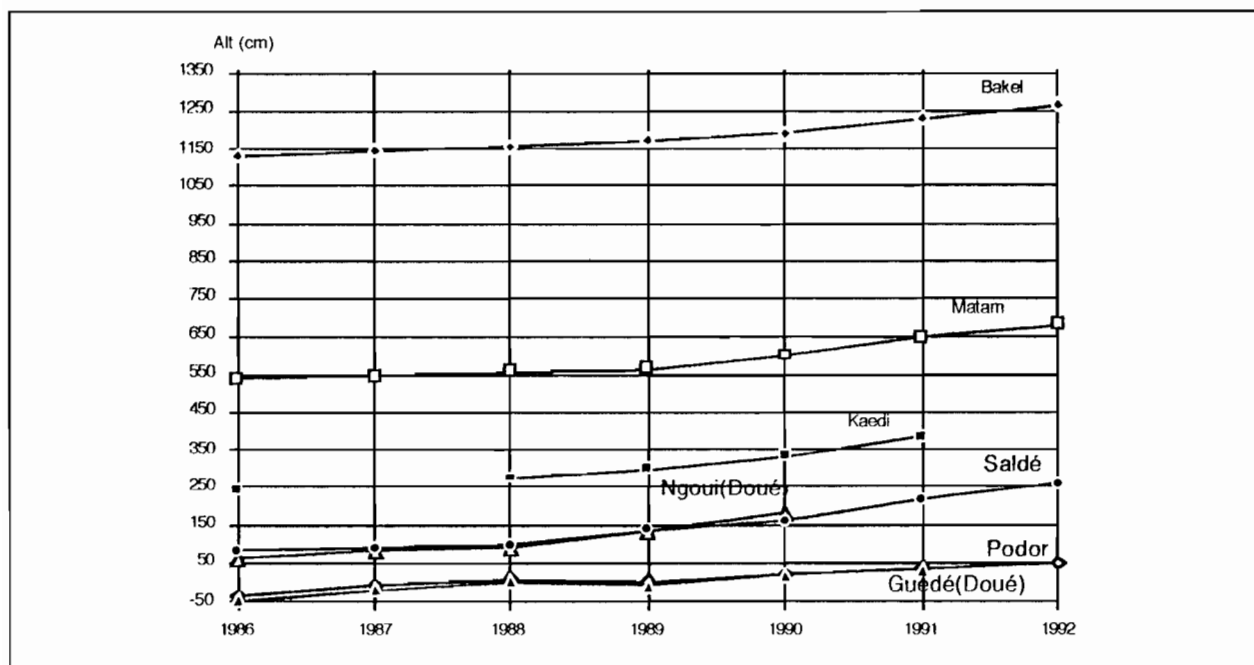


FIG. b-2: Evolution du niveau de base du plan d'eau du fleuve

Après la crue de 1987, la mise en service du barrage de Manantali a entraîné une nette amélioration du niveau du plan d'eau du fleuve. Le niveau monte d'année en année grâce à la mise en place progressive des digues latérales et aux lâchures répétées du barrage de Manantali (fig. b-2).

Depuis la mise en service du barrage de Manantali en juillet 1987 son influence ne cesse de se faire sentir sur les variations des hauteurs d'eau aux différentes stations hydrologiques du fleuve.

Les courbes de variation des hauteurs d'eau du fleuve aux stations de Bakel, Matam, Kaëdi et Saldé entre 1986 et 1992 montre l'influence du barrage de Manantali à partir de 1987. Les courbes de décrue sont perturbées (lâchures du barrage) et le niveau d'étiage se relève progressivement. Ainsi à Bakel on observe une remontée de plus de 1.30m au dessus du niveau théorique sans lâchure d'eau à Manantali (fig. b-3)

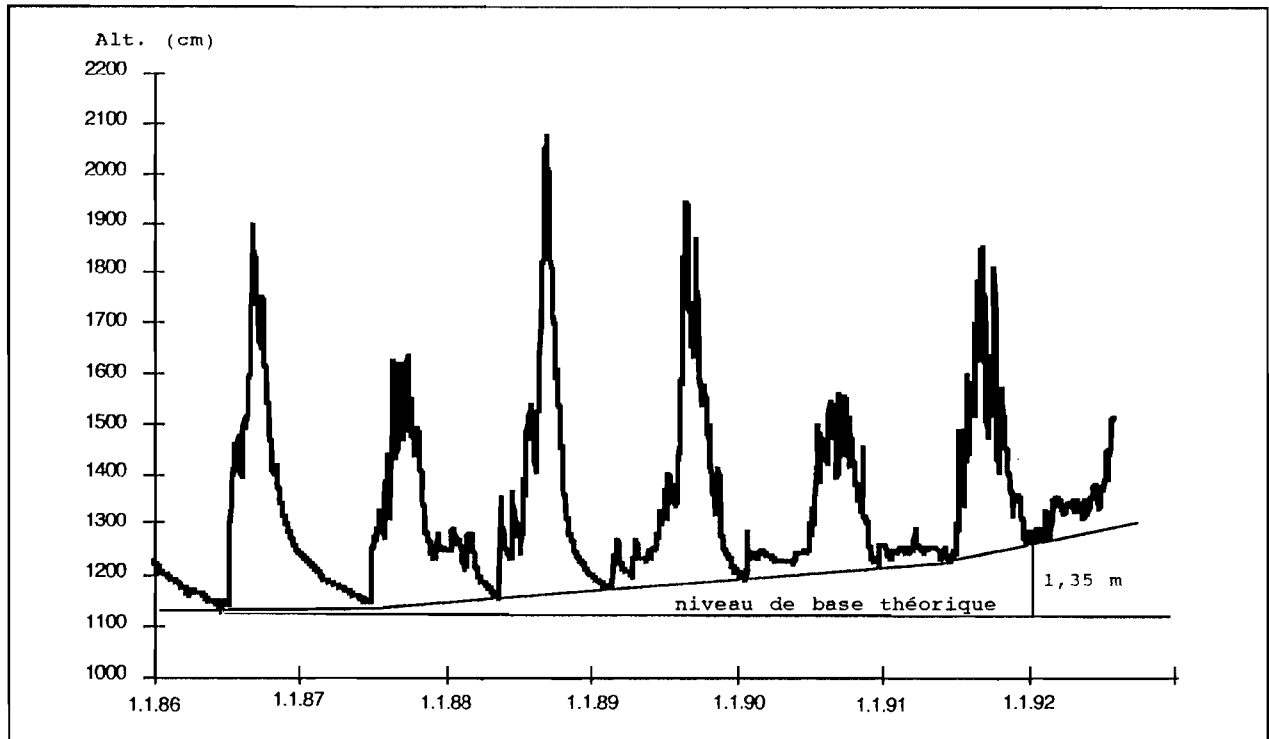


FIG. b-3: Influence du barrage de Manantali sur le niveau de base du fleuve à Bakel

Le barrage de Manantali, situé sur le cours du Bafing permet de réguler les eaux du fleuve Sénégal. Le module inter-annuel, calculé sur plus de 50 ans, est de  $323 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à Manantali et  $679 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à Bakel; le barrage permet ainsi de gérer l'écoulement des eaux de surface, en vue de maintenir les débits minimums à Bakel pour sécuriser les cultures, soit près de 50% des eaux du fleuve qui arrivent à Bakel (fig. b-4)

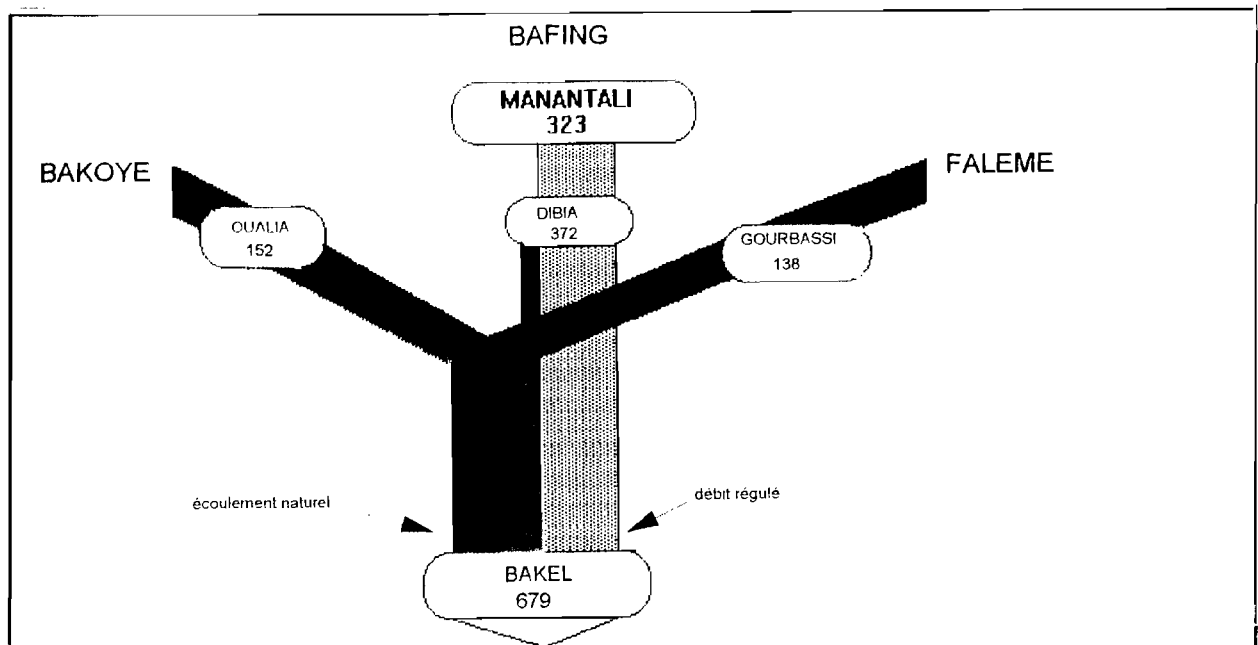


FIG. b-4: Module interannuel du fleuve et de ses affluents ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (moyenne calculée depuis la mise en place des stations soit plus de 50 ans) (Saos 1992)

L'illustration de cette remontée est donnée par l'évolution des hauteurs minimales extrêmes aux différentes stations pour les années 1986 et 1988 (fig. b-5).

L'incidence de cette remontée du niveau d'étiage du fleuve sur les nappes alluviales ne manquera pas de se faire sentir.

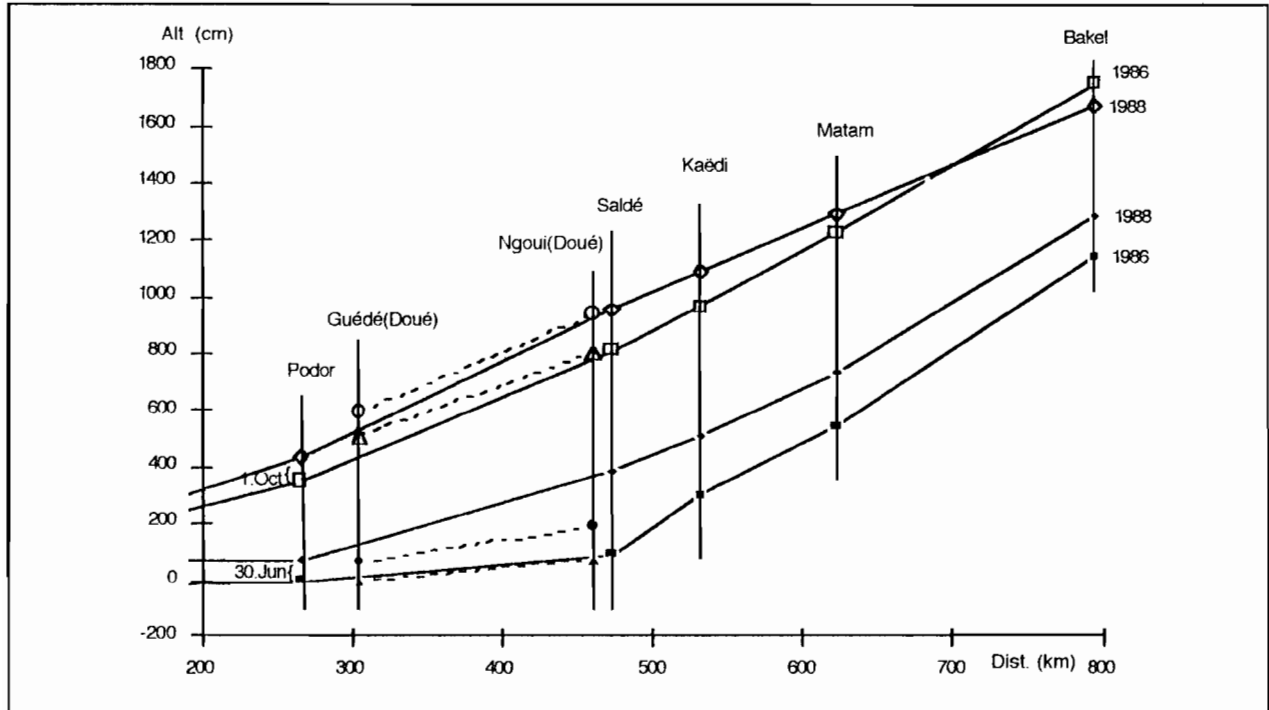


FIG. b-5: Plan d'eau du fleuve à l'étiage et à l'inondation

## 2 - PARAMETRES CLIMATIQUES

Dans ce paragraphe il ne s'agit pas de faire une étude détaillée du climat, mais plutôt de cerner les différents facteurs qui entrent dans la composition du bilan hydrique.

La limite Bakel-Podor de la vallée alluviale du fleuve Sénégal se situe entre 14°50' et 16°45' de latitude Nord. Elle est entièrement comprise dans le domaine tropical de l'hémisphère boréal, caractérisé par l'alternance de deux grandes saisons annuelles, une saison sèche (de novembre à juin) et une saison humide (de juillet à octobre).

Les stations climatiques du domaine d'étude sont celles de Bakel, Matam et Podor distants de la cote océanique respectivement de 450; 350 et 150 km, les données climatiques (an. 14 a) ont été recueillies au service de la météorologie nationale à Dakar - Yoff au Sénégal.

### 2-1. LES PLUIES

Si la saison des pluies démarre plus tôt à Bakel que pour les deux autres stations, elle s'arrête par contre au même moment pour les trois stations.

L'observation des précipitations interannuelles des différentes stations montre: (fig. b-6) une grande variabilité interannuelle des pluies d'une station à une autre.

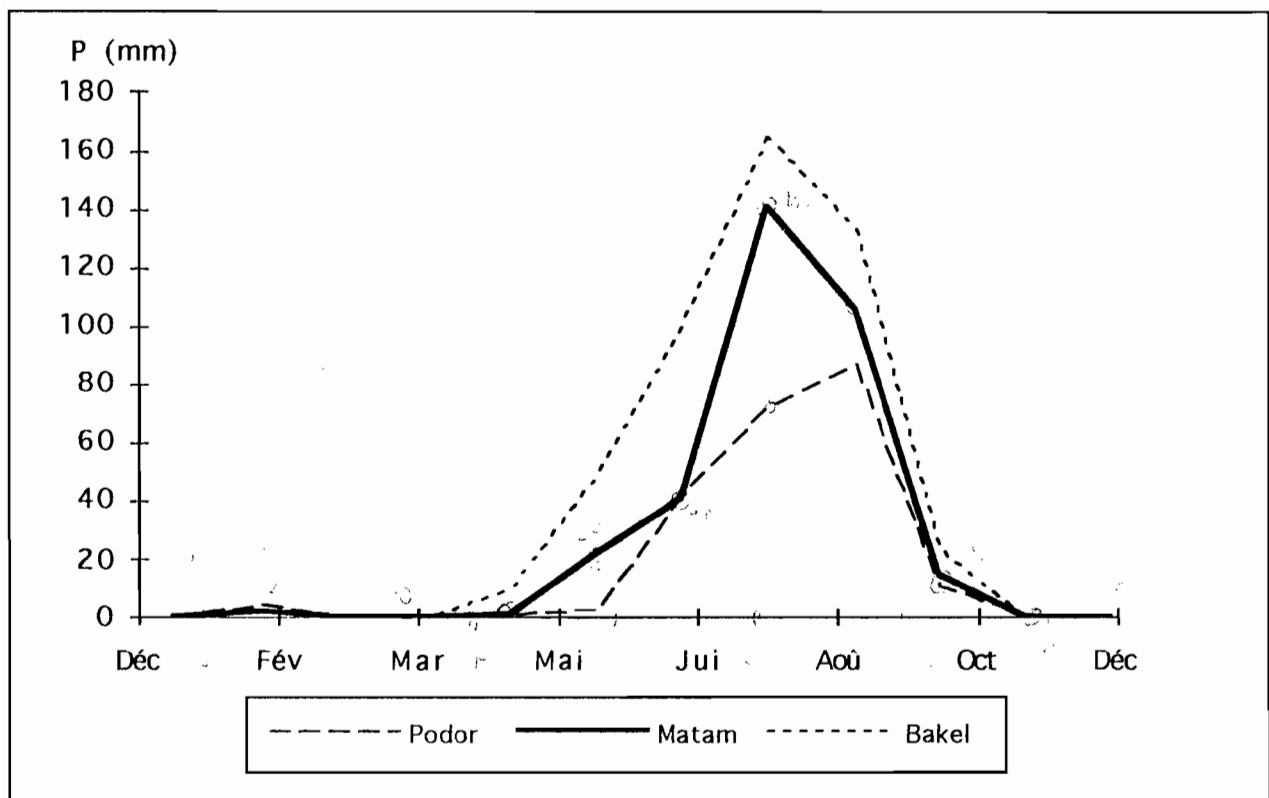


FIG. b-6: Pluviométrie: moyennes mensuelles (1986-1992)

L'impact de la sécheresse aux années 1970-1971 (fig. b-7) est manifesté particulièrement à Matam et Podor par une chute brusque de la pluviométrie annuelle, une diminution de la pluviosité dans le sens Bakel Matam et Podor c'est à dire du sud vers le nord. Cette diminution, si elle a un impact sur les nappes, devrait se manifester par une baisse de niveau.

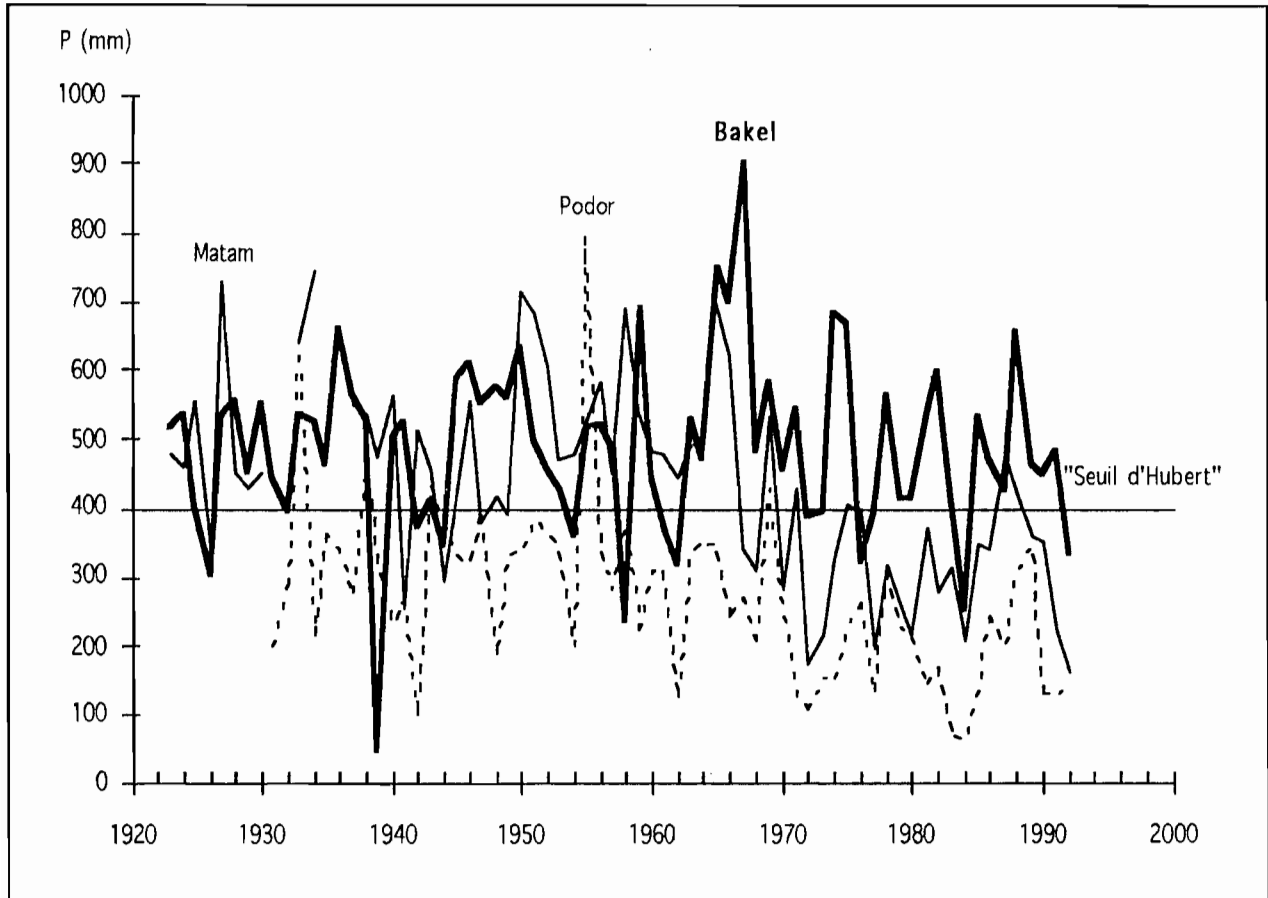


FIG. b-7: Chronique annuelle des pluies dans la moyenne vallée

## 2 - 2 . LES PHENOMENES EVAPORATOIRES (fig. b-8).

Nous avons porté sur le même graphique les valeurs moyennes journalières mensuelles de l'évaporation Piche et celles de l'évapotranspiration calculée par la méthode de Turc. Elles évoluent de façon inversement proportionnelle au cycle hydrologique annuel.

### - Evaporation Piche (EP)

C'est en période de saison sèche que l'on observe les valeurs maximales, mais aussi un décalage entre celles de la station de BAKEL d'une part et celles Matam et Podor d'autre part.

Ce décalage que l'on n'observe ni pour la température ni pour la vitesse du vent, souligne l'influence d'autres paramètres (telles l'altitude, la continentalité etc...) sur l'évaporation.

### - Evapotranspiration (ETP)

Cette notion fait intervenir non seulement l'évaporation à partir du sol humide ou mouillé, mais également la transpiration des plantes. Elle varie alors en fonction du couvert végétal.

Au Sénégal différentes formules empiriques ont été utilisées pour son calcul, ceci à partir des données météorologiques. Parmi celles-ci on distingue celles de Thornthwaite, Turc, et Walker utilisées par Schoch, (1965) (fig. b-9), et celles de Turc et Bouchet, *in* Tandia,(1990). Il est ressorti de la comparaison des différentes méthodes, l'impossibilité de conclure sur la validité d'une formule, d'où la nécessité de procéder par des mesures "in situ" sur évapotranspiromètre.

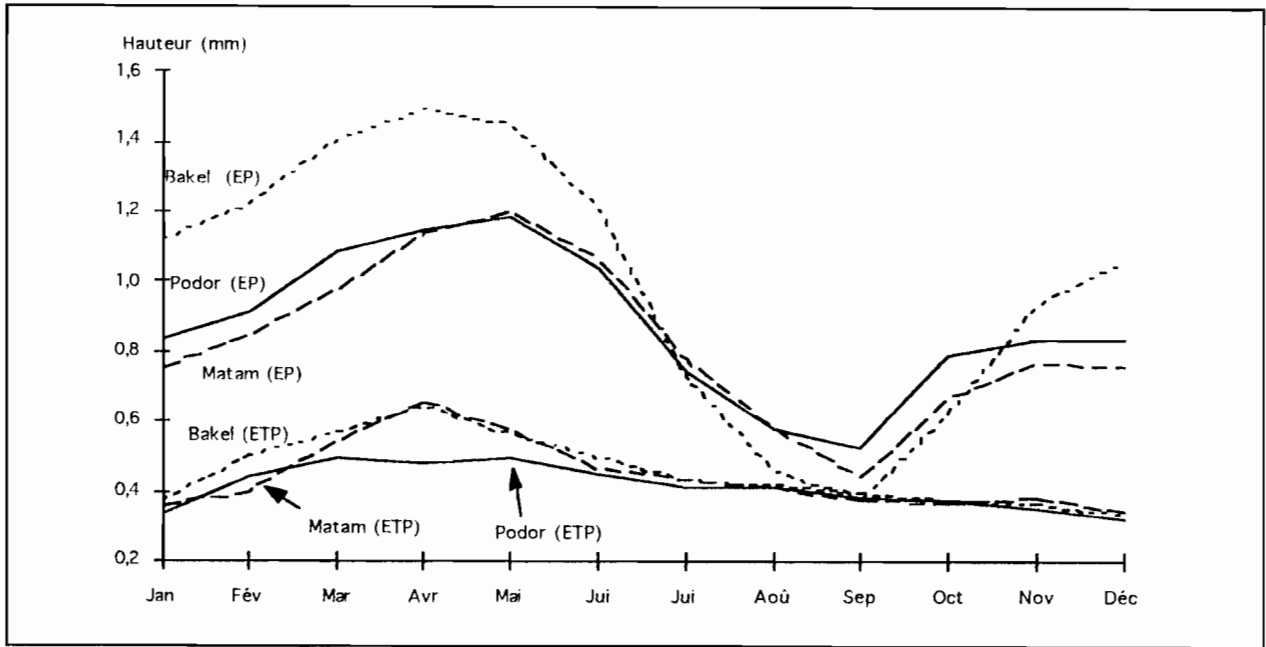


FIG. b-8: Evapotranspiration TURC (ETP) et évaporation Piche (EP) (moyennes journalières mensuelles)

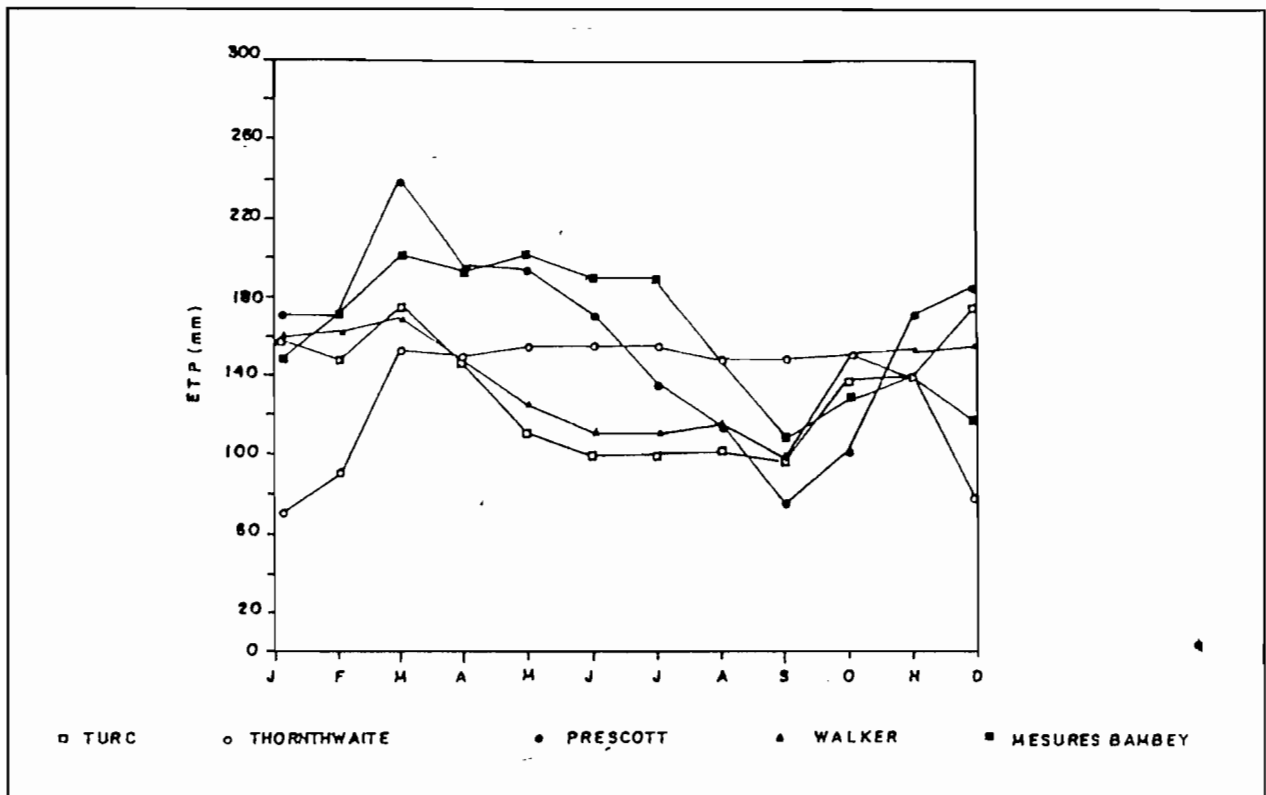


FIG. b-9: Comparaison entre évaporation calculée par différentes méthodes et évaporation mesurée au C.N.R.A. de Bambey. (données tirées de Schoch P.G., 1965); in Gaye, 1990



Gaye (1990) notait déjà: "les données sur l'évapotranspiration sont entachées d'erreurs plus grandes encore car intégrant en outre les erreurs dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP), dans une évaluation dans laquelle on dispose très rarement des mesures directes."

Tout de même, au Sénégal, la méthode la plus couramment employée reste celle de Turc.

Formule de TURC pour l'ETP:

$$\text{ETP (mm)/ mois} = 0,4 * \frac{T}{T + 15} * (Rg + 50) * \left(1 + \frac{50 - Hr}{70}\right)$$

0,4 = facteur issu de la forme  $k = 0,013 * n$ ; n étant le nombre de jour de la période égal ici à un mois ( $0,013 * 30 = 0,39$ )

T = la température moyenne mesurée sous abri au cours de cette période

Hr = humidité relative

Rg = la radiation solaire globale, que l'on sait évaluer à partir de la durée d'insolation h: soit  $Rg = Iga (0,18 + 0,62 h/H)$  avec:

h = durée réelle d'insolation

H = durée maximale d'insolation possible

Iga = radiation directe en l'absence d'atmosphère

Contrairement à l'évaporation, en période sèche on observe plutôt un décalage entre les valeurs évapotranspiratoires de Bakel et Matam de celles de Podor. Cette distinction disparaît pendant la période des pluies.

### 2 - 3 . HUMIDITE RELATIVE

Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative (fig. b-10 ) ne montrent pas une grande différence entre les trois stations. D'une manière générale voisines de 30% de novembre à avril elles augmentent ensuite pour atteindre un maximum de 60 à 70% en août-septembre au coeur de la saison pluviale.

L'humidité évolue de façon identique au cycle hydrologique annuel.

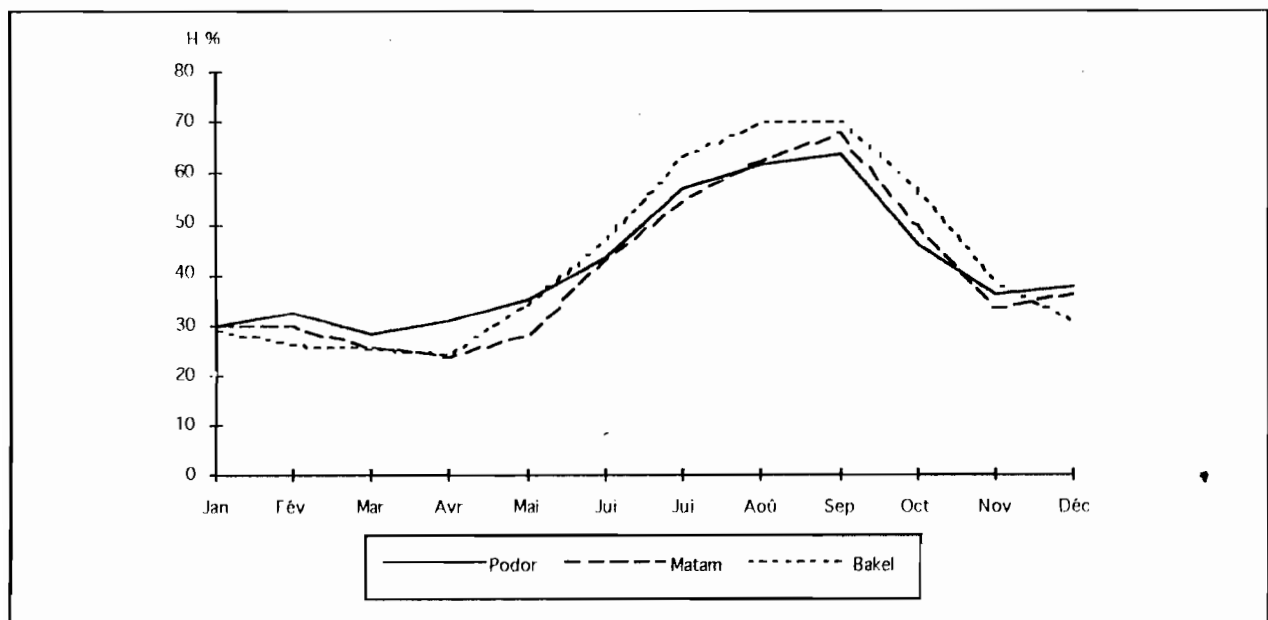


FIG. b-10: Humidité relative: moyenne journalière mensuelle.

## 2 - 4. TEMPERATURES

Les moyennes arithmétiques des températures maxima et minima mensuelles sont représentées (fig. b-11).

Les amplitudes de variation des températures au cours de l'année permettent de distinguer deux saisons, une saison fraîche de novembre à mars et une saison chaude d'avril à octobre. Tout de même pendant la saison chaude on observe une période d'adoucissement des températures, allant de juillet à octobre liée à la tombée des pluies.

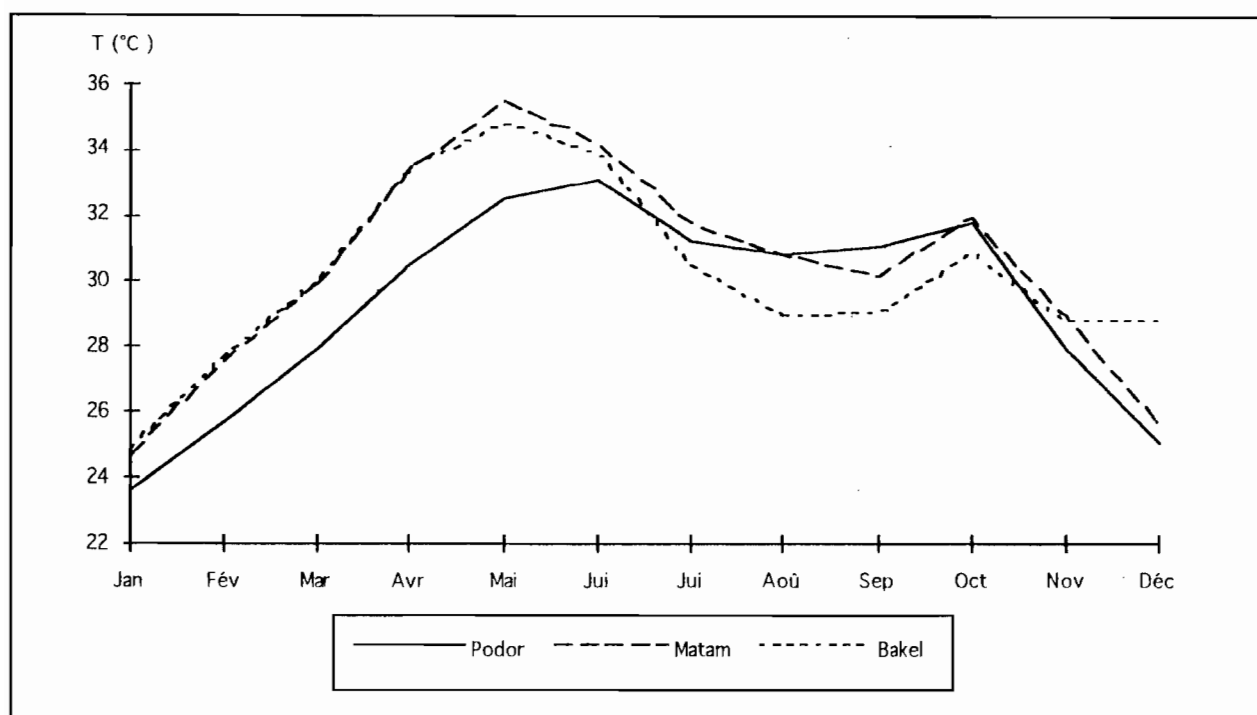


FIG. b-11: Température moyenne journalière mensuelle (1986 à 1992).

## 2 - 5. LES VENTS (fig. b-12)

La vitesse moyenne mensuelle des vents aux trois stations montre deux périodes de vents dominants:

- une pendant la saison sèche de novembre à mars au cours de laquelle les vents dominants sont ceux des alizés du nord issues des anticyclones des Açores ou de ses dorsales maghrébine ou saharienne,
- l'autre pendant la saison des pluies, de mai à octobre, c'est le vent de mousson qui souffle sur l'ensemble du bassin sénégalais. Il s'agit d'un vent d'ouest avec quelque nuance devenant NW dans le domaine côtier nord.

## 2 - 6. INSOLATION (fig. b-13)

La durée moyenne de l'insolation au Sénégal dépasse 3000 heures par an (D.A.T. , 1984; *in* GAYE, 1990), dans la moyenne vallée cette valeur dépasse 5000 heures par an.

Ceci classe d'emblée la moyenne vallée parmi les zones les plus chaudes du Sénégal. On note l'influence adoucissante des valeurs consécutive à l'hivernage. Les teneurs augmentent de l'Ouest vers l'Est c'est-à-dire du domaine océanique vers le continent.

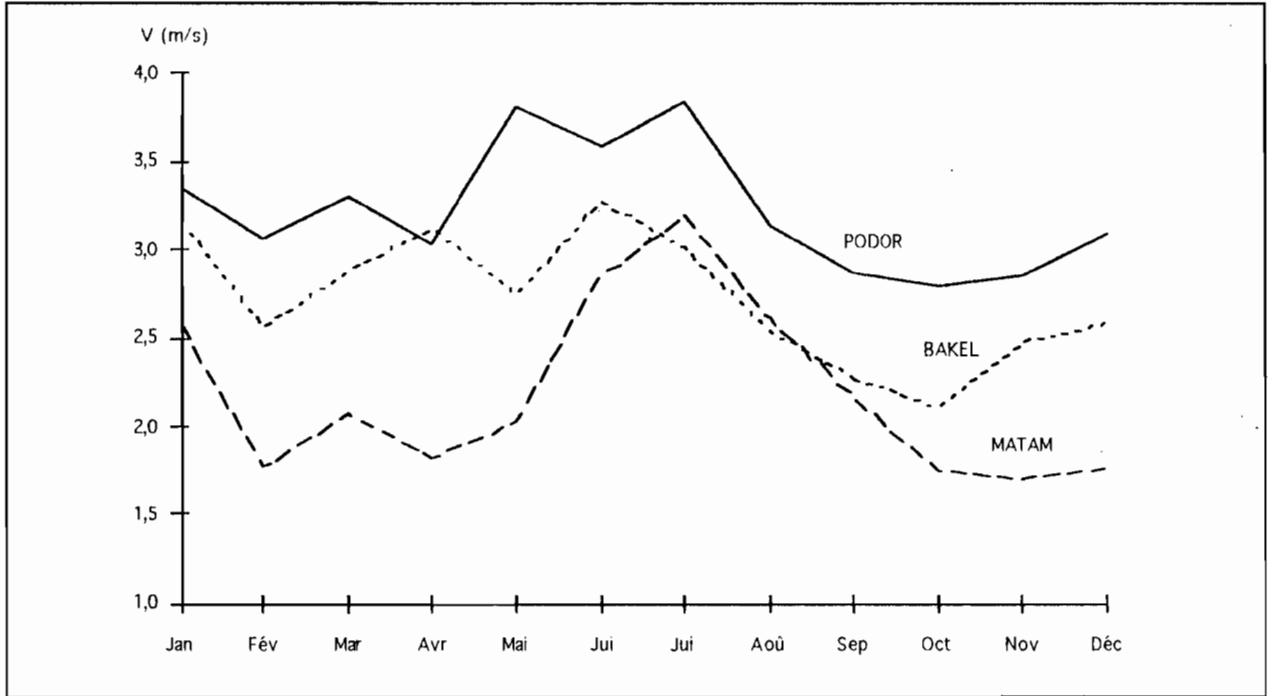


FIG. b-12: Le vent: vitesse moyenne mensuelle (1986 à 1992)

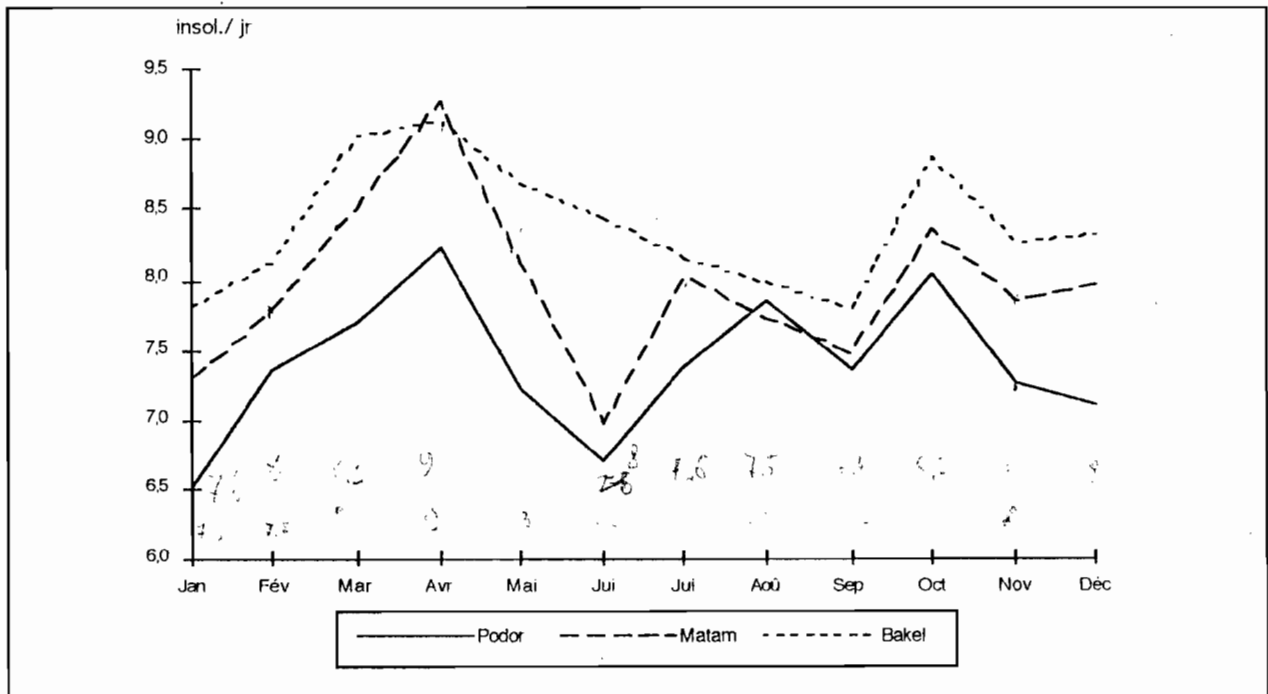


FIG. b-13: Insolation: moyenne journalière (1986 à 1992)

# C

## SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE

## 1. ETUDES ANTERIEURES

Les études antérieures entreprises par différents auteurs dans La vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Podor, ont permis d'identifier différentes nappes souterraines que nous essayons de passer en revue.

### 1 - 1. LA NAPPE DU MAASTRICHTIEN

La nappe maastrichtienne se trouve dans tout le bassin sénégalais. Selon ARCHAMBAULT (1960) cette nappe est, par endroit, captive sous les formations de l'Eocène.

#### - Alimentation de la nappe maastrichtienne

La carte (fig. c-1) montre deux zones (orientale et occidentale du bassin) d'affleurement ou de subaffleurement du toit du Maastrichtien, que ARCHAMBAULT, (1960) qualifie de zones préférentielles d'alimentation de la nappe maastrichtienne.

Cette nappe a été identifiée par sondages: sur la rive droite dans la région d'Aleg, Boghé et Kaédi au long de la vallée et sur la rive gauche entre Ourossogui et Thilogne (fig. c-2), où les courbes isopièzes dessinent une zone d'alimentation de la nappe semblant se faire à partir du fleuve. La deuxième zone, correspond au horst de Ndiass et ses alentours, là où le Campano-maastrichtien affleure .

### 1 - 2. LA NAPPE EOCENE

L'Eocène est représenté sur tout le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, exceptée la zone d'affleurement ou de subaffleurement du Maastrichtien où il a été érodé (fig. c-3).

DEGALLIER, (1962) notait que entre Podor et Matam, les puits près du fleuve ont capté la nappe avant de pénétrer dans les terrains éocènes, ce qui suggère une continuité hydraulique entre les formations de l'aquifère profond et celui de ces formations post-éocènes.

En Mauritanie la nappe du Brakna, a été identifiée par Elouard, (1959) et Michel, (1969) (fig. c-4) comme la plus orientale, dans le faciès littoral du Lutétien. Les puits atteignent ce niveau dans la zone d'affleurement des grès Gorgol et sous le mince recouvrement du Continental terminal. Cette nappe forme une bande parallèle à la limite du bassin sédimentaire, dont elle est séparée par un "biseau sec", large de 20 à 30 km. Ce biseau sec s'explique par la remontée des formations imperméables du Paléozoïque, qui se trouvent être au-dessus du niveau statique, bien avant d'affleurer.

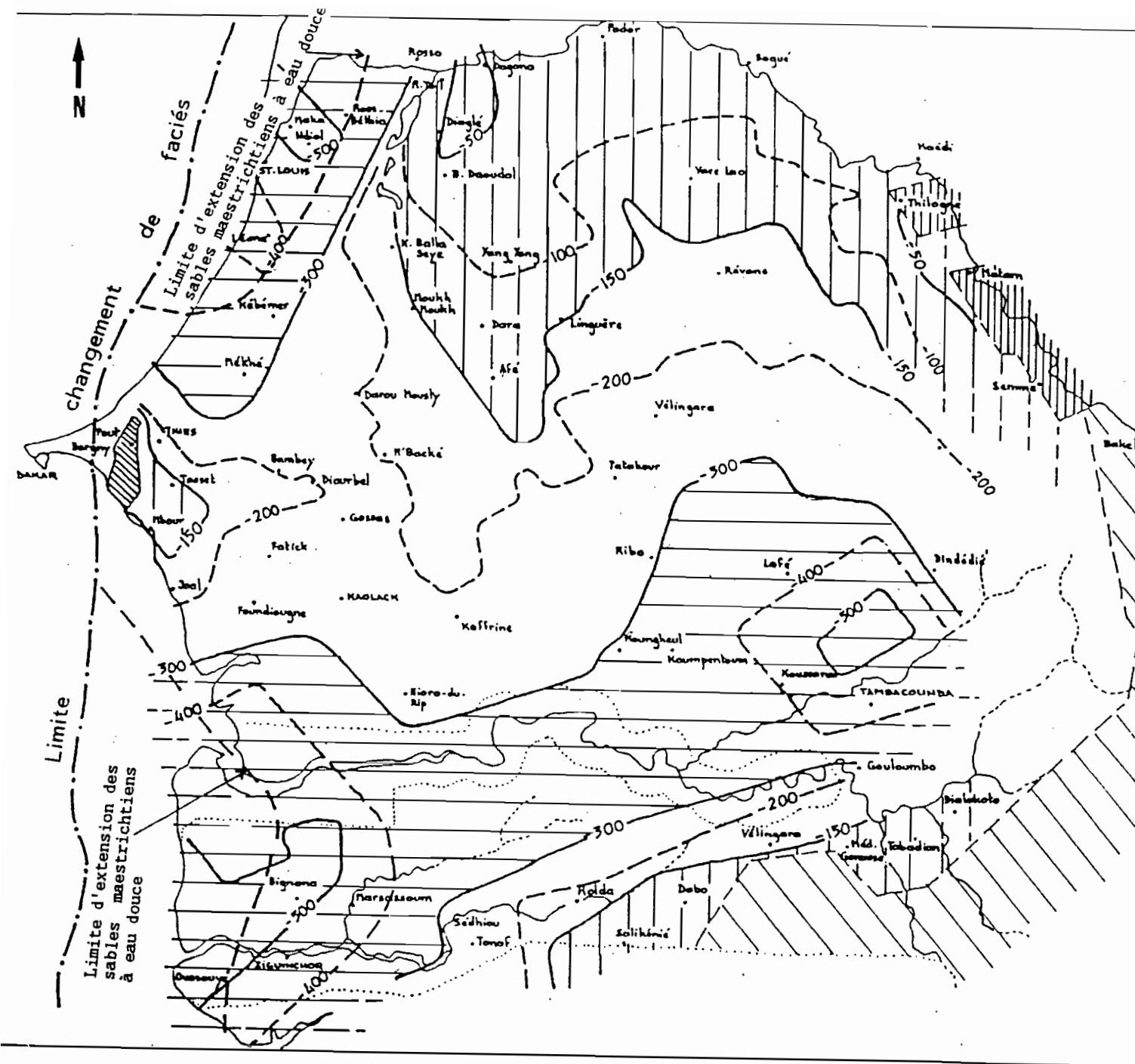
#### - Alimentation de la nappe éocène

##### Alimentation par les eaux de pluies

Les couches sédimentaires plus ou moins perméables des formations éocènes contiennent d'importantes nappes phréatiques.

Les conditions d'alimentation de ces nappes par infiltration directe des eaux de pluies ne semblent pas évidentes dans les régions septentrionales.

ARCHAMBAULT, (1960) a montré l'importance du seuil des 400 mm de pluies annuelles, appelé «Seuil d'Hubert» (fig. b-7), en dessous duquel l'alimentation directe par les pluies est impossible, puisque toute l'eau s'évapore.



LEGENDE

- 100 Courbe isohypse du toit des sables campano-maastrichtiens
- Sables campano-maastrichtiens affleurants ou subaffleurants (Horst de N'diass et bordure du fleuve)
- Zone haute du toit du Campano-maastrichtien
- Zone basse du toit du Campano-maastrichtien
- Socle paléozoïque

0 10 100 Km

FIG. c-1: CARTE DU TOIT DU CAMPANO-MAASTRICHIEN (d'après Le Priol et Dieng; 1985)

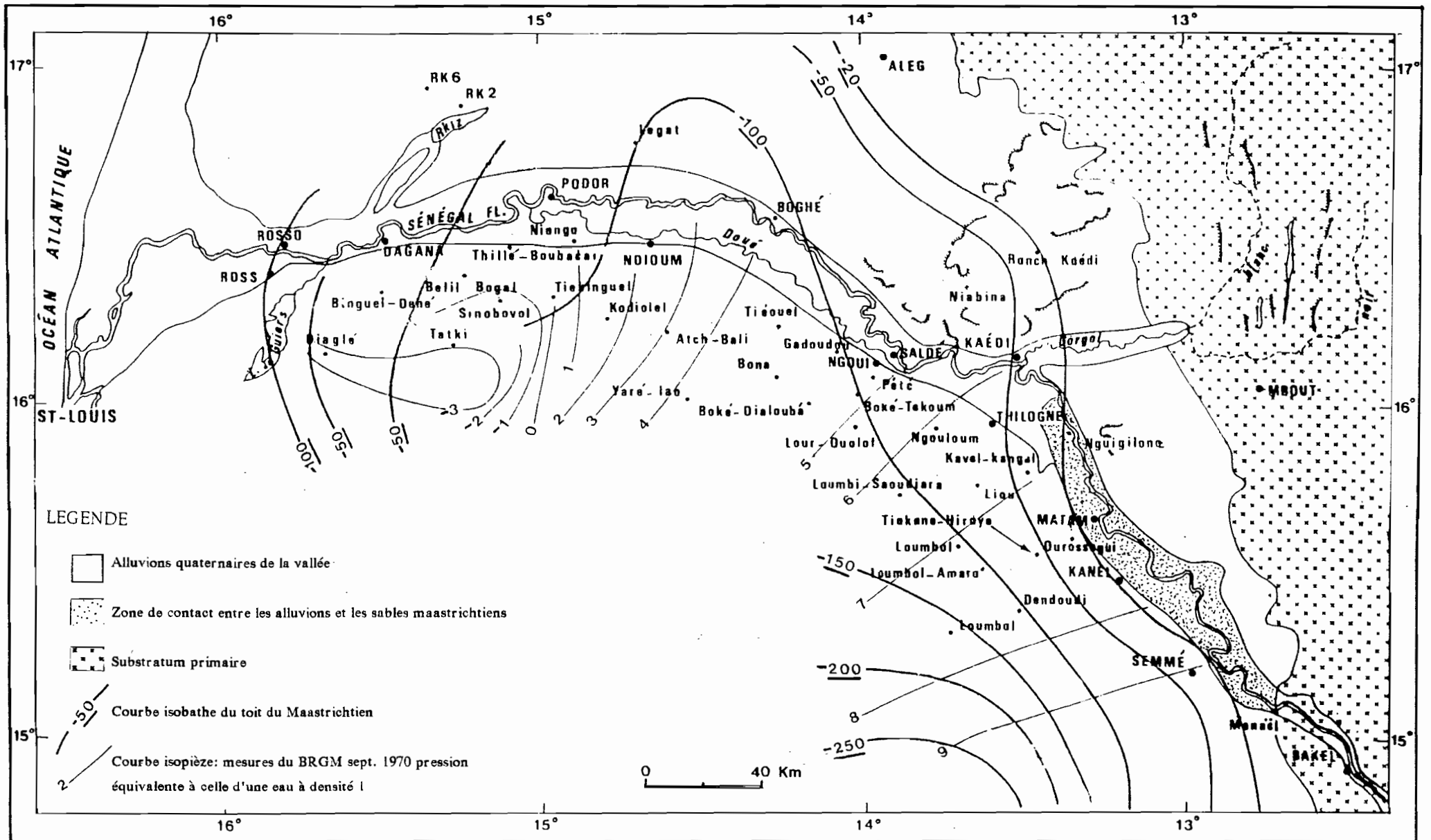
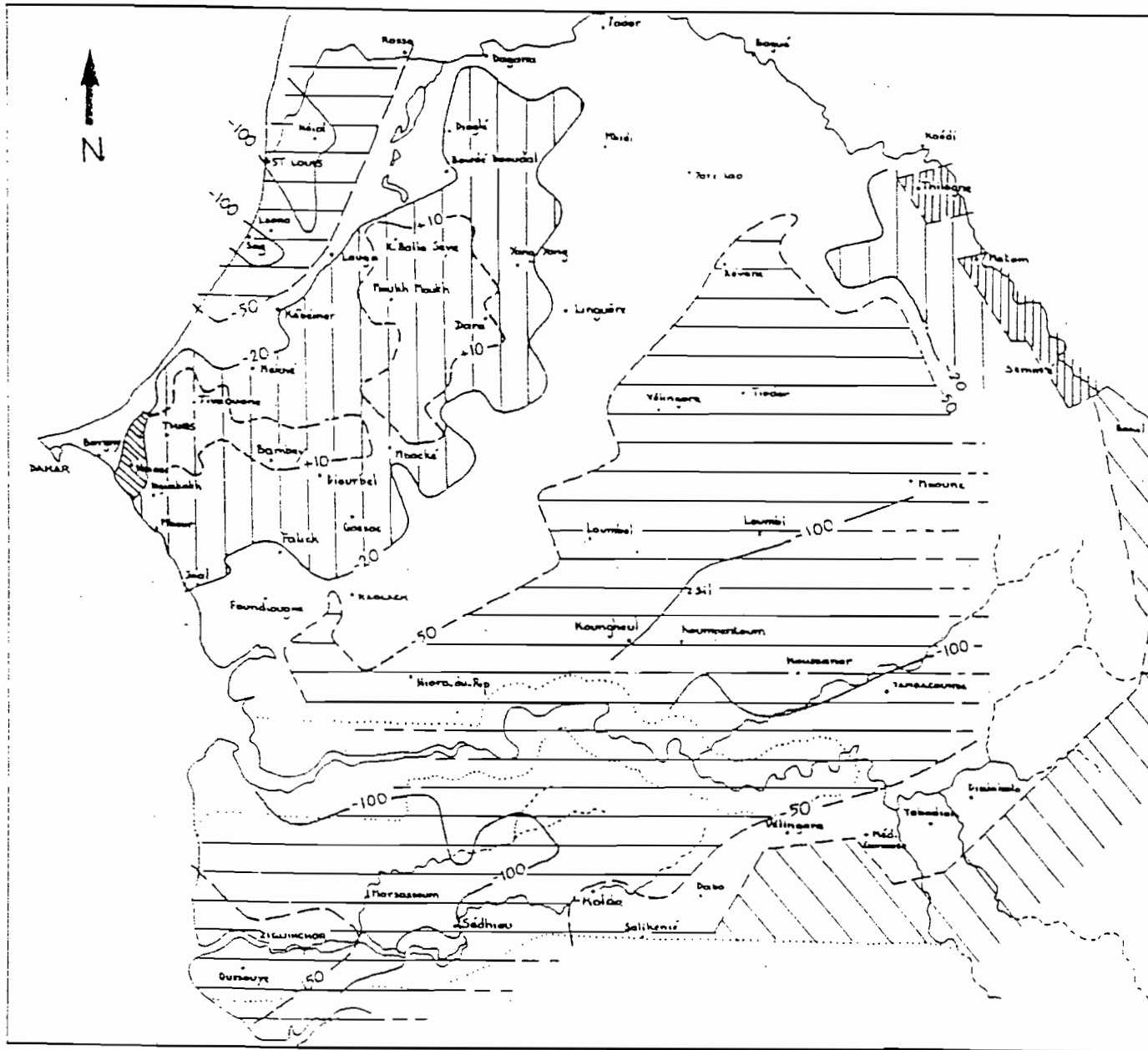



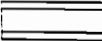
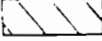


FIG. c-2: CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA NAPPE MAASTRICHTIENNE  
 ( d'après Illy,1973; modifié Diagana, 1994)



### LEGENDE

-  + 10 Courbe isohypse du toit des marno-calcaires
-  Lacunes de marno-calcaires (Horst de N'diass et bordure du fleuve)
-  Zone haute du toit des marno-calcaires (épaisseur du C.T. réduite ou nulle)
-  Zone basse déprimée du toit des marno-calcaires (limite d'extension des dépôts marins néogènes)
-  Socle paléozoïque

0 10 100 Km

FIG. c-3: Carte du toit des marno-calcaires éocènes (mur supposé de la nappe du Continental Terminal)  
(d'après Le Priol et Dieng; 1985)



### Alimentation par les eaux du fleuve

La nappe du Ferlo semble être alimentée uniquement sur ses bordures par les crues du fleuve, ici également l'alimentation par les eaux de pluies, en raison des conditions climatiques défavorables et la grande profondeur de la nappe, n'est guère possible (fig. c-5).

La nappe phréatique du Guebla mauritanien se rencontre successivement d'Est en Ouest dans les sables à bonne perméabilité de l'Eocène à faciès littoral (nappe du Brakna), dans l'Eocène argilo-calcaire marin, peu perméable (nappe de l'Amechtil) et dans les sables à bonne perméabilité du Quaternaire et du Continental terminal (nappe du Trarza).

### Alimentation par la nappe Maastrichtienne

Toutes les cartes piézométriques de la nappe maastrichtienne montrent un gradient hydraulique décroissant dans le sens Sud-Est, Nord-Ouest (ILLY, 1973) (fig. 28).

La nappe étant captive, le principe de la conservation des débits veut que l'alimentation au Sud-Est soit compensée par un exutoire (zone de meilleure Transmissivité).

AUDIBERT, (1970) et ELOUARD, (1959) émettent des doutes sur l'existence sinon l'importance que l'on accorde à ce transfert de courant d'amont vers l'aval. Ils envisagent plutôt qu'il y ait une déperdition de la nappe par son toit dans les calcaires du Tertiaire sur l'ensemble de la nappe. Ce qui nécessite alors une certaine perméabilité de ces formations calcaires qui, même très faible, serait suffisante sur des surfaces aussi importantes pour laisser passer des quantités d'eau importantes.

Selon DEBUISSON (1966/1968) à Thillé Boubacar, Semmé et Kanel, il n'a pas été possible de poursuivre le fonçage des contre-puits jusqu'à la profondeur de 5m sous le niveau piézométrique de la nappe profonde captée par les forages et d'effectuer un raccordement sur le tube de forage, en raison de l'importance des venues d'eau rencontrées.

A Kanel comme à Semmé, les contre-puits et les forages captent la même nappe. Seuls des sédiments essentiellement sableux et détritiques ont été rencontrés sur toute la hauteur des forages, sans la présence d'horizon véritablement étanche. Là, également, nous sommes en présence d'un aquifère multicouche des formations alluviales et profondes.

## 1 - 3 . LA NAPPE DU CONTINENTAL-TERMINAL

### Rive Droite

Elle est appelée "nappe du Trarza". C'est la nappe la plus importante et la plus régulière de toute la Mauritanie Elouard, (1962) (fig. c-4).

La continuité de la nappe est liée à la perméabilité générale des formations du Continental Terminal, constituées, comme au Sénégal, de sables, de grès bigarrés tendres ou argileux avec intercalation lenticulaire d'argiles bariolées.

La puissance du Continental Terminal s'accroît dans la zone de subsidence littorale, 30m au sondage Aleg, 37 m au sondage Legat. Il recouvre la quasi-totalité du bassin sédimentaire mauritanien à l'exception de son angle Sud-Est sous les formations du Quaternaire avec lesquelles il est en communication hydraulique.

### Rive Gauche

Dans la région de Podor les puits ont recoupé une couche aquifère de 45 m, formée d'un amas conglomératique d'argiles lie-de-vin et de sables ocres à dents de poissons et autres fossiles (origine marine du Continental Terminal).

A Pété-Olé, entre 51 et 52m, se trouvent des grès rouge-sombre, entre Matam et Podor au-dessus des argiles jaunes à ossements phosphatés ou à grès ocres ferrugineux.

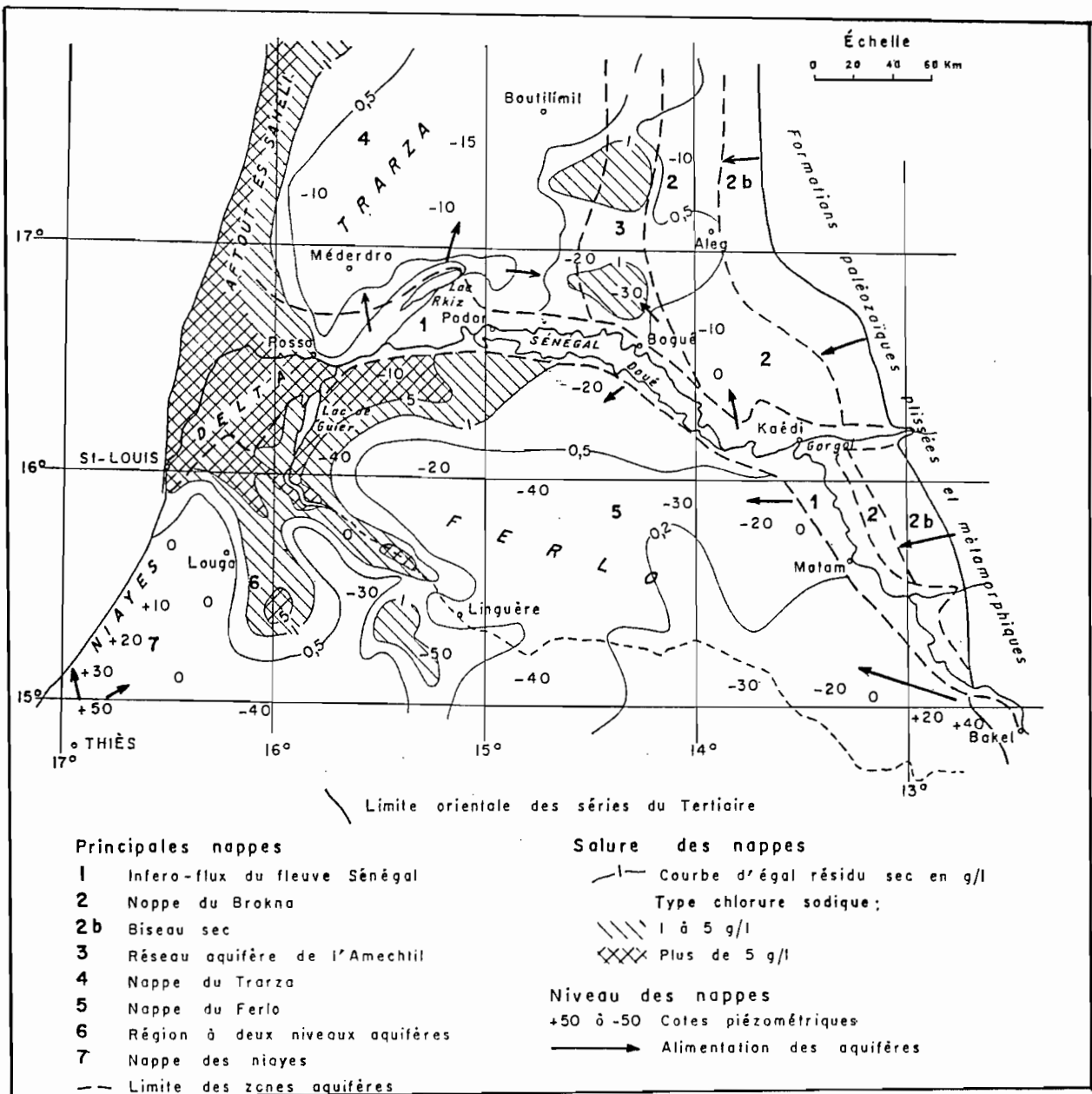


FIG. c-4: LES NAPPES PHREATIQUES DU SUD-OUEST DE LA MAURITANIE ET DU SENEGAL SEPTENTRIONAL d'après Elouard (1959), Paloc (1962), Depagne et Moussu (1967).

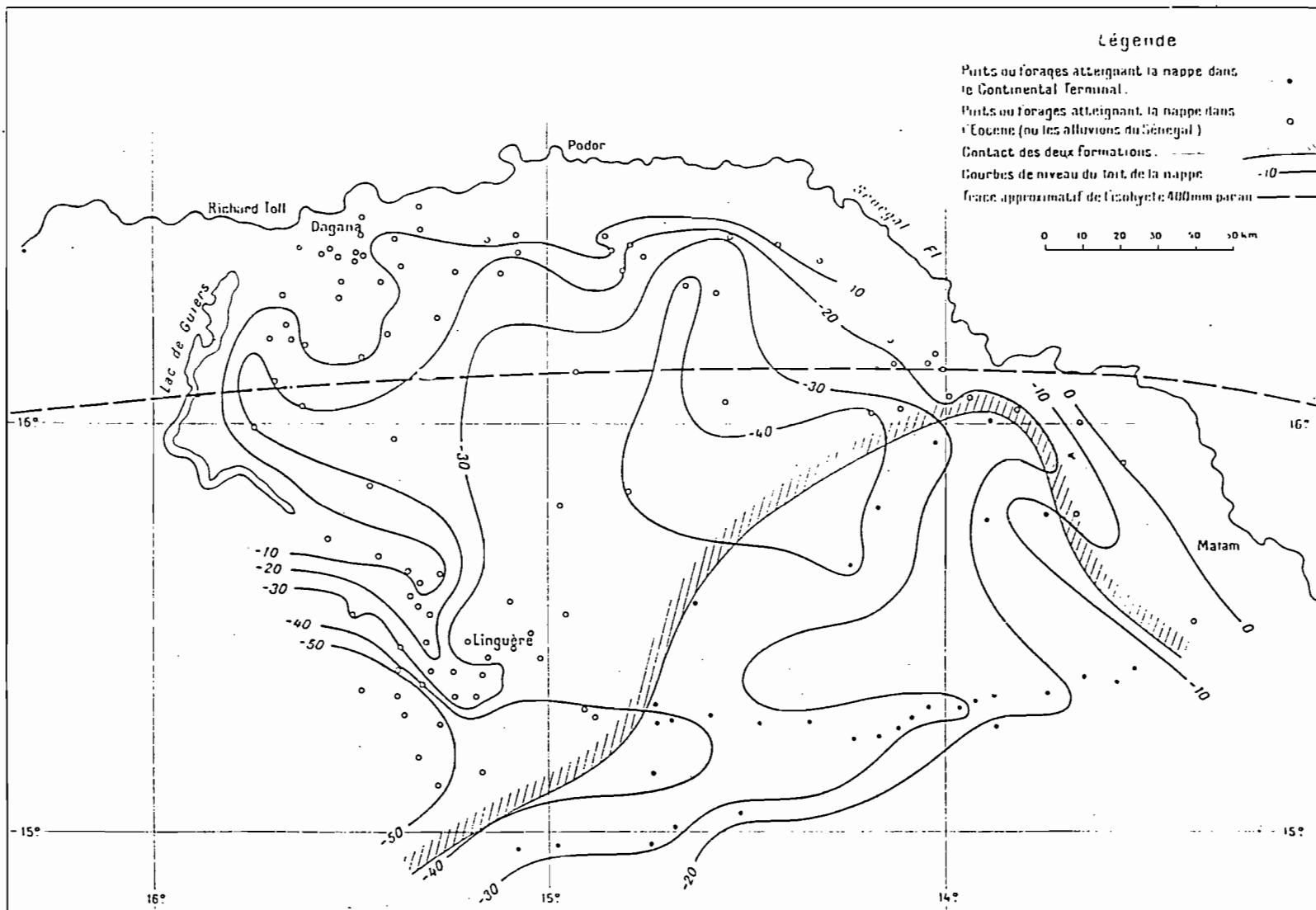


FIG. c-5: NAPPE PHREATIQUE DU CENTRE DU SENEGAL ( d'après Dégallier, 1954)

## Alimentation des nappes du Continental Terminal

Le niveau de la nappe du Continental terminal en Mauritanie (nappe du Trarza) augmente progressivement de la mer vers l'intérieur où il dépasse 70 m en certains points. C'est une nappe en creux, malgré l'avancement du biseau salé et de l'apport d'eau douce à partir de la nappe alluviale qui s'avère insuffisant pour compenser les pertes par évaporation de volume considérable de cette nappe. Ce qui fait admettre avec beaucoup de vraisemblance que cette nappe s'est, pour l'essentiel, constituée à l'époque préhistorique lors de la dernière période pluvieuse du Quaternaire.

En rive gauche du fleuve la nappe du Ferlo, dans les formations du Continental Terminal, se présente plus en creux que celle du Trarza. Sa surface piézométrique dessine une vaste cuvette, avec des bords relevés le long de la vallée du fleuve, atteignant +40 m vers le Sud-Est, près de Bakel, et avoisinant la côte (0 m) au Nord. Le niveau descend à (-40 m) entre le fleuve et la vallée du Bounoum et même à -50 m au Sud-Ouest de Linguère.

L'alimentation de cette nappe semble se faire uniquement sur ses bordures par les crues du fleuve. Un apport direct des eaux de pluies par la surface n'est guère possible, à cause de la grande profondeur de la nappe et des conditions climatiques défavorables.

### 1 - 4. LA NAPPE ALLUVIALE : QUATERNAIRE (fig. c-6)

Les formations quaternaires recèlent une nappe alluviale qui correspond au lit majeur du fleuve. L'écoulement de la nappe s'inverse entre la crue et l'étiage du cours d'eau. Cette nappe est en rapport avec les nappes sous-jacentes en raison de la variabilité des formations et de leur disposition lenticulaire. L'importance de cette nappe est fonction de l'épaisseur et de l'étendue de ces formations.

Les études piézométriques ont montré que les nappes alluviales sont alternativement alimentées et drainées par le fleuve.

Les études hydrologiques de l'ORSTOM, (1968), ont montré que le coefficient de tarissement du fleuve n'augmente pas vers l'aval, mais garde la même valeur (0,185) depuis Kayes (au Mali) jusqu'au seuil de Diouldé-Diobé, entre Kaédi et Boghé. Cette constance montre que les pertes par évaporation sont compensées par les apports de la nappe phréatique.

Selon ELOUARD, (1959) "cette nappe alluviale reste suspendue pendant toute la période de tarissement".

HERVY, (1918) avait déjà pu observer, grâce à une série de sondages dans les dépôts meubles de la vallée, que le niveau de la nappe est plus élevé que celui du fleuve pendant les basses eaux, et noté: "ce phénomène est d'ailleurs apparent en plusieurs endroits des berges, où se produisent des suintements ou des ruissellements".

### 1 - 5. RELATIONS INTER-NAPPES

L'étude lithologique des formations aquifères de la Moyenne Vallée, associée à leur étude hydrogéologique, nous révèlent presque toujours l'existence d'une communication entre les différents étages.

Ainsi, la distinction entre nappe phréatique (alluviale) et nappe profonde ne peut être que locale. Les eaux souterraines des alluvions constituent un système hydraulique unique du fait de la disposition lenticulaire des couches.

Les formations aquifères les plus perméables sont les sables moyens ou grossiers de la partie inférieure du remplissage alluvial.

Les formations éocènes dans la moyenne vallée sont en majeure partie sableuses.

L'imperméabilité des calcaires du Tertiaire serait locale mais pris à grande échelle, ces calcaires admettraient une perméabilité suffisante pour laisser, des quantités d'eau, passer du Maastrichtien vers les formations supérieures, ce qui montre une continuité hydraulique jusque-là ignorée.

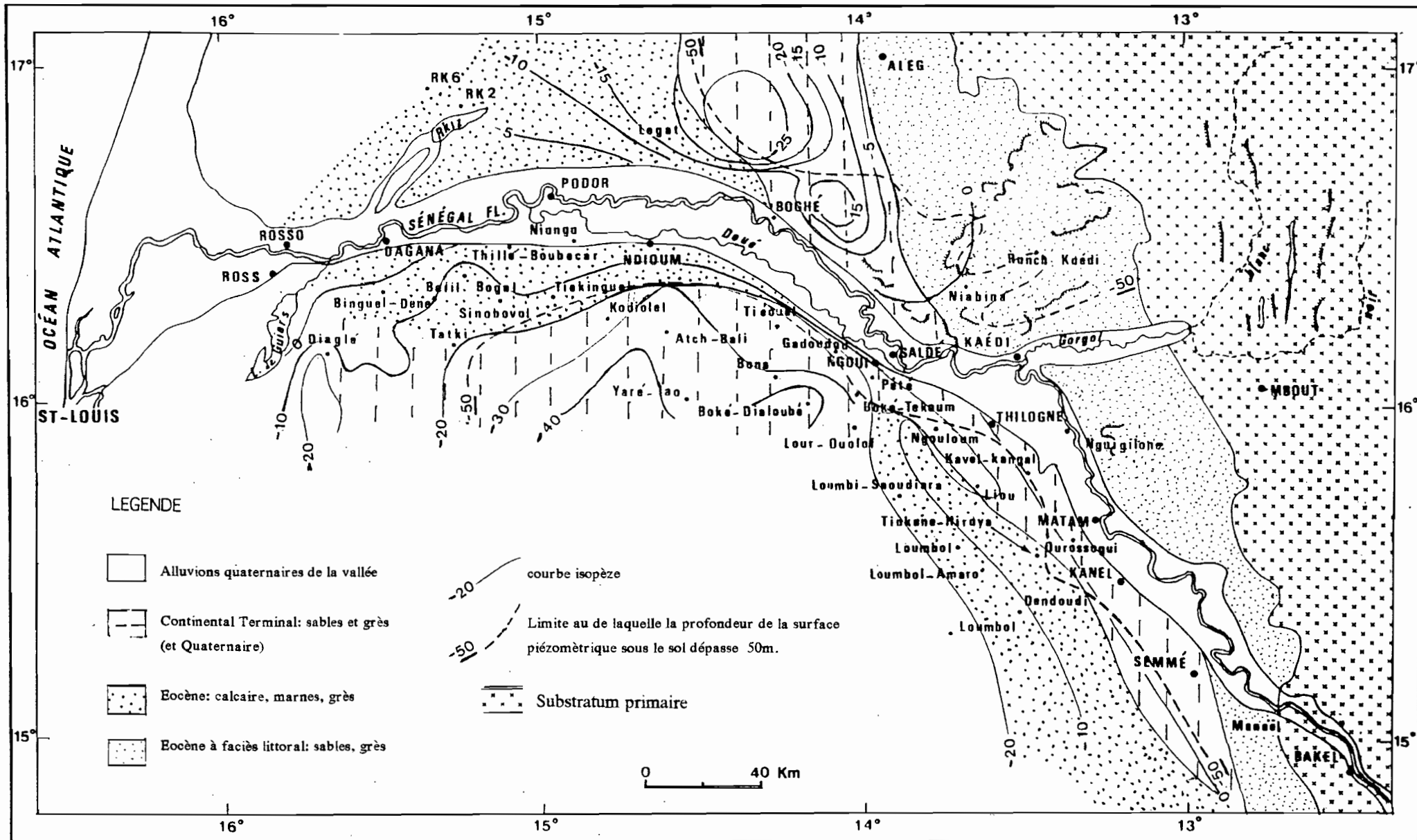


FIG. c-6: CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DES NAPPES PHREATIQUES (d'après Illy, 1973; modifié par Diagana, 1994)

Les mesures piézométriques effectuées de Juillet 1961 à Mai 1963 dans le Sud-Ouest mauritanien DEPAGNE, (1963), ont conduit aux conclusions suivantes :

"Dans la zone du fleuve, la nappe phréatique est alimentée à partir de celui-ci. Les profils des nappes montrent une pente décroissante à partir du fleuve.

Il reste à savoir si cette alimentation n'est pas restreinte à une certaine zone, d'une dizaine de kilomètre de largeur, au-delà de laquelle l'influence de fleuve ne se ferait plus sentir. Par ailleurs, d'amont en aval, cette alimentation semble décroître".

Selon GOUZES, (1968) : Entre Ourossogui et Thilogne les courbes isopièzes dessinent une zone d'alimentation de la nappe profonde semblant se faire directement à partir du fleuve Sénégal.

Par ailleurs, dans la région en bordure du bassin sédimentaire (Kaédi-Semmé), le Sénégal et son affluent de rive droite, le Gorgol (fig. a-8) ont profondément entaillé leur lit et la communication entre nappe profonde et l'inféroflux est parfaitement plausible.

Selon AUDIBERT, (1970) : L'alimentation des nappes est théoriquement possible dans la période correspondant à la crue (en juillet, Août et Septembre) par les pluies, et en Octobre-Novembre par l'eau d'inondation du fleuve qui envahit les terres de la vallée et par absence de niveau de base à ce moment, nul écoulement ne peut se faire. C'est seulement à la décrue, très rapide (un mois) que les circulations horizontales souterraines sont possibles. Les eaux infiltrées sont reprises par évapotranspiration intense en Décembre-Janvier, donc défavorables aux écoulements horizontaux sous faible gradient.

Selon ILLY, (1973): L'étude piézométrique montre que les nappes alluviales sont: alternativement alimentées et drainées par le fleuve et drainées par les terrains encaissants en bordure de la vallée et se perdent par évaporation et évapotranspiration en dehors de ces zones privilégiées. Les horizons superficiels sont, en général en charge, légèrement supérieurs aux horizons profonds.

Par la comparaison de l'évolution piézométrique des nappes avec celle des cours d'eau DIAGANA, (1990). Il est ressorti que l'alimentation des nappes de la Basse Vallée dépend essentiellement des cours d'eau superficiels. En effet la mise en eau du barrage de Diama en décembre 1988 a entraîné une remontée de niveau des nappes alluviales. Cette mise en eau n'avait pas entraîné un débordement du fleuve de son lit mineur. Par conséquent l'alimentation de la nappe s'est, alors, effectuée à travers la berge.

#### 1-6. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES

Les paramètres hydrodynamiques ont été déterminés pour les nappes dans la vallée et ses alentours par différentes méthodes: pompages d'essai de courte durée, essais de débit, granulométrie, essai de perméabilité et par application de formules empiriques sur la variation naturelle des niveaux d'eau Illy, (1973). Nous présentons ici les résultats de pompage d'essai dans la nappe alluviale qui serviront d'élément de comparaison. Ces tests sont de courte durée (8h) par rapport celles entreprises par l'OMVS (48h). L'aquifère des alluvions quaternaires a ainsi été testé par pompage d'essai de courte durée (tabl. c-1)

TABL. c-1: Résultats des pompages d'essai dans les alluvions quaternaires(ILLY, 1973)

Localité	N° Forage	Prof. (m)	T ( $m^2s^{-1}$ )	S (%)	K (m.s-1)
Kanel	F1	22	0.08 10 <sup>-3</sup>	2.7 10 <sup>-3</sup>	3 10 <sup>-5</sup>
Matam	F5	27	7.2 10 <sup>-3</sup>	6 10 <sup>-4</sup>	39 10 <sup>-5</sup>
Boghé	F9bis	12	7 10 <sup>-4</sup>	1.3 10 <sup>-3</sup>	9 10 <sup>-5</sup>
Nianga	F 10	32	4 10 <sup>-4</sup>		4 10 <sup>-5</sup>
	F 10	42	9 10 <sup>-3</sup>		9,5 10 <sup>-4</sup>
Nianga	F 12	22	7 10 <sup>-5</sup>		1,0 10 <sup>-5</sup>
	F 12	35	7 10 <sup>-5</sup>		> 3,7 10 <sup>-4</sup>

## 2. PRESENTE ETUDE

### 2 - 1 . DELIMITATION DES DIFFERENTS AQUIFERES

L'étude géologique, des différentes coupes de sondages que nous avons réalisées nous a permis de distinguer différentes formations géologiques (selon leur âge) du Maastrichtien de l'Eocène et du Quaternaire. Ces formations étant, nous allons tenter dans ce paragraphe de les identifier.

#### 2 - 1 - 1 . L'aquifère du Maastrichtien

La limite inférieure du Maastrichtien est mal connue à l'intérieur du bassin. En bordure du bassin (fig. a-6) le substratum, aux sondages Sémmé et Tianaff, est respectivement à 170 et 80m du sol.

La limite supérieure est très irrégulière, elle présente des dômes et des creux. Elle se situe, successivement par rapport au sol, du NW au SE: 100m à Pété, 10m à Goudoudé, 50m à Sédo-Sébé et 10m à Kanel (fig. a-6).

Les limites latérales sont celles du bassin, elles correspondent à des ruptures en escaliers et non en biseau. Elle montre deux dômes du Maastrichtien: l'un entre Agnam-Sivol et Kavel Kangal, et l'autre entre Kanel et Doundé-Kassem.

Ces deux dômes correspondent à celles décrites en géologie locale dans les zones A et C. Sa lithologie correspond à du sable fin à grossier .

#### 2 - 1 - 2 . L'aquifère de l'Eocène

Dans la moyenne vallée la formation de l'Eocène n'est pas continue. Elle est absente au niveau des dômes du Maastrichtien.

Par ailleurs, à Kavel (an-10) la limite inférieure se situe à 60m du sol, et la supérieure à 10m. A Pété (an-12) ces limites sont respectivement à 100 et 20m du sol. Par son absence sur les dômes, l'Eocène se présente sous forme d'aquifère multicouche discontinu à dominance calcaire, calcaire-sableux ou calcaire-marneux.

#### 2 - 1 - 3 . Les formations du Quaternaire

Il s'agit des formations alluvionnaires déposées par le fleuve ou par ses affluents notamment le Gorgol.

Les formations du Quaternaire reposent généralement sur celles de l'Eocène. Par contre au niveau des dômes, là où l'Eocène est absent, elles reposent directement sur le Maastrichtien.

L'épaisseur des formations diminue des bordures vers l'intérieur de la vallée. Elle est en moyenne de 15m en bordure et de 35m à l'intérieur. L'épaisseur maximale ne correspond pas toujours au droit du fleuve.

La lithologie présente des formations supérieures argileuses à argilo-sableuses et des formations inférieures sablo-argileuses à sableuses.

### 2 - 2 . RAPPEL SUR LES POMPAGES D'ESSAI

L'analogie entre la propagation de la chaleur dans un milieu continu et isotrope, et celle des frottements dans un fluide homogène et isotrope a été montré par BOUSSINESQ *in* Rouquet, (1988) . Dans les deux cas, il s'agit d'un phénomène de diffusivité, soit thermique, soit visqueuse.

THEIS compare l'écoulement des eaux souterraines à la propagation de la chaleur et en applique les lois de l'hydrodynamique.

C'est la méthode d'analogie thermique, en régime transitoire. Les méthodes graphiques d'interprétation des pompages d'essai sont basées sur la comparaison de relevés expérimentaux avec une expression analytique, solution particulière d'une équation différentielle, et par conséquent, valable pour les hypothèses physiques qui ont déterminé la forme de l'équation différentielle; et les conditions particulières qui ont déterminé la forme de la solution.

#### Justification du choix des méthodes d'interprétation

Deux types d'aquifères ont été rencontrés dans la moyenne vallée.

Un modèle d'aquifère multicouche: à plusieurs formations de sables (sables grossiers, sables moyens, sables fins, sables argileux) ou de limons. Ce type d'aquifère est celui que l'on rencontre dans la zone Manaël-Saldé. On rencontre dans sa zone non saturée des éléments fins; notamment cette formation argileuse gonflante superficielle, qui confère à la nappe le caractère tantôt captif tantôt semi-captif ou même libre en certains endroits selon l'épaisseur et la nature lithologique de ses sédiments.

Un modèle d'aquifère mono ou bicouche: comprenant des formations perméables délimitées entre elles par des formations argileuses imperméables. Ce type d'aquifère est celui que l'on rencontre dans la zone Podor.

Le choix de la méthode d'interprétation est basée sur: son applicabilité, et sa simplicité .

Il existe plusieurs méthodes d'interprétation des pompages d'essai selon les types d'aquifères, la durée du pompage ou selon les paramètres à identifier.

Parmi toutes les méthodes que nous avons expérimentées dans la basse vallée, celles de THEIS et JACOB semblent être plus adaptées. Ces deux méthodes sont complémentaires comme le montre ce qui suit.

Hypothèses et conditions de base pour l'application des méthodes d'interprétation:

- Aquifère à extension latérale apparemment illimitée; "nappe infinie";
- Aquifère homogène, isotrope et d'épaisseur constante dans la zone d'influence du pompage d'essai;
- Surface piézométrique (presque) horizontale avant le début du pompage;
- Débit de pompage constant;
- Puits parfait et complet; l'eau arrive en écoulement horizontal sur toute l'épaisseur de la nappe
- Nappe à substratum horizontal;
- Diamètre du puits faible; l'effet de capacité du puits étant négligeable;
- Fluide incompressible;
- L'écoulement possède la symétrie radiale; le puits est circulaire et équipotentiel à tout instant.

A ces hypothèses peuvent s'ajouter d'autres conditions selon les différents types de modèles de nappes

- La méthode de THEIS

Les conditions particulières d'application:

Dans le cas d'une nappe captive

- L'eau qui provient de l'aquifère est libérée instantanément, sous l'action de baisse de la charge hydraulique



- Le diamètre du puits est faible, c'est à dire le volume d'eau dans le puits est négligeable,

Les conditions que doit satisfaire l'aquifère:

- Aquifère à extension latérale illimitée; (l'influence des limites ne se font pas sentir)
- Aquifère homogène, isotrope et à épaisseur constante
- Surface piézométrique horizontale (ou presque horizontale)
  - Un débit de pompage constant
  - Puits complet

Selon THEIS: l'équation du rabattement en fonction du débit s'écrit

$$s = Q/4\pi T \int_0^u \frac{e^{-u}}{u} du = Q/4\pi T * W(u)$$

avec  $u = r^2 S/4\pi t$  et

s : rabattement dans un piézomètre (m)

Q : débit de pompage ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )

r : distance d'un piézomètre à l'axe du puits d'essai (m)

T : transmissivité ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

S : coefficient d'emmagasinement

t : temps de pompage (s ou mn)

W(u): fonction de THEIS

$$W(u) = -0.577 - \ln(u) + u - (u^2/2*2!) + (u^3/3*3!) - (u^4/4*4!) + \dots$$

Cette fonction a été tabulée pour chaque valeur de (u).

$$s = (Q/4\pi T) * W(u) = (0.08 Q/T) * W(u)$$

$$T = (0.08 Q/s) * W(u)$$

pour  $u' = 1/u$  on peut écrire

$$S = 4Tt/r^2 u'$$

- La méthode semi-logarithmique de JACOB - COOPER

Elle est basée sur la formule de THEIS, dont les conditions d'interprétation sont les mêmes, mais plus une condition supplémentaire qui est que le Temps de pompage soit grand (au moins 48h).

Dans l'équation de rabattement de THEIS pour:

$$u < 0.01; \text{ la partie } [ u - (u^2/2*2!) + (u^3/3*3!) - (u^4/4*4!) \dots ] \neq 0$$

l'équation peut s'écrire

$$s = (Q/4\pi T)[-0.577 - \ln(r^2 S/4t)]$$

$$s = (2.3 Q/4\pi T)\log(2.25 Tt/r^2 S) = (0.183Q/T)\log(2.25Tt/r^2 S)$$

Pour que la condition de JACOB soit satisfaite et que sa méthode soit valable il faut que:

$$(r^2 S/4Tt) < 10^{-2} \quad \text{c'est à dire que} \quad t > 10^2 r^2 S/4T$$

L'équation de rabattement de JACOB s'écrit:

$$s = (0.183Q/T)\log(2.25Tt/r^2 S):$$

c'est celle d'une droite de pente  $A = 0.183Q/T$  que l'on peut écrire:

$$s = A \log Bt \quad \text{c'est la droite de JACOB}$$

L'intersection de la droite de JACOB avec celle de l'axe des temps correspond à un rabattement nul ( $s = 0$ ) et pour un temps égal à  $t_0$ .

Si l'écoulement satisfait les conditions de JACOB on peut écrire:

$$0 = (0.183Q/T)\log(2.25Tt_0/r^2 S) \Rightarrow (2.25Tt_0/r^2 S) = 1$$

$$\text{on peut écrire} \quad S = 2.25Tt_0/r^2$$

On appelle  $i(m)$  la différence de rabattement pour un cycle logarithmique du temps

$$s_1 = A \log Bt_1$$

$$s_2 = A \log Bt_2$$

$$i(m) = s_2 - s_1 = A \log(Bt_1/Bt_2) = A \log(t_1/t_2)$$

$$i(m) = \text{pente} = A = 0.183Q/T \Rightarrow T = 0.183Q/i(m)$$

- La méthode de Remontée (THEIS-JACOB)

Il s'agit de respecter les conditions de THEIS et JACOB. A un temps "t" on arrête le pompage d'essai, alors on obtient une courbe de remontée du niveau de la nappe, et on parlera de courbe de rabattement résiduel. A l'arrêt du pompage au temps "t" on a t' qui est le temps de rabattement résiduel.

L'équation de rabattement résiduel selon JACOB s'écrit:

$$s_r = Q/4\pi T [\ln(4Tt/r^2 S) - \ln(4Tt'/r^2 S_r)]$$

$$s_r = (0.183Q/T)\log t/t' = (0.183Q/T)\log(1+t/t')$$

$s_r$ : rabattement résiduel (m)

$t'$ : temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (s ou mn)

$S$ : coefficient d'emmagasinement durant la remontée

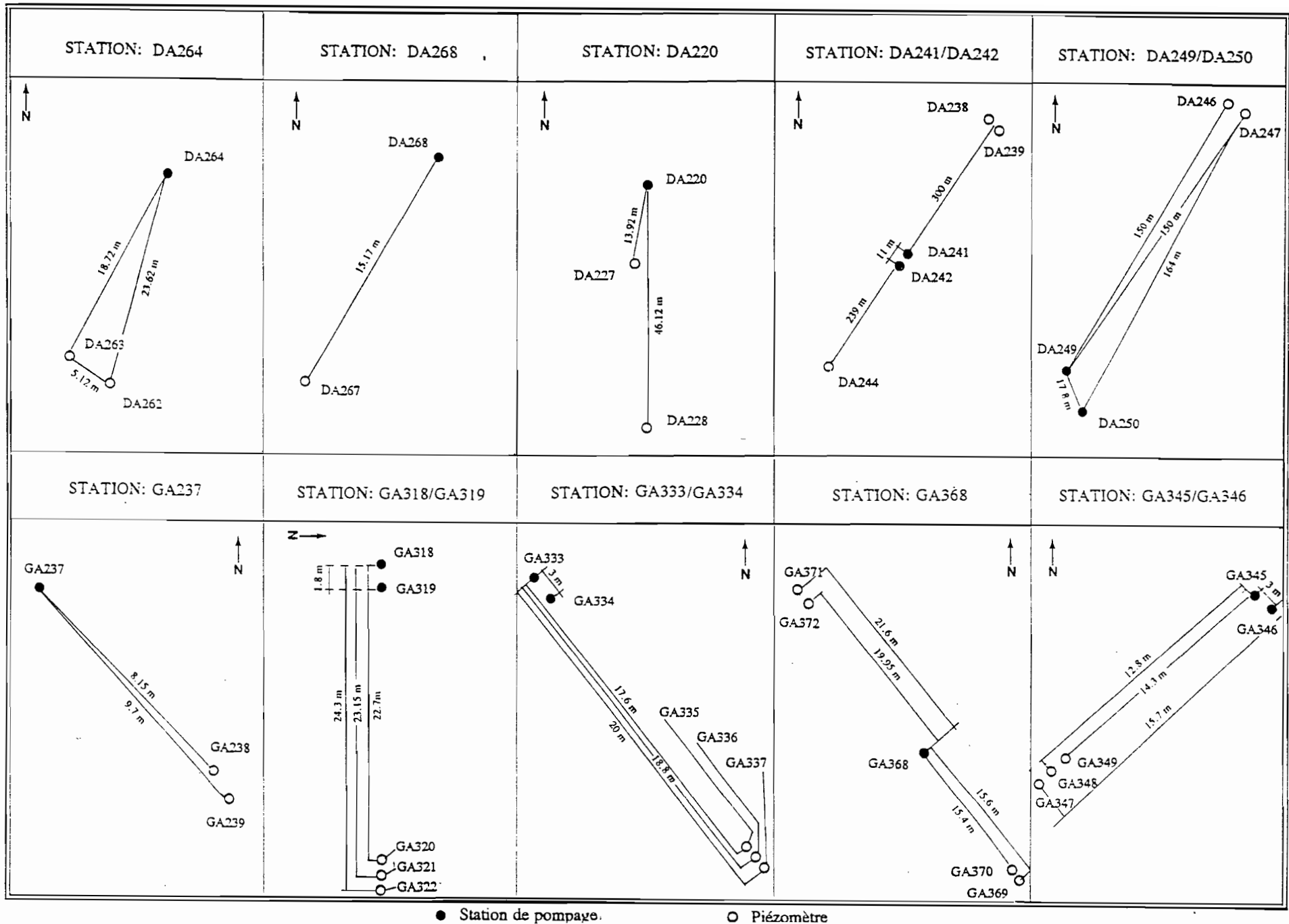


FIG. FIG. c-7 LE DISPOSITIF DES STATIONS DE POMPAGE D'ESSAI DANS LA MOYENNE VALLEE

## 2 - 3. INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI

Cette interprétation permet, dans l'approche pour la détermination de la recharge des nappes, de dire d'une part s'il existe une relation entre les différents aquifères délimités précédemment, et, d'autre part entre ces aquifères et les cours d'eau de la vallée.

Elle permet également de calculer les paramètres hydrodynamiques des formations testées.

De 1987 à 1988 l'OMVS a testé les aquifères de la moyenne vallée par pompage de longue durée (au moins 48h) sur dix stations (fig. 2). Les dispositifs des différentes stations (fig. c-7) montrent un ou deux forages de pompage accompagnés d'un à quatre piézomètres de suivi.

Nous avons interprété l'ensemble des données de pompage et nous présentons ici les plus caractéristiques des différents types d'échanges hydriques dans la vallée.

### 2-3-1. Relation nappe maastrichtienne / nappe alluviale

Double station de pompage à Kanel: GA345-346

Situation (an. 2)

La double station de pompage GA345-346 est située sur la ligne n°2 Kanel, à la distance de 3,25 km du fleuve Sénégal dans la vallée alluviale

#### Lithologie

La coupe lithostratigraphique de la station montre de bas en haut:

- Une formation de sables moyens sur 17m présentant un niveau de sables grossiers de 3m d'épaisseur
- une formation de sables moyens à fins située 18m, présentant une intercalation de sables grossiers de 3m d'épaisseur
- Une formation silto-argileuse de 15m d'épaisseur.

On remarque l'absence de formations argileuses au sens strict. Les formations silto-argileuses et sables fins, attribuées au Quaternaire, reposent directement sur des sables grossiers et graveleux d'âge maastrichtien.

TABL. c-2: Caractéristiques techniques des sondages

#### Station GA345/GA346

N° PIEZO	GA345(48m)	GA346(28m)	GA347(49m)	GA348(29m)	GA349(14m)
rayon	4"	4"	1"1/4	1"1/4	1"1/4
long.crépine	10m	8m	1m	1m	1m
alt. crépine	-32,977	-12,893	-33,962	-13,963	1,073
alt. repère	16,338	16,247	16,009	16,058	16,059
margelle	1.14m	1.13m	0.97m	1m	0.99m
formation	sab. MAAST	sab.QUAT	sab. MAAST	sab.QUAT	silt.QUAT

Deux pompages d'essai ont eu lieu à la station:

- dans le GA345(50m) un pompage de 48h avec un débit de  $22 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$
- dans le GA346(30m) un pompage de 48h avec un débit de  $22,2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Pompage dans les formations maastrichtiennes: GA345 (fig. c-8):

Les piézomètres GA346(30m),GA347(50m),GA348(30m) et GA349(15m) ont été suivis en même temps que le forage 345 pendant , toute la durée du pompage (mesure du rabattement) et pendant l'arrêt du pompage (mesure de la remontée).

Les piézomètres GA346, 347 et 348 ont réagi à l'effet du pompage en même temps que le forage GA345. Le rabattement brusque au début, proportionnel à la profondeur de la crépine est suivi d'un régime transitoire. En fin de pompage on observe un ralentissement des rabattements. Dans le piézomètre GA349(15m) aucun rabattement n'a été observé pendant toute la durée du pompage.

A l'arrêt du pompage, on observe une remontée brutale dans le forage et le piézomètre de même profondeur, ce qui tend à rapprocher leur niveau de celui des autres.

- Calcul des paramètres:

Les mesures effectuées dans le forage GA345 et le piézomètre GA347 permettent de déterminer des paramètres hydrodynamiques des formations inférieures qui appartiennent au Maastrichtien. L'épaisseur totale de cet aquifère n'est pas connue ici.

Les rabattements maxima sont de 1,58 m dans le forage et 0,278 m dans les piézomètres, valeurs très faibles par rapport à l'épaisseur supposée de l'aquifère. L'effet d'alimentation qui se traduit par le ralentissement du rabattement, est observable après 11 minutes de pompage.

TABLE. c-3: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )	S (%)	to(s)	U < 0.01
GA345(50)	0.06	4"	/	1.8 10 <sup>-2</sup>	/	/	/
GA347(50)	0.09	1" 1/4	15.7	1.2 10 <sup>-2</sup>	4.2 10 <sup>-4</sup>	4	t>214 s

REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )
GA345(50)	0.072	1.5 10 <sup>-2</sup>
GA347(50)	0.076	1.5 10 <sup>-2</sup>

i(m) = décote d'un cycle logarithmique de rabattement de la nappe

r<sub>p</sub> = rayon du puits

r(m) = distance entre le le puits et le forage

L'absence de réaction dans le piézomètre superficiel (GA349) semble liée à la formation silteuse au droit de sa crépine.

La transmissivité moyenne calculée est de l'ordre de 1,5 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; le coefficient d'emmagasinement est de 4,2 10<sup>-4</sup>. En raison de la présence de la formation supérieure silto-argileuse, on peut considérer que nous sommes en présence d'une nappe semi-captive.

Pompage dans les formations quaternaires GA346 (fig. c-9)

TABLE. c-4: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )	S (%)	to (s)	U < 0.01
GA348(30)	0.065	1" 1/4	17.3	1.7 10 <sup>-2</sup>	5 10 <sup>-4</sup>	0.45	t > 24 s

REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )
GA346(30)	0.078	1.4 10 <sup>-2</sup>
GA348(30)	0.082	1.4 10 <sup>-2</sup>

Les rabattements ont été mesurés dans tous les piézomètres et dans le forage de la station. A la différence du pompage dans le GA345, tous les piézomètres sans exception ont réagi à l'effet du pompage. Le rabattement a été plus important dans le forage (3,84 m) et le piézomètre GA348 de même profondeur (0,27 m). Par contre le piézomètre supérieur GA349 a très faiblement réagi (moins de 0,05m).

Calcul des paramètres:

L'aquifère testé par ce pompage correspond aux sables moyens et fins du Quaternaire. L'épaisseur de cette formation quaternaire est de 15m. L'interprétation de la courbe de descente dans le piézomètre GA348 de même profondeur que le forage, montre un régime transitoire. Après 17 minutes de pompage, on observe un ralentissement du rabattement vraisemblablement lié l'alimentation par les formations maastrichtiennes.

La réaction des piézomètres crépinés dans les niveaux inférieurs (Maastrichtien) confirme la continuité hydraulique des sables du Quaternaire avec ceux du Maastrichtien, constituant ainsi un aquifère multicouche. Le rabattement plus modéré du piézomètre superficiel GA349 montre la possibilité d'échanges très limités entre les formations supérieures et l'aquifère inférieur.

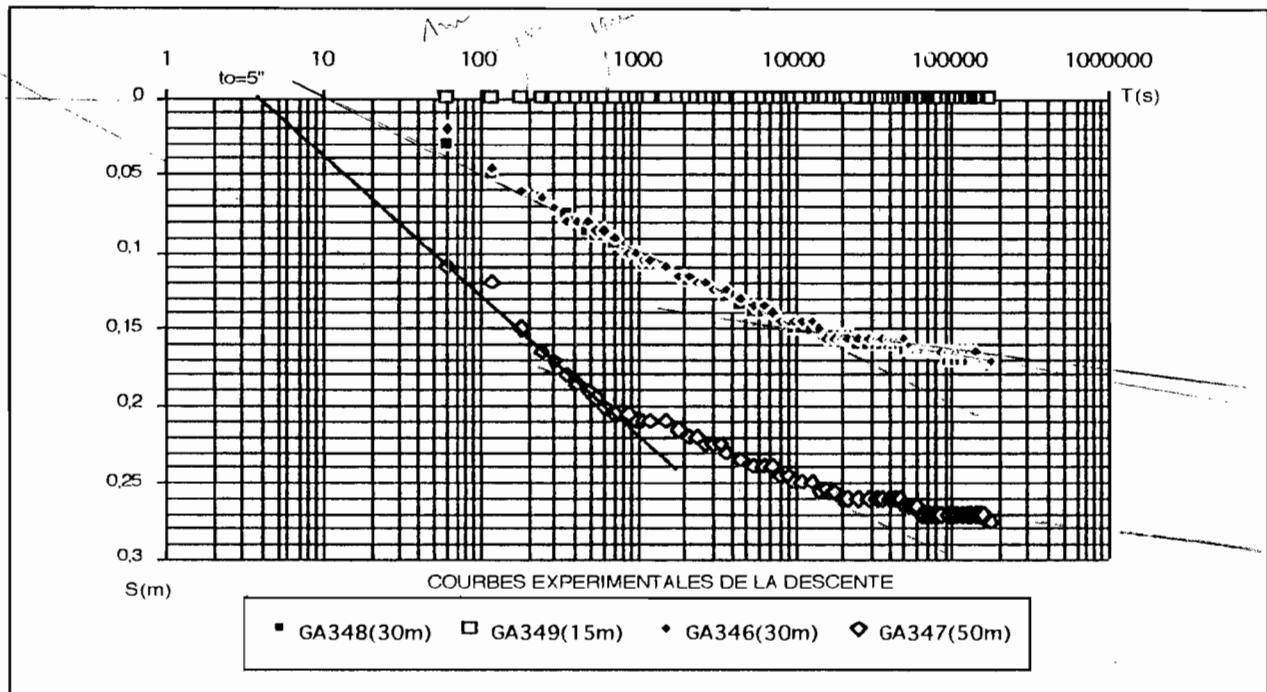


FIG. c-8: Station GA345(50m): Essai de nappe (48h)  $Q= 22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

L'évolution piézométrique à la station montre un même niveau de la nappe des piézomètres qui captent aussi bien dans les sables maastrichtiens que dans ceux du Quaternaire. Tout de même on note un léger décalage entre ce premier niveau et celui observé dans les silts superficiels du Quaternaire captés au piézomètre GA349. Ce décalage est l'oeuvre d'une mauvaise circulation de l'eau dans les silts (fig. c-10).

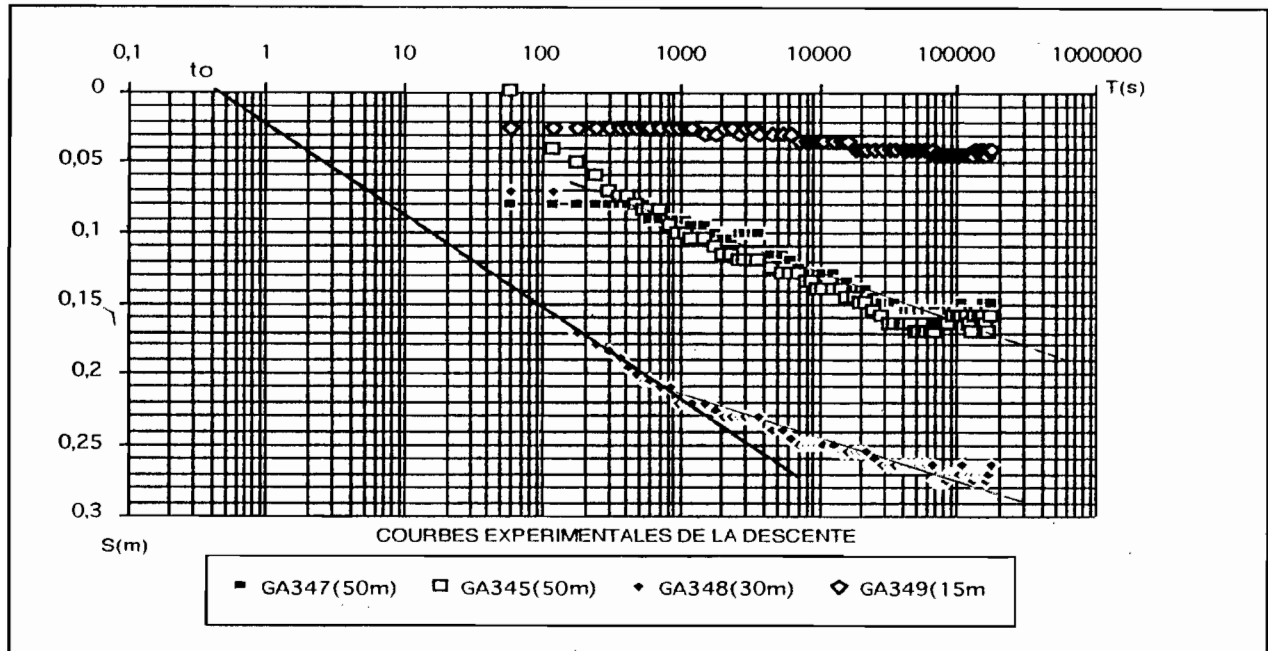


FIG. c-9: Station GA346(30m) Essai de nappe (48h)  $Q= 22.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

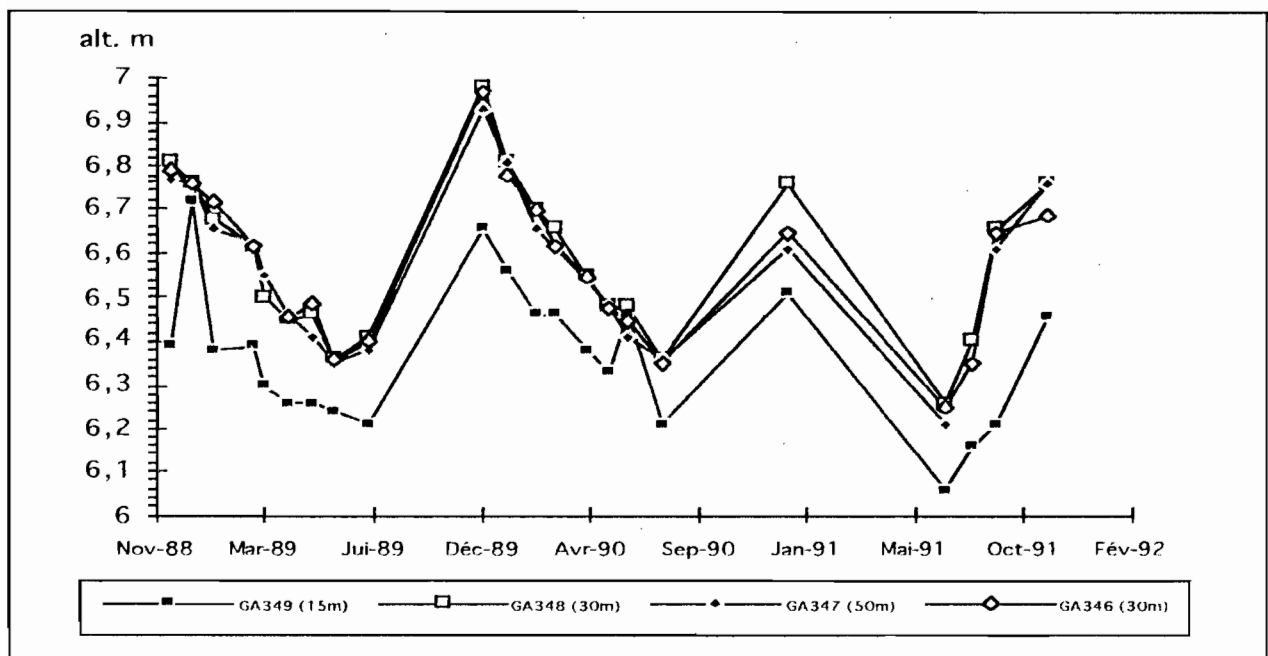


FIG. c-10: Station GA345: Evolution du niveau piézométrique

### Conclusion

Il est mis en évidence l'existence d'un aquifère multicouche comprenant des formations sableuses quaternaires, et des formations sableuses maastrichtiennes. Dans cet aquifère s'effectuent des échanges bidirectionnels entre les formations quaternaires et celles maastrichtiennes. La transmissivité moyenne  $y$  est très bonne:  $T= 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Cet aquifère comporte dans sa partie supérieure une formation silto-argileuse semi-perméable du Quaternaire supérieur, avec laquelle des échanges hydriques limités, liés à la nature lithologique de cette formation, sont possibles.

### 2-3-2. Relation nappe éocène / nappe alluviale

Station de pompage à **Mbakhna**: GA333-334

Situation (an. 3)

La station de pompage est située sur la ligne n°3 Nguigilone. Elle est à moins d'un km du marigot Thialoungueul et à 8 km du fleuve.

Lithologie

la coupe lithostratigraphique de la station montre de bas en haut:  
 -20m de formations d'argile marneuse et de sable-argileux de l'Eocène,  
 -30m de formations sableuses et argileuses du Quaternaire.

TABL. c-5: Caractéristiques techniques des piézomètres

station GA333/334

N° PIEZO	GA333(43m)	GA334(28m)	GA335(48m)	GA336(29m)	GA337(11m)
rayon	4"	4"	2"1/4	1"1/4	1"1/4
long. crépine	15m	10m	1m	1m	1m
alt. crépine	-29,5	-14,4	-34,6	-15,6	2,5
alt. repère	14,459	14,537	14,4	14,41	14,438
margelle	0,97	0,95	0,99	0,97	0,96
formation	sabl. arg.EOC.	sab.QUAT.	abl. arg.EOC.	sab.QUAT.	sab.QUAT.

Deux pompages ont été effectués à la station, de durée chacune égale à 48h.  
 Interprétation des pompages d'essai

Pompage dans les formations éocènes: GA333 (fig. c-11)

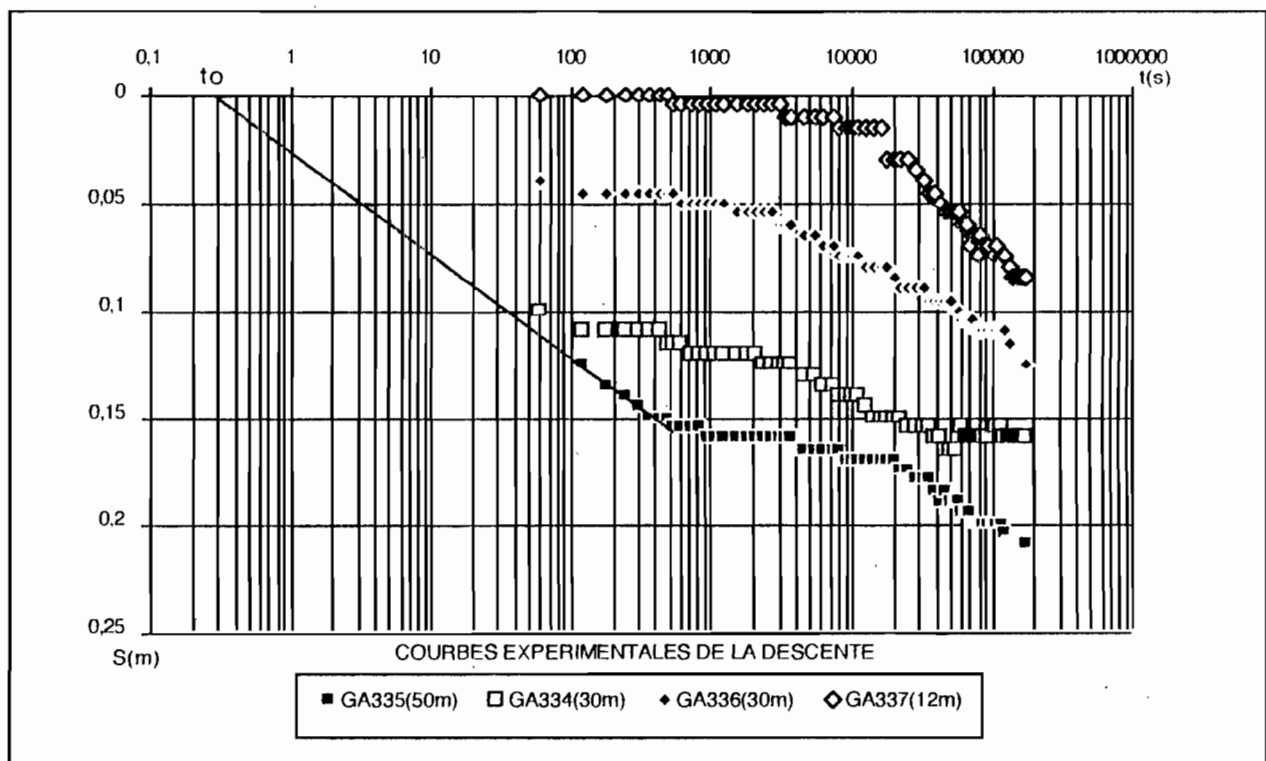


FIG. c-11: Station GA333(45m): Essai de nappe (48h)  $Q= 22 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$



Un pompage de 48h au débit de  $23 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  dans le forage GA333(43m), crépiné aussi bien dans les formations éocènes que dans celles quaternaires. Tous les piézomètres ont réagi à l'effet du pompage par l'établissement d'un régime transitoire et les rabattements ont été mesurés. A l'arrêt du pompage la remontée de niveau dans les piézomètres a également été mesurée.

Les mesures effectuées dans le forage et les piézomètres GA336(29m) GA334(28m) et GA335(48m) ont permis la détermination des paramètres hydrodynamiques des formations testées par la méthode de JACOB.

L'épaisseur des formations éocènes est de 50m au forage de KAVEL.

TABL. c-6: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

#### DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	S (%)	to (s)	U < 0.01
GA336(29)	0.035	1"1/4	18.8	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^2$	80	$t > 5008 \text{ s}$
GA335(48)	0.045	2"1/4	17.6	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$5.7 \cdot 10^4$	3	$t > 170 \text{ s}$
GA334(28)	0.035	2"1/4	3	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$8.5 \cdot 10^3$	1	$t > 58 \text{ s}$

#### REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
GA336(29)	0.038	$3 \cdot 10^{-2}$
GA333(43)	0.022	$5 \cdot 10^{-2}$
GA334(28)	0.018	$6.5 \cdot 10^{-2}$

Pompage dans les formations quaternaires: GA334 (fig. c-12)

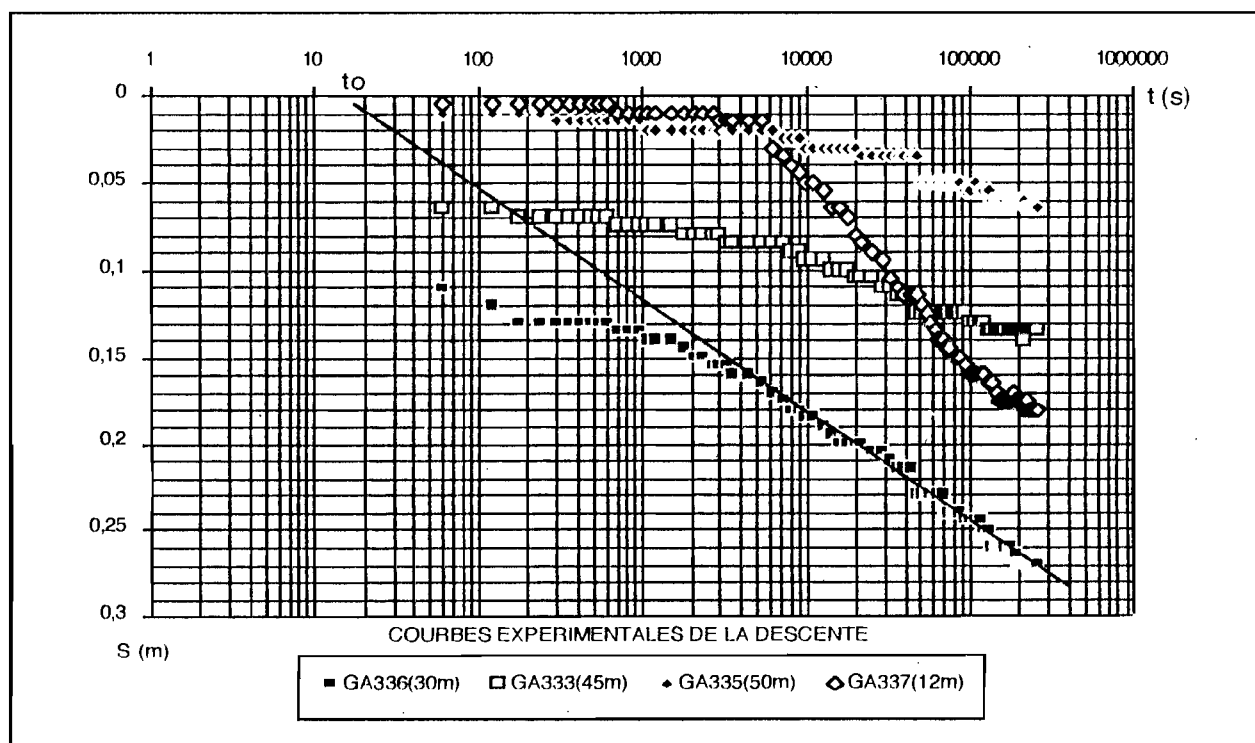


FIG. c-12: Station GA334(30m): Essai de nappe (78h)  $Q = 21.9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

TABL. c-7: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

## DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	S (%)	to (s)	U < 0.01
GA336(29)	0.06	1"1/4	14.8	1.8 10 <sup>-2</sup>	2.210 <sup>-2</sup>	12	t>669 s

## REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
GA334(28)	0.076	1.5 10 <sup>-2</sup>
GA336(29)	0.076	1.5 10 <sup>-2</sup>

Un pompage de 72h au débit de 21.9 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> dans le forage GA334(28m). Tous les piézomètres ont réagi à l'effet du pompage par l'établissement d'un régime transitoire et les rabattements ont été mesurés. A l'arrêt du pompage la remontée de niveau dans les piézomètres a également été mesurée. Les mesures effectuées dans le forage et le piézomètre GA336(29m) ont permis la détermination des paramètres hydrodynamiques de la formation testée par la méthode de JACOB.

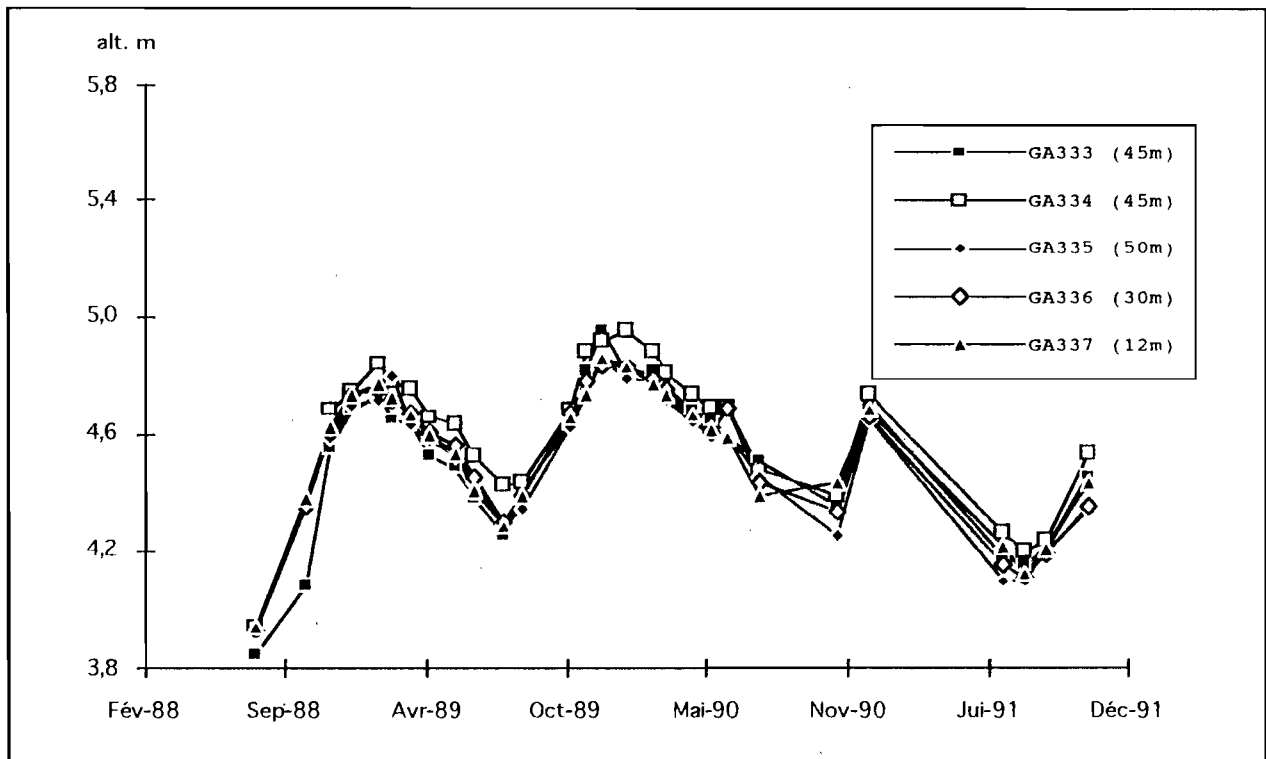


FIG. c-13: Station GA333: Evolution du niveau piézométrique

L' évolution piézométrique (fig. c-13) montre un même niveau de nappe aussi bien dans les formations éocènes que quaternaires, ce qui atteste l'unicité de l'aquifère.

## Conclusion

Le double test à la station de pompage GA333-334 a permis de montrer l'existence d'une drainage bidirectionnelle (une descendante des formations alluviales du Quaternaire vers celles de l'Éocène et une ascendante des formations de l'Éocène vers celles du Quaternaire). Ceci met en évidence un aquifère multicouche des formations alluviales et éocènes entre lesquelles existe un échange hydrique.

## 2 - 3 - 3. Relation nappe maastrichtienne / nappe éocène

Station de pompage à Boynadji: GA368

Situation (fig. 2)

La station de pompage est située, à la limite entre le Dièri et le Walo, à environ 11 km à l'Ouest du fleuve.

## Lithologie

Les coupes lithostratigraphiques de la station montrent de bas en haut:

- 10m de formation sableuse de taille moyenne à fine appartenant à la limite supérieure du Maastrichtien
- 36m de formation calcaire à calcaire gréseux de l'Eocène
- 3m de sable graviers du Quaternaire.

TABL. c-8: Caractéristiques techniques des sondages

## Station GA368

N° PIEZO	GA368(48)	GA369(48)	GA370(31)	GA371(48)	GA372(31)
rayon	4"	2"1/4	1"1/4	2"1/4	1"1/4
long. crépine	10m	1m	1m	1m	1m
alt. crépine	-27,5	-27,7	-10,6	-27,4	-10,4
alt. repère	21,468	21,233	21,371	21,616	21,632
margelle	1.012m	0.979m	0.987m	0.99m	1m
formation	sab. MAAST	sab. MAAST	calc. EOC.	sab. MAAST	calc. EOC.

## Interprétation du pompage d'essai (fig. c-14)

Le pompage a eu lieu dans le GA368(48m) pendant 48h du 26 au 28/8/88, au débit de  $20.9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Les piézomètres GA369(48m) GA370(31m) GA371(48m) et GA372(31m) ont été suivis pendant toute la durée du pompage (mesures de rabattements) et après l'arrêt du pompage (mesure de la remontée). Tous les piézomètres ont réagi, dès les premières minutes à l'effet du pompage, en même temps que le forage selon un rabattement en régime transitoire.

En fin de pompage, on observe l'établissement d'un régime permanent irrégulier qui se traduit dans le forage par une remontée de 16 cm. A l'arrêt du pompage, on obtient après le régime transitoire un régime permanent suivi d'une remontée qui amena les niveaux au dessus du niveau initial.

TABL. c-9: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

## DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	S (%)	to (s)	U < 0.01
GA369(48m)	0.11	2" 1/4	15.6	$9.65 \cdot 10^{-3}$	$8.9 \cdot 10^{-5}$	1	t > 536 s
GA371(48m)	0.12	2" 1/4	21.6	$8.85 \cdot 10^{-3}$	$8.5 \cdot 10^{-5}$	2.5	t > 117 s

## REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
GA368(48m)	0.12	$8.5 \cdot 10^{-3}$
GA369(48m)	0.12	$8.5 \cdot 10^{-3}$
GA371(48m)	0.12	$8.5 \cdot 10^{-3}$

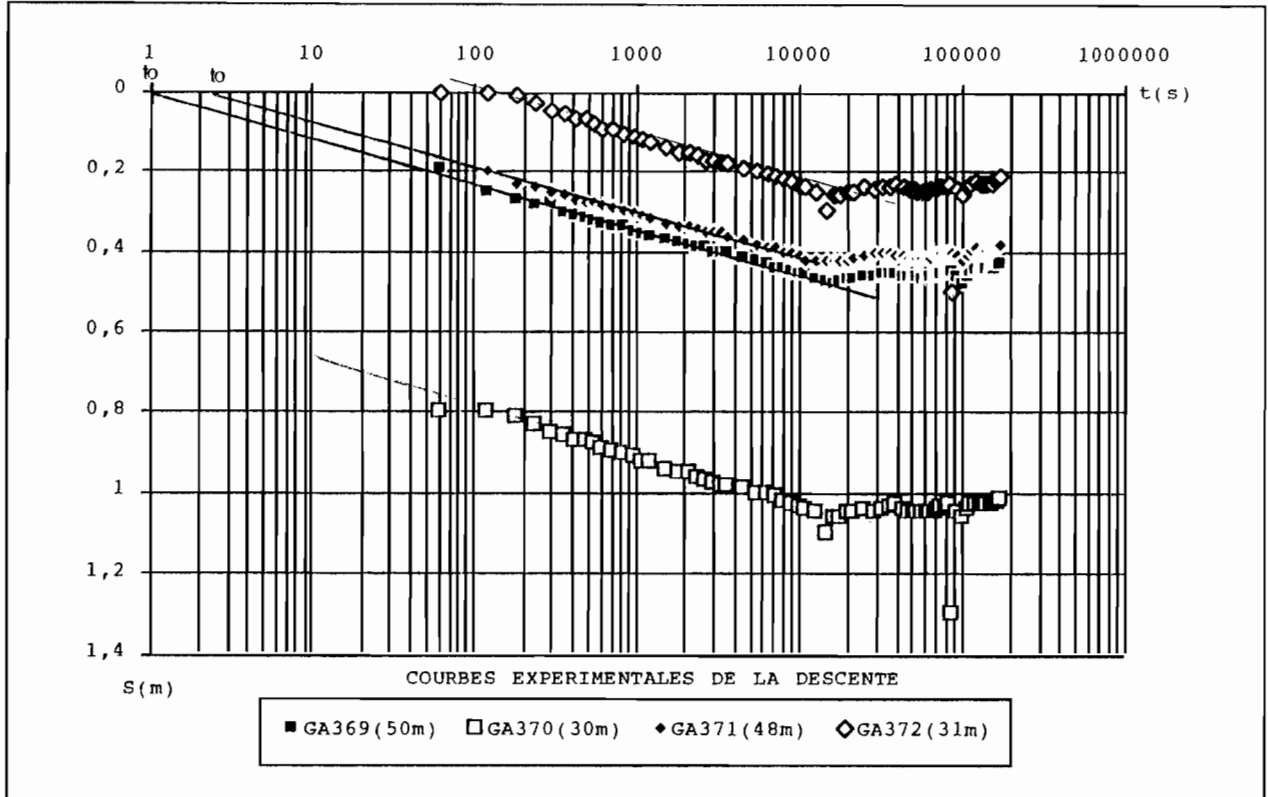


FIG. c-14: Station GA368(50m): Essai de nappe (48h) DU 28/08/88: Q=20.9m3/h

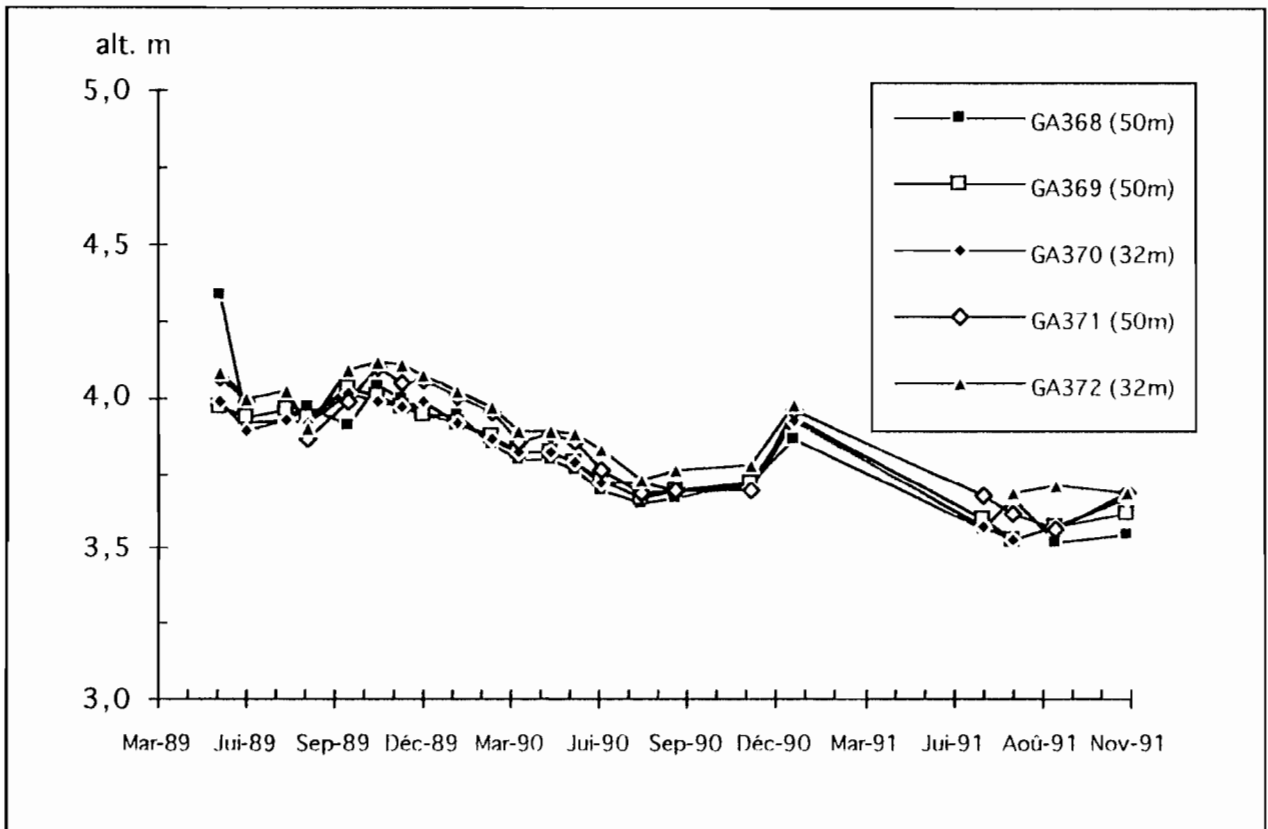


FIG. c-15: Station GA368: Evolution du niveau piézométrique

### Calcul des paramètres.

Les mesures effectuées dans les piézomètres GA369 GA371 et dans le forage GA368 permettent de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Maastrichtien ici testé. Les rabattements maxima sont de 1.8 m dans le forage, 1.1 m dans le GA370(31 m), 0.45 m dans le GA369(48m) et 0.42 dans le GA371(48m).

L'unicité de l'aquifère est montrée par l'évolution identique du niveau dans les différents piézomètres (fig. c-15).

### Conclusion

La réaction spontanée de tous les piézomètres à l'effet de pompage met en évidence la continuité hydraulique entre les formations calcaires éocènes avec celles sableuses maastrichtiennes, par conséquent l'existence d'un aquifère multicouche constitué par deux formations.

La transmissivité des formations maastrichtiennes égale à  $9\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . La réaction plus importante de la nappe dans le piézomètre GA370(31m) de l'Eocène est liée au caractère anisotrope de ses formations calcaires, qui seraient de perméabilité supérieure à celles du Maastrichtien.

### 2 - 3 - 4 . Relation nappe / cours d'eau

Station de pompage à Youmanièrè: DA241/242

Situation (an. 2)

La station DA241/242 se trouve à la rive droite à environ 0.5km du fleuve sur la ligne n°2.

### Lithologie

- La coupe géologique de la station montre de bas en haut
- 40m de formations sableuses sablo-silteuses à argilo-sableuses appartenant à l'Eocène.
  - 10m de silt argileux attribué au Quaternaire.

TABL. c-10: Caractéristiques techniques des sondages

Station DA241/242

N° PIEZO	DA241(48m)	DA242(28m)	DA244(29m)	DA238(39m)	DA239(28m)
rayon	3"	3"	1"1/4	3"	1"1/4
long. crépine	19m	1m	1m	1m	1m
alt. crépine	-32,3	-13,4	-11,4	-24,2	-12,8
alt. repère	16,617	16,617	18,602	16,239	16,186
margelle	1.01m	0.99m	0.97m	1.4m	0.99m
formation	sab.EOC.	sab.EOC.	sab.EOC.	sab.EOC.	sab.EOC.

- Deux pompages d'essai ont été effectués sur le site
- Dans le DA241 (48m) un pompage de 48h au débit de 25 m<sup>3</sup>/h
  - Dans le DA242 (29m) un pompage de 72h au débit de (7.2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)

Interprétation des pompages d'essai:

Pompage dans les formations éocènes: DA241 (fig. c-16)

Pendant le pompage seul le DA242(29m) a réagi dès la première minute les autres DA238(39m) DA244(29m) DA239(28m) l'ont fait plus tard avec des rabattements inférieurs à 10 cm, ce qui ne permet pas une interprétation des résultats. Seuls les résultats du forage pendant la remontée feront l'objet d'une interprétation.

TABL. c-11: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

REMONTÉE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )
DA241 (48m)	0.06	2.1 10 <sup>-2</sup>

Pompage dans les formations éocènes: DA242 (fig. c-17)

Seul le DA241(48m) a été suivi en même temps que le forage pendant le pompage, mais ne captant pas dans la même formation que le forage, il ne peut faire l'objet d'interprétation pour le calcul des paramètres de cette formation. Le faible débit de pompage (7.2 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>) ne permet pas l'établissement d'un régime transitoire capable de faire l'objet d'interprétation par la méthode de Jacob, par conséquent il n'est pas possible de calculer les différents paramètres de la formation ainsi testée.

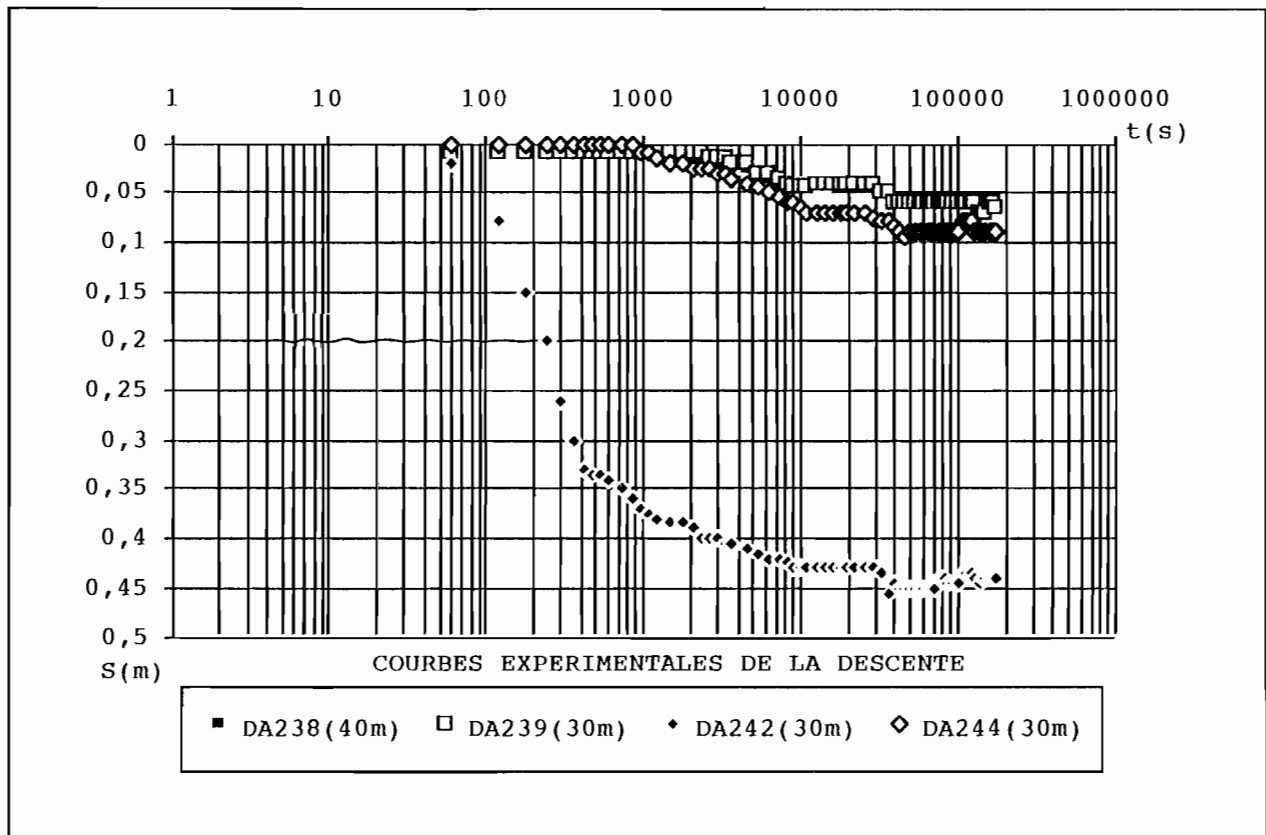


FIG. c-16: Station DA241(48m): Essai de nappe (48h) du 26/02/88 :Q=25m<sup>3</sup>/h

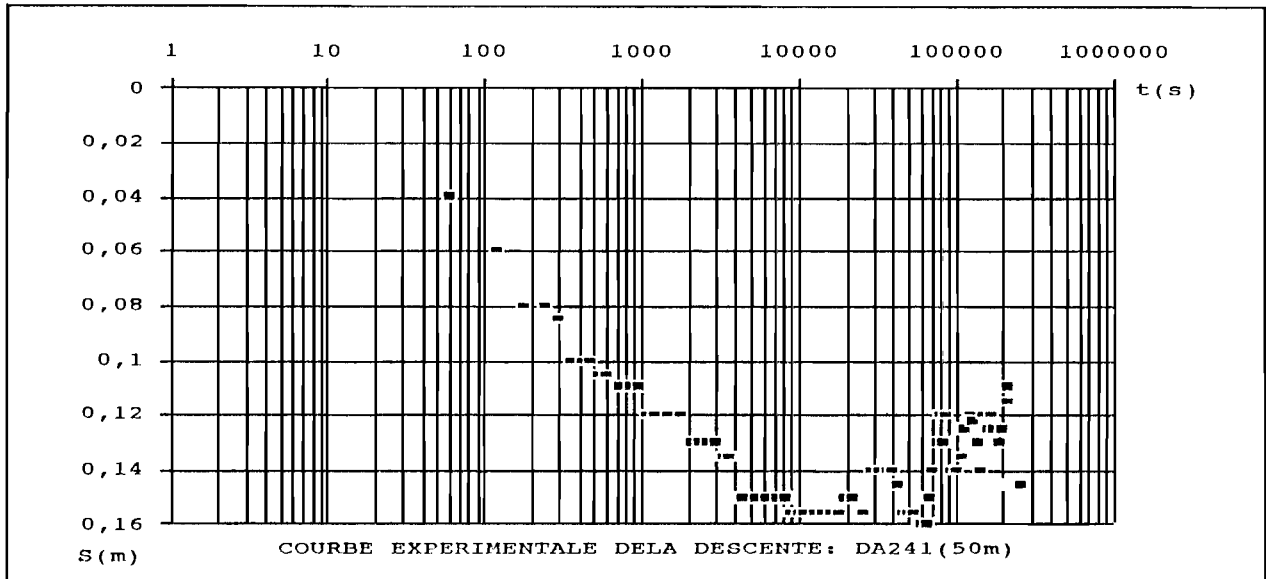


FIG. c-17: Station DA242(30m): Essai de nappe (72h) du 3/03/88:  $Q=7.2\text{m}^3/\text{h}$

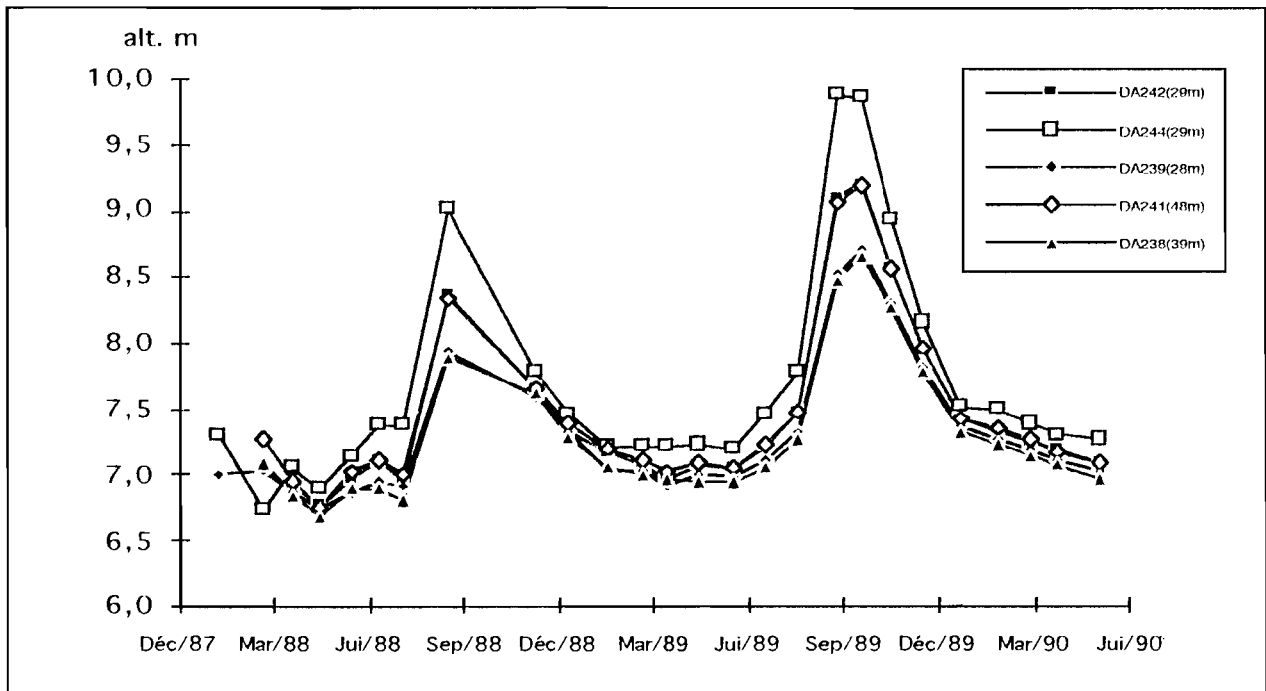


FIG. c-18: Station DA241: Evolution du niveau piézométrique.

#### Conclusion

A la station DA241/242 tous les piézomètres captent dans l'Eocène ce qui a priori ne permet pas une étude directe des relations entre les formations alluviales et celles de l'Eocène. Par contre l'établissement d'un régime permanent lors des pompages, signale une source d'alimentation de ces formations éocènes. Vu la faible distance qui sépare la station du fleuve, celui-ci pourrait être la cause de l'effet d'alimentation.

Les formations de la station sont toutes sableuses, elles appartiennent alors à un même aquifère multicouche, comme le montre l'évolution du niveau piézométrique (fig. c-18). On remarque la remontée du niveau de base de la nappe de près de 40 cm de 1988 à 1990.

## 2 - 3 - 5. Mise en évidence d'une limite étanche

Station de pompage à Thilogne: GA318/319

Situation (an.-4)

La station de pompage se trouve en rive gauche, sur la ligne piézométrique n°4, à la distance de 6,5 km du fleuve et 200 m du marigot Thialoungueul.

Lithologie

La lithologie de la station comprend:

- 15m de formation éocène qui comprend un niveau de base silteux séparé d'un niveau supérieur sablo-argileux par du sable latéritique,
- 35m de formation quaternaire qui comprend un niveau de base sableux surmonté de sable-argileux.

TABL. c-12 Caractéristiques techniques des sondages

station GA318/319					
N° PIEZO	GA318(30m)	GA319(48m)	GA320(48m)	GA321(29m)	GA322(14m)
rayon	4"	4"	2"1/4	1"1/4	1"1/4
long. crépine	11m	9m	1m	1m	1m
alt. crépine	-19,1	-37,2	-36,7	-17,9	-2,9
alt. repère	12,329	12,103	12,036	12,058	12,044
margelle	1.401m	1.319m	0.73m	0.968m	0.985m
formation	sabl.EOC.	sabl. EOC.	sabl. EOC.	sab.QUAT	sab-arg.QUAT

Deux pompages d'essai ont eu lieu sur le site:

- Dans le GA318(30m) un pompage de 48h au débit de 24m<sup>3</sup>/h
- Dans le GA319(48m) un pompage de 48h au débit de 21.6m<sup>3</sup>/h

Interprétation des pompages d'essai:

Pompage dans les formations quaternaires: GA318 (fig. c-19)

Les piézomètres GA319(48m) GA(320(48m) GA321(29m) et GA322(14m) ont été suivis en même temps que le forage pendant la descente comme pendant la remontée.

Tous les piézomètres ont réagi à l'effet du pompage par un rabattement caractéristique d'un régime transitoire. En fin de pompage il s'est établi un effet d'alimentation.

- Calcul des paramètres

TABL. c-13: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

## DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )	S (%)	to (s)	U < 0.01
GA321(29m)	0.125	1" 1/4	23.15	9.7 10 <sup>-3</sup>	2 10 <sup>-4</sup>	5	t>276 s
GA322(14m)	0.125	1" 1/4	24.3	9.7 10 <sup>-3</sup>	8 10 <sup>-4</sup>	5	t>248 s

## REMONTÉE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )
GA318(30m)	0.135	9 10 <sup>-3</sup>
GA321(29m)	0.13	9.4 10 <sup>-3</sup>
GA322(14m)	0.135	9 10 <sup>-3</sup>



Les mesures effectuées dans le forage et les piézomètres GA321(29m) et GA322(14m) permettent de déterminer les paramètres hydrodynamiques de la formation testée

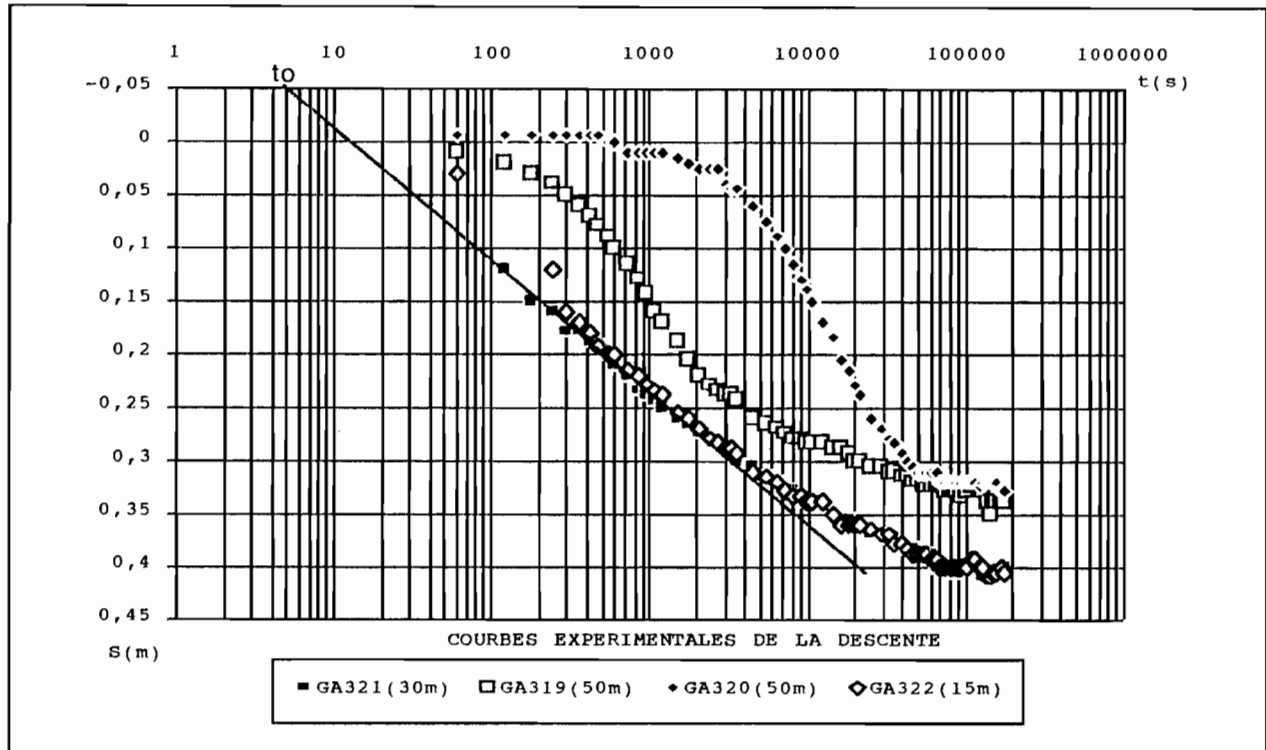


FIG. c-19: Station GA318(32m): Essai de nappe (48h) du 10/08/88:  $Q=24\text{m}^3/\text{h}$

#### Pompage dans les formations éocènes: GA319 (fig. c-20)

Les piézomètres GA318(30m) GA(320(48m) GA321(29m) et GA322(14m) ont été suivis en même temps que le forage pendant la descente comme pendant la remontée.

Tous les piézomètres ont réagi par rabattement à l'effet du pompage. Si un rabattement régulier est observable pour les piézomètres moins profonds, pour le piézomètre profond on observe un rabattement à double pentes caractéristique d'une limite étanche. Il est à noter que pendant la remontée l'impact de la limite tanche ne s'est pas fait sentir.

#### - Calcul des paramètres

Les résultats des mesures dans le forage et dans le piézomètre GA(320(48m) ont permis de calculer les paramètres hydrodynamiques des formations éocènes par la méthode semi-logarithmique de JACOB.

Le calcul de la distance théorique (d) qui sépare le forage de la limite étanche, (probablement une faille), est de 212 m obtenue par la formule:

$$d \text{ (m)} = (r/2) * (t_i/t_0)^{1/2} = 212 \text{ m}$$

r, est la distance du piézomètre à l'axe du forage ( 22,7 mètres)

$t_i$ , est le temps d'intersection des deux droites du rabattement (700 000 secondes)

$t_0$ , est le temps de l'intersection de la droite de Jacob avec l'axe du temps (200secondes)

c-14 Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	S (%)	t <sub>0</sub> (s)	U < 0.01
GA320(48m)	0.12	2" 1/4	22.7	9 10 <sup>-3</sup>	1.2 10 <sup>-2</sup>	300	t > 17176 s

REMONTÉE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
GA320(48m)	0.2	6 10 <sup>-3</sup>

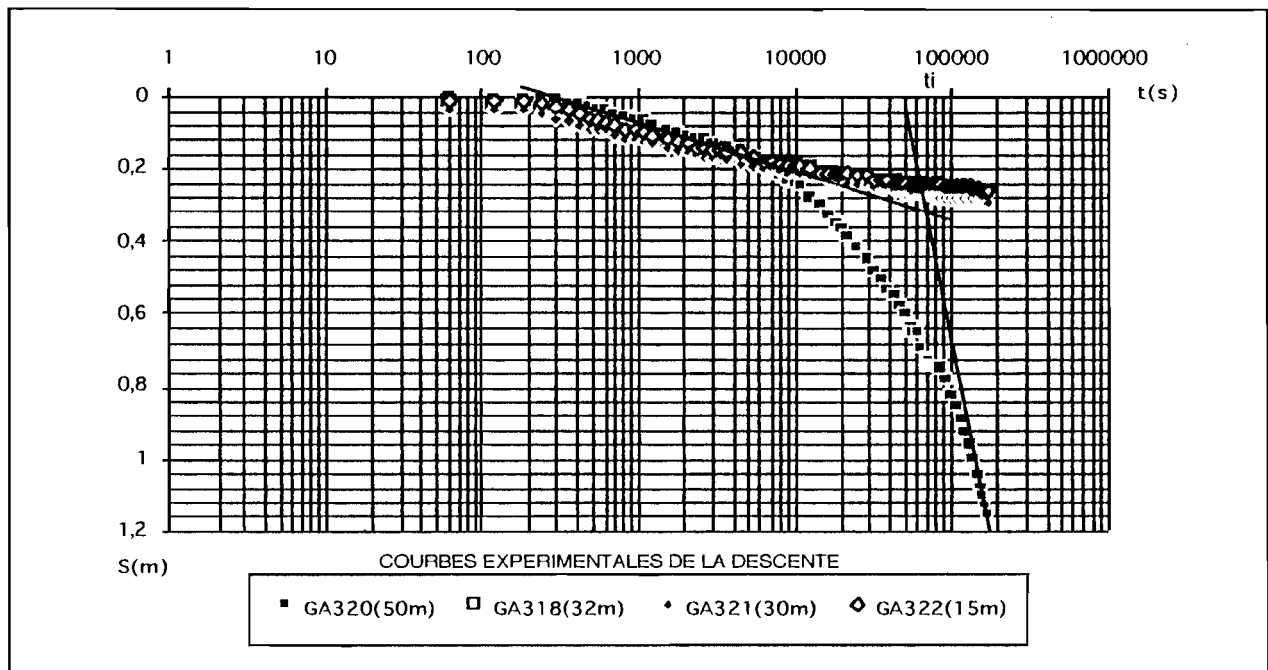


FIG. c-20: Station GA319(50m): Essai de nappe (48h) Q= 21.6 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

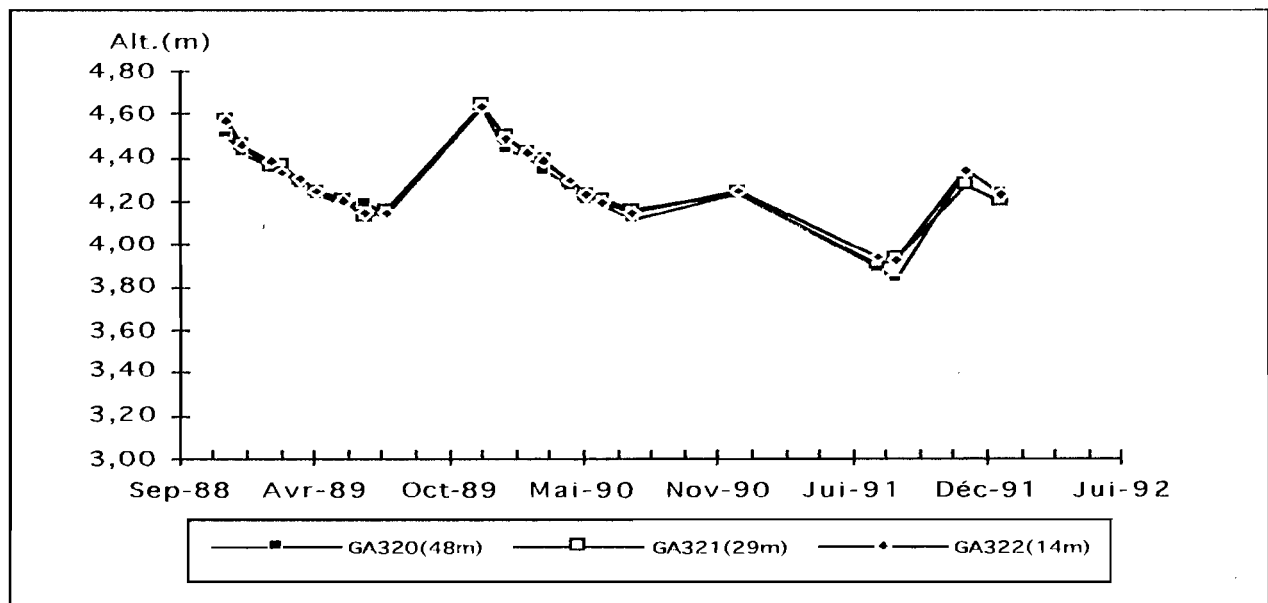


FIG. c-21: Station GA318: Evolution du niveau piézométrique.

## Conclusion

A la station GA318/319 se trouve un aquifère des formations alluviales et éocènes dit aquifère multicouche à limite étanche. L'effet de la limite étanche ne s'est fait sentir que pendant le pompage dans l'Eocène, il est bien possible que ce soit l'oeuvre de failles présentes dans l'Eocène. L'évolution annuelle du niveau de la nappe montre une baisse de celle ci de près de 30 cm de 1989 à 1991 (fig. c-21).

### 2 - 3 - 6 . Mise en évidence de nappes distinctes

Station de pompage à Podor: GA237

Situation (an. 6)

Située entre le fleuve Sénégal et le Doué, la station GA237 comporte trois sondages de 8 à 45 m. de profondeur

Lithologie

Les coupes lithologiques de ces sondages montrent une variation importante des formations détritiques alluviales.

Le forage GA237 a recoupé une formation calcaire éocène à la profondeur (-40 m IGN).

TABL. c-15: Caractéristiques techniques des piézomètres

Station GA237

N° PIEZO	GA237(45m)	DA238(38m)	DA239(8m)
rayon	6"	2"1/2	2"1/2
long. crépine	10m	1m	1m
alt. crépine	-39	-34	-3
alt. repère	4,893	4,974	4,96
margelle	1,002	0,995	1
formation	sab.QUAT.	sab.QUAT.	sab.QUAT.

Interprétation du pompage (fig. c-22)

Pendant toute la durée du pompage, le piézomètre le moins profond GA239(7m) n'a pas été affecté; alors que dans le Forage GA237(43m) et au piézomètre le plus profond GA238(38m) on observe une baisse régulière du niveau de la nappe, caractéristique d'un régime d'écoulement transitoire. La formation calcaire signalée, n'étant pas atteinte par la crépine, n'est pas alors testée par le pompage. La formation testée correspond aux sables profonds d'épaisseur de l'ordre de 10m.

Le comportement des piézomètres, pendant le pompage et la nature lithologique des sédiments, permettent de décrire deux nappes distinctes: une nappe dans les sables supérieurs séparée d'une autre dans les sables profonds, par des niveaux argileux et argilo-sableux.

Calcul des paramètres

L'interprétation des données de pompage du forage et du piézomètre profond, par la méthode semi-logarithmique de Jacob, a permis d'obtenir une transmissivité de  $5.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et un coefficient d'emmagasinement de  $5 \cdot 10^{-4}$ .

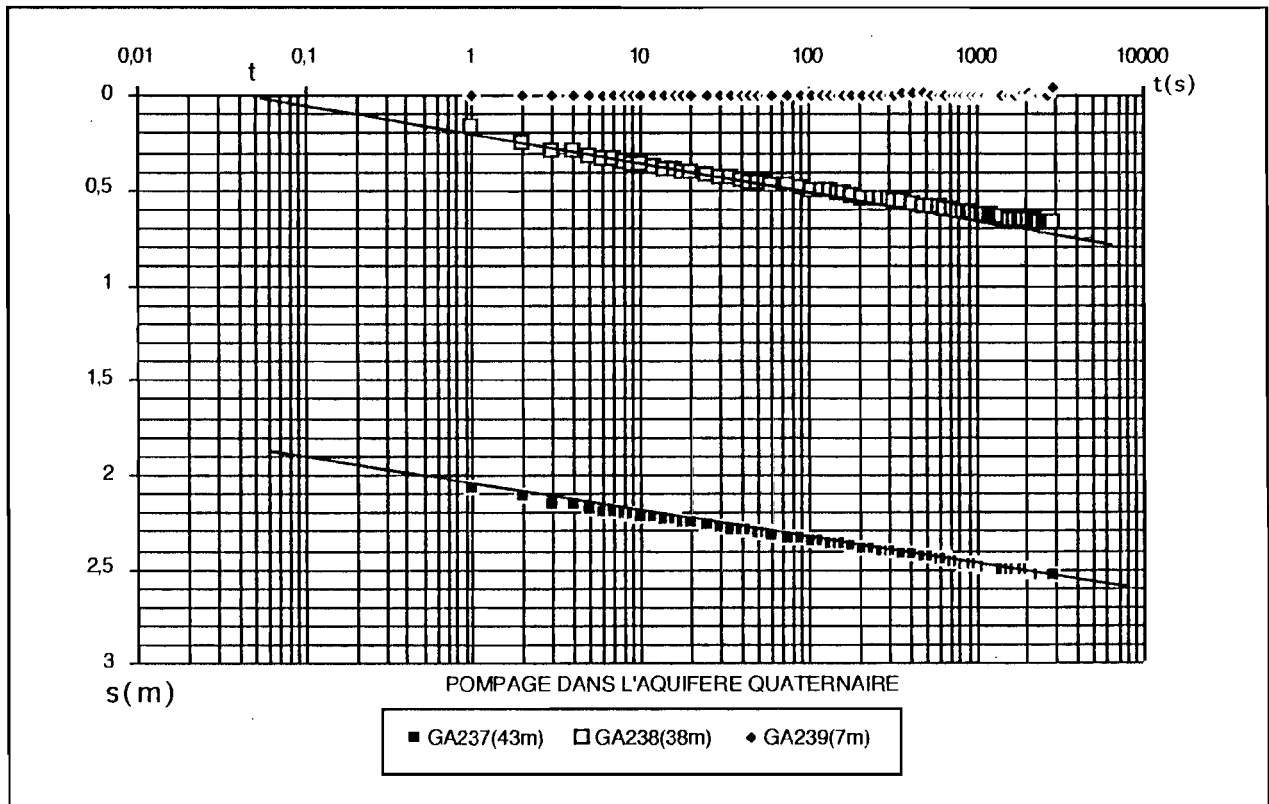
TABL. c-16: Résultats de l'interprétation par la méthode de JACOB:

## DESCENTE

N° PIEZO.	i (m)	rP	r (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )	S (%)	t <sub>0</sub> (s)	t <sub>c</sub> (s)	U < 0.01
GA237(43m)	0.14	6"	/	5 10 <sup>-3</sup>	/	/	106	/
GA238(38m)	0.13	2" 1/2	8.15	6 10 <sup>-3</sup>	5 10 <sup>-4</sup>	3	/	t > 139 s

## REMONTEE

N° PIEZO.	i (m)	T (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )
GA237(43m)	0.14	5 10 <sup>-3</sup>
GA238(38m)	0.14	6 10 <sup>-3</sup>

FIG. c-22: Station GA237(43m): Essai de nappe (48h) Q= 14.6 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>

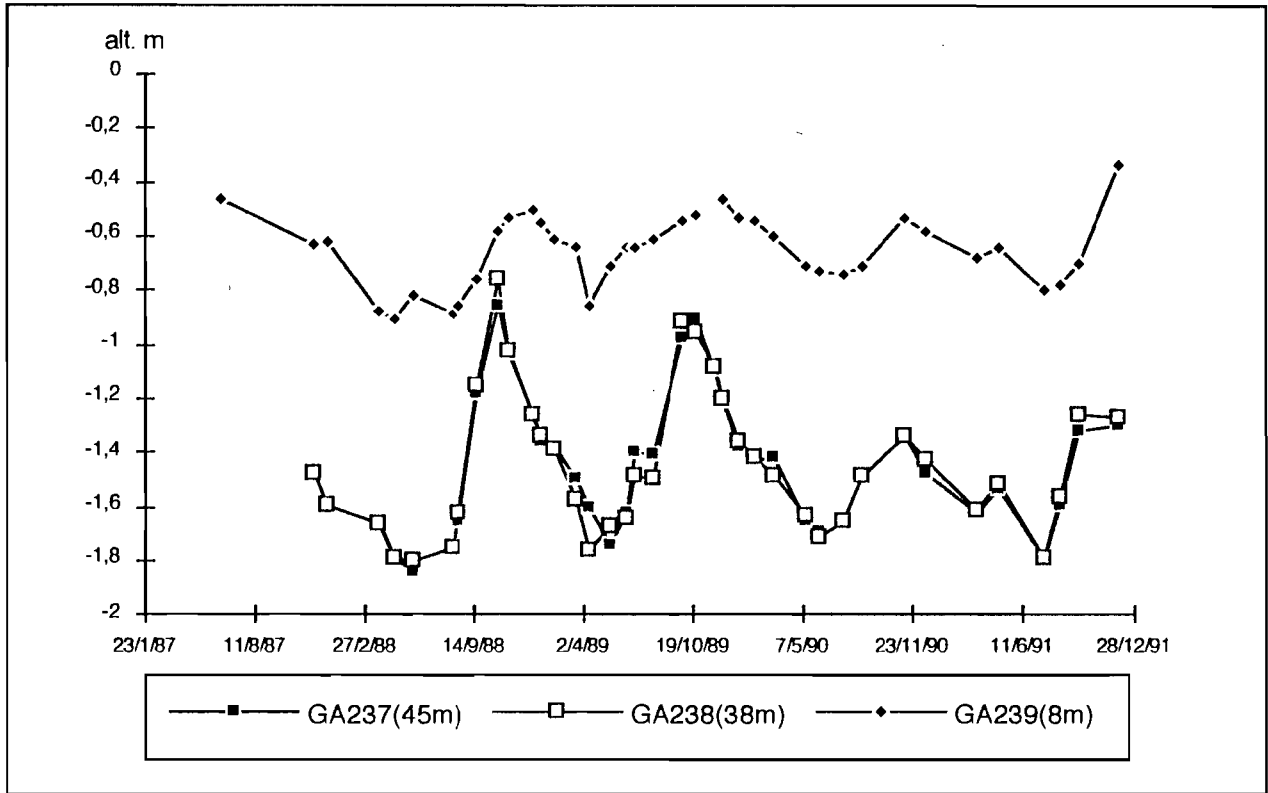


FIG. c-23: Station GA237: Evolution du niveau piézométrique.

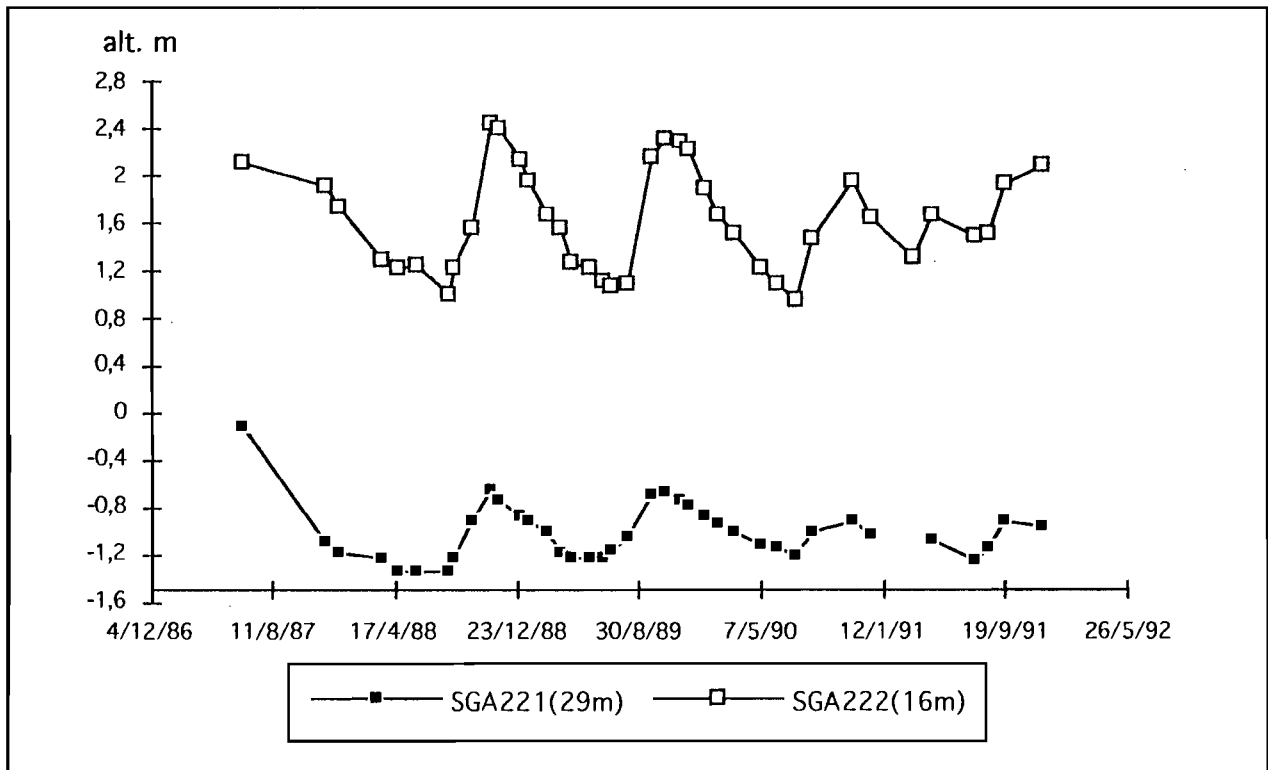


FIG. c-24: Site GA220: Evolution du niveau piézométrique.

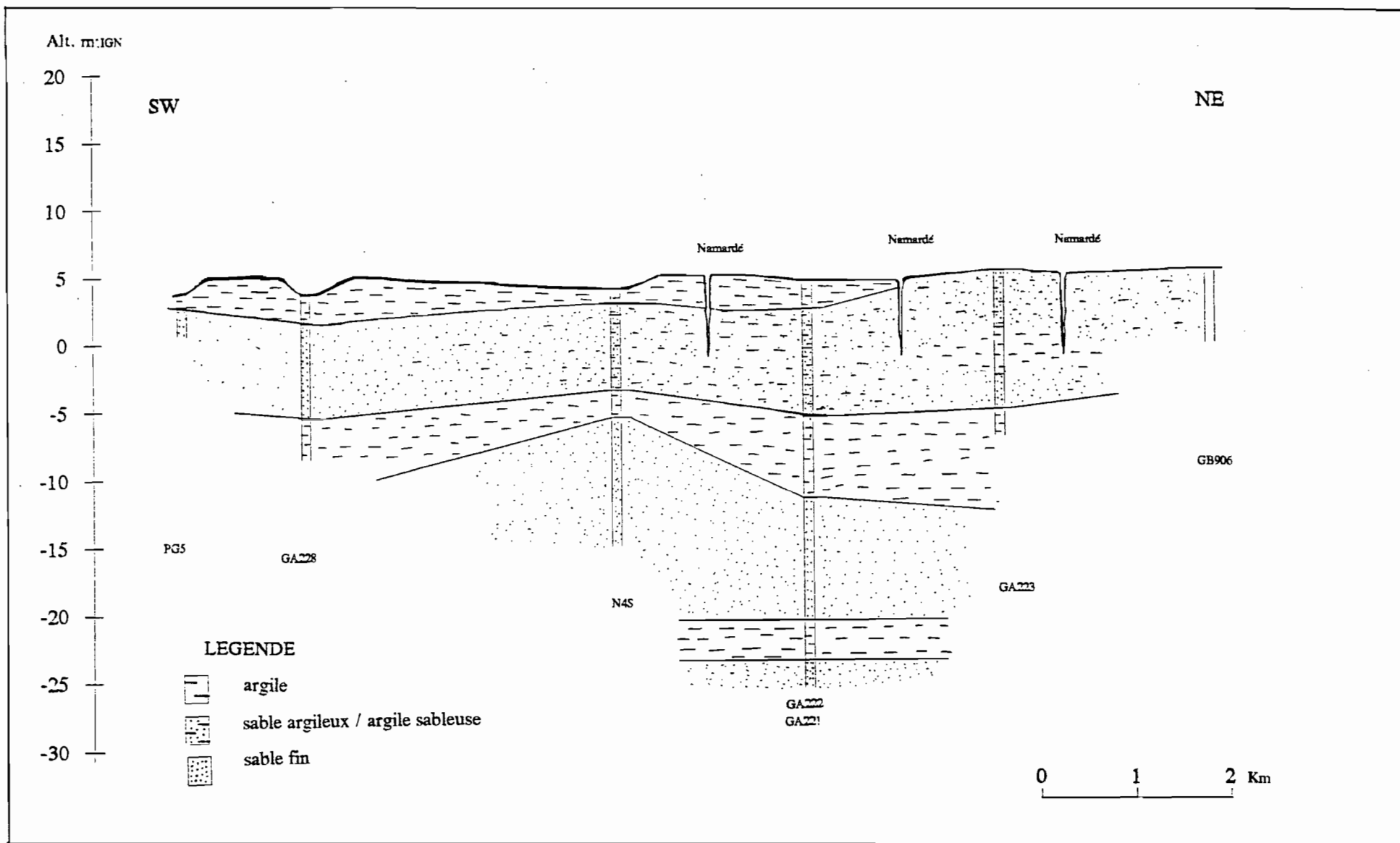


FIG. 25

COUPE TRANSVERSALE DANS LA CUVETTE DE NIANGA ( mise en évidence locale de plusieurs aquifères alluviaux)

### Conclusion

L'aquifère multicouche des alluvions du fleuve Sénégal à Podor, comprend deux types de nappes. Une nappe superficielle libre séparée d'une profonde captive par des couches argileuses imperméables que confirment les graphiques d'évolution du niveau piézométrique sur deux sites différents (fig. c-23 et c-24) par deux niveaux piézométriques distincts. Au deuxième site (fig. c-25) on observe même trois niveaux de formations aquifères dans les alluvions. Ces nappes superficielles ont été également signalées par Illy (1973) sous l'appellation de "nappes perchées".

TABL. c-17: Paramètres hydrodynamiques des aquifères de la moyenne vallée  
(valeurs moyennes)

Localité	N° forage	Prof. en m	Formation aquifère	T (m <sup>2</sup> .s-1)	S (%)
Podor	<b>GA 237</b>	45	Quaternaire	5,5 .10-3	4,5 .10-4
Boynadji	<b>GA 368</b>	48	Eocène	9,0 .10-3	8,5 .10-5
Mbakhna	<b>GA 333</b>	43	Eocène	4,0 .10-2	8,5 .10-3
Mbakhna	GA 334	28	Quaternaire	1,5 .10-2	2,2 .10-3
Thilogne	<b>GA 318</b>	30	Quaternaire	9,5 .10-3	2,0 .10-4
Thilogne	GA 319	48	Eocène	7,5 .10-3	1,2 .10-2
Wali	<b>DA 249</b>	58	Eocène	8,0 .10-3	5,1 .10-5
Wali	DA 250	35	Quaternaire	5,0 .10-3	7,0 .10-5
Youmanière	<b>DA 241</b>	48	Eocène	2,1 .10-2	
Mafoundou	<b>DA 220</b>	50	Eocène	4,0 .10-2	2,0 .10-4
Mbagne	<b>DA 264</b>	49	Eocène	9,0 .10-3	5,8 .10-4
Bagoudine	<b>DA 268</b>	38	Eocène	1,2 .10-2	8,2 .10-4
Kanel	<b>GA 345</b>	50	Maastrichtien	1,5 .10-2	4,2 .10-4
Kanel	GA 346	30	Quaternaire	1,7 .10-2	5,4 .10-5

Les interprétations complémentaires de pompages d'essai sont récapitulées en annexe (an.14 b).

# D

ETUDES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES EAUX



## INTRODUCTION

Dans ce paragraphe nous allons essayer de localiser des zones d'échange hydrique entre nappes ou entre nappes et fleuve, ceci à partir des analyses chimiques d'échantillons d'eaux souterraines ou superficielles dans la vallée.

En 1972 Illy a entrepris des analyses chimiques et isotopiques d'eaux souterraines dans la vallée, Illy, (1973).

L'OMVS de 1988 à 1990 a effectué des mesures mensuelles de paramètres physico-chimiques (T°C, pH, Conductivité, et de Niveau piézométrique) et d'analyses chimiques des eaux souterraines dans la vallée alluviale et ses environs.

Dans le cadre du projet "EQUESEN" nous avons effectué en 1991 et 1992 des visites mensuelles de piézomètres avec prélèvement d'échantillons d'eau, pour les analyses chimiques et isotopiques.

### 1. ETUDE DE LA CONDUCTIVITE DES EAUX SOUTERRAINES

#### 1 - 1. Les graphiques de conductivité

Les graphiques de comparaison de la conductivité des eaux souterraines prélevées dans les piézomètres localisés entre Manaël et Saldé (an.15.a et 15.b) en période d'étiage (juin) et de crue (novembre) sur les deux rives ont conduit aux conclusions suivantes:

- les eaux souterraines de la rive gauche sont plus chargées que celles sur la rive droite (fig. d-1 et d-2);
- la conductivité en période de crue (novembre) est plus élevée qu'en période de décrue (juin) (fig. d-3 et d-4). Cela s'explique par le fait que pendant la recharge de la nappe il y a remobilisation des sels;
- et la conductivité des eaux augmente d'amont en aval.

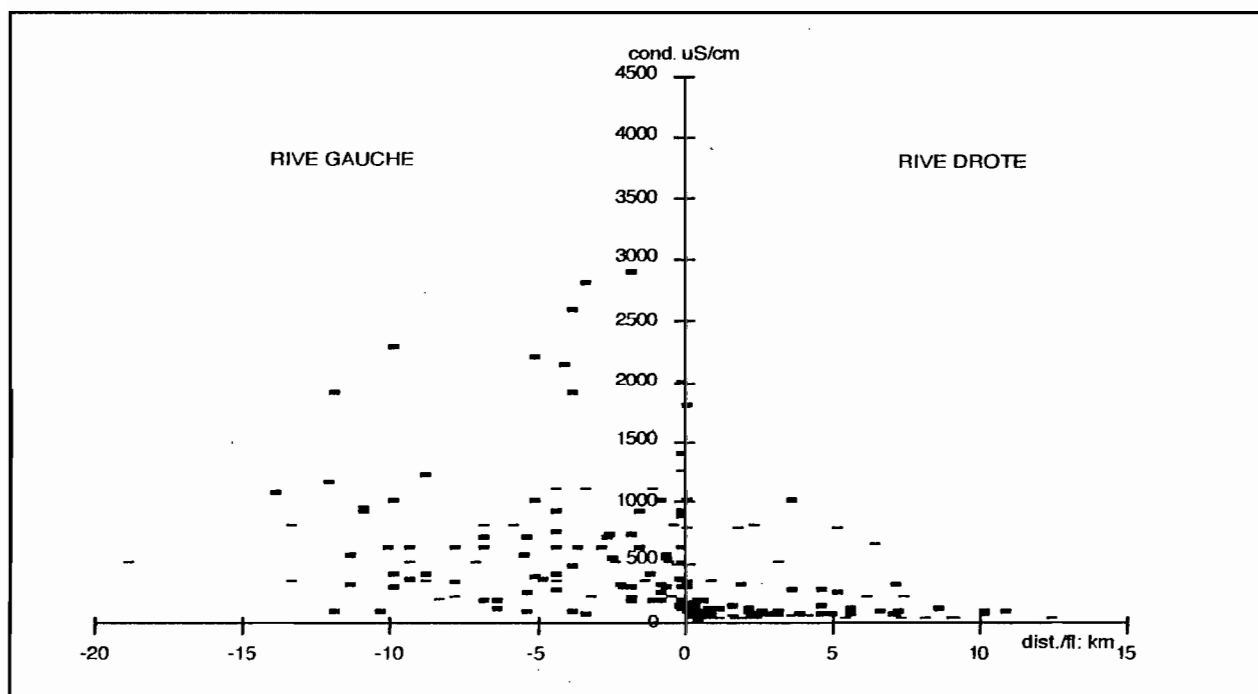


FIG. d-1: La conductivité des eaux souterraines: Zone Manaël-Saldé (JUN 88)

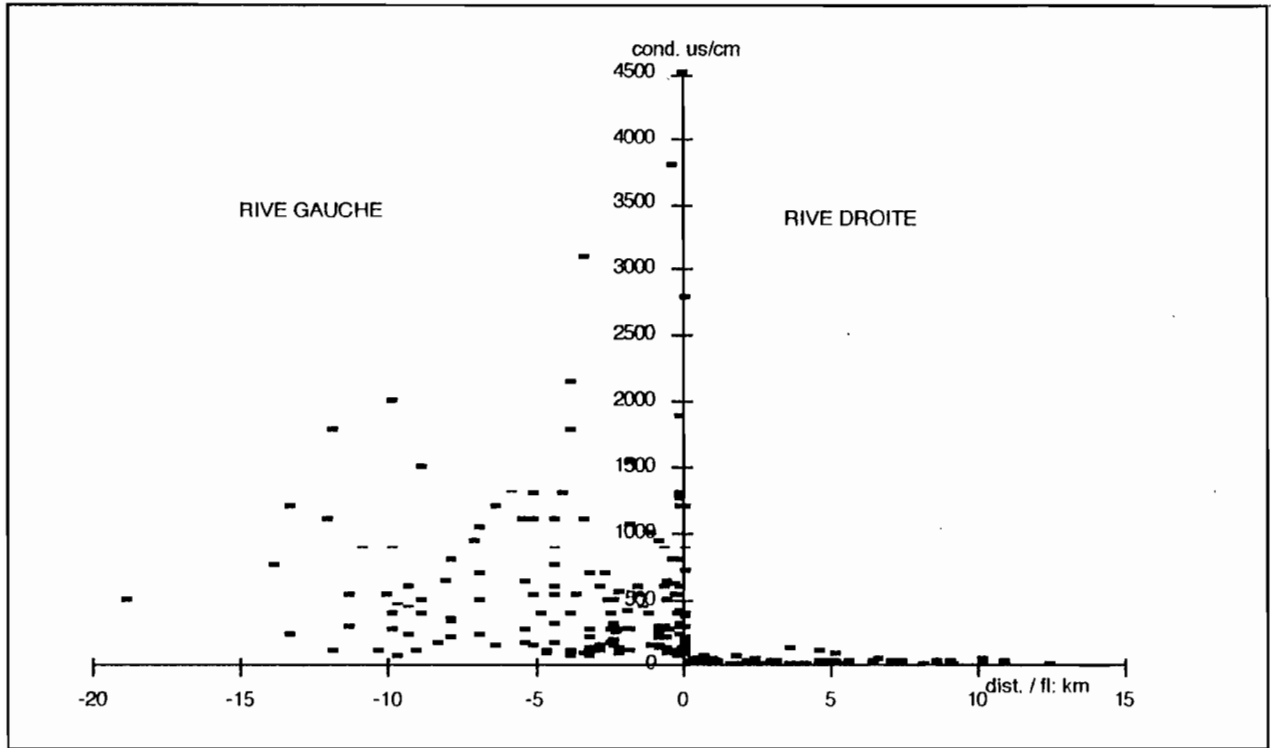


FIG. d-2: La conductivité des eaux souterraines: Zone Manaël-Saldé (NOV.88)

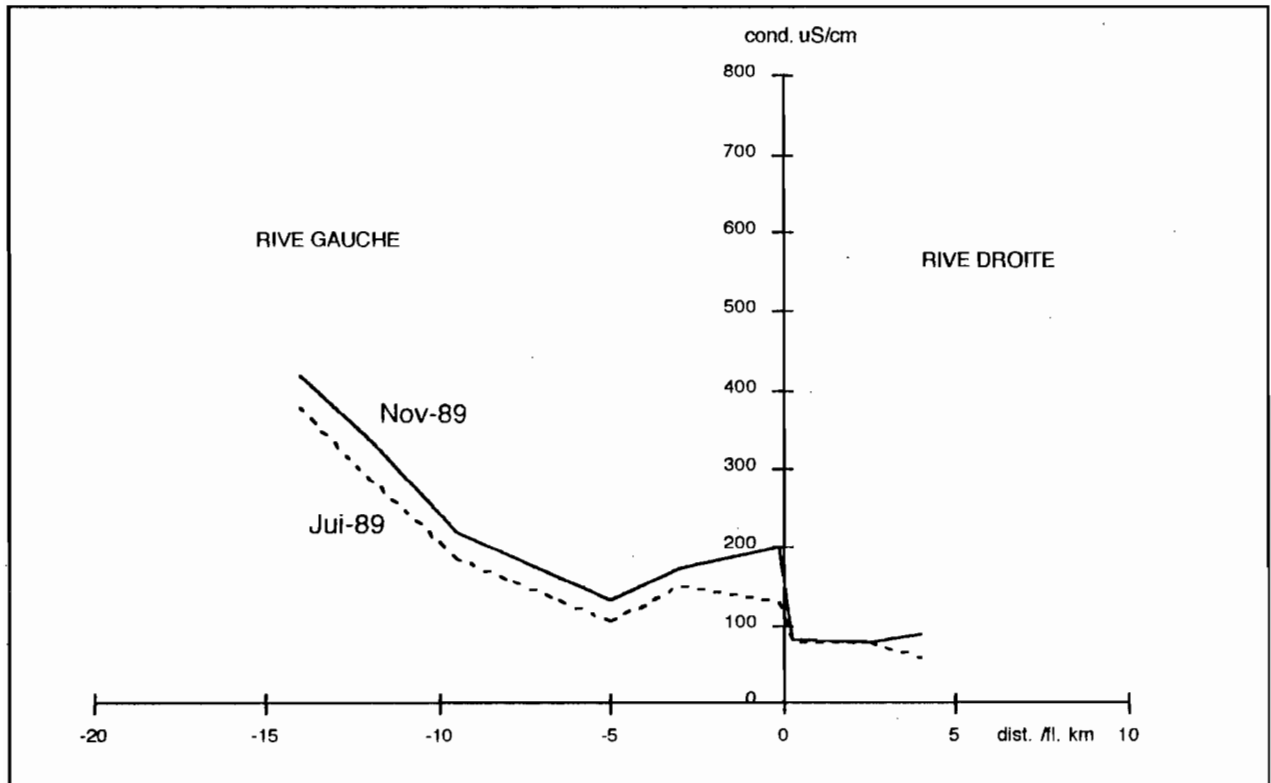


FIG. d-3: La conductivité des eaux souterraines: Zone Manaël-Saldé (Ligne N°3 Nguigilone)

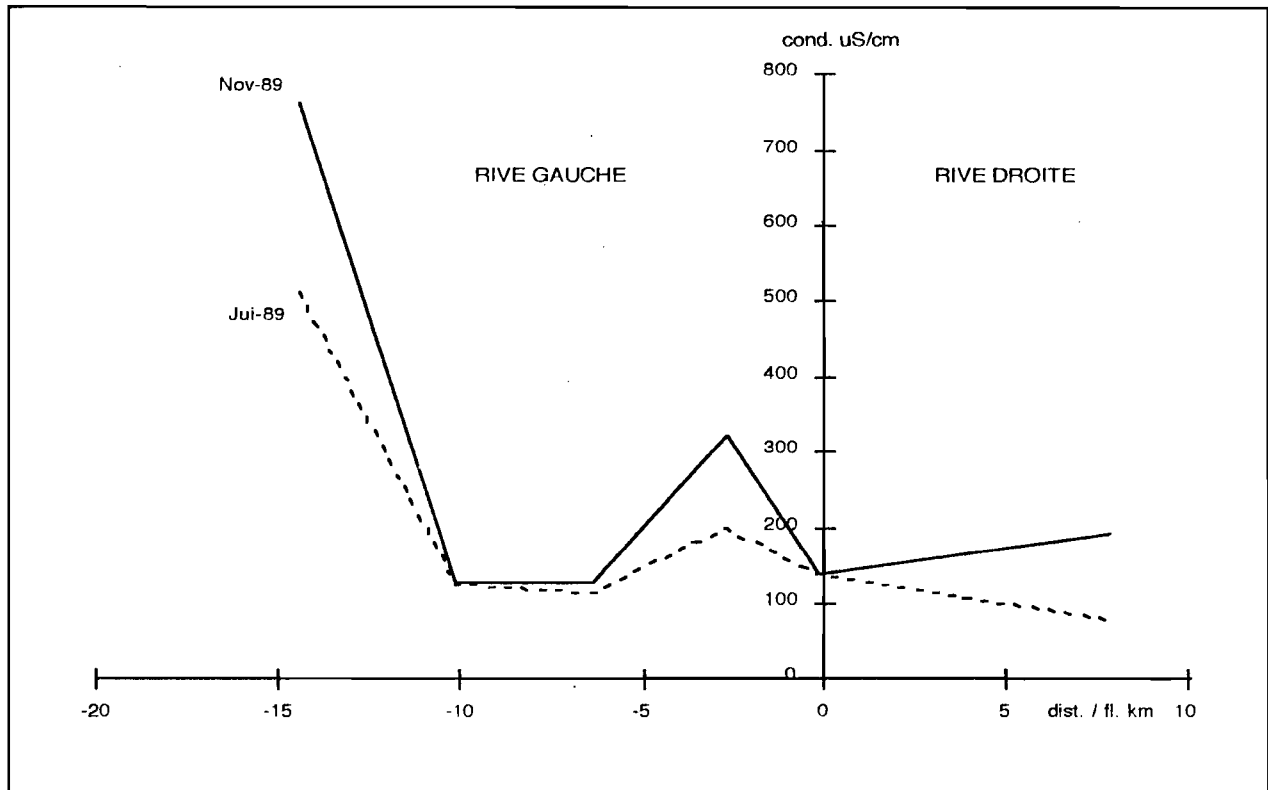


FIG. d-4: La conductivité des eaux souterraines: Zone Manaël-Saldé (Ligne N°4 Thilogne)

## 1 - 2. Les cartes de conductivité

L'établissement de cartes isovaleurs de la conductivité, pour les mois de juin 88 et juin 90 (fig. d-5), a permis de localiser dans les environs de Kaédi, des eaux de la nappe à conductivité particulièrement élevée. En effet la valeur moyenne de la conductivité des eaux de la nappe pour les trois années est environ de  $250 \mu\text{s.cm}^{-1}$ , alors que celles des eaux de la nappe aux environs de Kaédi peuvent atteindre  $2000 \mu\text{s.cm}^{-1}$ .

## 2. ANALYSES CHIMIQUES

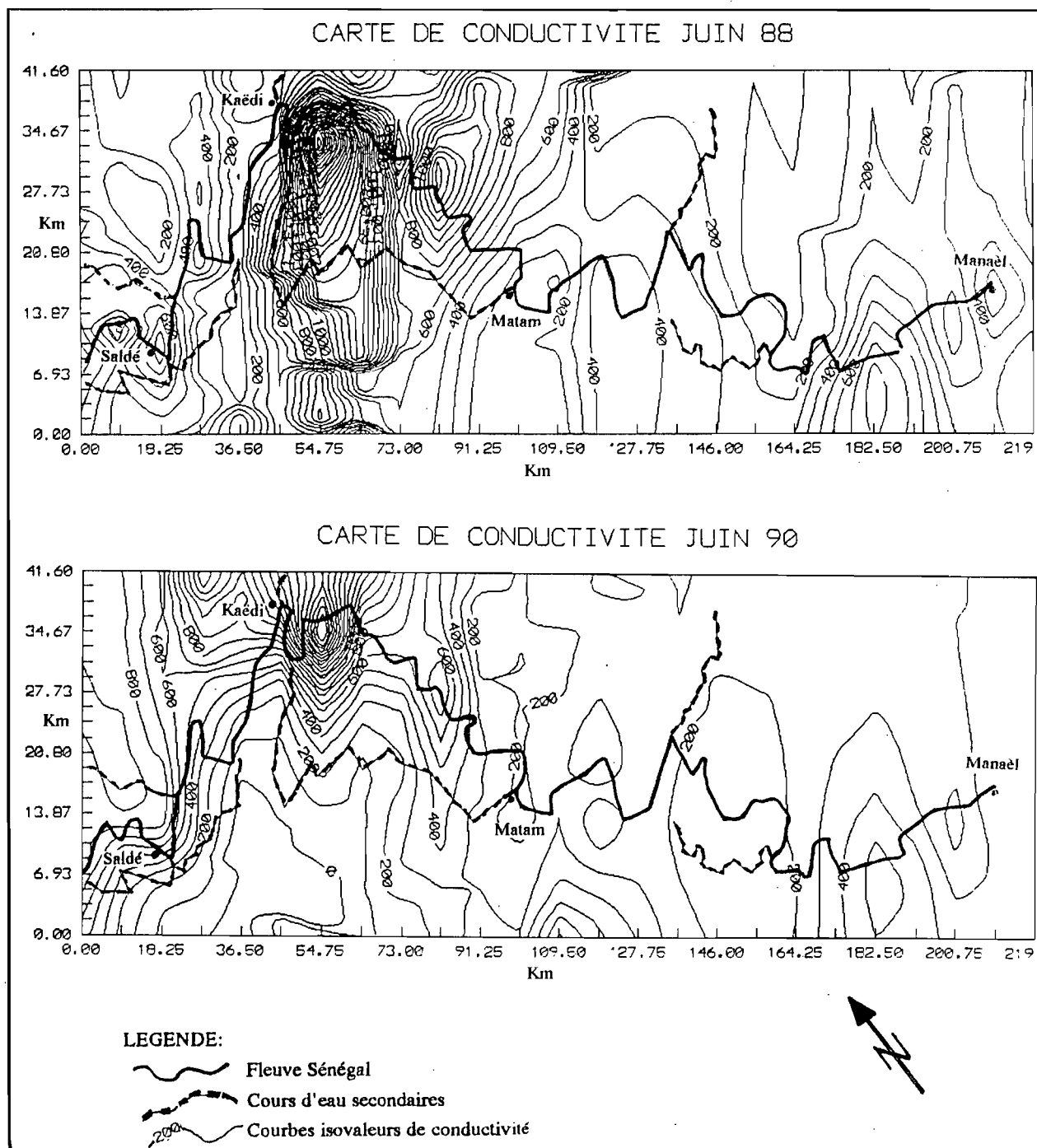
Cette étude chimique est une tentative d'explication de l'anomalie de conductivité des eaux souterraines observée aux environs de Kaédi.

### 2 - 1. CLASSIFICATION DES EAUX PAR DIAGRAMME DE PIPER

Le report sur diagramme triangulaire de PIPER, (fig. d-6) des teneurs ioniques des eaux souterraines des deux zones, Kaédi et Podor, et de celles de l'eau de mer, a permis leur classification. Ainsi les eaux souterraines GB970 et GB996 des environs de Kaédi et celles de Podor ont été classées avec celles de la mer comme étant des eaux chlorurées sodiques calciques magnésiennes ( $\text{Cl} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$ ), ce qui fait penser à une origine commune pour ces eaux.

### 2 - 2. RELATION NaCl ET CONDUCTIVITE

La corrélation de la teneur en ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  avec la conductivité des eaux des nappes (fig. d-7) donne un coefficient de corrélation satisfaisant ( $r = 0.88$ ). Ce qui montre la prévalance de ces deux ions dans la conductivité des eaux.



Nota Bena: L'échelle des cartes en kilomètres est personnalisée par rapport à une origine fictive zéro (0), ceci dans le souci d'un meilleur encadrement de la vallée alluviale du Sénégal.  
( voir méthode d'opération pour un changement de repère: An-15 a)

FIG.d-5: CARTES D'ISOVALEURS DE LA CONDUCTIVITE DES EAUX SOUTERRAINES MOYENNE VALLEE DU SENEGAL

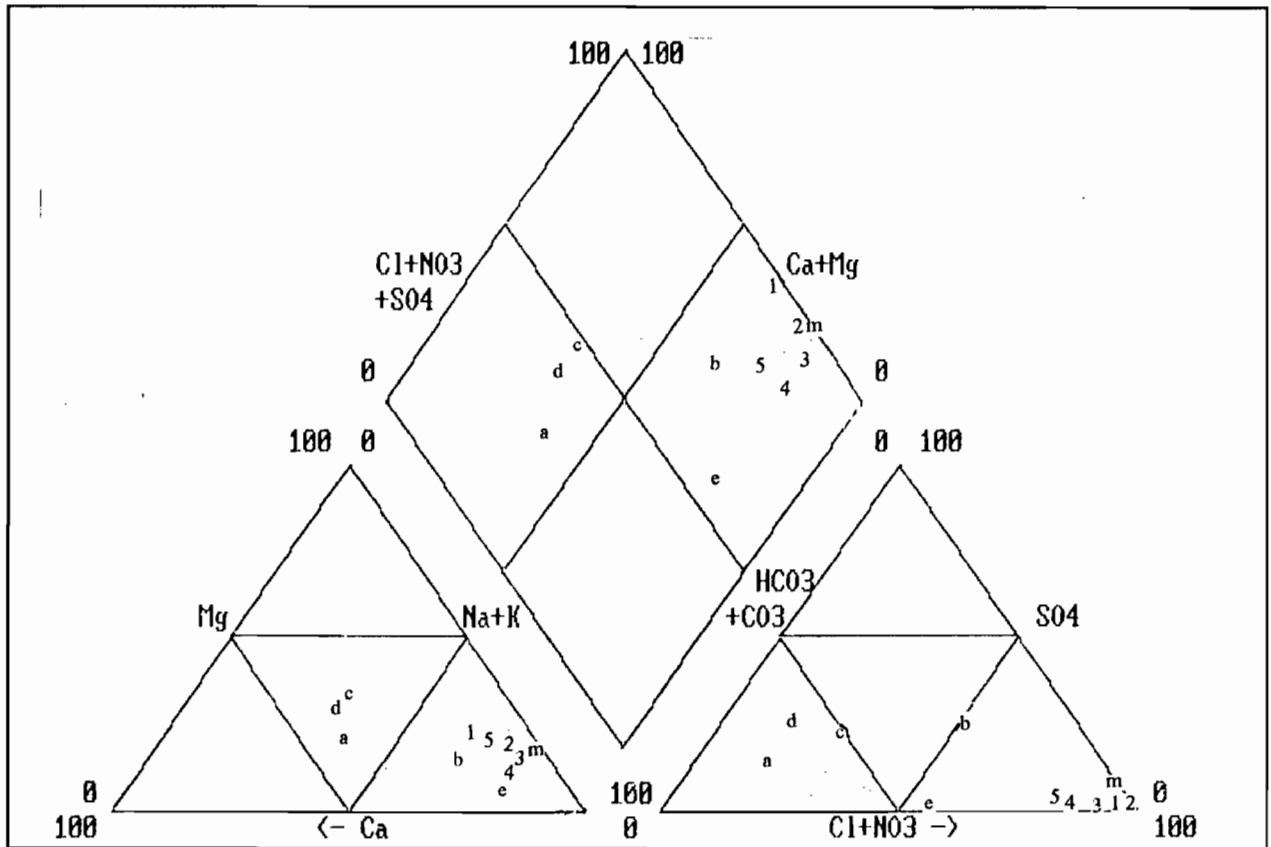


FIG. d-6: Faciès chimique des eaux souterraines de la moyenne vallée et de l'eau de mer

environs de KAEDI: a: GA310, b: GB970, c: GB980, d: GB995, e: GB8996  
 environs de PODOR: 1: GA239, 2: GA237, 3: GA235, 4: GA234, 5: GA236  
 eau de mer: m

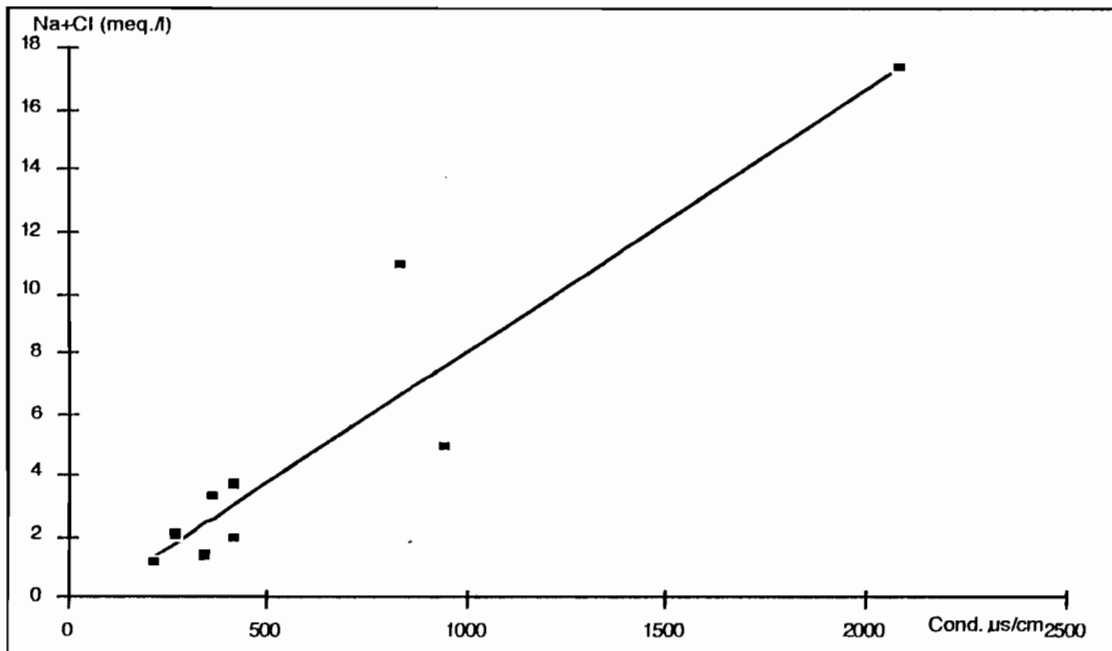


FIG. d-7: Relation teneur en NaCl et conductivité des eaux souterraines.

La ressemblance chimique entre les eaux de la nappe dans la zone de Kaédi avec celles de Podor (les eaux de Podor sont reconnues comme étant issues de la transgression marine du nouakchottien) fait penser à une origine également marine pour les premières.

Après un tel constat il est nécessaire de se poser la question à savoir: quelle est la provenance de cette pollution saline des eaux de la nappe aux environs de Kaédi. Trois hypothèses pour expliquer l'origine de la salinité:

- les pollutions artificielles
- la nature chimique de l'aquifère
- une transgression marine

Passons en revue ces trois hypothèses:

#### 2-2-1. Les pollutions artificielles

Les aménagements agricoles dans la zone ne semblent pas être la cause, car le piézomètre DA257 situé dans le Périmètre Pilote du Gorgol (P.P.G.) a une conductivité de  $171 \text{ ms.cm}^{-1}$  alors que la moyenne est  $250 \text{ ms.cm}^{-1}$ . La localisation, de l'impact en une zone, exclut l'hypothèse des polluants artificiels, sinon le même phénomène se serait produit ailleurs, dans la vallée où les mêmes conditions existent, ce qui n'est pas le cas.

#### 2-2-2. La nature chimique de l'aquifère

Les coupes géologiques des différents sondages montrent des formations sédimentaires détritiques (sableuses et sablo-argileuses) mais pas de formations salifères pouvant être à l'origine de la salinité de la nappe.

#### 2-2-3. La transgression nouakchottienne

Au Sénégal La transgression nouakchottienne (fig. d-8), la dernière importante, décrite par différents auteurs, a connu son maximum il y a 5.500 ans BP. A cette date le niveau de la mer était à la cote +3 m. GUIEU (1975) et elle atteignait Boghé à plus de 250 km de la côte actuelle. A cette limite la transgression nouakchottienne ne pourrait pas être responsable de la pollution des eaux souterraines aux environs de Kaédi en amont de la limite de transgression.

### Discussion

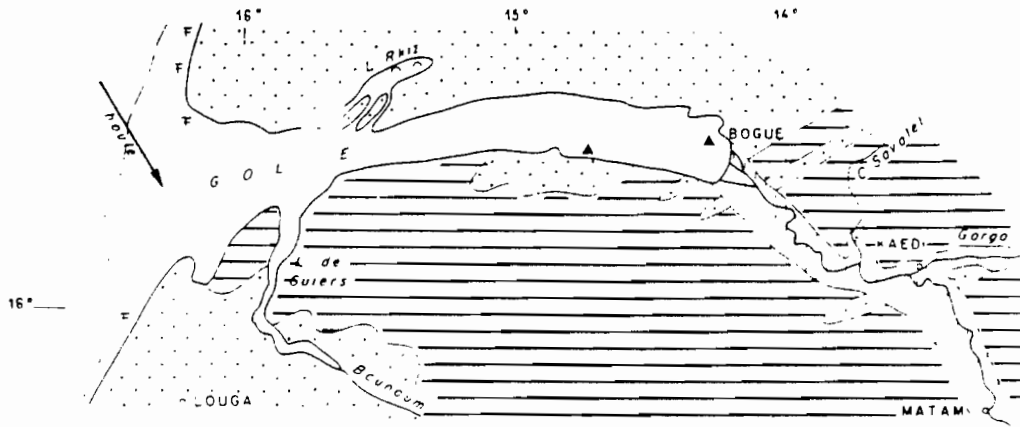
En 1973, Illy se demandait déjà si la résistivité relativement basse des alluvions, au niveau du profil géophysique de Saldé, ne correspondait pas à une salure élevée des eaux souterraines. Les eaux salées aux environs de Kaédi (100 km en amont de Boghé) semblent bien correspondre à celles décrites par Illy à Saldé. Ces eaux salées sont alors hors de la limite de la dernière transgression Nouakchottienne.

Il se pose alors la question de savoir ce qui est à l'origine de cette pollution des eaux souterraines.

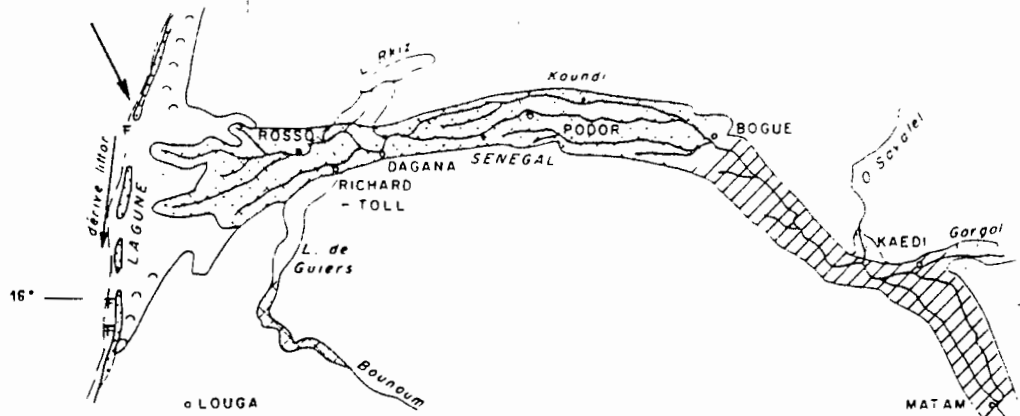
La transgression nouakchottienne a atteint la cote +3 m, on note actuellement un seuil de 5m (fig.b-1) du lit du fleuve à Orénata en aval Kaédi qui aurait pu empêcher la transgression d'atteindre Kaédi. Il est nécessaire de situer l'âge et la nature lithologique de ce seuil en mettant l'accent sur ses capacités de diffusion.

Faute d'arguments valables pour expliquer les causes de cette salinité, il serait logique d'admettre que la transgression du Nouakchottien ait pu atteindre Kaédi par des moyens qu'il faut chercher à expliquer.

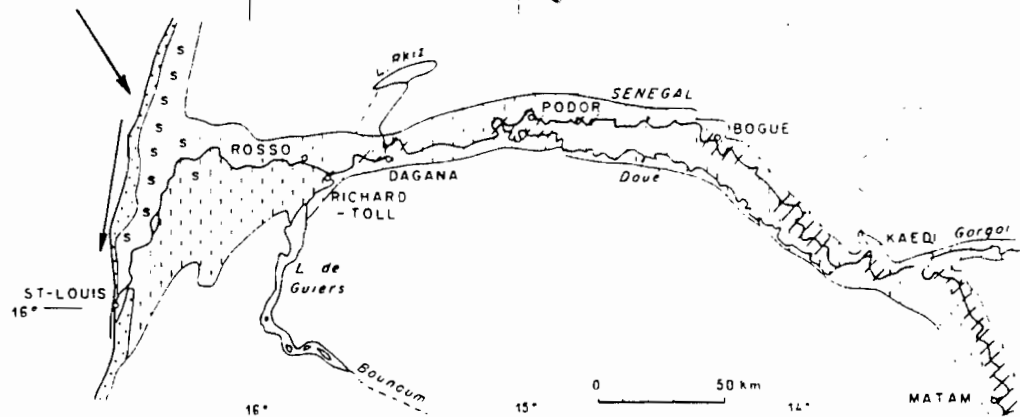
a - Maximum de la transgression : Nouakchottien 5500 ans BP



b - Formation du delta : Situation vers 2500 ans BP



c - Epoque subactuelle et actuelle



	Glacis généralement cuirassés		Décantation d'argile
	Dunes rouges		Levées fluviales
	Plage fossilifère		Dépôts fluvio-deltaïques
	Faune lagunaire abondante		Cordons littoraux
	Pollens de mangrove		Sebkha
	Littoral actuel		Vallée morte

FIG. d-8: EVOLUTION DE LA BASSE ET MOYENNE VALLEE DU SENEGAL depuis la dernière transgression ( d'après Michel, 1976)

### 3. CONTRIBUTION DES ISOTOPES A L'ETUDE DES ECHANGES HYDRIQUES DANS LA VALLEE

On appelle isotopes les atomes d'un même élément chimique ayant un même numéro atomique (Z) et une masse atomique (A) différente. Ils ont un même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent.

Ils ont été définis (PAYNE, 1971 *in* A. Faye, 1983) comme suit: " On peut définir les isotopes du milieu comme ceux radioactifs ou non que l'on trouve dans l'environnement à différentes concentrations et sur lesquelles le chercheur ne peut agir directement. Les isotopes du milieu couramment utilisés sont le deutérium et l'oxygène-18 (Stables); le tritium et le carbone-14 (Radioactifs). Les trois premiers entrent dans la composition de la molécule d'eau et constituent les seuls traceurs réels dont on dispose. Tous les autres traceurs sont présents à l'état de solution donc sujets aux pertes par précipitations, adsorption et échange".

En hydrogéologie, on utilise généralement deux types d'isotopes du milieu, les isotopes stables et les isotopes radioactifs.

L'étude des isotopes stables permet de déterminer l'origine des eaux souterraines (pluies, apports rivières, ou lacs...) et aussi l'origine des sels dissous. la grandeur utilisée est la composition isotopique delta ( $\delta$ ) qui traduit les variations relatives de concentration en isotopes dans le temps Fontes, (1986) .

Les isotopes radioactifs permettent, quant à eux, l'évaluation du taux de renouvellement et des vitesses de circulation des eaux souterraines Fontes, (1986).

#### 3 - 1 . TRAVAUX ANTERIEURS

##### Teneurs isotopiques des eaux souterraines et de pluies

Dans la moyenne vallée les analyses isotopiques connues sont celles entreprises par ILLY, (1972).

Les résultats d'analyses isotopiques, des prélèvements d'échantillons d'eaux souterraines et de pluies par ILLY en 1972 dans la vallée du fleuve Sénégal, sont reportés au (tabl. d-1).

En 1981 une étude a été entreprise au début de la saison des pluies et s'est poursuivie au cours des campagnes d'hivernages en 1982, 1983 et 1984; TRAVI et *al.*, (1986). Lors de la première campagne, les précipitations journalières ont été prélevées sur huit stations réparties sur l'ensemble du Sénégal dont deux dans la vallée du Sénégal; celle de Bakel à l'Est et celle de Richard-Toll au Nord.

Avant 1981, il n'existait que très peu de données publiées sur la composition isotopique et chimique des eaux de pluie au Sénégal.

Les études engagées sur les eaux souterraines souffraient de cette méconnaissance du "signal d'entrée" isotopique et chimique.

Les isotopes deutérium et oxygène-18 ont été dosés dans les échantillons de juillet et d'août et les résultats comparés à la droite météorique mondiale (M.W.L.) La droite de corrélation obtenue a pour équation:

Equation de la droite météorique mondiale:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$



Equation de la droite des eaux de pluies au Sénégal Avec un facteur de corrélation = 0.972

$$\delta^2\text{H} = 7.93 \delta^{18}\text{O} + 10.09$$

Cette droite, proche de celle des eaux météoriques mondiales a permis à ses auteurs de retenir les conclusions suivantes:

TABL. d-1: Résultats des analyses isotopiques (ILLY, 1973)

N° échant.	région	date prélèv.	nappe	T.U.	D%	O18%
pluie	Guédé	Août/Oct.		41,8	-8	-2,05
K3	Kanel	14/07/72	nap. phréa.al.	33,8	-29,5	-4,13
K4	Kanel	10/11/72	nap. phréa.al.	56,3	-38,7	-5,34
K6	Kanel	14/07/72	nap. phréa.al.	196	-36,2	-5,04
K3s	Kanel	14/07/72	nap.prof.al.	2,4	-33,4	-4,57
F1	Kanel	10/06/72	nap.prof.al.	4,4	-33,7	-4,69
F3	Kanel	14/06/72	nap.maast.	1,6	-31,9	-4,38
F4	Kanel	14/07/72	nap.maast.	1	-39,7	-5,71
A7	Matam	10/11/72	nap.phréa.	71,4	-41,7	-6,27
F5	Matam	24/06/72	nap.prof.al.	1,6	-38,2	-5,39
B04	Boghé	12/11/72	nap.phréa.	1,6	-28,3	-3,87
F9	Boghé	12/11/72	nap.prof.al.	5,8	-30,6	-4,15
N10	Nianga	09/11/72	nap.phréa.	11,4	-30	-3,92
N12	Nianga	09/11/72	nap.phréa.	9,7	-31,6	-4,46
N4 S	Nianga	14/07/72	nap.prof.al.	20,3	-25	-3,01
F10	Nianga	09/11/72	nap.prof.al.	6,5	-28,9	-5,63
F12	Nianga	10/09/72	nap.prof.al.	8,1	-31	-4,05

"Au coeur de la saison des pluies, les précipitations n'ont donc pas subi, en cours de chute, d'évaporation dont l'effet aurait été de déplacer les points sous la droite des eaux météoriques. La colonne d'air traversée par la pluie de mousson est donc saturée en eau;

la vapeur qui condense sur l'ensemble du territoire sénégalais en juillet et août a une même origine océanique sans mélange significatif avec d'autres sources possibles et en particulier la vapeur évapotranspirée par la forêt située plus au sud;

aucun effet de continentalité ne peut être associé à l'avancement de la mousson en provenance du golfe de Guinée sur le Sénégal. Les teneurs les plus faibles se rencontrent au sud du pays dans la zone des pluies continues".

En nous basant sur ces conclusions, nous considérons ces eaux comme "signal d'entrée" dans la moyenne vallée pour l'interprétation des résultats d'analyses.

### 3 - 2 . TRAVAUX ENTREPRIS

#### 3 - 2 - 1 . Données de base pour l'interprétation

Ce sont: - Les résultats d'analyses isotopiques ( $^{18}\text{O}$ ;  $^2\text{H}$  et  $^3\text{H}$ ) de prélèvements d'eaux souterraines et d'eaux de pluie que Ily a effectués dans la vallée du Sénégal aux mois de juin à novembre 1972 (tabl. d-1),

- Les résultats d'analyses isotopiques ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) sur des prélèvements d'eaux du fleuve et des eaux souterraines que nous avons effectués dans la moyenne vallée du Sénégal en

1991, dans le cadre du projet EQUÉSEN (tabl. d-2) et sur des prélèvements au Fouta Djallon dans le haut bassin (Saos, 1991), (tabl. d-3)

TABL. d-2: Analyses isotopiques dans la moyenne vallée du Sénégal. (projet EQUÉSEN, 1991)

N° OUV.	Cond μS. cm <sup>-1</sup>	format./crép.	étage	pH	Rep/ IGN	ND/NS :RIP	ND/NS IGN	Prof. crép.	Zone non saturée	Dist. /fl Km	δ <sup>18</sup> O	δ <sup>2</sup> H
					m	m	m	/ sol				
GA340	220	cal.mar.bl	E marin ind.	6,4	16,62	9,58	7,04	49	8,58	0,5	-2,12	-24
GA342	242	sab moy.gros .silt	Q	6,2	16,61	9,55	7,06	15	8,55	0,5	-5,24	-37,4
GA349	274	sab.fin moy brun	Q	6,8	16,06	9,84	6,22	14	8,84	3,25	-5,22	-37,1
GB479	263			6,6	22,08	16,65	5,43	16,7	15,65	8,5	-5,96	-35,5
GA327	141	sab moy brun	Q	6,8	16,03	9,72	6,31	12	8,72	0,25	-2,38	-16,7
GA328	201	sab moy beige	Q	6,4	14,94	9,87	5,07	29	8,87	3	1,98	2,8
GA332	216	silt sabl brun	Q	6,5	13,62	10,39	3,23	15	9,39	6,5	-5,22	-35,1
GA330	106	gres sab cal/moy	E marin inf.	6,1	13,62	10,39	3,23	15	9,39	6,5	-0,02	-7,7
GA335	250	sabl. fin	E marin inf.	7,4	14,4	10,01	4,39	48	9,01	10,5	-4,11	-31,3
GB702	721			6,9	17,87	15,95	1,92	16,23	14,95	16	-4,26	-34,2
GB687	918			7,6		22,4			21,4	19,5	-4,7	-34
KAVIL. FOR.	607	sab peu arg.	Maast.	7,1				110,5		21	-4,28	-31,9
GB681	759			7,4		28,2			27,2	21	-5,76	-35,9
GA313	140	sabgr /gr av qz.	E cont	6,5	12,85	9,62	3,23	49	8,62	0,02 5	-5,46	-39,9
GA315	389	silt sab/brun	Q ind	6,2	12,85	8,55	4,30	10	7,55	0,02 5	-5,07	-36,4
GA317	432	sab f gr silt/arg	Q	7,3	11,86	8,32	3,54	12	7,32	2,5	-5,35	-38,2
GA320	236	marne rose ldv	E marin inf.	6,6	12,04	8,02	4,02	48	7,02	6,5	-5,25	-38,5
GA322	228	silt br sab/arg	Q indif	6,9	12,04	8,00	4,04	14	7	6,5	-5,96	-41
GA325	47	sab fin silt	Maast.	8	11,63	7,67	3,96	48	6,67	14,5	-5,72	-39
GA304	530	cal jaun/brun	E marin inf.	8,46	11,15	11,65	-0,50	39	10,65	5,75	-5,21	-35,3
GA307	280	sab moy gros	Q ind	6,87	12,14	11,87	0,27	15	10,87	5,5	-2,82	-21,1
GA308	270	sab . silt. brun	Q ind	7,24	10,18	8,92	1,26	13	7,92	3	-5,09	-36,7
GA309	620	marn blanc lait	E mar inf.	7,44	12,44	10,65	1,79	50	9,65	0,14	-4,67	-33
GA310	165	sab gros +quartz	Q	7,21	12,43	10,40	2,03	25	9,4	0,14	-3,76	-26,2
GA312	334	sab moy blanc	Q	7,04	11,64	10,23	1,41	15	9,23	1,5	-4,84	-36,2
GB205	700			7,64		39,6			38,6	15	-5,33	-35,2
GB353	1150			7,66	26,7	41	-14,3	37,6	40	13	-5,36	-36,2
MATAM		eaux de surface									-0,56	-11,8
NGOUI		"									0,05	-8,4
TAOUIE		"									-1,65	-14,8
DRAIN		"									-1,17	-12,2
Taoué/L GUIERS		"									3,57	-14,5
YETI - YON		"									13,4	-53,1

### 3 - 2 - 2 . Interprétation des résultats

Les deux types d'isotopes (stables et radioactif) nous ont servi de support.

- Isotopes stables: ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ )

La figure d-9 montre une nette distinction entre les eaux du haut Bassin (Fouta Djallon) plus homogènes et peu évaporées, de celles de la moyenne vallée du Sénégal hétérogènes et très évaporées.

TABL. d-3: Analyses isotopiques des eaux du haut bassin (Fouta Djallon); Saos, 1991.

N° ECHANT	R1	R2	R3	R4	R5	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R20
$^{18}\text{O}$	-4.15	-5.06	-5.45	-4.82	-4.78	-4.29	-5.08	-4.75	-4.76	-4.93	-4.97	-4.48	-5.78
$^2\text{H}$	-24.0	-29.1	-31.8	-39.9	-31.7	-24.0	-29.5	-28.4	-29.7	-30.2	-32.2	-29.6	-36.0

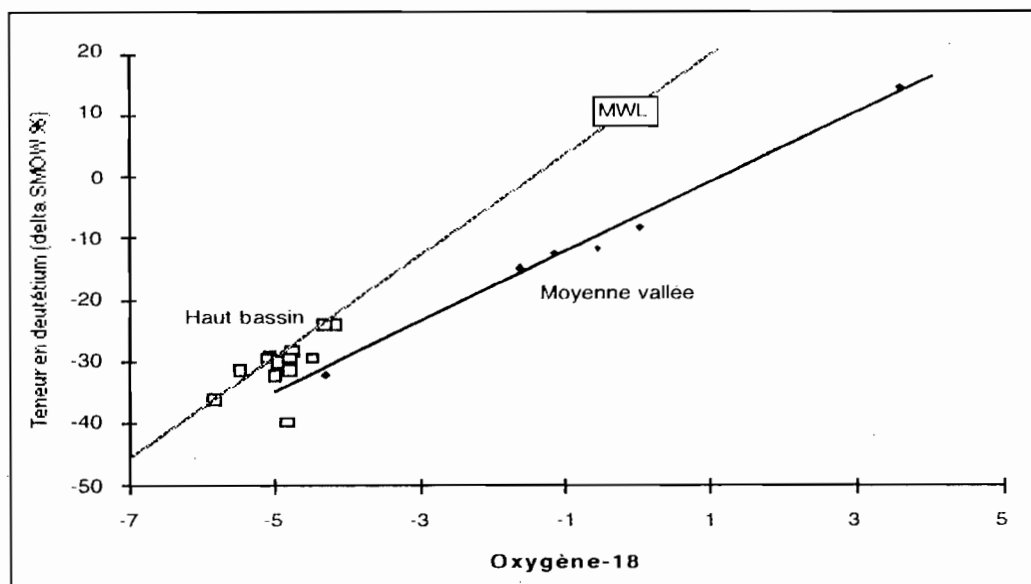


FIG. d-9: Relation Oxygène-18 / Deutérium des eaux de surface

La comparaison du graphique de relation  $^{18}\text{O} / ^2\text{H}$  des eaux de surface et souterraines de la vallée du fleuve Sénégal (prélèvements d'Illy 1972, et celles d'EQUESEN 1991), avec la droite météorique mondiale et la droite du "signal d'entrée" au Sénégal (fig. d-10) permet de constater:

- une nette distinction entre les eaux de surface de celles souterraines, les premières sont nettement plus évaporées,
- la grande majorité des échantillons d'eaux souterraines correspondent à des eaux évaporées sauf trois: le GB479, le GB681 et le F10,
- la présence d'eaux non évaporées dans la nappe consolide le caractère "non évaporé" déjà évoqué du "signal d'entrée" au Sénégal d'une part, et d'autre part elle montre qu'à ces endroits l'infiltration de ce signal (pluies efficaces) s'y effectue avant de subir un phénomène évaporatoire. Ces endroits correspondent à des zones de recharge de la nappe par les pluies efficaces.

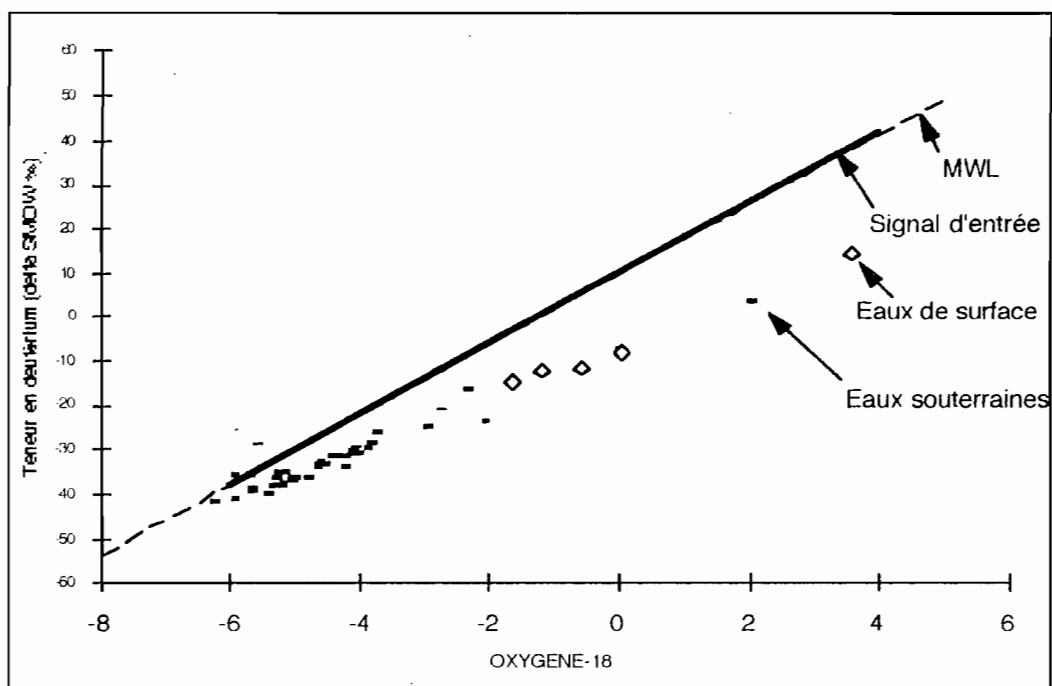


FIG. d-10: Relation oxygène-18 / deutérium dans la vallée du Sénégal

Les eaux souterraines de la moyenne vallée s'identifient plus à celles du haut bassin qu'à celles de la moyenne vallée du fleuve Sénégal (fig. d-11).

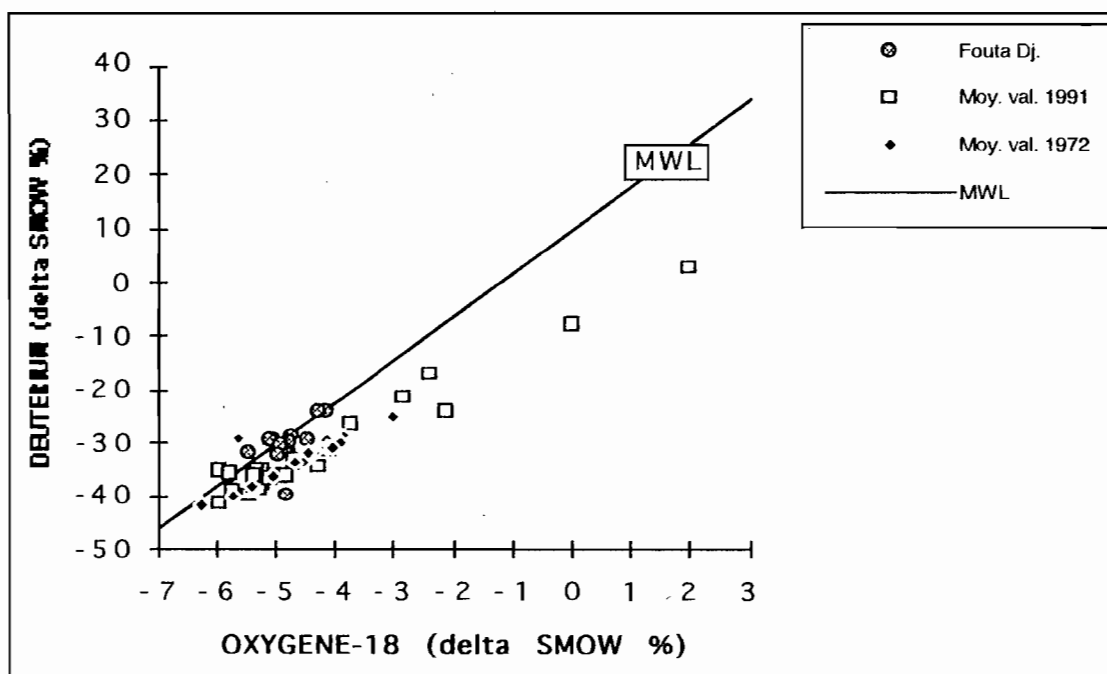


FIG. d-11: Relation oxygène-18 /deutérium des eaux eaux souterraines.

- isotope radioactif: ( $^3\text{H}$ )

La méthode de détermination de l'état évolutif des eaux météoriques dans la vallée en tenant compte de l'effet "piston flow" est donnée (an.-16)

C'est à ces valeurs corrigées de teneur en tritium que nous allons comparer celles des eaux souterraines de la vallée.

TABL. d-4: Teneurs en tritium et la profondeur

n°échant.	nappe	U.T.	Prof.(m)
F4	nap.maast.	1	46.5
F5	nap.maast.	1.6	42
F3	nap.maast.	1.6	40
F1	nap.prof.al.	4.4	37
F12	nap.prof.al.	8.1	35
F10	nap.prof.al.	6.5	31.6
K3 bis	nap.prof.al.	2.4	19
N4 S	nap.prof.al.	20.3	15
F9	nap.prof.al.	5.8	13.33
K3	nap. phrea.al.	33.8	7
A7	nap.phrea.	71.4	7
K4	nap. phrea.al.	56.3	7
N12	nap.phrea.	9.7	7
K6	nap. phrea.al.	196	7
BO4	nap.phrea.	1.6	6
N10	nap.phrea.	11.4	6

- la teneur en tritium des eaux souterraines varie en fonction inverse avec la profondeur de prélèvement (tabl. d-4). Autrement dit la teneur en tritium diminue quand la profondeur augmente (fig. d-12).

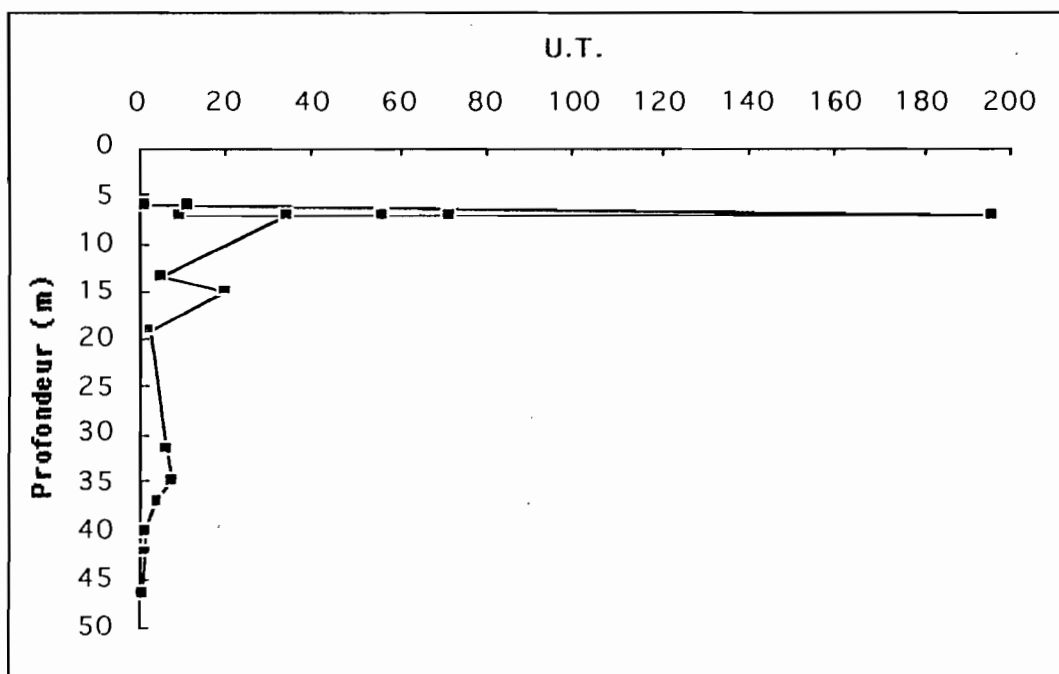


FIG. d-12: Variation de la teneur en tritium des eaux souterraines avec la profondeur.

- Les eaux des nappes phréatiques, sauf celles du piézomètre BO4, ont des teneurs en tritium qui varient de 11 à 196 UT caractéristiques de celles des eaux rechargées après le début des essais nucléaires (1953), donc des eaux récentes.

- C'est à Kanel que l'on observe, dans la nappe, les teneurs les plus élevées en tritium, il pourrait s'agir d'une zone de meilleure recharge.

- Alors que les faibles teneurs en tritium de la nappe phréatique à Boghé et Nianga (BO4 et N12 respectivement 1.6 et 9.6 UT) correspondent à des zones de mauvaise recharge. Il s'agit de nappes semi-captives et captives.

- Les eaux des nappes profondes alluviales, sauf celle du piézomètre N4S, accusent des teneurs comprises entre 2 et 9 UT. Celles du Maastrichtien ont des teneurs comprises entre 1 et 2 unité tritium (UT) ce sont des eaux anciennes (fig. d-13).

Toutes ces nappes ont été rechargées avant les essais nucléaires, c'est à dire avant 1953. Leur contamination serait due à un échange hydrique avec la nappe phréatique qui, nous avons vu, est susceptible d'être alimentée aussi bien par les eaux de pluies que par celles du fleuve.

Quant à la teneur élevée de la nappe profonde semi-captive du piézomètre N4S (20.9 UT) qui correspond à celle captée par le piézomètre GA222 de l'OMVS, elle pourrait trouver son explication, par une alimentation, par drainance descendante de la nappe supérieure à travers la formation semi-perméable qui les sépare.

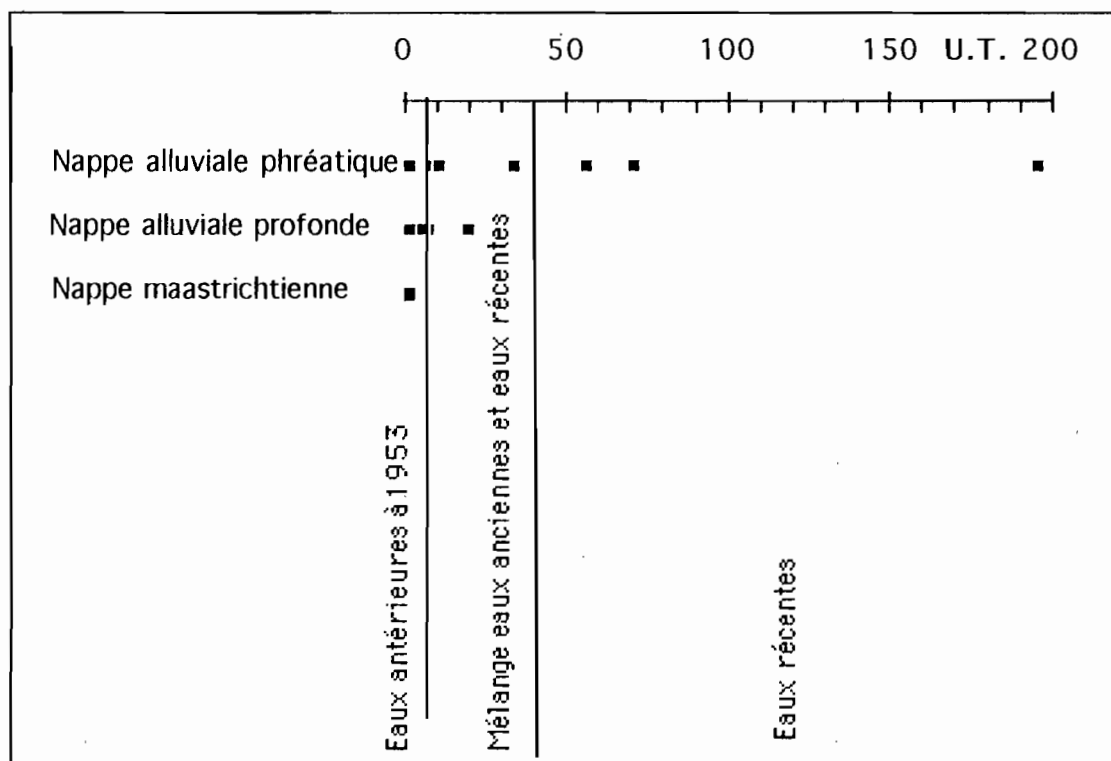


FIG. d-13: Classifications des eaux des nappes par leur teneur en Tritium

## Conclusion

Les eaux de pluies de la moyenne vallée très proches de celles de la droite météorique mondiale, correspondent à des eaux non évaporées.

Quant aux eaux souterraines, la majorité correspond à des eaux évaporées. Tout de même à certains endroits dits zones de recharge, notamment en bordure de la vallée (Kanel et Thilogne), on obtient des infiltrations d'eaux de pluies non évaporées.

Les nappes alluviales de la vallée se rechargent essentiellement à partir des cours d'eaux (eaux évaporées) et très peu à partir des eaux de pluies (eaux non évaporées).

Les teneurs élevées de tritium dans les nappes alluviales sont le témoignage d'alimentation, par les eaux de pluies postérieures à 1953, elles correspondent à des eaux de mélange.

L'existence d'un gradient de concentration décroissant de la teneur en tritium en fonction de la profondeur de la nappe, montre une contamination des eaux qui s'effectue de la surface du sol vers l'intérieur de la terre. Les eaux de la nappe maastrichtienne, de très faible teneur en tritium, correspondent à des eaux qui ont plus de 20 ans appelées "eaux anciennes".

# E

RELATIONS PIEZOMETRIQUES ENTRE LES EAUX DE  
SURFACE ET LES EAUX SOUTERRAINES



## 1. LES CARTES PIEZOMETRIQUES DANS LA ZONE MANAEL-SALDE

Les mois de juin et novembre correspondent, en moyenne, respectivement aux périodes de faibles et fortes amplitudes du niveau de la nappe, soit le début et la fin de la saison des pluies.

Les relevés de niveaux piézométriques mensuels de ces mois nous ont servi de support, dans la zone Manaël-Saldé, pour dresser les cartes isopièzes de la nappe alluviale pour les années 1988 et 1989.

### 1 - 1 . DESCRIPTION GENERALE DES CARTES

L'observation des quatre cartes piézométriques (fig. e-1) permet de remarquer:

- que les lignes de courant ne sont pas parallèles à la direction d'écoulement du fleuve;
- une grande ressemblance cartographique du niveau de la nappe pour les quatre mois, un écoulement pluridirectionnel mais de tendance générale SE-NW qui est le sens d'écoulement du fleuve;
- des zones d'influence de la nappe, en dôme et dépressions s'individualisent.

### 1 - 2 . INTERPRETATION DES DIFFERENTES CARTES

Sur les cartes, de l'amont à l'aval, on obtient une décroissance générale du gradient hydraulique de  $10^{-1}$  à  $10^{-6}$ . Le niveau de la nappe s'est relevé de juin 1988 à juin 1989 de près de 1 mètre, ce qui témoigne la recharge.

#### Les dépressions piézométriques

Deux zones de dépressions se distinguent sur les cartes, une au droit du cours d'eau Oued El Garfa sur la rive droite, et l'autre se trouve entre Matam et Kaëdi sur la rive gauche. Celle de la rive droite montre un drainage de la nappe par le marigot Oued El Garfa, ( en général les cours d'eau correspondent à des failles). La coupe géologique de la ligne N°2 (an.9) montre à ce niveau un Eocène à faible profondeur caractérisé par un sédiment de sable grossier.

On peut interpréter la dépression comme étant due au déversement de la nappe alluviale dans l'aquifère éocène plus perméable.

La dépression sur la rive gauche correspond à la coupe de la ligne N°3 (an.10), qui montre une formation calcaire éocène au niveau du sondage Kavel, qui peut être à l'origine de la perte de charge de la nappe alluviale, de la même façon que la première.

#### Le dôme piézométrique

Situé sur la rive droite au droit de la coupe N°3, le dôme piézométrique correspond à une aire d'alimentation importante de la nappe. Cet endroit correspond à une zone d'irrigation agricole. Ce dôme constitue ainsi une illustration de l'impact hydro-agricole sur la nappe.

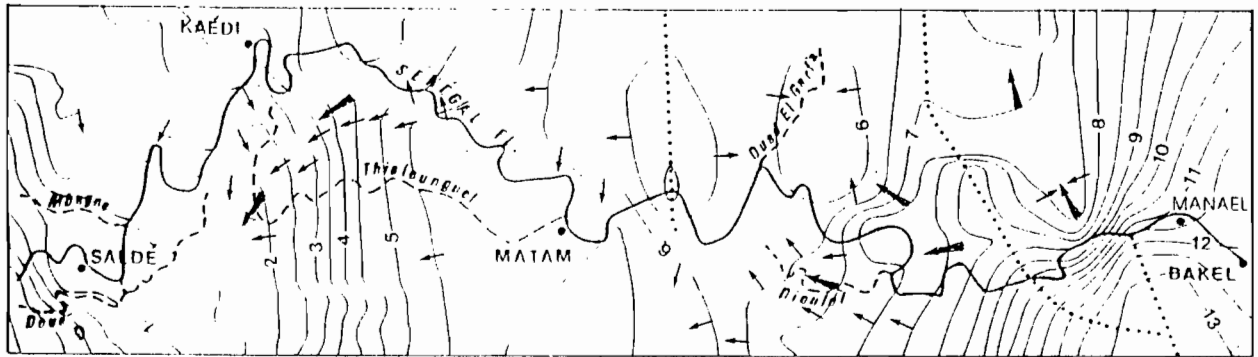
#### Conclusion

L'influence du fleuve sur l'évolution du niveau de la nappe alluviale n'est pas homogène de toute part, ainsi on note des zones préférentielles d'alimentation (dômes) ou de vidange (dépressions) de la nappe .

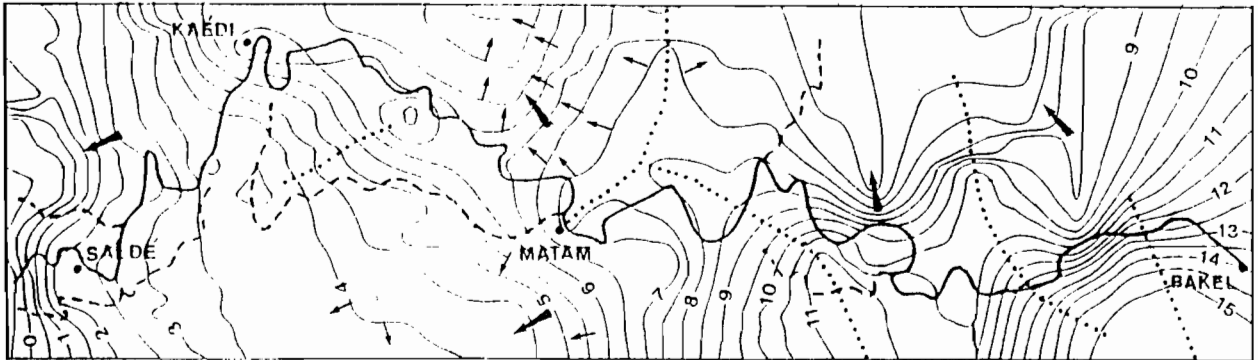
L'influence du fleuve sur la nappe existe bien, elle est partiellement masquée sur les cartes isopièzes par l'influence concomitante des cours d'eau secondaires.

La moyenne vallée ne correspond pas à une unité hydrogéologique homogène, mais à plusieurs, ce qui semble bien refléter la nature lithologique des formations aquifères, qui prises globalement constituent un même et unique aquifère.

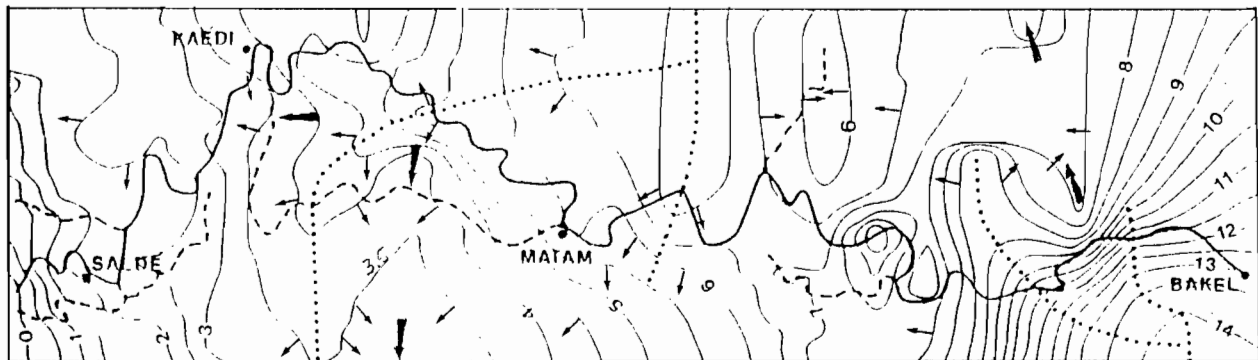
JUIN 1988



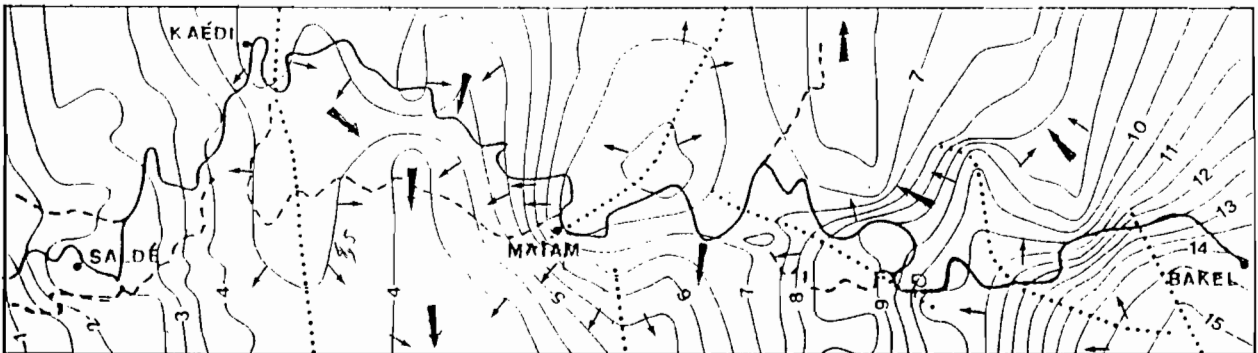
NOVEMBRE 1988



JUIN 1989



NOVEMBRE 1989



..... Ligne de partage des eaux

— Courbe isopièze

➔ Direction de l'écoulement

--- Ligne de courant

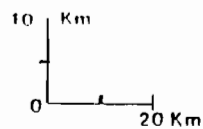


FIG.e-1: CARTES PIEZOMETRIQUES DE LA MOYENNE VALLEE DU SENEGAL.

## 2. L'INFLUENCE DES COURS D'EAU SUR LE NIVEAU DES NAPPES

Il s'agit de comparer l'évolution du plan d'eau du fleuve, avec celle des niveaux piézométriques des différentes nappes dans la vallée.

Les lignes piézométriques N°1; N°2; et N°3, qui ne se situent pas à l'endroit d'une station limnimétrique du fleuve répertoriée, ont été raccordées à des stations simulées. Les données desquelles stations ont été régénérées par le service hydrologique de l'ORSTOM, à partir de celles de la station de Bakel, ceci en fonction de la distance curviligne qui sépare ces stations de celle de Bakel.

La ligne N°1 montre un plan d'eau du fleuve qui fluctue régulièrement au dessus de celui de la nappe (fig. e-2 ). Ceci permet de qualifier cet endroit comme une zone préférentielle d'alimentation de la nappe par le fleuve. Alors qu'à la ligne N° 2 à l'étiage le niveau du fleuve est en dessous de celui de la nappe (fig. e-3), on a un drainage de la nappe par le fleuve.

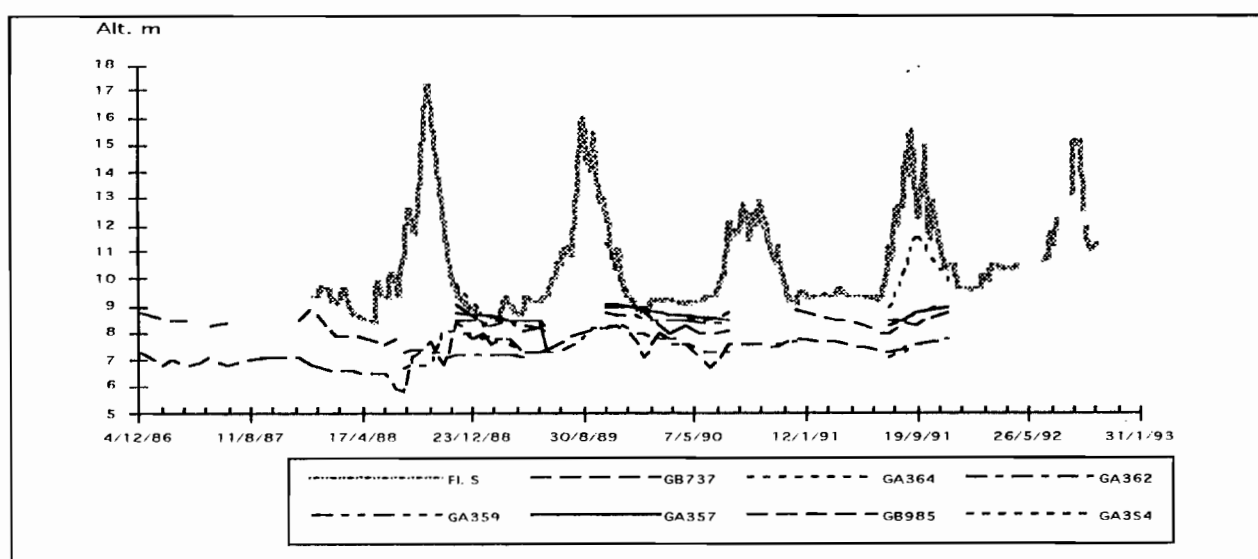


FIG. e-2: Plan d'eau du fleuve et niveau de la nappe (ligne N° 1)

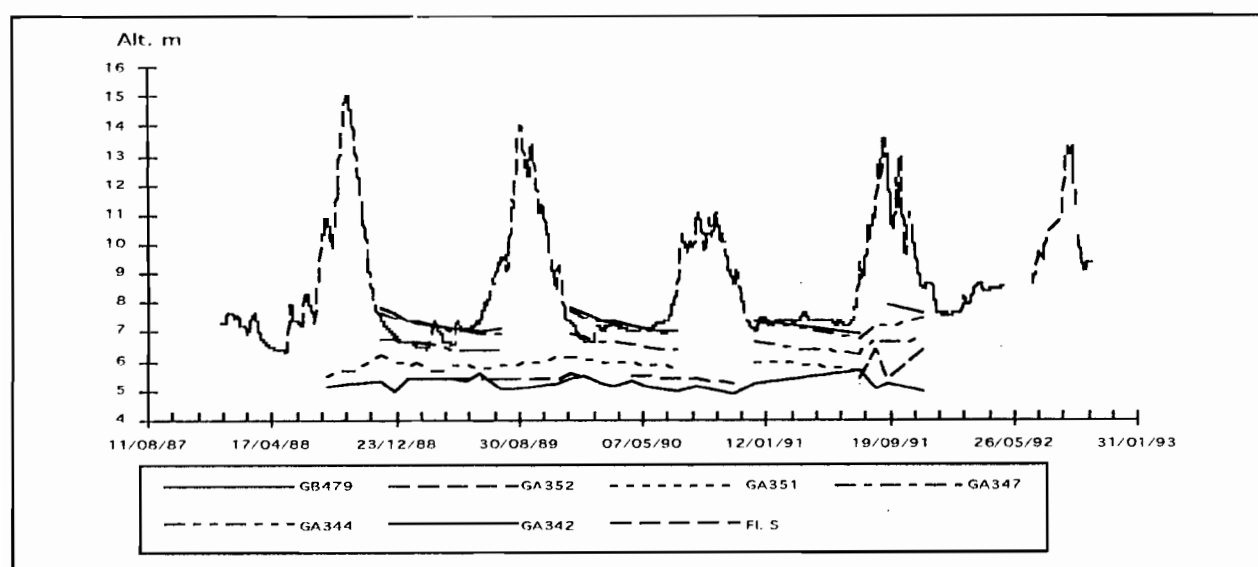


FIG. e-3: Plan d'eau du fleuve et niveau de la nappe (Ligne N°2)

Les variations piézométriques, suivent le cycle hydrologique du fleuve qui connaît son maximum en période hivernale et son minimum en période sèche.

Cette correspondance laisse présager que les eaux du fleuve et celles des nappes sont sous l'influence des apports pluviaux.

En l'absence de tout autre cours d'eau sur la ligne piézométrique, en dehors du fleuve, on observe un gradient hydraulique décroissant du fleuve vers la limite de la vallée. Par contre en présence d'un cours d'eau secondaire (marigot) l'influence de celui-ci se fait sentir sur le niveau piézométrique (fig. e-4).

En plus de l'influence cyclique hydrologique du fleuve sur la nappe, on observe au piézomètre GA310 de la ligne N°5 l'impact des lâchures d'eau au barrage de Manantali, en période d'étiage, sur le niveau de la nappe (fig. e-5).

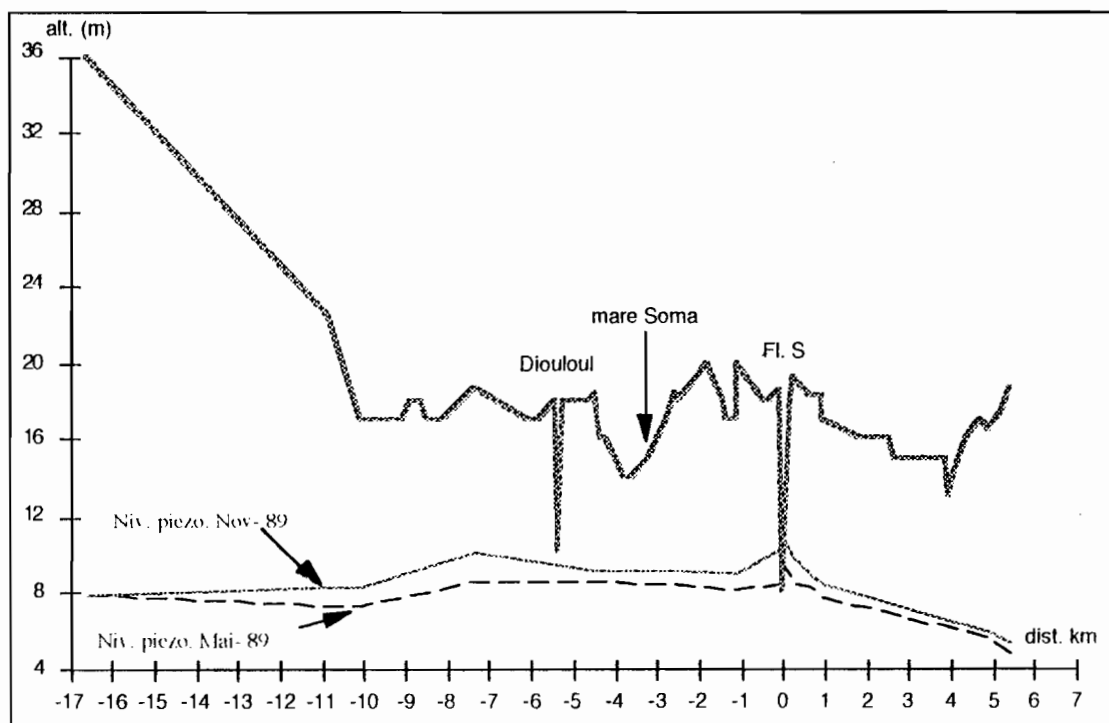


FIG. e-4: Influence des cours sur le niveau de la nappe souterraine: ( Ligne N°1 Semmé)

L'observation de la remontée annuelle des niveaux de base de la nappe et du fleuve de 1987 à 1993 témoigne l'action d'un même phénomène qui entraîne les mêmes causes. En effet cette remontée est consécutive à l'aménagement du barrage de Diama d'une part et d'autre part à l'édification de la digue de protection des eaux du fleuve en rive droite. Ce dernier impact survenu tout récemment (1993) serait d'un apport considérable pour les années à venir, dans l'étude approfondie des relations fleuve/nappe (fig. e-6).

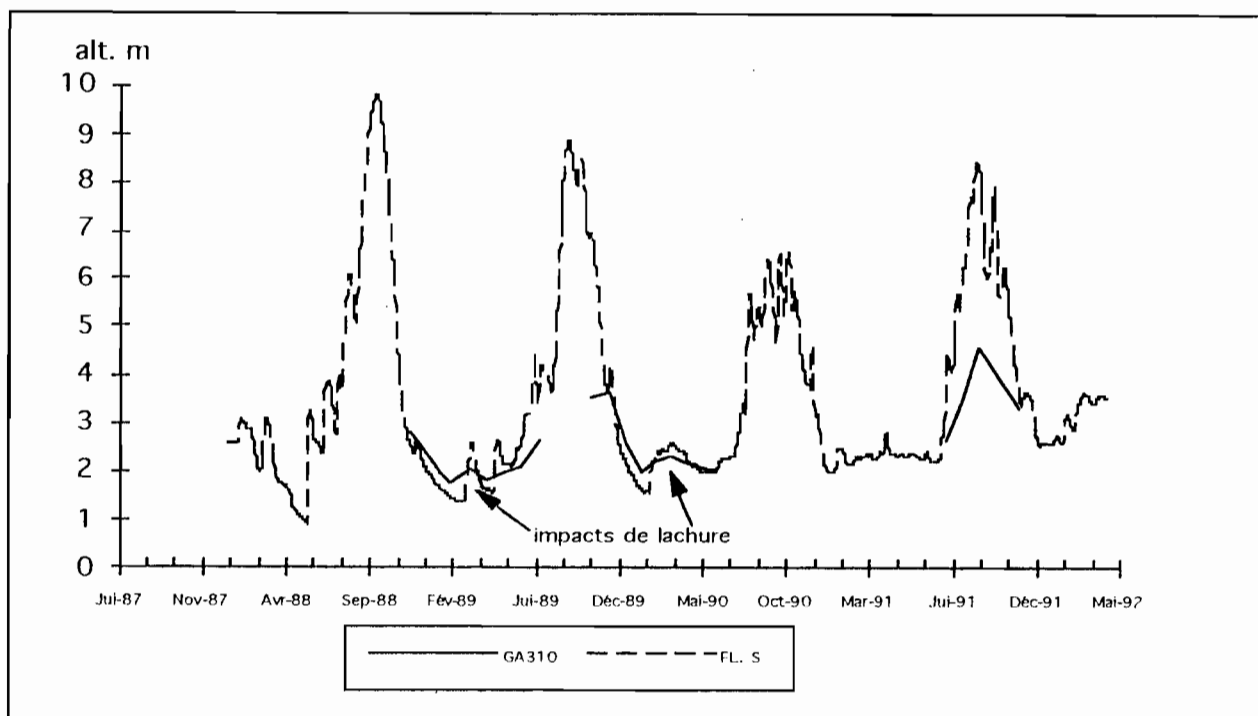


FIG. e-5: Impacts des lâchures du barrage de Manantali sur le niveau du Sénégal et de la nappe souterraine

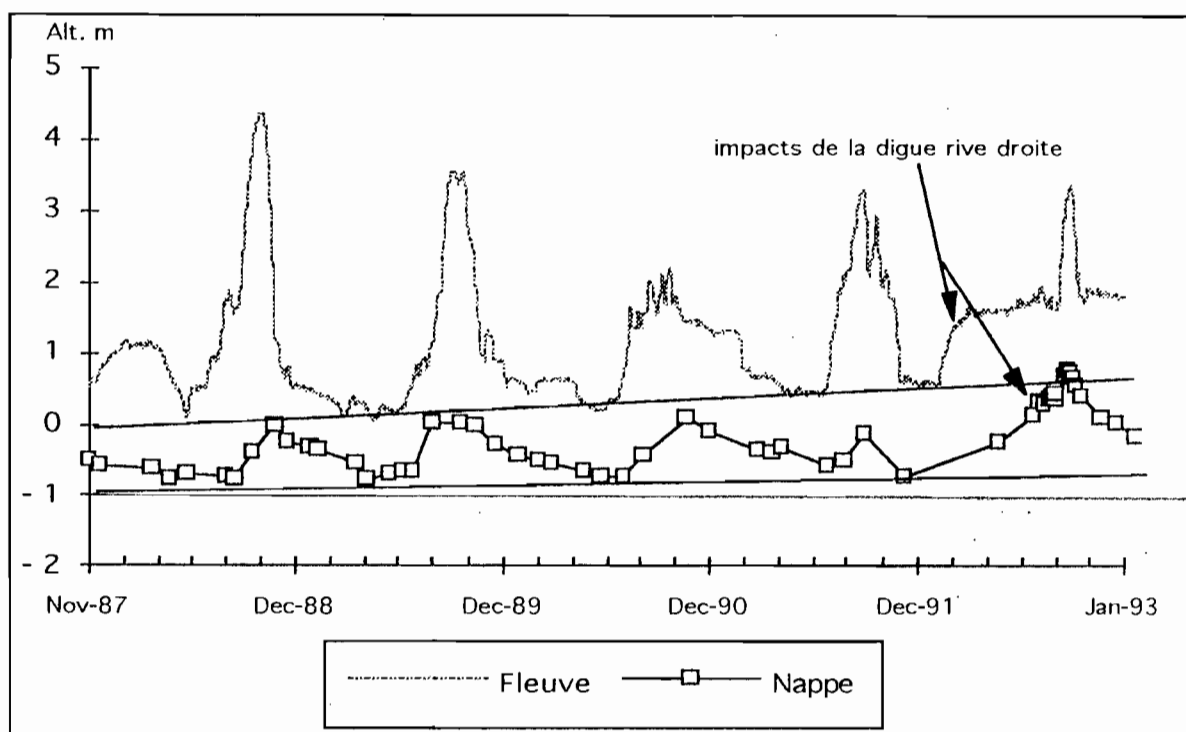


FIG. e-6: Remontée de niveaux de base du fleuve et de la nappe à Podor: Ligne N°6

### 3. FLUCTUATION DE LA NAPPE EN FONCTION LA DISTANCE D'UN PLAN D'EAU ET DE L'ÉPAISSEUR DE LA ZONE NON SATURÉE

La corrélation de l'amplitude de variation du niveau de la nappe (Ampl. m) dans les piézomètres (an.17) en différents points avec la distance (Dist. km) par rapport au cours d'eau le plus proche ( fig. e-7) donne une relation de type exponentielle avec un coefficient de corrélation (r) égal à 0,8. Alors que la corrélation de l'amplitude avec l'épaisseur moyenne de la zone non saturée (ZNS. m), (fig. e-8) ne montre pas de lien entre elles.

On retient de ces deux graphiques que les cours d'eau secondaires influencent le niveau de la nappe au même titre que le fleuve, et que l'amplitude de la zone non saturée n'est pas fonction de la seule distance par rapport au fleuve, mais aussi de celle de tout cours d'eau quel qu'il soit.

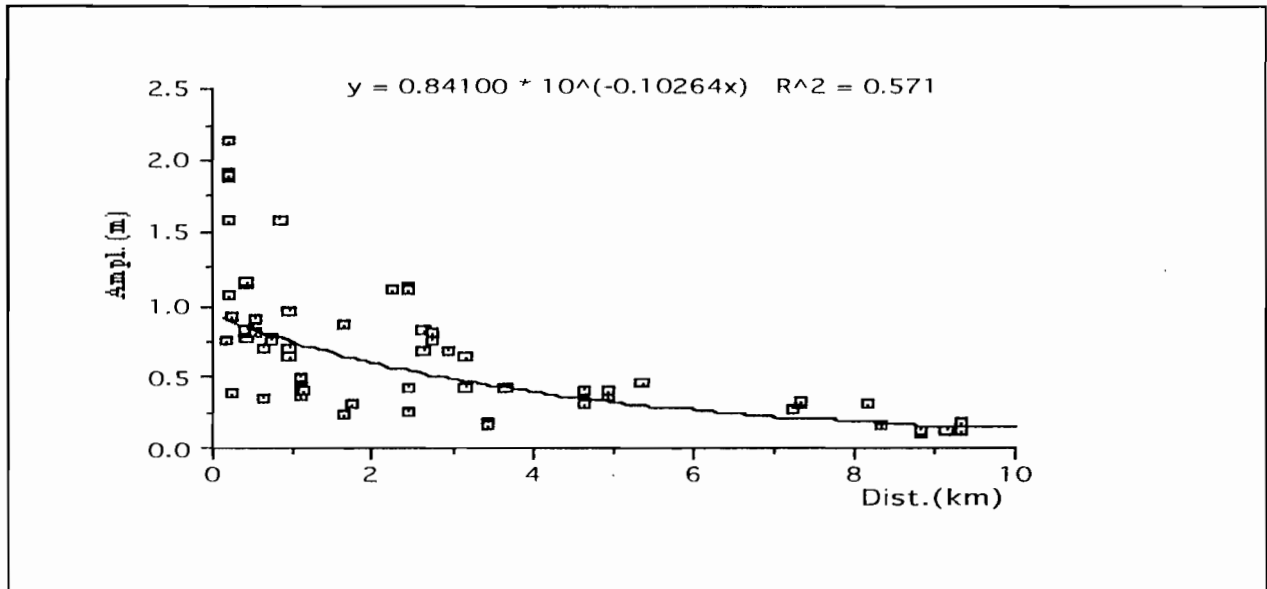


FIG. e-7: Influence des cours d'eau sur l'amplitude de variation du niveau de la nappe.

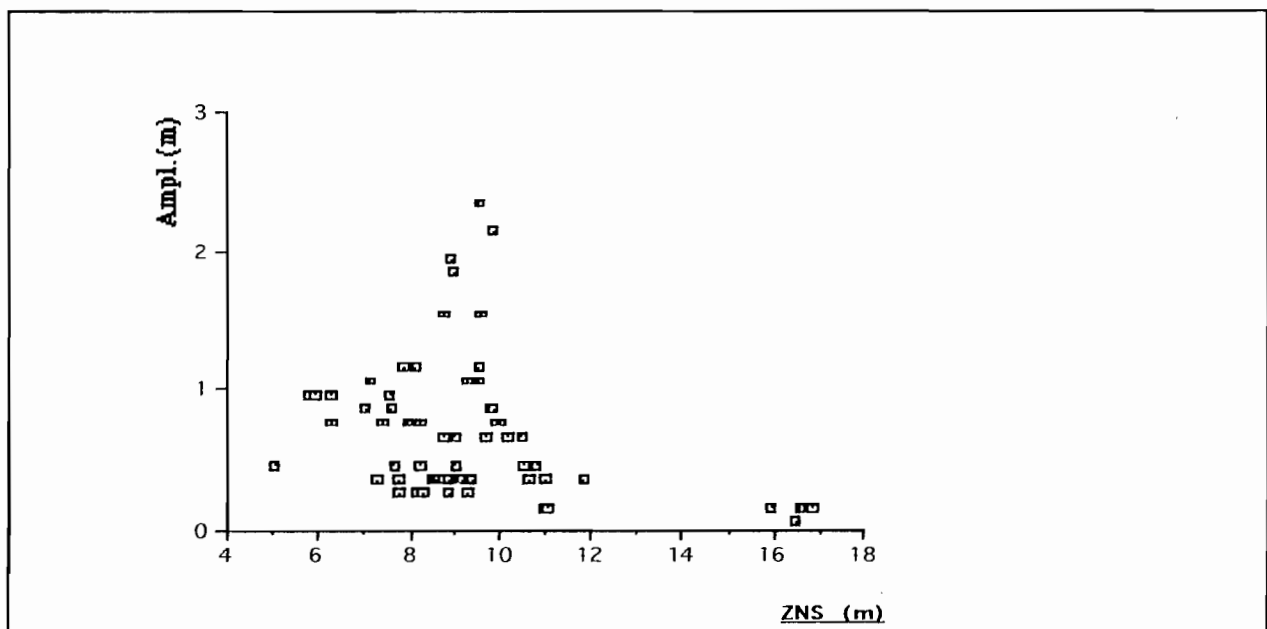


FIG. e-8: Corrélation amplitude piézométrique et épaisseur de la zone non saturée.

## 4. LES EFFETS DE L'IRRIGATION SUR LE NIVEAU DE LA NAPPE

### 4 - 1 . LA BASSE VALLEE

L'influence de l'irrigation sur le niveau de la nappe a déjà été soulignée, dans la basse vallée où les aménagements sont plus réguliers, successivement par:

S.M. DIAO soulignait déjà en 1992, que "l'apport des eaux de surface (fleuve et ses affluents plus les eaux d'irrigation et de pluies) à la nappe se traduisait par une élévation sensible du niveau de la nappe dans les piézomètres implantés dans les zones hydroagricoles".

L'auteur souligne la principale difficulté qui réside dans la quantification de la part d'influence qui revient à chaque type d'alimentation, et note qu'une analyse chimique approfondie des différentes eaux pourrait permettre de lever un coin du voile.

M. DABOIT, (1993) notait que: "le suivi du niveau piézométrique parallèlement à celui de la conductivité électrique permet de mettre en évidence une minéralisation lors de la recharge des eaux de la nappe consécutive, d'une part à la recharge de la nappe par remobilisation des sels, d'autre part en période d'étiage par concentration. Et que l'impact des cultures de contre-saison se traduit par une légère recharge et minéralisation des eaux dues aux mêmes phénomènes.

Par ailleurs, les éléments apportés sous forme d'engrais pour la fertilisation des sols se retrouvent dans les eaux souterraines, surtout dans les zones rizicoles."

Au sortir des conclusions de ces deux études, il est établi que les eaux d'irrigation influent sur les nappes souterraines.

### 4 - 2 . LA MOYENNE VALLEE

Dans la moyenne vallée très peu de piézomètres implantés dans des zones irriguées. Entre Manaël-Saldé on trouve sur la rive gauche un seul piézomètre dans le casier agricole de N'guigilone (L3), et sur la rive droite des piézomètres ont été implantés dans le P.P.G. (Périmètre Pilote du Gorgol) à Kaëdi (L4).

A Podor, nous ne disposons de piézomètres que sur la rive gauche, dans le casier pilote de Nianga (L6).

#### - Périmètre hydroagricole de Nguigilone: ligne n°3

La comparaison des plans d'eau du fleuve et de la nappe aux mois d'avril et octobre montre un niveau élevé de la nappe au droit du piézomètre GA327 sur la ligne n°3 (fig. e-9). Cette élévation résulte d'une alimentation de la nappe par les aménagements hydroagricoles aux voisinages immédiats de ce piézomètre.

#### - Périmètre pilote du Gorgol (PPG): ligne N°4

Sur la ligne piézométrique à la rive droite (fig. e-10) on observe bien l'influence de l'irrigation du périmètre sur le niveau de la nappe, qui se manifeste par un gradient hydraulique croissant, pendant la crue, vers le fleuve.

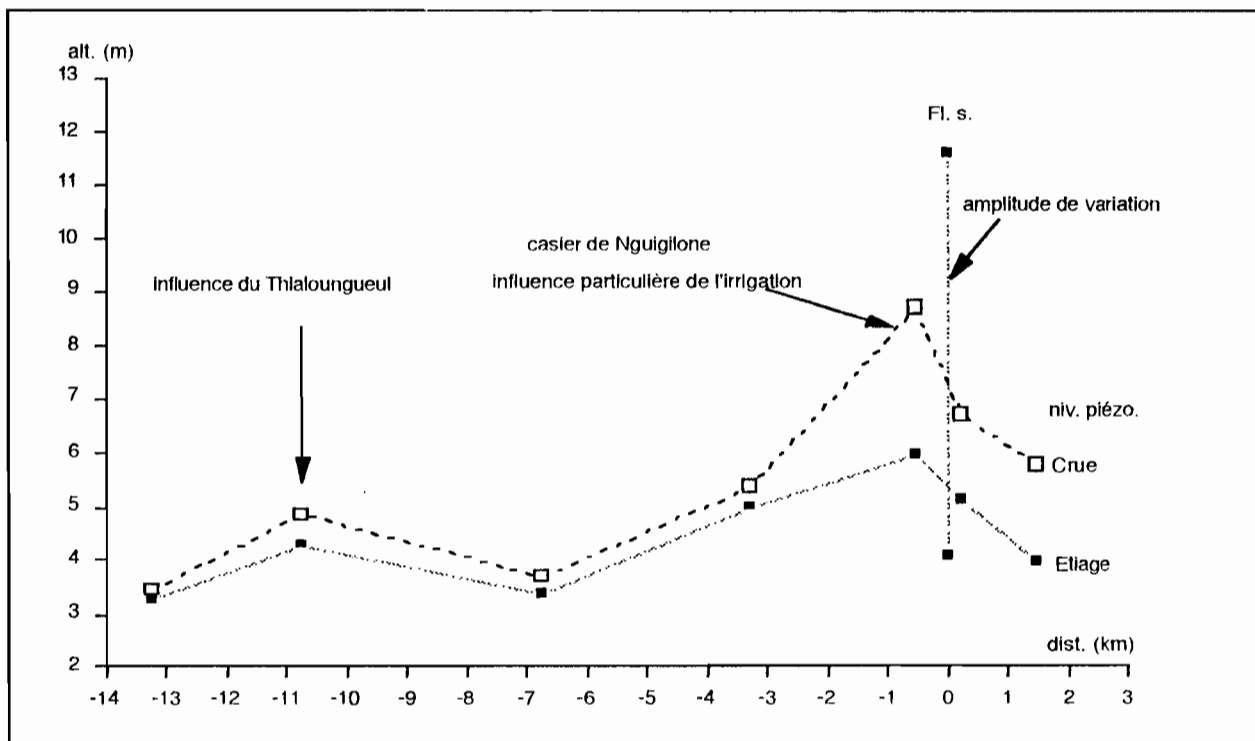


FIG. e-9: Mise en évidence de l'influence de l'irrigation : (ligne N°3 Nguigilone)

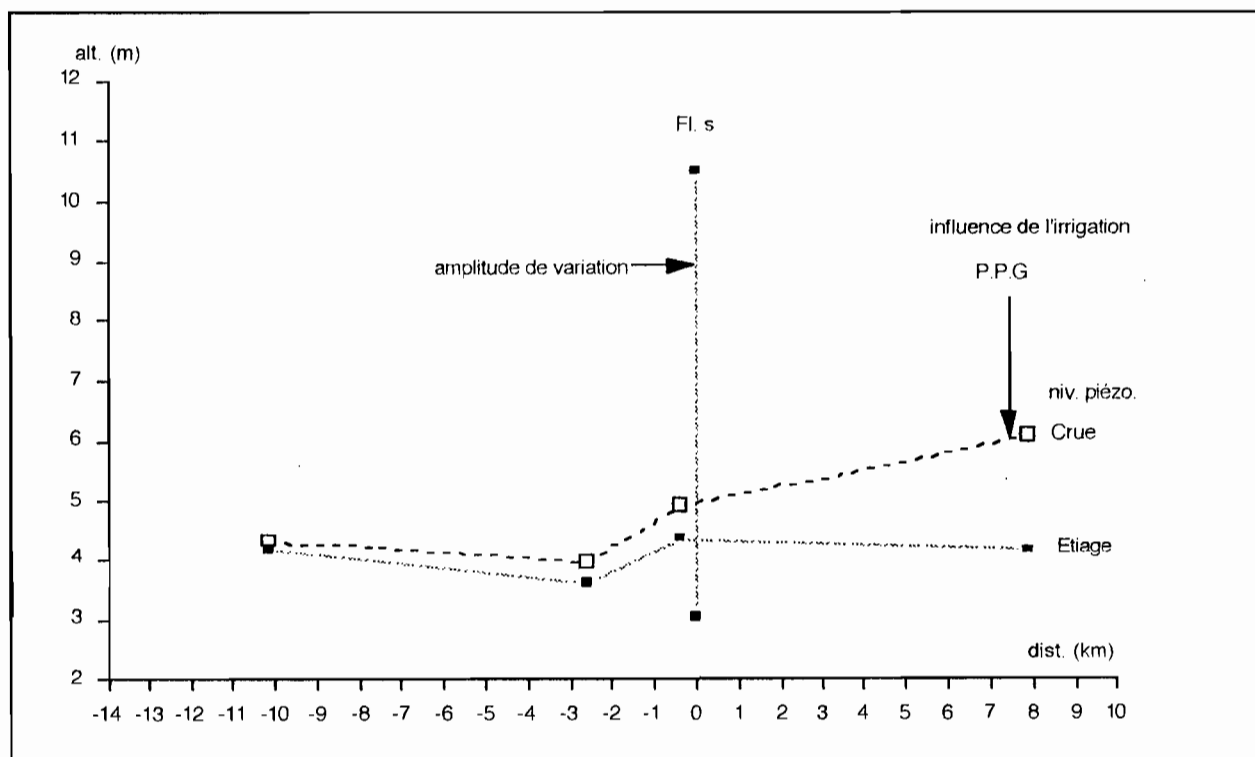


FIG. e-10: Mise en évidence de l'influence de l'irrigation: (ligne N°4 Thilogne)



## 5. LES EFFETS DE LA PLUIE SUR LES EAUX SOUTERRAINES

S'il a été établi dans la vallée que les eaux d'inondation du fleuve et d'irrigation jouent un rôle déterminant dans l'alimentation des nappes, celui des pluies sur ces nappes reste encore non élucidé.

C'est ainsi qu'en dans la zone de Podor il a été entrepris une campagne de relevés piézométriques, au cours de laquelle des mesures régulières journalières ont été opérées pendant l'hivernage 1992. IL n'a pas été possible d'identifier l'action directe de la pluie sur les nappes à Nianga dans la zone de Podor.

Le report sur graphique (fig. e-11) des valeurs journalières de pluies, de niveau de la nappe, du fleuve et du Doué dans la zone de Podor, montre une augmentation de niveau de la nappe de près de 1.5m, mais également du niveau du fleuve et du Doué respectivement de 2 et 4 mètres suite à la tombée le 30 Août 1992 de 120 mm de pluie enregistrés au pluviographe ORSTOM de la cuvette de Nianga et 65.1 mm à la station météorologique national à Podor. En raison des réactions simultanées des différents niveaux, il est difficile de dissocier la part d'influence de la pluie de celle du fleuve, sur la nappe.

Pour parer à une telle difficulté, pour les travaux à venir, il faudrait nécessairement procéder par l'installation d'un pluviographe à coté d'un piézomètre équipé de limnigraphe dans une zone de la vallée peu influencée par les cours d'eau. Pour cela la station de pompage GA345, de la ligne N°2 Kanel, constitue un site de choix (an.-2).

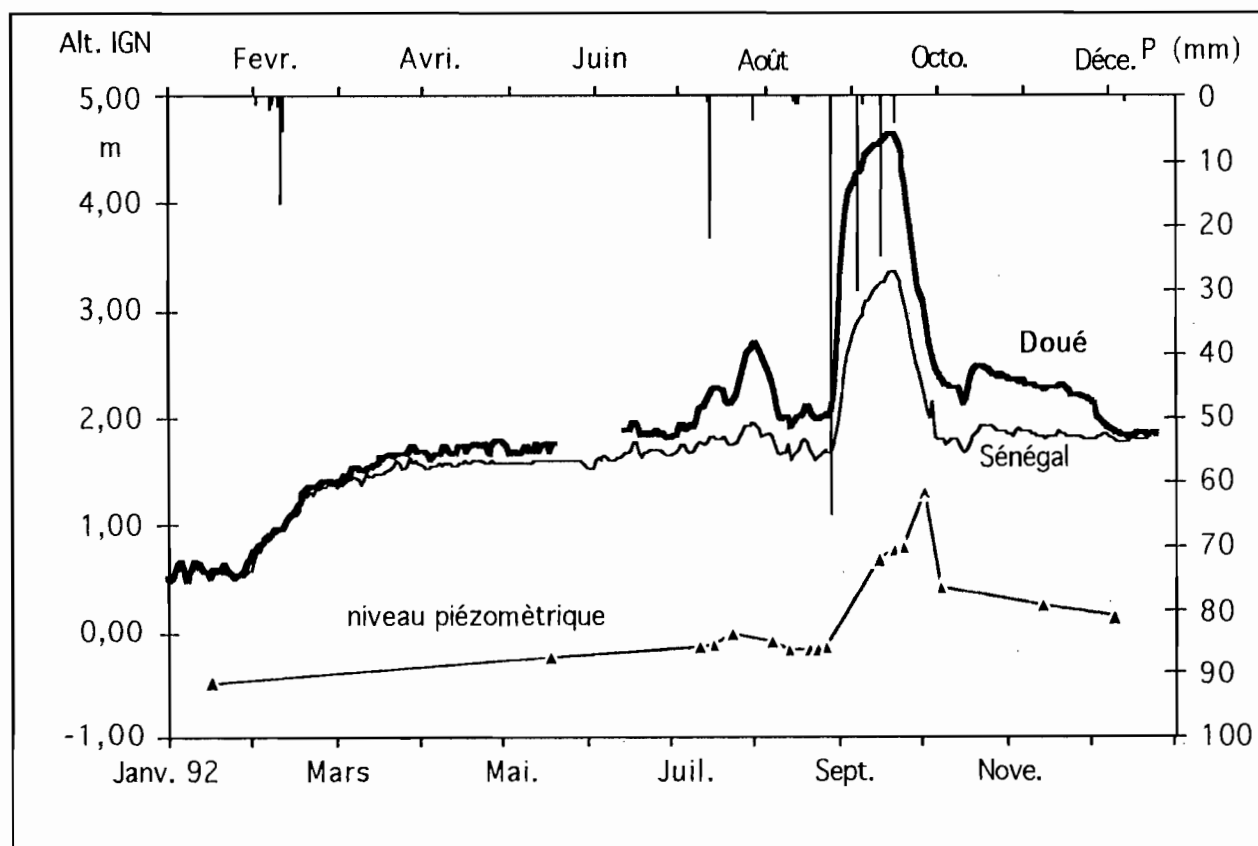


FIG. e-11: Relation entre eaux de surface et eaux souterraines avec les pluies: Zone de Podor Ligne N°6

F

LES ECHANGES HYDRIQUES DANS LA VALLEE DU SENEGAL  
METHODES DE BILAN

## INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents nous avons eu à décrire et identifier les différents aquifères dans la vallée du Sénégal de Bakel à Podor.

Les échanges inter-nappes ont été définis qualitativement, mais aussi celles entre les nappes et les cours d'eau et le rôle des pluies dans la recharge des nappes.

L'impact des eaux de surface sur celles des nappes dans la moyenne vallée a été mise en évidence.

Cela a éclairé la particularité des échanges hydriques dans cette partie de la vallée, sans pour autant permettre la quantification de ces échanges. Cette quantification est l'objet du présent chapitre, dans lequel des enseignements complémentaires ont été tirés à partir de trois méthodes d'approche:

- méthode de J. Albergel, (1991)
- méthode de Flux Net de R. Malou, (1992)
- méthode d'évaluation de la variation annuelle du niveau de la nappe.

### 1. ETATS DES TRAVAUX ANTERIEURS DE BILAN HYDRIQUE

Des tentatives de bilan hydrique ont été entreprises soit dans la vallée soit dans des endroits qui lui sont proches, et parmi celles-ci on note:

#### 1 - 1 ILLY (1972)

L'auteur a calculé un bilan hydrique par quantification des différents paramètres composants le système en apports et pertes comme suit:

##### Les apports

- Fleuve: le module à Bakel est de  $24 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$
- Gorgol:  $540 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$
- Précipitations: moyenne annuelle 410 mm

##### Les pertes en $10^6 \text{ m}^3/\text{an}$

- évaporation dans le lit mineur	420
- évaporation dans le lit majeur	1070
- volume retenu dans le lit majeur	120
- alimentation du lac R'KIZ	120
- prélèvement par la population et le bétail	10
- reconstitution de la réserve en eau du sol	970
- alimentation des nappes	230
- écoulement à l'exutoire	21730

Dans ce bilan l'auteur aboutit à un excédent des apports sur les pertes.

## 1 - 2 DIENG (1987)

L'auteur a calculé le bilan hydrique au pas de temps journalier de 1955 à 1973 sur l'ensemble du bassin sédimentaire. Nous présentons ici les résultats qui se rapportent à la vallée du fleuve Sénégal (tabl.f-1).

Les paramètres physiques CRT, DCRT, FN sont choisis d'une part en fonction de la texture du sol et d'autre part en fonction de l'importance de la végétation. Dans le calcul il a été utilisé une pluie utile annuelle calculée à partir d'une pluie utile journalière (Pmax). Dans le calage de l'infiltration par les modèles de simulation hydrogéologique, on s'aperçoit que le résultat obtenu n'est qu'un ordre de grandeur qui peut malheureusement être parfois loin de la réalité du terrain. L'auteur rattache cette différence dans les résultats à la mauvaise appréciation de l'effet évaporatoire.

Le bilan obtenu fait état d'une absence totale du ruissellement et de l'infiltration contrairement à toute vraisemblance.

TABL. f-1: Résultats du calcul de bilan hydrique (mm/an) de la vallée du Sénégal de 1966 à 1971 (DIENG. 1987)

	Pm/an	Pmax	CRT	DCRT	Rmax	Fn	Pu	Inf.	Ru	ETR
Matam	474.2	60	430	330	530	10	458.5	0	0	458.4
Podor	301.7	70	420	320	520	15	293.4	0	0	293.4
Rd-Toll	275.3	70	350	250	440	15	269.8	0	0	269.8
St-louis	306.8	70	340	260	440	20	305.4	0	0	305.4

DCRT: Valeur minimale en mm du stock en eau dans le sol en deçà de laquelle aucune quantité d'eau n'est disponible. Ce paramètre règle principalement le rôle des premières pluies survenant après une période de sécheresse.

CRT: Valeur moyenne du stock en eau dans le sol. L'évapotranspiration croît en fonction de ce paramètre qui conditionne le bilan hydrique global.

FN: Valeur maximale de l'infiltration sur un pas de temps. Ce paramètre régule le partage de la pluie efficace en ruissellement et infiltration.

## 1 - 3 DIAGANA (1990)

Le bilan hydrique de la basse vallée a été effectué par la méthode de Thornthwaite (pour la période 1984-1988). Dans ce bilan il n'a pas été tenu compte de l'apport d'eau par le fleuve. On observe un déficit hydrique annuel (tabl. f-2). Alors que sur les courbes annuelles de variation du niveau des nappes on observe une alimentation.

TABL. f-2: Résultats moyens du bilan hydrique (1984-1988) dans la basse vallée (DIAGANA,1990)

Station	Précipitation P (mm)	Evapotranspiration ETR (mm)	Déficit D(mm)
Podor	191	248	57
St-Louis	243	278	35

## 1 - 4 GAYE (1990)

L'auteur a fait une évaluation de bilan des nappes, dans la moitié nord du Sénégal, basée sur le principe de calcul du taux d'infiltration des chlorures par deux méthodes (tabl. f-3) d'une part et sur le calcul du taux d'évaporation à partir des isotopes stables d'autre part.

Il souligne que:

- les nappes du nord du Sénégal sont réalimentées par les eaux de pluies,
- le taux de recharge est plus élevé au nord à Louga avec une lame d'eau infiltrée de 80 à 90 mm soit 20 % de la pluie, alors qu'il est de 10 mm soit 2 % de la pluie au sud à Kaolack où les pluies sont plus abondantes. Ce taux évolue en sens inverse de la répartition des pluies,
- la reprise évaporatoire peut s'effectuer jusqu'à 10 m de profondeur dans le sol et rend difficile la quantification de la recharge des nappes qui serait probablement, l'oeuvre d'épisodes pluvieux antérieurs, par effet piston.

Ces résultats montrent toute l'importance qu'il convient d'accorder à la précision des paramètres du bilan puisque la réalité des événements peut bien être contraire aux attentes, comme c'est le cas dans ce bilan.

TABL. f-3: Comparaison des résultats des deux méthodes de calcul du taux d'infiltration par les chlorures (GAYE, 1990).

N° Site	I1: infiltr. Méthode 1	I2: infiltr. Méthode 2
Niague 2 (NG2)	11.1 ± 0.06	13.9 ± 0.08
Niague 3 (NG3)	12.8 ± 0.06	13.9 ± 0.07
Niague 4 (NG4)	50.1 ± 0.32	13.6 ± 0.26
Kaolack 1 (KK1)	9.4 ± 0.06	9.7 ± 0.05
Louga 8 (LG8)	6.7 ± 0.03	0.5 ± 0.02
Louga 9 (LG9)	33.8 ± 0.17	5.9 ± 0.03
Louga 18 (LG18)	80.5 ± 0.45	92.2 ± 0.45

## Remarques

Tous ces bilans ne sont que partiels car n'intégrant pas tous les paramètres du système notamment l'apport des eaux du fleuve dans la moyenne vallée.  
Ceci nous a conduit à l'utilisation de différentes méthodes pour le calcul de ce bilan.

## 2 DOMAINE D'APPLICATION DU BILAN HYDRIQUE

### 2 - 1 CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES

Le motif du choix des trois sites (Bakel, Matam, Podor) est basé d'une part sur leur situation géographique et d'autre part sur la disponibilité des paramètres climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Chaque site correspond à une zone hydrogéologique bien individualisée.

- Le site de Bakel est situé dans une zone à état de surface de type sableux, issu de l'altération du socle. Son réservoir aquifère est de type cristallin plissé constitué surtout de quartzites de schistes et grès. En hydrogéologie il correspond au milieu dit fissuré

- Celui de Matam est situé dans la vallée alluviale, entre Manael et Saldé, la zone étudiée est longue de 220 km et large de 15 km environ soit une surface de 3.300 km<sup>2</sup>,

- Enfin celui de Podor est également situé dans la vallée alluviale, se trouve entre Saldé et Rosso, la zone étudiée est longue de 250 km et large de 20 km environ soit une superficie de 5.000 km<sup>2</sup>,

Les deux zones de la vallée alluviale (Matam et Podor) ont un réservoir aquifère constitué à sa base par des dépôts de sables et de sable-argileux, avec un état de surface de type argileux épais de 5 à 10 m environ.

Dans la zone Matam on observe un aquifère multicouche, alors que dans la zone de Podor on observe des aquifères multicouches.

La surface approximative de la moyenne vallée, ainsi délimitée, entre Manael et Rosso est d'environ 8.300 km<sup>2</sup>.

### 2 - 2 REMARQUES SUR LA NATURE DE LA VALLEE

La couche superficielle argileuse présente des fentes de dessiccation. En début d'hivernage l'infiltration à travers ces fentes entraîne leur fermeture du fait du gonflement de l'argile.

La rapidité avec laquelle se forment les marres pendant la saison des ains ainsi que les fréquentes ruptures de la route nationale (destruction de ponts) montrent l'importance du ruissellement et la résistance des couches superficielles à l'infiltration.

Pendant l'hivernage, le fleuve et l'ensemble de son réseau de collecte se mettent en eau constituent la vallée inondée.

## 3 LES TERMES GENERAUX DU BILAN HYDRIQUE

Faire un bilan d'eau d'un système hydrologique (bassin versant) consiste à déterminer la part des entrées et des sorties d'eau, de ce système au cours d'une durée déterminée selon la formule classique suivante:

$$Pu = RFU + ETR + Lr + Li$$

- Pu = hauteur des précipitations en (mm)
- RFU = réserve du sol facilement utilisable (mm)
- ETR = évapotranspiration réelle en (mm)
- Lr = lame ruisselée (mm)
- Li = lame infiltrée (mm)

Il est à remarquer que dans cette formule, que seul l'apport pluvial est pris en compte comme recette.

Un des problèmes de la détermination de bilan hydrique reste l'estimation de la RFU, et du coefficient de ruissellement.

### 3 - 1 NOTION DE RESERVE HYDRIQUE DU SOL

Après une pluie, la part d'eau qui s'infiltré dans le sol est divisée en deux:

- Une partie retenue dans les manchettes interstitielles par les éléments solides sous l'effet des forces d'adhésion autour des grains et des forces de capillarité dans les interstices, Brochet et *al.* 1968 (fig. f-1)

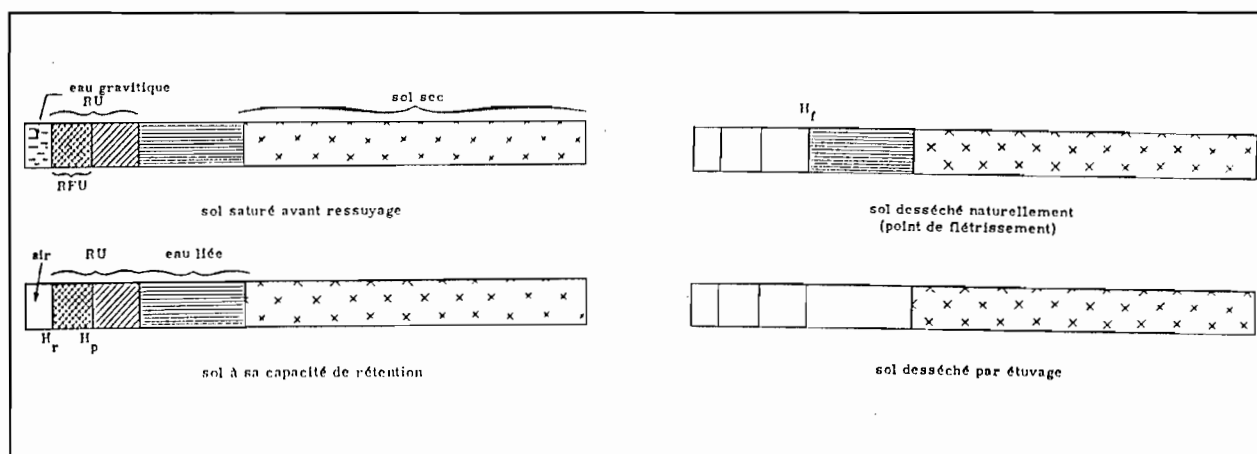


FIG. f-1: La répartition de l'eau dans différents états du sol. (d'après Brochet, 1968)

- L'autre partie, qui traverse le sol et alimente les nappes phréatiques, c'est l'eau gravitaire. C'est cette partie qui, en dehors de toute autre apport entraîne une élévation du niveau piézométrique des nappes.

Dans la fraction retenue dans les interstices du sol, seule une partie peut être extraite par le système racinaire des végétaux. Elle est appelée réserve utile du sol (RU), (fig. f-2).

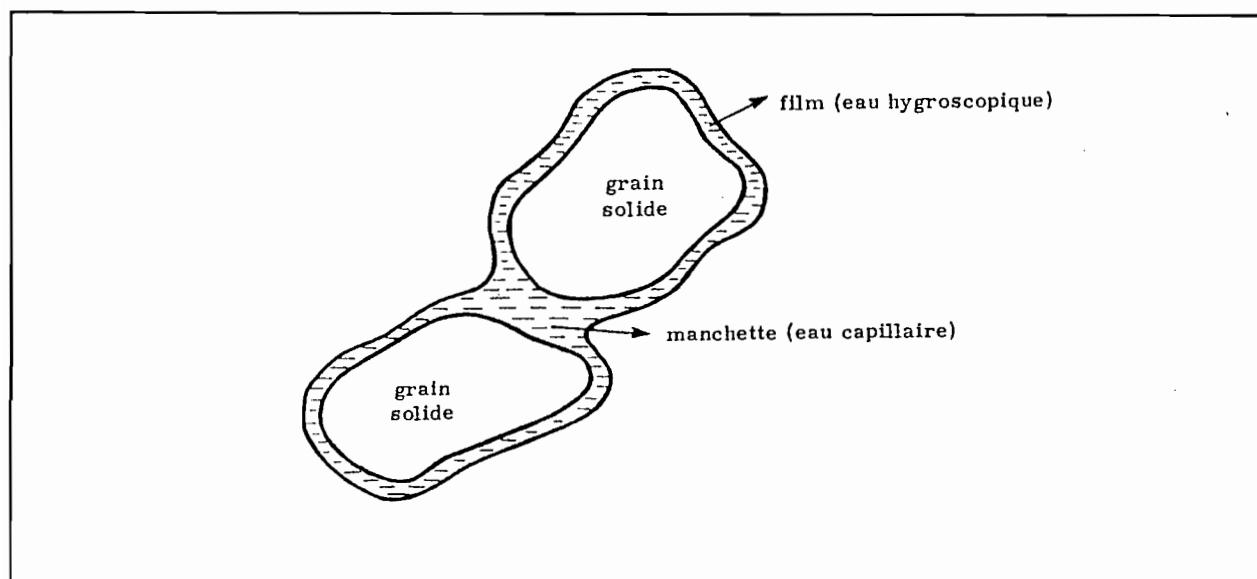


FIG:f-2: La rétention granulaire des eaux ( d'après BROCHET, 1968)

Conceptuellement cette réserve hydrique est comprise entre deux seuils d'humidité:

- la capacité au champ: qui est la quantité maximale d'eau que peut contenir un sol après ressuyage, c'est à dire après élimination par percolation de l'eau gravitaire et qui résulte d'un équilibre entre les forces de rétention (pression capillaire, forces d'adhésion ) et les forces de gravité.

- Le "point de flétrissement" permanent (pF): limite inférieure de l'humidité du sol avec laquelle est compatible la vie des végétaux Ces deux seuils correspondent aux limites supérieure et inférieure, de la RU.

On distingue alors une Réserve Facilement Utilisable (RFU) représentant environ 50 à 60% de la Réserve Utile (RU), BROCHET et *al*, (1968). Cette RFU est la seule susceptible d'alimenter les végétaux et d'en assurer la meilleure productivité.

Nous ne disposons pas de résultats de terrain de la RFU pour la vallée du Sénégal. Seuls quelques études du régime hydrique du sol faites par l'IRAT (Institut de Recherche Agronomique Tropicale au CNRA de Bambey par CHARREAU (1961) et BONFILS et *al*, (1962)) basées sur des mesures de profils d'humidité dans le temps, sont disponibles.

La profondeur maximale d'investigation est de 2m pour deux échantillons de sol et ces études ont abouti à la définition de deux types de sols:

les sols Dior sont des sols ferrugineux tropicaux beiges sur sables quaternaires, les sols Deck sont des sols bruns à hydromorphie temporaire de surface sur sable reposant sur marno-calcaires, BONFILS et *al*, (1963). Ces deux sols ont été prélevés dans les champs du CRA à Bambey.

Les principales conclusions de ces études sont:

- La dessiccation du sol se fait en saison sèche jusqu'à une profondeur 3.5 m pour les sols Dior et 4 m ( par manque de mesures) pour les sols Deck (fig. f-3).

- L'évapotranspiration réelle mesurée en saison sèche augmente rapidement de la fin de saison des pluies au mois de janvier (pour les sols Dior) et février (pour les sols Deck), ensuite elle varie faiblement pour le reste de la saison sèche.

- La capacité de rétention moyenne est de 5.7 % pour les sols Dior et de 9.6 % pour les sols Deck

- Le volume d'eau de rétention varie en fonction de la tranche de sol considérée (tabl.f4).

TABL. f-4: Capacité de rétention en lame d'eau (d'après Charreau *in* Dieng,1987)

Profondeur	Sol Dior en mm	Sol Deck en mm
40 cm	34.2	58.6
100 cm	88.0	161.2
200 cm	176.0	314.0

La dessiccation peut atteindre les profondeurs de 3.5 m pour les sols Dior et 4 m pour le sol Deck, avec un volume correspondant d'eau de rétention respectif de 325 et 580 mm. A de telles profondeurs correspondent des valeurs de RFU de 160 mm pour les sols Dior et 300 mm pour les sols Deck. Ces résultats montrent que les valeurs usuelles de la RFU (à objectif purement agronomique 60 et 100 mm) sont sous-estimées pour les profondeurs supérieures à 3 m (DIENG, 1987).



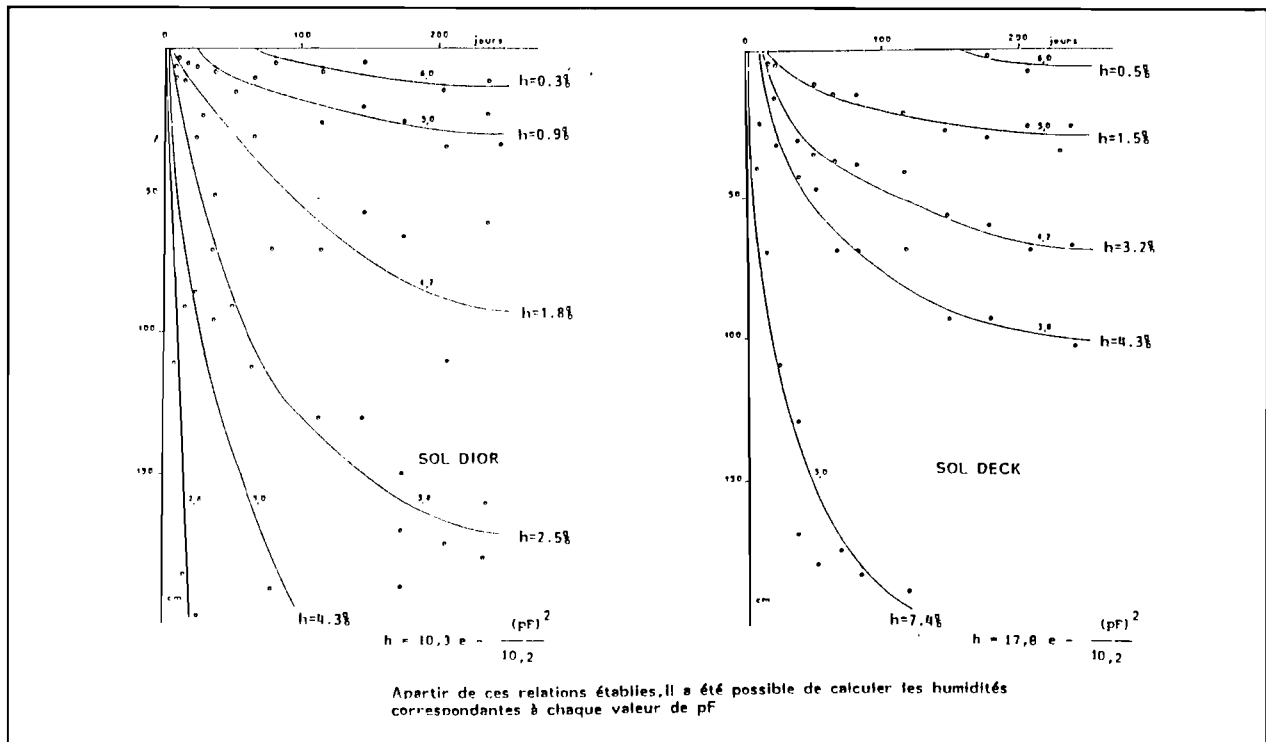


FIG. f-3: Profil de pF et d'humidité - dessiccation en saison sèche, (d'après DIENG; 1987).

Ceci montre à quel point la RFU varie avec la profondeur. Ainsi un profil de détermination de la RFU en fonction de la profondeur des différents types de sol permettrait d'affecter à chaque frange de la zone non saturée une valeur correspondante.

### 3 - 2 LA NOTION DE RUISSELLEMENT

Lors d'une pluie simulée quatre phases différentes, de l'hydrogramme du débit de ruissellement en fonction du temps, ont pu être observées, CASENAVE et al (1989), (fig. f-4).

- Phase d'imbibition
- Le régime transitoire
- Le régime d'écoulement permanent
- La phase de vidange

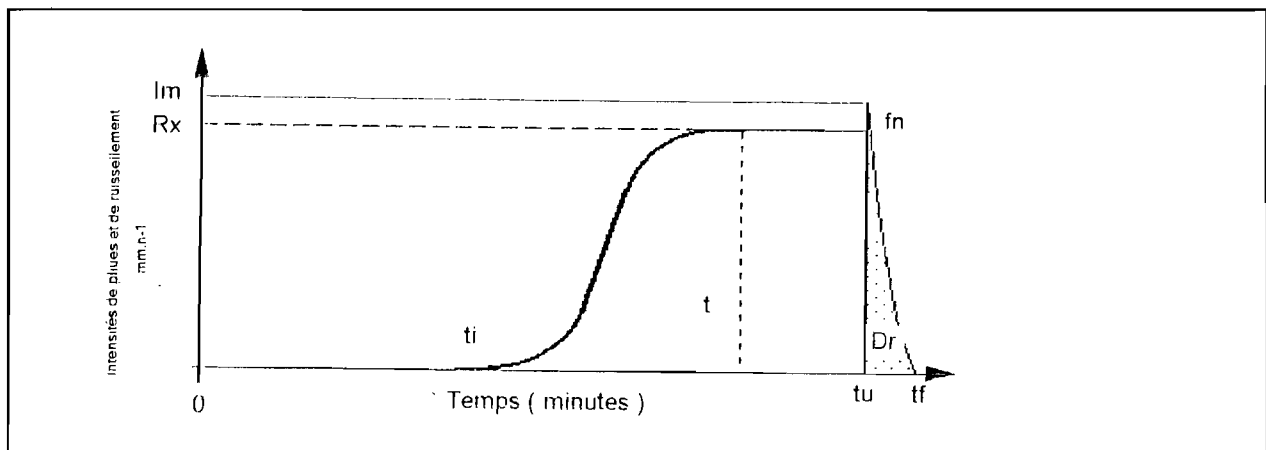


FIG. f-4: Hydrogramme théorique de ruissellement sous averse d'intensité constante. (d'après CASENAVE, 1989)

- Im = Intensité maximale d'infiltration
- Rx = Intensité maximale de ruissellement
- ti = Début de ruissellement
- tm = Début de l'intensité maximale de ruissellement
- tu = temps de cessation de la pluie
- tf = temps de cessation du ruissellement
- fn = intensité minimale de l'infiltration
- Dr = fraction du ruissellement mesurée après la pluie

A chaque type de surface et selon son état (cultivé ou non) correspond un coefficient de ruissellement approprié.

L'équation générale de la lame ruisselée, en mm, est de la forme:

$$L_r = A P_u + B I_K + C P_u I_K + D \quad \text{avec}$$

L<sub>r</sub>: la lame ruisselée

P<sub>u</sub>: la hauteur de pluie utile

I<sub>K</sub>: indice d'antécédence des pluies caractérisant la capacité d'absorption du sol

A; B; C; D : des paramètres d'ajustement entre L<sub>r</sub>, P<sub>u</sub>, et I<sub>K</sub>.

Dans la vallée du Sénégal, à notre connaissance, le coefficient de ruissellement n'a pas été déterminé pour les deux types de sols qui le caractérisent. Ce qui nous a amené à choisir, sa valeur pour les sols de notre zone à l'étude, dans un catalogue de détermination des états de surface au Sahel, CASENAVE et *al*, 1989. Nous utiliserons ces valeurs pour le calcul du bilan hydrique de cette zone.

### 3 - 3 ECOULEMENT DU FLEUVE A BAKEL ET DAGANA

Les volumes d'eau transités dans le fleuve à Bakel se corrèlent bien avec les pertes subies entre Bakel et Dagana (tabl. f-5 ). Cette relation de type exponentiel permet de déterminer les pertes hydriques dans la vallée à partir des seuls débits de transit à la station de Bakel.

Les débits à Dagana connaissent des perturbations depuis la mise en fonction du barrage de Diama en 1986.

Nous entendons par pertes hydriques la somme: le volume d'eau résiduel dans le fleuve entre Bakel et Dagana, le volume d'eau évaporé, et le volume d'eau infiltré à la nappe (fig. f-5).

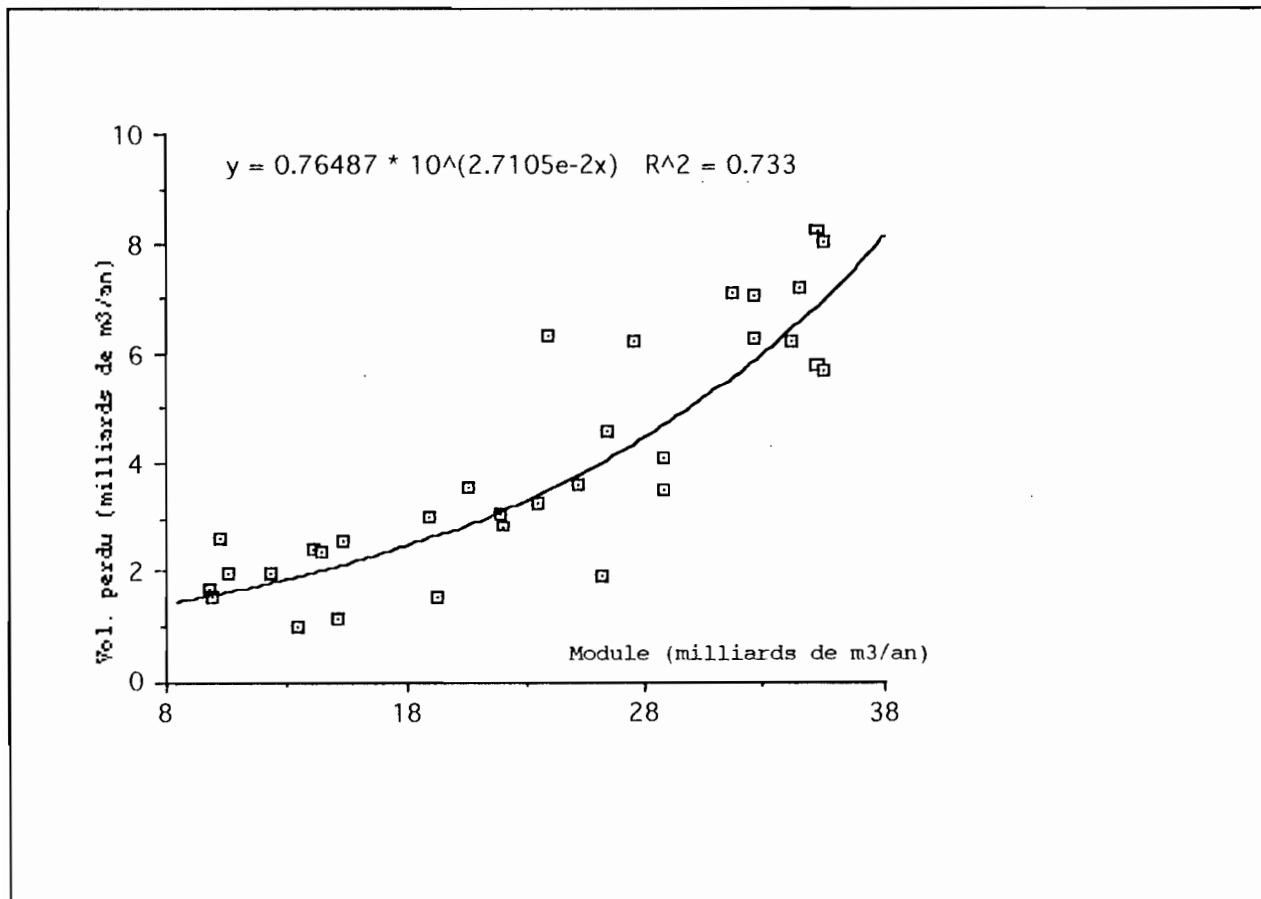


FIG. f-5: Relation module à Bakel et volume d'eau perdu dans la moyenne vallée.

TABL. f-5: Modules annuelles dans la moyenne vallée (1951 - 1982)

	Module (m3/s)		Module (milliards de m3/an)		
	Bakel	Dagana	Bakel	Dagana	Pertes
1951	900	795	28.38	25.07	3.31
1952	786	678	24.79	21.38	3.41
1953	686	602	21.63	18.98	2.65
1954	1110	862	35.00	27.18	7.82
1955	1110	934	35.00	29.45	5.55
1956	1020	802	32.17	25.29	6.87
1957	1080	857	34.06	27.03	7.03
1958	1070	878	33.74	27.69	6.05
1959	861	669	27.15	21.10	6.05
1960	683	592	21.54	18.67	2.87
1961	991	771	31.25	24.31	6.94
1962	823	684	25.95	21.57	4.38
1963	730	633	23.02	19.96	3.06
1964	1020	827	32.17	26.08	6.09
1965	1100	844	34.69	26.62	8.07
1966	898	774	28.32	24.41	3.91
1967	1100	921	34.69	29.04	5.64
1968	465	434	14.66	13.69	0.98
1969	816	761	25.73	24.00	1.73
1970	596	554	18.80	17.47	1.32
1971	638	531	20.12	16.75	3.37
1972	309	233	9.74	7.35	2.40
1973	432	362	13.62	11.42	2.21
1974	747	552	23.56	17.41	6.15
1975	585	495	18.45	15.61	2.84
1976	443	375	13.97	11.83	2.14
1977	320	264	10.09	8.33	1.77
1978	472	398	14.88	12.55	2.33
1979	299	257	9.43	8.10	1.32
1980	377	320	11.89	10.09	1.80
1981	411	385	12.96	12.14	0.82
1982	298	250	9.40	7.88	1.51
moy.	748	622	23.58	19.63	3.95

## 4 LA METHODE D'APPROCHE DU BILAN HYDRIQUE

A défaut d'une méthode de bilan qui intègre l'ensemble des paramètres dans la vallée, nous avons procédé par une synthèse de trois méthodes différentes:

### 4 - 1 MODELE DE BILAN DE: Albergel, (1991)

Ce modèle a été conçu pour les Iles du Cap-Vert,

#### 4 - 1 - 1 Les hypothèses de la méthode

Il est admis que toute la partie de l'averse, dont les intensités sont supérieures à la capacité d'absorption du sol, donne lieu à un ruissellement.

Les observations permettraient de caler une fonction de transformation (pluie lame ruisselée).

Les équations permettent d'exprimer la lame ruisselée en fonction de la hauteur de l'événement pluvieux et de la capacité d'absorption du sol.

La variation de la capacité d'absorption du sol, au cours de la saison des pluies sur un bassin versant sahélien, peut être caractérisée par un indice pluviométrique récurrent de la forme:

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) e^{-at}$$

où  $IK_n$ : est l'indice d'antécédence des pluies exprimant la capacité d'absorption du sol pour l'événement pluvieux  $n$  (mm)

$a$ : est une constante d'ajustement caractéristique du bassin variant de 0 à 1 ( $\text{jour}^{-1}$ )

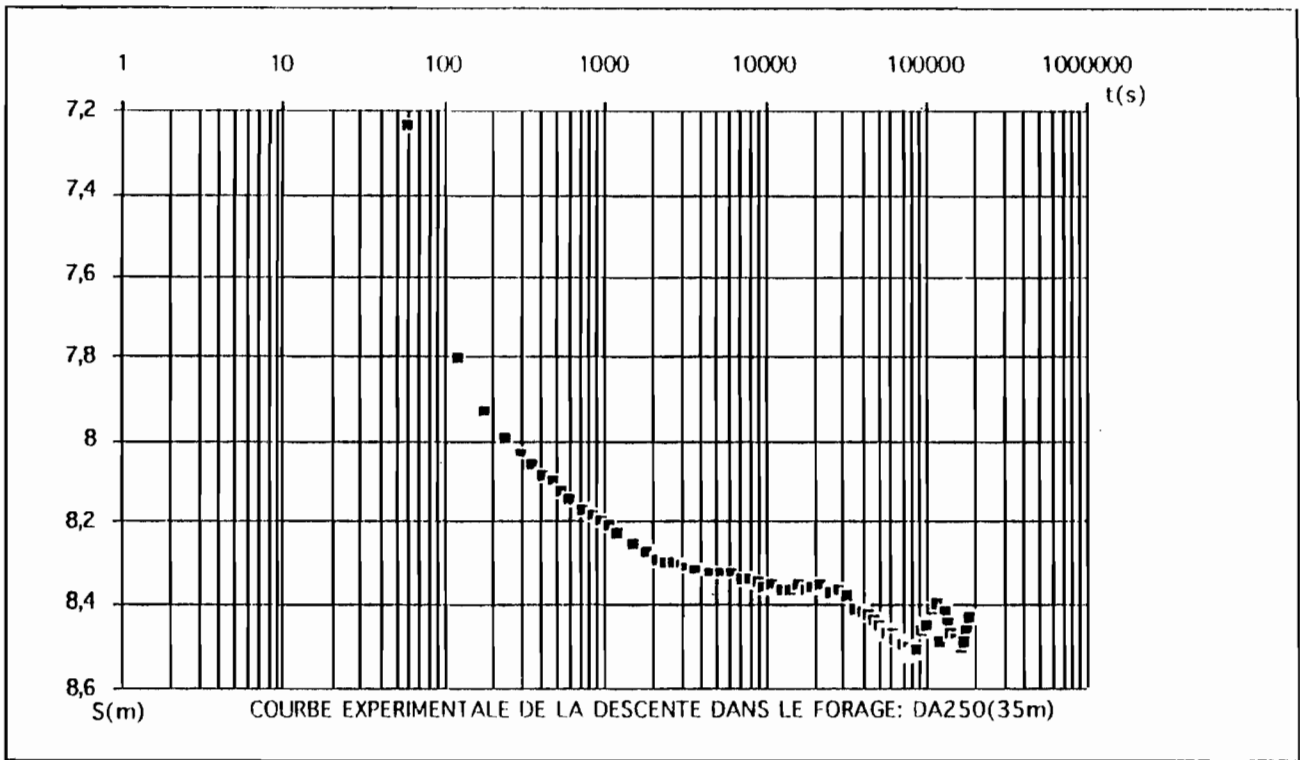
$t$ : est le temps exprimé en jours entre les événements pluvieux  $n-1$ .

La hauteur moyenne de pluie, nécessaire pour l'observation d'un ruissellement donné d'après le catalogue des états de surfaces au Sahel, est de 10 mm.

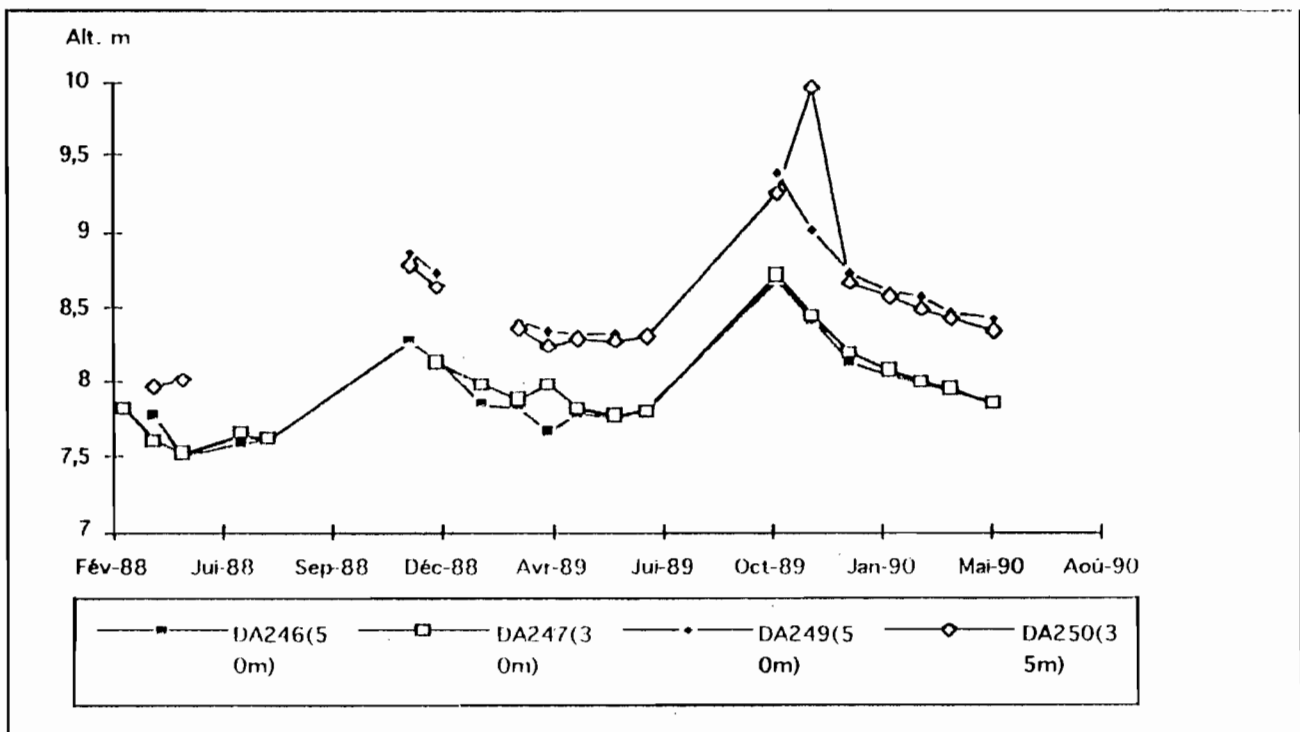
On prend l'hypothèse qu'il ne se produit qu'un seul événement pluvieux par jour de pluie et que les événements pluvieux de deux jours de pluies sont séparés de 24 heures (modèle à pas de temps journalier)

La partie non ruisselée est acheminée vers un réservoir sol (Zone non saturée), dont la première sortie est le prélèvement occasionné par l'évapotranspiration réelle (ETR). Ce réservoir est caractérisé par sa capacité, classiquement appelée "réserve facilement utilisable" (RFU).

Le niveau de remplissage de ce réservoir  $R$  est soumis à la fois à la pluie efficace ( $P_u - L_r$ ) et à l'évapotranspiration potentielle seulement et non de l'influence des cours d'eau. Le niveau  $R$  est donné journalièrement.



An. 14- FIG. 5: STATION DA250(35m) ESSAI DE NAPPE DU 12/03/88: Q=19.8m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 6: STATION DA249 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

### CONCLUSION

A la station de pompage DA249/250 nous avons un aquifère multicouche dans les formations éocènes et alluviales, de transmissivité moyenne égale à  $7.10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ . Cet aquifère contient une nappe semi-captive en relation avec le fleuve.

- Pour la zone Bakel nous avons choisi le type de sol appelé: " type C2: à porosité vésiculaire faible (5 à 30 %)" (fig. f-6).

$$R = (P_U - L_r) - ETP \text{ et } R \geq 0$$

Lorsque pour un événement pluvieux, R dépasse RFU, la lame d'eau (R - RFU) est considérée comme lame infiltrée et gagne alors la zone saturée.

Cette fraction peut être reprise soit par écoulement d'inféro-flux dans le lit du fleuve, soit par écoulement souterrain vers d'autres zones géologiques à formations plus drainantes (nappe Eocène ou Maastrichtienne), soit par évapotranspiration des ligneux (selon les chercheurs du CNRA de Bambey certaines espèces du Sénégal, *Accacia albida* en l'occurrence, peuvent avoir des racines qui descendent jusqu'à 40 m au dessous du sol et avoir une incidence sur le bilan hydrique des nappes).

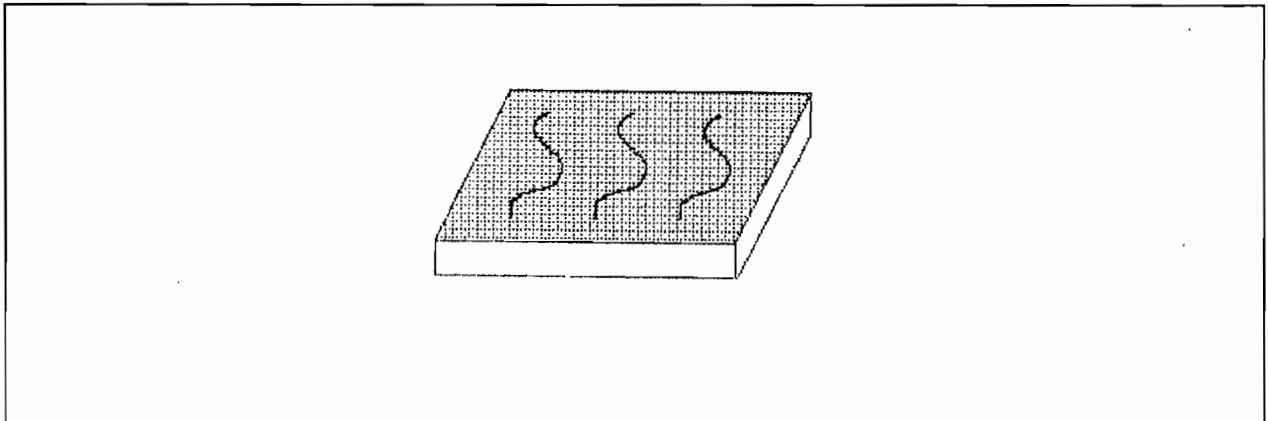


FIG. f-6: Surface de type cultivé à porosité vésiculaire (C2) caractéristique de zones sableuses (Bakel)

si  $P_U < 10 \text{ mm}$ ,  $L_r = 0$

si  $P_U > 10 \text{ mm}$ ,  $L_r = 0.35 P_U + 0.04 IK + 0.004 P_U IK - 3.0$

- Pour la zone Matam-Podor nous avons choisi le type de sol appelé: "le type DEC de croûte à décantation" (fig. f-7).

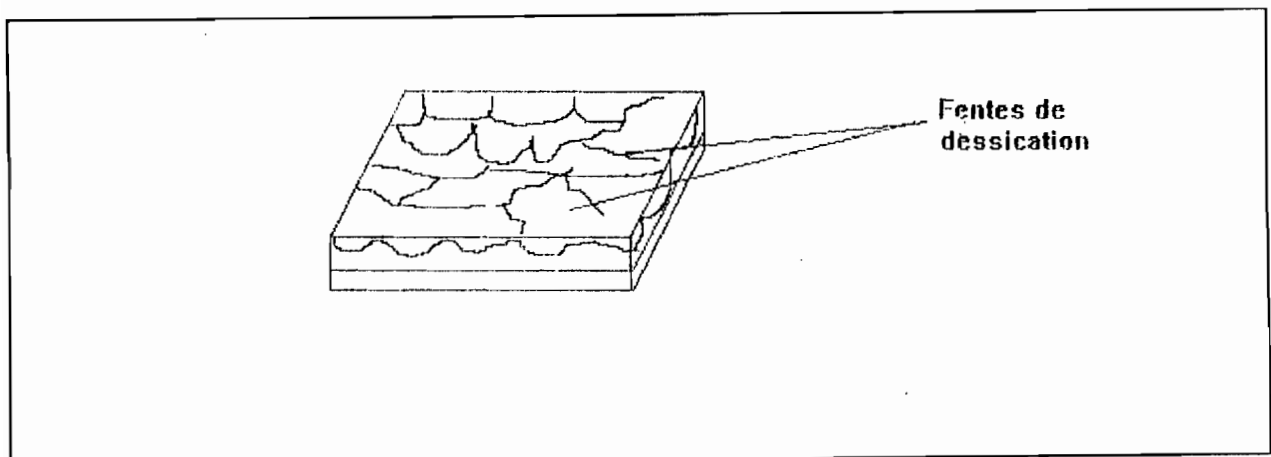


FIG. f-7: Surface de type décantation à porosité vésiculaire (DEC) caractéristique de la vallée du Sénégal (Matam - Podor )

si  $P_U < 10$  mm,  $L_r = 0$

si  $P_U > 10$  mm,  $L_r = 0.8 P_U + 0.08 IK + 0.001 P_U IK - 12$

#### 4-1-2 Application du modèle à la vallée du Sénégal

Le modèle est appliqué pour simuler un bilan hydrique des sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal sans tenir compte des apports fluviaux

Les valeurs de la RFU introduites sont celles retenues pour les deux types de sol (Dior et Deck) considérées comme valeurs extrêmes et aux quelles nous avons ajouté une valeur moyenne des deux, soit trois valeurs testées de la RFU pour chaque site.

L'ETP est calculée selon la méthode de Turc. Et la valeur utilisée dans le bilan est la moyenne journalière mensuelle de 1986 à 1992 pour les trois stations (tabl. f- 6)

TABL: f-6: Evapotranspiration moyenne journalière mensuelle (Turc)

ETP(mm)	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
Podor	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
Matam	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Bakel	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3

Les pluies sont des observations journalières aux différentes stations.

L'utilité de ce bilan est de pouvoir dire, en fonction des différentes valeurs de la RFU, s'il y a eu ou non une infiltration efficace, c'est à dire une alimentation de la nappe alluviale.

#### 4-1-3 Les résultats du modèle de J. ALBERGEL dans la vallée

L'application du modèle donne les résultats de lames ruisselées calculées (LRC) et de lames infiltrées calculées (LIC) annuelles et journalières depuis le début des enregistrements. Seules les valeurs de 1988 à 1991 pourront faire objet de comparaison, parce que correspondent aux années de relevés piézométriques plus réguliers que nous disposons.

Du fait que la zone non saturée a une épaisseur moyenne de 10 m, les valeurs de RFU qui prennent en compte cet état sont celles estimées à des profondeurs atteintes par la dessiccation (3.5 en sol Dior et 4 m en sol Deck), soit aux RFU respectives de 160 et 300 mm. A ces valeurs de RFU, de 1987 à 1991 le modèle ne donne aucune infiltration d'eaux de pluies dans les zones Matam et Podor c'est à dire dans la moyenne vallée, par contre à Bakel, dans la haute vallée, il calcule en 1988 une infiltration de 52 mm, (an. 18):

Ceci permet de conclure que dans la moyenne vallée toute alimentation de la nappe, en cette période, proviendrait des eaux du fleuve.



TABL. f-7: Résultats de bilan hydrique par la méthode de J. Albergel

## PODOR

RFU = 100 mm

RFU = 200 mm

RFU = 300 mm

AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC
1987	201	36	0		1987	201	36	0		1987	201	36	0
1988	309	114	0		1988	309	114	0		1988	309	114	0
1989	343	118	0		1989	343	118	0		1989	343	118	0
1990	132	10	0		1990	132	10	0		1990	132	10	0
1991	135	50	0		1991	135	50	0		1991	135	50	0

## MATAM

RFU = 100 mm

RFU = 200 mm

RFU = 300 mm

AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC
1987	459	192	2		1987	459	192	0		1987	459	192	0
1988*	281	145	0		1988*	281	145	0		1988*	281	145	0
1989	357	91	4		1989	357	91	0		1989	357	91	0
1990	350	170	2		1990	350	170	0		1990	350	170	0
1991	218	65	0		1991	218	65	0		1991	218	65	0

## BAKEL

RFU = 60 mm

RFU = 110 mm

RFU = 160 mm

AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC		AN	PA	LRC	LIC
1987	433	93	0		1987	433	93	0		1987	433	93	0
1988	654	222	85		1988	654	222	68		1988	654	222	52
1989	459	125	27		1989	459	125	13		1989	459	125	0
1990	450	119	1		1990	450	119	0		1990	450	119	0
1991	482	128	11		1991	482	128	0		1991	482	128	0

PA = pluie annuelle  
 LRC = lame ruisselée calculée  
 LIC = lame infiltrée calculée  
 1988\* = année incomplète

## 4 - 2 METHODE DU FLUX NET DE R. MALOU, (1992)

## 4 - 2 - 1 Concept physique du modèle (fig. f-8)

Ce modèle de bilan hydrique a été proposé pour la Casamance, et se fonde sur le schéma déterministe classique de Thornthwaite. Il possède des fonctions d'entrée, de sortie et de stockage représentées à la figure f-8.

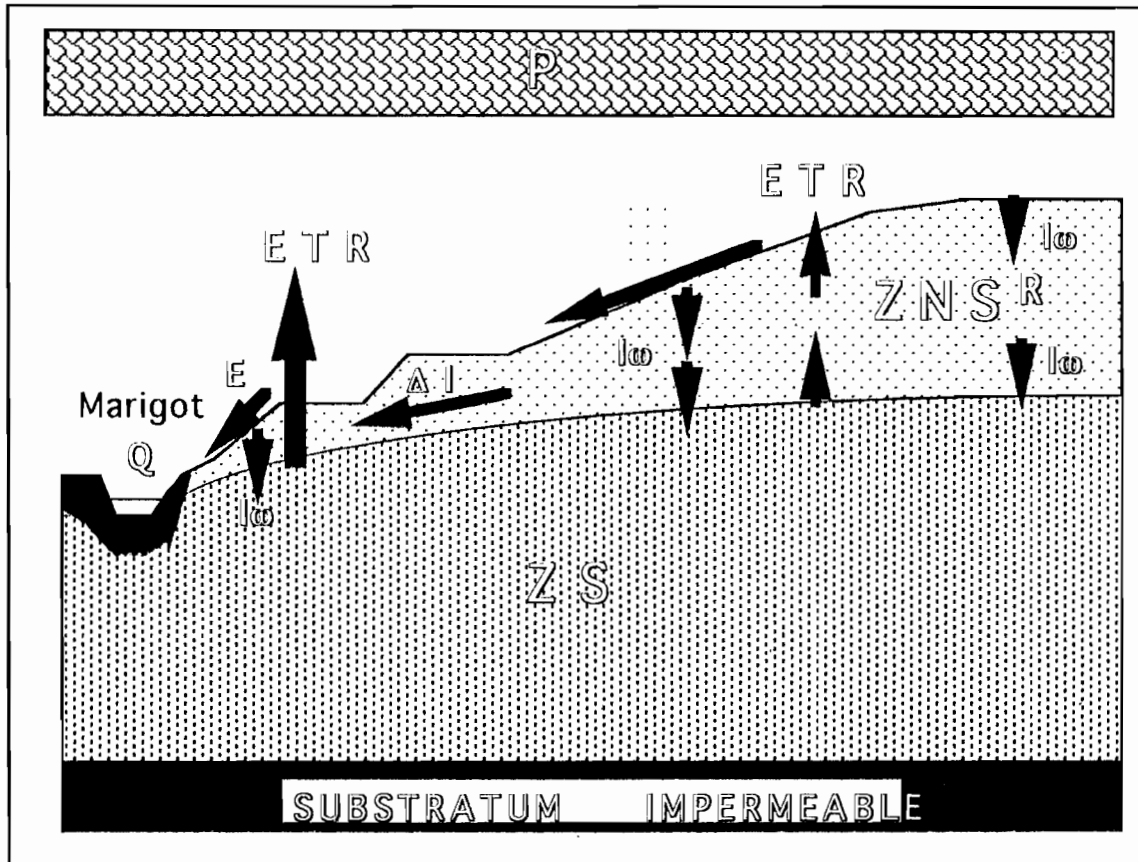


FIG. f-8: Modèle de bilan hydrique en basse Casamance: (R. Malou, 1992)

P: précipitations; ETR: évapotranspiration réelle; lw: infiltration efficace; I: écoulement hypodermique; Q: écoulement global; R: réserve du sol; ZNS: zone non saturée; ZS zone saturée.

Il est à noter que, dans le concept de la méthode, l'apport exogène des eaux du fleuve et le coefficient de ruissellement à la surface du sol ne sont pas pris en compte. Par contre il a l'avantage de donner au pas de temps journalier (recharge ou décharge) le sens de variation de la nappe et servira de moyen de comparaison avec le volume d'eau transité dans la moyenne vallée.

## 4 - 2 - 2 Concept mathématique du modèle

Il ressort de l'étude des fluctuations du niveau piézométrique et des opérations de corrélation précédemment établies, que l'hydrologie de la nappe est une fonction de la précipitation et de l'évaporation Piche cumulées à l'échelle saisonnière (Pc et EPc).

$$Y = f (Pc, EPc) \quad (1)$$

L'action des précipitations (f (Pc)) est une fonction de stockage de type polynomial:

$$Rc = a + b * Pc + c * e^{-xPc^2} - d * e^{-yPc^3} \quad (2)$$

L'influence de l'évaporation ( $f(EP_c)$ ) est une fonction de déstockage de type linéaire:

$$Dé = a' + b' * EP_c \quad (3)$$

L' action simultanée des deux termes sur la ressource hydrique est la somme des termes (2) et (3) selon l'expression (4):

$$Y = (a + a') + b * P_c + c * e^{-xP_c^2} - d * e^{-yP_c^3} - b' * EP_c \quad (4)$$

ceci aboutit à l'expression (5) suivante:

$$Y = a'' + b * P_c + c * e^{-xP_c^2} - d * e^{-yP_c^3} - b' * EP_c \quad (5)$$

Etant donnée la décroissance exponentielle de ces fonctions de stockage et de déstockage, en fonction de la profondeur ( $h$ ) de la nappe, on aboutit à l'équation générale suivante, dite flux net (FN).

$$FN = (a'' + b * P_c + c * e^{-xP_c^2} - d * e^{-yP_c^3} - b' * EP_c) * e^{-zh}$$

les paramètres:  $a$ ,  $a'$ ,  $a''$ ,  $x$ ,  $y$ , et  $z$  sont des constantes de régression déterminées stochastiquement dans un site de référence qui est celui de Baladine et  $h$  l'altitude du niveau piézométrique.

Ce modèle intègre deux processus opposés (recharge et décharge) dont l'action simultanée détermine, à terme le bilan hydrologique de la nappe.

Le bilan net de la nappe, au jour ( $j$ ) est la résultante d'un flux descendant, apport à la nappe par infiltration efficace ( $I_w$ ) et d'un flux ascendant, dû à l'évapotranspiration, assimilé dans l'hypothèse de cette étude à l'évaporation Piche ( $EP$ ).

Le caractère différé de ce processus, compte tenu des temps de transfert hydrique ( $t$ ), oblige, cependant, à considérer les paramètres climatiques ( $P'_c$  et  $EP'_c$ ) relatifs à un jour ( $j-t$ ) et susceptibles d'occasionner l'état actuel de la nappe. Ceci conduit à l'expression finale du FN selon l'équation

$$FN = (a'' + b * P'_c + c * e^{-xP'_c^2} - d * e^{-yP'_c^3} - b' * EP'_c) * e^{-zh}$$

Il ne nous a pas été possible d'entreprendre les mêmes types de corrélations, que la méthode du flux net en Casamance, dans la vallée, faute de valeurs régulières journalières de fluctuation de la nappe. Tout de même nous l'appliquons pour une appréciation des transferts hydriques dans la vallée Sénégal.

#### 4-2-3 Résultats de la méthode du Flux Net de R. MALOU (1992)

Le calcul du bilan hydrique est simplifié par la connaissance de l'état, d'évolution de la nappe, donné au pas de temps journalier, par la formule du flux net:

$$FN = (0.555 * P'_c + 0.45 * e^{-4P'_c^2} - 0.19 * e^{-7P'_c^3} - 0.78 * EP'_c) * 10^{-10/8}$$

Le calcul du bilan se fait sur la base de la connaissance des variables climatiques (précipitation et évaporation Piche) selon le principe du schéma (fig.F-8).

- Application de la méthode du flux net pour une nappe de profondeur égale à 10m

L'application de la méthode du flux net dans la vallée alluviale du Sénégal à une profondeur moyenne de la nappe ( $h$ ) égale à 10m (fig. f-9; f-10 et f-11) donne des résultats d'évaporation de la nappe surestimés par rapport au volume d'eau transitaire dans le fleuve aux mêmes périodes (tabl. f-9).

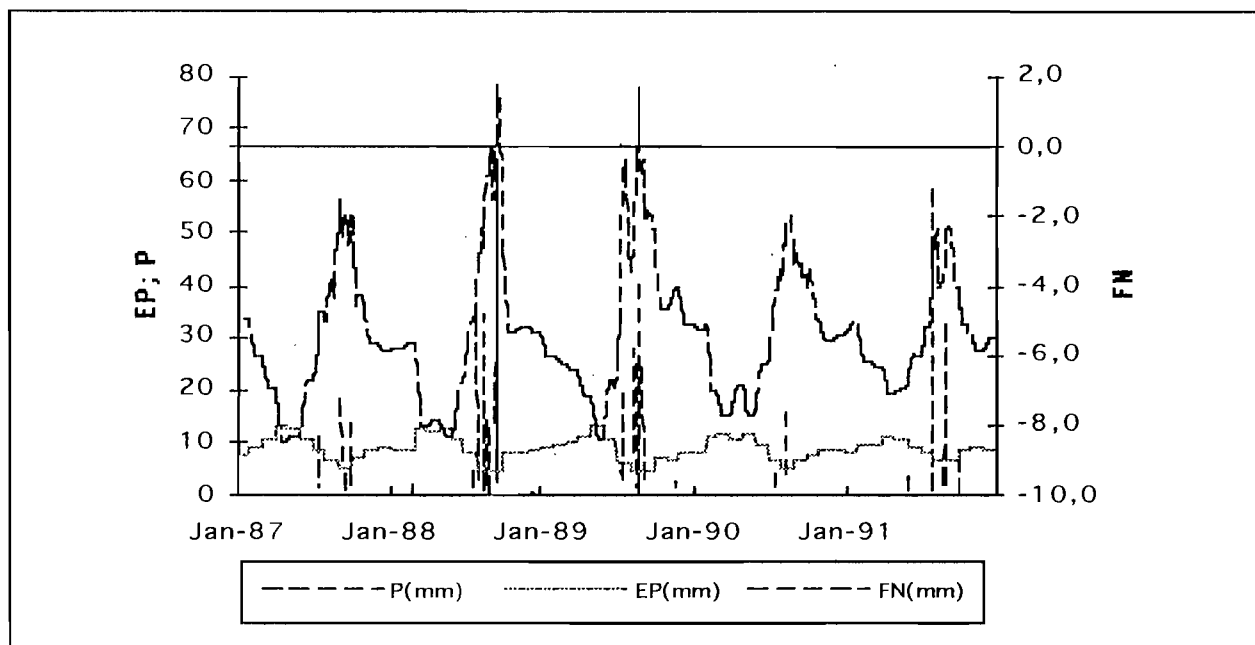


FIG. f-9: Méthode du flux net à Podor pour une nappe profonde de 10m

P (mm) = précipitations  
 EP(mm)= évaporation Piche  
 FN(mm)= flux net

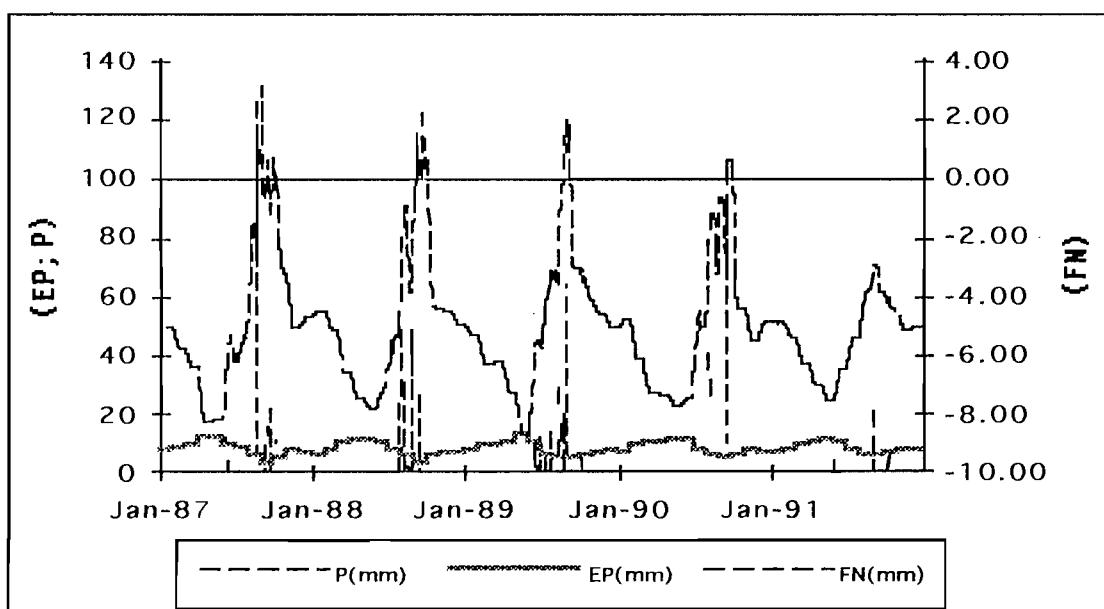


FIG. f-10: Méthode du flux net à Matam pour une nappe profonde de 10m

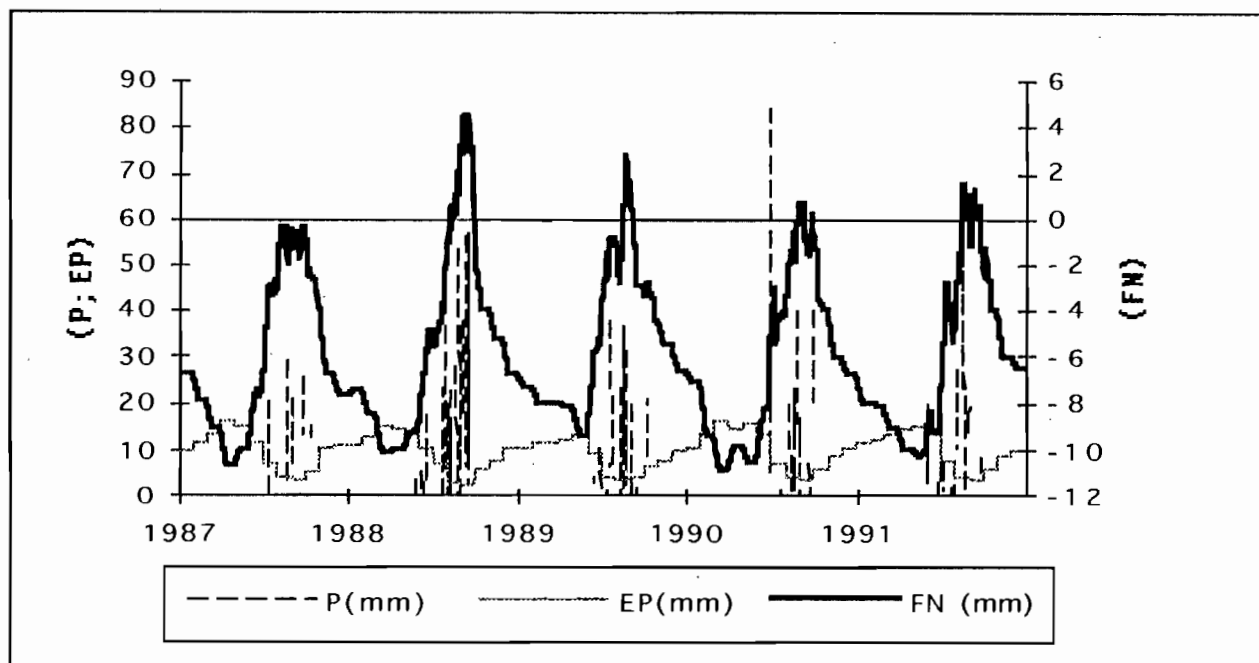


FIG. f-11: Méthode du flux net à Bakel pour une nappe profonde de 10m  
 Résultats pour une profondeur moyenne de la nappe à 10 m

L'alimentation totale de la nappe correspond de la somme recharge de la nappe avec la décharge donnée par le flux net (tabl. f-8). Le volume infiltré (tabl. f-9) correspond au produit de cette alimentation par la surface de l'aquifère.

TABL. f-8: L'alimentation en lame d'eau de la nappe alluviale(m)

Année	Podor	Matam	Bakel
1989	1.82	1.80	2.06
1990	2.02	1.88	2.36
1991	2.00	1.96	2.26

TABL. f-9: L'alimentation en volume d'eau de la nappe alluviale ( $10^9 \text{ m}^3$ )

Année	Podor	Matam	Total
1989	9,1	5,9	15
1990	10,1	6,2	16,3
1991	9,9	6,5	16,4

De 1951 à 1982 on observe dans la vallée les volumes moyens annuels transités à Bakel et Dagana respectivement de  $23,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  et  $19,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ ; soit une perte moyenne annuelle entre les deux stations égale à  $4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ .

la recharge de la nappe phréatique, reprise par l'évaporation, à la profondeur moyenne de 10 m varie de  $15 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  à  $16,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  soit quatre fois supérieure au volume d'eau perdu entre les deux stations.

#### 4 - 3 METHODE DE CALCUL PAR LA VARIATION DE NIVEAU DE LA NAPPE

Cette méthode repose sur le calcul de la lame de variation annuelle du niveau de base de la nappe. Ceci à partir de l'amplitude de variation annuelle de la nappe et de la porosité efficace (nappe libre) ou du coefficient d'emménagement (nappe semi-captive à captive).

##### 4-3-1 Le coefficient d'emménagement et la porosité efficace

Des études ont permis de mesurer sur un volume important les paramètres de l'emménagement de l'eau dans les réservoirs. La méthode usuelle des hydrogéologues est le pompage d'essai. (voir chapitre sur les pompages).

En effet la libération de l'eau dans deux aquifères l'un à nappe libre et l'autre à nappe captive sous l'effet d'un abaissement unitaire de niveau piézométrique entraîne une différence de charge unitaire  $Dh$ , (fig. f-12).

Dans l'aquifère à nappe libre la libération s'effectue sous l'effet de la force de la gravité (drainage).

Dans l'aquifère à nappe captive elle s'effectue par les actions d'élasticité de l'eau et du solide (détente de l'eau et déformation du solide). les modules d'élasticité étant faibles le volume d'eau libéré est plus petit, à caractéristiques égales que pour les nappes libres.

Le coefficient d'emménagement, noté  $(S)$ , sans dimension, est le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné, par unité de surface de l'aquifère ( $1 \text{ m}^2$ ) à la variation de charge hydraulique ( $Dh$ ) correspondante (fig. f-12).

Dans l'aquifère à nappe libre, le coefficient d'emménagement est égal à la porosité efficace. Par contre dans l'aquifère à nappe captive, il est de 100 à 1000 voir 10000 fois plus petit, Castany, (1982).

Les résultats d'interprétation des pompages d'essai dans la vallée (tabl. c-17) donne une valeur moyenne du coefficient d'emménagement ( $S$ ) des aquifères alluviaux est de  $2 \cdot 10^{-4}$ . Les nappes de ces aquifères sont généralement semi-captives à captives.

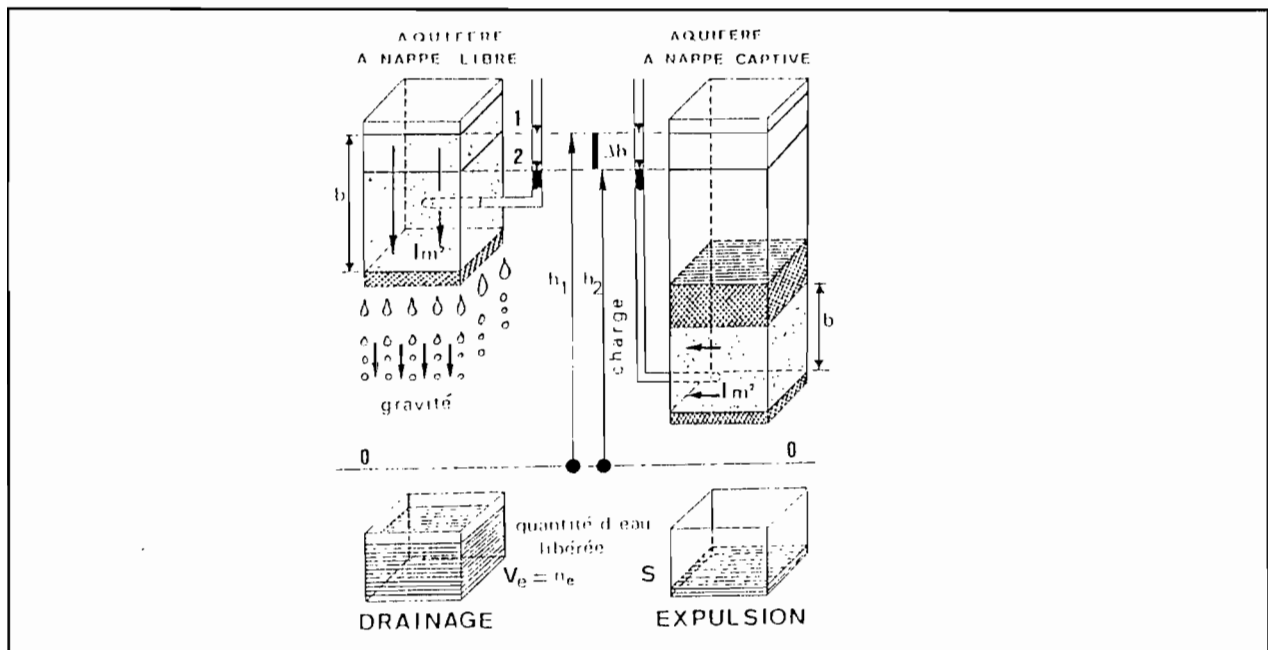


FIG. f-12: La libération de l'eau souterraine dans les aquifères.  
( d'après Castany, 1982)

Quant à la zone de Bakel elle appartient au milieu cristallin plissé constitué surtout de quartzites de schistes et grès. En hydrogéologie elle correspond au milieu dit fissuré. La porosité efficace ( $N_e$ ) de tels milieux est comprise entre  $10^{-2}$  et  $15 \cdot 10^{-2}$ . soit en moyenne égale à  $8 \cdot 10^{-2}$ ; Castany, (1982 ).

## 4 - 3 - 2 Méthode de calcul et résultats

Elle permet, connaissant le coefficient d'emménagement d'un aquifère captif ou de la porosité d'un aquifère libre et la dénivelée piézométrique annuelle, de calculer la lame d'eau résiduelle annuelle.

Soit ( $H_f$ ) la variation annuelle du niveau de base de la nappe dans les piézomètres situés au bord du fleuve (tabl. f-10).

TABL. f-10: Amplitude de variation du niveau de base de la nappe alluviale ( $H_f$  en m)

ANNEES	PODOR	MATAM	BAKEL
1989	0.15	0.31	1.23
1990	0.2	0.34	0.03
1991	0.08	0.05	0.04

Soit ( $H_v$ ) la variation annuelle du niveau de base de la nappe dans les piézomètres situés au bord de la vallée (tabl. f-11).

TABL. f-11: Amplitude de variation du niveau de base de la nappe alluviale ( $H_v$  en m)

ANNEES	PODOR	MATAM	BAKEL
1989	0.02	0.05	0.81
1990	0.36	0.58	0.78
1991	0.22	0.1	0.02

Soit ( $H_m$ ) L'amplitude moyenne annuelle de variation du niveau de la nappe (tabl. f-12)

$$H_m = (H_f + H_v)/2$$

TABL. f-12: Amplitude moyenne de variation de la nappe alluviale:  $H_m$

ANNEES	Podor	Matam	Bakel
1989	0.08	0.18	1.02
1990	0.32	0.46	0.41
1991	0.15	0.08	0.03

La lame d'eau infiltrée à la nappe observée (LIO) correspond à l'alimentation potentielle de la nappe par le fleuve et les eaux de pluies (tabl. f-13). Elle est obtenue pour la zone Bakel à partir de la porosité efficace ( $N_e$ ) et l'amplitude moyenne de la dénivelée piézométrique ( $H_m$ ) par la formule:

$$LIO = N_e * H_m$$

et pour les zones Matam et Podor à partir du coefficient d'emménagement ( $S$ ) par la formule:

$$LIO = S * H_m$$

La recharge annuelle de la nappe aux trois stations est donnée au tableau, elle est plus importante à Bakel puis à Matam et à Podor.

TABL. f-13: La recharge annuelle de la nappe: LIO (m)

ANNEES	Podor	Matam	Bakel
1989	0,000016	0,000036	0,0816
1990	0,000064	0,000092	0,0328
1991	0,00003	0,000016	0,0024

## Remarques sur les différentes méthodes d'approche

- la méthode d'Abergel 1991 permet de quantifier l'apport des pluies à la nappe en prenant en compte l'état de surface, et elle a permis de tester plusieurs valeurs de RFU .

- la méthode de Malou permet de quantifier la résultante de la recharge et évaporation de la nappe appelée Flux Net, mais ne prend pas en compte L'état de surface.

- la méthode de la fluctuation piézométrique permet de quantifier la variation annuelle de la nappe par mesure directe du niveau piézométrique.

Les deux premières méthodes ont l'avantage de fonctionner au pas de temps journalier, mais ne prennent pas en compte le facteur alimentation de la nappe par le fleuve.

## Remarques

Ces valeurs ici positives correspondent à des années où la nappe s'est rechargée. Elles seraient respectivement nulles ou négatives pour les années de recharge ou de décharge de la nappe.



#### 4 - 4 SYNTHÈSE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'APPROCHE DE BILAN

- Application de la méthode du flux net pour une profondeur de nappe égale à 25 m par la formule:

$$FN = (0.555 * P'c + 0.45 * e^{-4P'c^2} - 0.19 * e^{-7P'c^3} - 0.78 * EP'c) * 10^{-25/8}$$

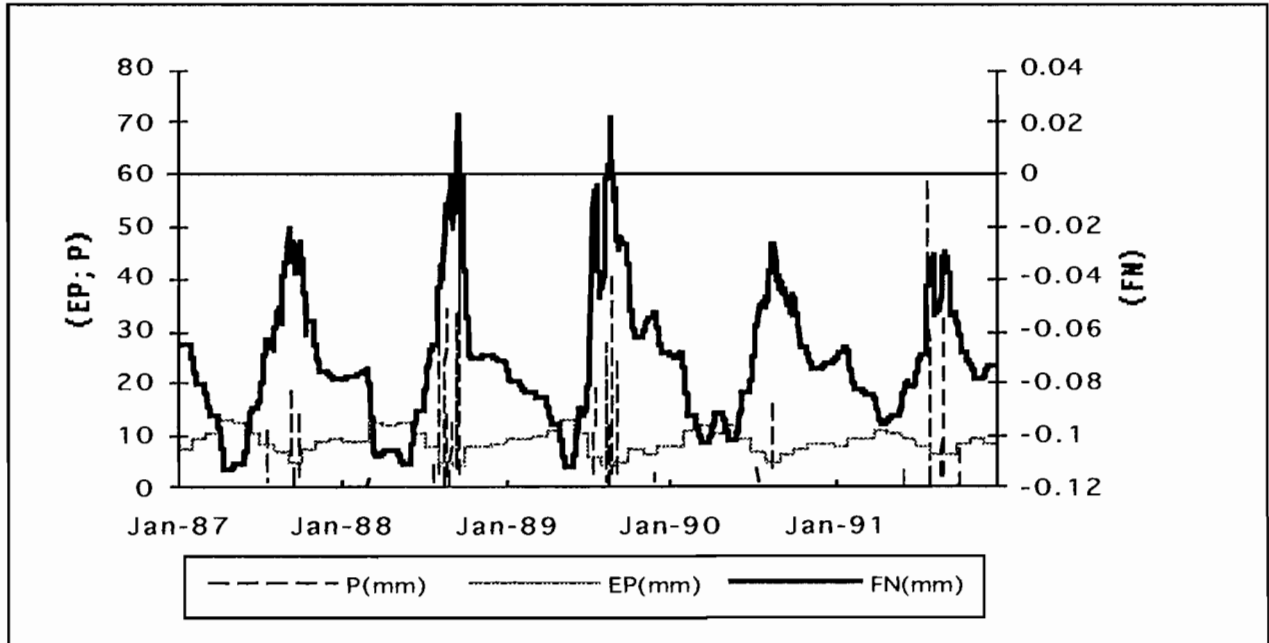


FIG. f-13: Méthode du flux net à Podor pour une nappe profonde de 25 m

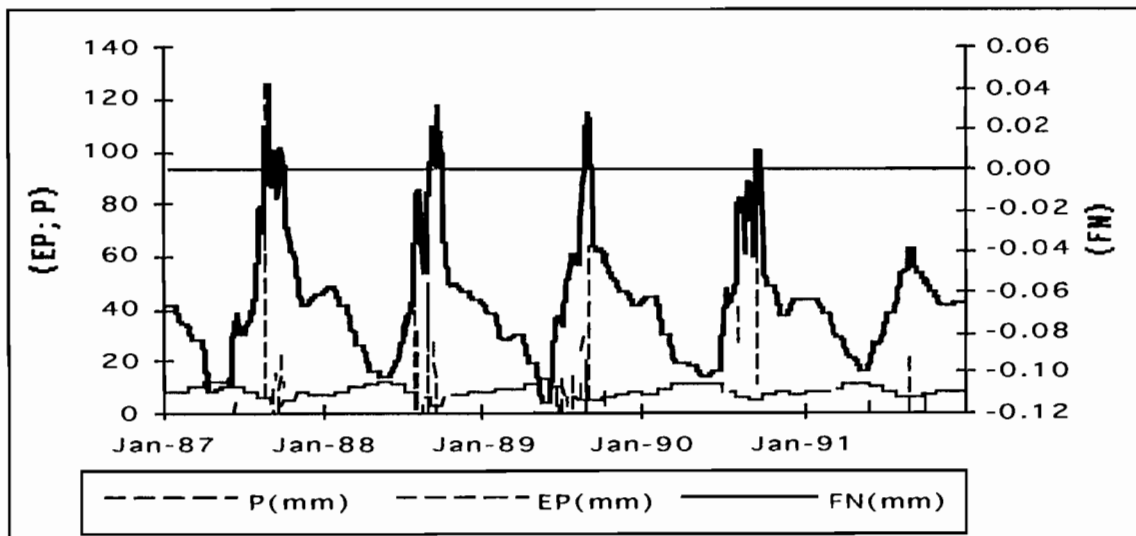


FIG. f-14 Méthode du flux net à Matam pour une nappe profonde de 25 m

En considérant l'absence d'alimentation de la nappe de 1987 à 1991, nous avons calé, par la méthode du flux net, une valeur de profondeur moyenne du niveau de la nappe, dans la vallée alluviale, pour laquelle l'alimentation de la nappe à partir des eaux de pluies est négligeable. Cette profondeur est estimée à 25m.

Les valeurs d'évaporation de la nappe obtenues à cette profondeur, sont également faibles et conformes aux observations de volumes transités dans le fleuve. Nous avons estimé la profondeur de la nappe à 25 m afin de tenir compte l'impact de la formation argileuse superficielle présente dans la région et qui jouerait un rôle d'écran à l'infiltration directe (fig. f-13 et f-14).

Le volume d'eau de recharge de la nappe pour les différentes zones est le produit de la lame infiltrée par la surface de l'aquifère respective (tabl. f-14).

Le volume d'eau de recharge total de la nappe dans la moyenne vallée (de Manaél à Rosso) de 1989 à 1991 est donné au tableau suivant:

TABL. f-14: La recharge annuelle de la nappe alluviale ( $m^3$ )

Années	Podor	Matam	Total
1989	800000	118800	918800
1990	3200000	303600	3503600
1991	1500000	52800	1552800

Pour les trois années 1989; 1990 et 1991 la recharge de la nappe par les eaux de pluies est nulle (tabl. f-7). Le Fux Net (résultante de la recharge par les pluies et de l'évaporation) correspond alors uniquement à l'évaporation de de la nappe (tabl.f-15 et f-16).

TABL. f-15. Lame d'eau évaporée de la nappe alluviale à 25 mètres (m)

Années	Podor	Matam
1989	0.024	0.024
1990	0.027	0.025
1991	0.027	0.026

TABL. f-16 Volume évaporé de la nappe alluviale à 25 mètres ( $10^6 m^3$ )

Années	Podor	Matam	Total
1989	121.35	79.20	200.55
1990	135.30	82.89	218.19
1991	133.50	86.36	219.86

L'alimentation totale de la nappe (tabl. f-17) est la somme de la recharge annuelle de la nappe et de son évaporation.

La recharge annuelle de la nappe, pour les trois années, représente 0.06 à 2% de l'alimentation totale de la nappe, elle est très faible par rapport à ce qui s'évapore de la nappe.

TABL. f-17: L'alimentation totale de la nappe alluviale ( $10^6 m^3$ )

Années	Podor	Matam	Total
1989	122.15	79.32	201.47
1990	138.50	83.20	221.70
1991	135.00	86.41	221.41

La comparaison du volume moyen annuel des pertes (différence entre le module du fleuve à Bakel et celui à Dagana), (tabl. f-18) avec l'alimentation totale annuelle de la nappe alluviale permet d'observer le pourcentage des pertes qui constitue l'alimentation de la nappe alluviale (tabl. f-19).

TABL. f-18 Moyennes annuelles des modules et des pertes( $10^9 \text{ m}^3$ )

BAKEL	DAGANA	PERTES
23.58	19.63	3.95

TABL. f-19 Pourcentage des pertes infiltré à la nappe

ANNEE	1989	1990	1991
VOLUME	5 %	6 %	6 %

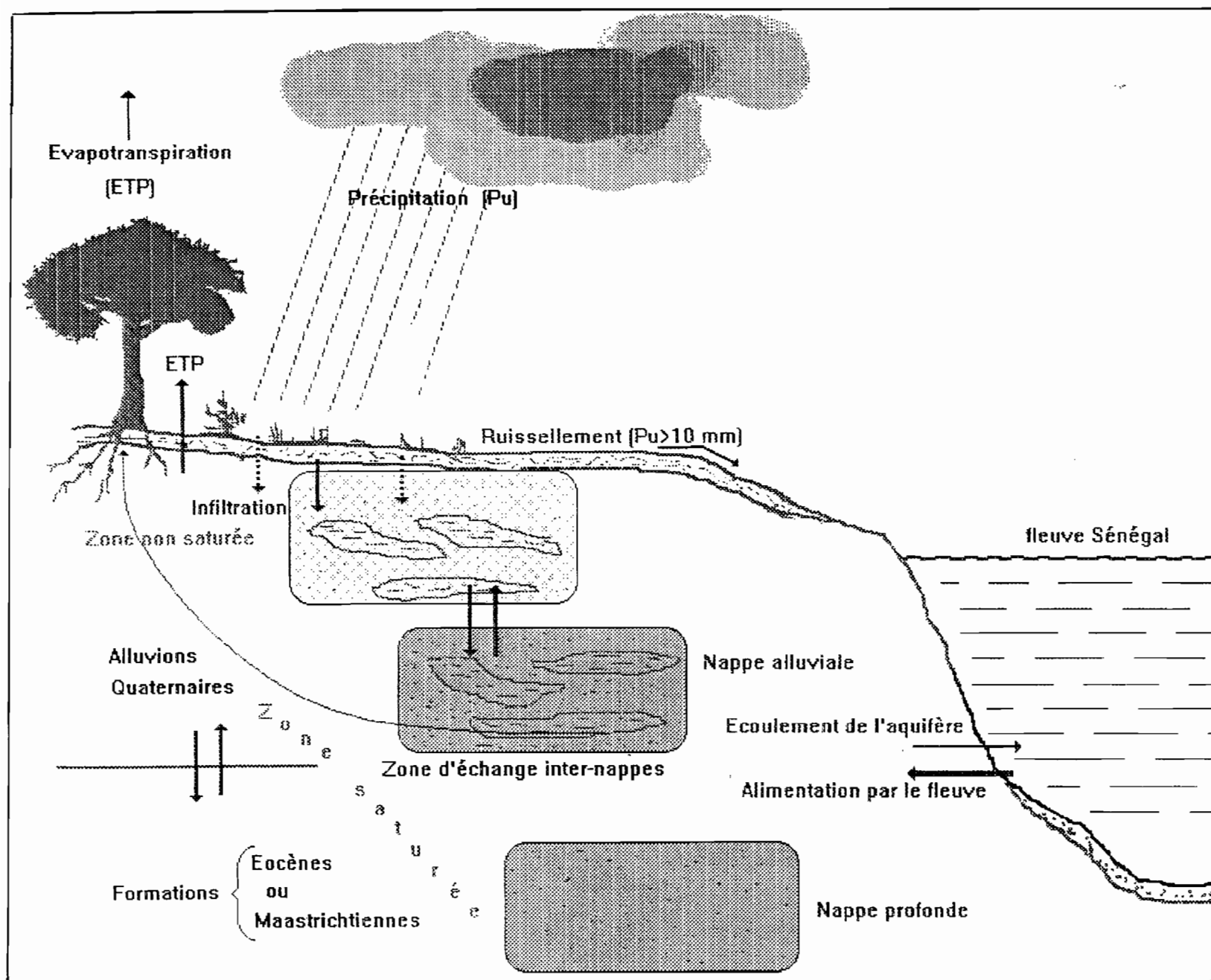


FIG. f-15: BILAN HYDRIQUE DE LA MOYENNE VALLEE DU FLEUVE SENEGAL  
 SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE  
 (d'après Albergel, 1991; modifié par Diagana, 1994)

## Conclusion

Les eaux qui alimentent la nappe alluviale sont de deux types: il y'a les eaux du fleuve et les eaux de pluies. L'alimentation de la nappe par les eaux du fleuve est prépondérante sur celle par infiltration de pluies efficaces pour trois raisons:

- la rareté, la faible quantité des pluies, mais aussi la brièveté de la saison pluvieuse (trois mois en moyenne dans l'année),
- la présence d'une croûte argileuse superficielle, qui favorise le ruissellement en limitant ainsi l'infiltration,
- le drainage par le fleuve des eaux du haut bassin qui relève d'un autre contexte climatique (excédent pluviométrique)

Le bilan hydrique par la méthode J. Albergel montre une absence d'alimentation de la nappe de 1987 à 1991 par les eaux de pluie dans la moyenne vallée, ce qui confirme des études antérieures (Dieng, 1987 et Diagana, 1990).

Les variations piézométriques pendant cette période correspondent à l'alimentation de la nappe par le fleuve.

Cette alimentation diminue de l'amont (Bakel) vers l'aval (Podor). Ceci se justifie par le colmatage progressif du fond du lit du fleuve lié au dépôt d'éléments fins en suspension.

La particularité du phénomène hydrique dans la vallée du fleuve Sénégal impose les conditions suivantes pour le calcul du bilan hydrique:

- la mesure à pas de temps journalier les fluctuations de la nappe (installation de limnigraphe dans un piézomètre) qui permettra d'identifier des réactions de la nappe à l'influence des pluies et du fleuve,
- la détermination du coefficient de ruissellement (en raison de la présence de la formation argileuse superficielle),
- la détermination de la RFU (la vallée du Sénégal constituant une entité non identique aux deux types de sol Dior et Deck).

L'impact limitant de l'état de surface à l'infiltration conduit à des résultats compatibles avec les observations faites dans la vallée.

L'alimentation de la nappe correspond à 5 % des pertes d'eau dans la moyenne vallée, cette alimentation provient, pour les années étudiées, entièrement des eaux du fleuve. La reprise évaporatoire de l'alimentation représente près de 98%.

Tout de même, si l'essentiel de l'alimentation de la nappe alluviale se fait par le fleuve, il n'est pas à exclure qu'un apport des eaux de pluies efficaces puisse s'effectuer à partir de la limite, de la vallée dans une zone sableuse (Dièri) notamment aux environs de Thilogne (Ligne N°2) Gaye (1990) a mis en évidence cette alimentation à Louga (au sud-ouest de la zone d'étude).

La figure f-15 est une synthèse des différents types d'échange hydriques dans la vallée du Sénégal, elle prend en compte l'ensemble des paramètres qui entrent dans la composition du bilan hydrique sur la base desquels nous avons entrepris cette tentative.

## REMARQUES ET CONCLUSION GENERALE

## DIFFICULTES ET LIMITES DES METHODES D'ETUDE

### - Les corrélations géologiques

Après avoir constaté avec M<sup>r</sup> Ababacar LY du département de géologie (communication orale), le caractère azoïque des échantillons de sol de la rive gauche, que nous avons récupérés au secteur de l'OMVS à Saint-Louis, il n'a pas été possible de procéder à une corrélation fossilifère des échantillons. Ainsi nous avons procédé par une corrélation lithologique basée sur la nature, la taille, la composition, la couleur des échantillons, et l'épaisseur des formations. Un travail identique n'a pu être effectué du côté mauritanien où nous ne sommes pas entrés en possession des échantillons de sol.

Si dans certains cas, la présence de failles s'imposait d'elle-même, par la différence lithologique (calcaire et sable par exemple), dans d'autre leur emplacement est justifié l'existence de zones de faiblesse comme au droit des lits des cours d'eaux.

Avec ces échantillons, encore disponibles au laboratoire d'hydrogéologie de l'ORSTOM à Dakar, que l'on pourrait compléter par ceux de la rive droite (avec l'aide des services de l'OMVS), entreprendre une étude corrélatrice géologique plus approfondie et une analyse granulométrique au moins pour les échantillons de sol prélevés au droit des crépines.

### - Les pompages d'essai

Il existe plusieurs méthodes d'interprétation des pompages d'essai selon la nature géologique de l'aquifère testé et la nature de la captation.

Les conditions d'application des méthodes ne sont pas toujours respectées. Dans le cas de la vallée du Sénégal l'installation des piézomètres n'a pas toujours été effectuée dans les normes, c'est ainsi que des piézomètres ont souvent été crépinés dans des formations silteuses ou argile-sableuses exemple GA349 de la ligne N°2. Ce qui peut se traduire pendant le pompage par une mauvaise libération de l'eau des formations d'où un retard de réaction à l'effet de pompage, et décalage du niveau piézométrique par rapport aux autres piézomètres de la station.

Aux stations de pompage on a pas toujours un piézomètre de même profondeur que le forage (exemple à la station DA241/DA242) pour la détermination des paramètres hydrodynamiques, qui est le principal objectif d'un pompage d'essai.

Avant d'entreprendre un pompage de longue durée, il est nécessaire de procéder à un développement de type "air lift" ou un pompage test jusqu'à ce que l'on obtienne une eau claire à la sortie. Ceci permet de décolmater les alentours de la crépine et éviter ainsi d'obtenir des affolements de courbes suite à un décolmatage de la crépine (exemple à la station GA333/334) ainsi avoir un meilleur rendement du pompage.

Il n'a pas été possible d'utiliser la pompe à débit supérieur à  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  à cause du faible diamètre du tube PVC des forages de pompage. Ainsi les rabattements dans les piézomètres sont souvent inférieurs à 50 cm, et l'on obtient plus rapidement l'établissement d'un régime permanent. Ce qui ne manque pas de jouer sur la précision des paramètres calculés.

Il est alors vivement recommandé, avant l'implantation des piézomètres, de définir clairement les objectifs, pour le déroulement d'un meilleur test et pour cela il faut:

- dans chaque niveau testé qu'il y ait près du forage de pompage un piézomètre crépiné à la même profondeur,
- que le diamètre du forage soit adapté aux pompes de gros diamètres disponibles sur le marché.

#### - Les mesures piézométriques

Les prélèvements et Les mesures de paramètres physico-chimiques, doivent s'effectuer normalement après un vidange du piézomètre. Ceci est impératif pour des échantillons destinés à l'analyse du deutérium, car les eaux ayant longtemps séjourné dans le piézomètre ont dû subir une évaporation. la vidange permet alors d'obtenir une meilleure qualité de la nappe. A défaut de pouvoir vidanger, il est recommandé dans la basse vallée où l'on observe un fort gradient de variation des paramètres physico-chimiques en fonction de la profondeur, d'effectuer dans chaque piézomètre les mesures à une profondeur régulière (de préférence à deux mètres du fond du piézomètre).

#### - Les variations de niveaux d'eau

Les endroits pour implanter les piézomètres doivent être accessibles en toute saison sans difficulté majeure. Tel n'est pas le cas pour tous les piézomètres de l'OMVS. En effet rares sont ceux accessibles en période hivernale, ceci à cause des inondations. Par conséquent les valeurs maximales de niveau piézométrique font souvent défaut dans les données, ce qui constitue un grand handicap pour les corrélations du niveau de la nappe avec celui du fleuve.

Dans la moyenne vallée en réalité, seule la ligne N°4 Thilogne pose beaucoup de difficulté d'accès, sinon pour les autres lignes, il suffit de disposer d'une mobylette en plus de la voiture pour effectuer toutes les mesures. Quant à la ligne N°4 il faudrait responsabiliser des villageois capables de lire et écrire pour effectuer les mesures dans les piézomètres enclavés.

Il est regrettable que les piézomètres destinés à être équipés de limnigraphe ne le soient pas. En effet cela aurait permis une meilleure appréciation des fluctuations de la nappe notamment de celles liées à des actions limitées telles les pluies efficaces et les lâchures des barrages. Il est impératif de procéder à un tel équipement pour les travaux à venir.

#### - Les échanges hydriques dans la vallée

Notre approche consiste à l'évaluation de la recharge de la nappe, par deux méthodes de bilan hydrique J. Albergel, 1991 et R Malou 1992, qui ont l'avantage de fonctionner au pas de temps journalier, et par l'évaluation de la recharge de la nappe par la variation du niveau piézométrique.

La non prise en compte de l'apport du fleuve à la nappe, dans la méthode empirique, et l'absence de quantification partielle des différents apports à la nappe dans la méthode d'évaluation de la recharge de la nappe ne permettent pas encore de donner toutes les explications du système de fonctionnement hydrique de la vallée alluviale du Sénégal.

Pour une meilleure approche du fonctionnement hydrique dans la vallée, il faudrait un modèle de bilan au pas de temps journalier, qui va comptabiliser comme paramètres d'entrée :

- l'état de surface (le coefficient de ruissellement)
- l'état de la zone non saturée (la réserve utile)
- les apports d'eaux de surface en général (pluies, cours d'eau, et eaux d'irrigation)
- les échanges inter-nappes doivent être prises en compte.

Le paramètre relatif aux cours d'eau sera le plus difficile à quantifier en raison du grand nombre, d'affluents ou effluents du fleuve sur lesquels on ne dispose pas de relevés hydrologiques. Ce qui rend difficile la comparaison du module du fleuve à Bakel à celui de Dagana par exemple.

Il sera tenu compte de l'inversion, dans l'année, des échanges entre la nappe et le fleuve.

Quant à l'échange inter-nappe nous l'avons identifié entre les trois nappes (alluviale, éocène et maastrichtienne). La surface de la vallée alluviale entre Manaël et Rosso est estimée à 8.300 km<sup>2</sup>.



## CONCLUSION GENERALE

Il ressort de cette étude, destinée à une meilleure connaissance des différents échanges hydriques dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal que:

les formations alluviales de la vallée sont hétérogènes, elles sont composées en général de sables, de sables argileux, et d'argiles, elles se présentent en structure lenticulaire. Leur teneur en argile diminue avec la profondeur. Elles reposent sur un substratum (éocène ou maastrichtien) souvent faillé.

Deux types d'aquifères ont été identifiés dans ces formations alluviales. Entre Manaël et Saldé se trouve un aquifère alluvial multicouche en continuité avec les formations profondes (maastrichtiennes et éocènes), tandis qu'à Podor on a des aquifères alluviaux multicouches distincts, entre lesquels existent des formations argileuses franches.

Ces aquifères de transmissivité comprise entre  $9.5 \cdot 10^{-3}$  et  $4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-2}/\text{s}$ ; et un coefficient d'emmagasinement compris entre  $8.5 \cdot 10^{-5}$  et  $1.2 \cdot 10^{-2}$ .

Dans ces aquifères de la moyenne vallée, on observe des nappes libres à semi-captives (selon l'épaisseur de la couche supérieure argileuse) dans la zone Manaël et Saldé, et dans la zone Podor on observe également des nappes libres à semi-captives, parmi lesquelles des nappes perchées, mais aussi des nappes captives *stricto-sensus*.

Les nappes alluviales, en général ont, des échanges hydriques avec les cours d'eau. Ces échanges sont prédominants dans le sens cours d'eau-nappes, et ils s'effectuent surtout à travers la berge, le fond du lit du fleuve étant partiellement colmaté.

La nappe alluviale dans la zone Manaël-Saldé est en continuité hydraulique, avec celles de l'Eocène et du Maastrichtien, par phénomène de drainage.

Les eaux de la nappe alluviale correspondent à un mélange d'eaux anciennes et d'eaux récentes, ce qui prouve les échanges inter-nappes d'une part mais aussi les échanges entre ces nappes et les eaux de surface d'autre part.

L'alimentation de la nappe alluviale diminue de l'amont vers l'aval. Kanel et Thilogne correspondent à des zones de meilleure recharge de la nappe, tandis que le marigot Oued-el-garfa correspond à une zone de vidange de la nappe.

D'après les résultats de la tentative de bilan que nous avons entreprise, de 1988 à 1991 la recharge annuelle de la nappe par les eaux du fleuve correspond à 6 % du volume d'eau perdu entre Bakel et Dagana. La reprise notamment par phénomène évaporatoire de cette recharge avoisine les 98 %.

Une étude plus approfondie des composantes du bilan, après complément des données de terrain déjà disponibles, permettra de confirmer les résultats obtenus ou d'y apporter les correctifs nécessaires.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., PEPIN Y. , (1991). - Etude des ressources en eau des Iles du Cap-Vert, *rapport de projet - P.N.U.D - CVI/001/90*, Mission d'expertise du 10 Décembre au 20 Janvier 1991, 111 p.
- ARCHAMBAULT J., (1960). - Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale, *imprimé Berger-Levrault, Nancy*.
- AUDIBERT M., (1970). - Delta du fleuve Sénégal Etude hydrogéologique Projet Hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal; *Rapport Projet AFR-REG-61, 1 carte, 4 tomes*.  
I. Généralités et rapport de synthèse: 27 p  
II. Géologie - Logs Géologiques: 63 Logs - 31 p  
III. Hydrogéologie: 30 p.  
IV. Drainabilité: 54 p.
- BELLION Y., (1987). - Histoire géologique Post-Paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, lullimmeden, Tchad), *Thèse Doctorat d'état Es-sciences, Avignon, 302 p*.
- BONFILS P., CHARREAU C., MARA, (1963). - Etudes lysimétriques au Sénégal. *Bulletin Agronomique N°19, Inst. Rech. Agr. Trop. et Cult. Viv. (CRA Bambey)*.
- BONKEL A., (1989). - Etude de la répartition des paramètres hydrochimiques des eaux souterraines de l'aquifère alluvial situé en rive droite du fleuve Sénégal entre Keur-Macène et Dagana, *rapport d'ingénieur, Inst. Sci. Terre (I.S.T.) Univ. C.A.DIOP, Dakar; 7 p*.
- BROCHET P., GERBIER N. (1968). - L'évapotranspiration aspect agrométéorologique évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. *Monographie de la Météorologie Nationale N°65, 36p., S.M.M. Climatologique Paris France*.
- B.R.G.M., 1967. - Chronique d'hydrogéologie; N°11 juin 1967 *Editions BRGM*.
- CASENAVE A., VALENTIN C. (1989). - Les états de surface de la zone sahélienne, influence sur l'infiltration; 192 p. *Editions de l' ORSTOM*.
- CASTANY G., (1982). - Principes et méthodes de l'hydrogéologie, *Editions DUNOD: Paris. 233 p*.
- C.E.F.I.G.R.E., (1984). - Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin, et du sédiment ancien de l'Afrique de l'Ouest. *Sophia Antipolis - 06561 Valbonne Cedex - France, 121 p*.
- CHARREAU C., (1958-1959). - Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal: *Bulletin Agronomique. N°19 Inst. Rech. Agro. Tro. et des cultures vivrières*.
- DA BOIT M., (1993). - Impacts des aménagements hydroagricoles sur la nappe superficielle de la basse vallée du fleuve Sénégal (Thiagar, Richard-Toll, Dagana). *Rapport de DEA de géologie appliquée mention hydrogéologie. Départ. Géol., Fac. Sci., Univ. C.A.DIOP de Dakar, 94 p*.
- DEBUISSON J. , (1968). - Compte rendu de surveillance des travaux de recherche et d'exploitation d'eaux souterraines - 1966 à 1968 programme de 9 forages d'exploitation et 15 forage-puits, *rapport BRGM: 70 DAK 6*.
- DEPAGNE J. , (1963). - Exploitation et interprétation des mesures piézométriques effectuées de juillet 1961 à mai 1963 dans le sud-ouest mauritanien, la vallée du fleuve Sénégal , le lac de rkiz et le lac d' Aleg, *rapport BRGM*.

- DIA O., (1986). - la chaîne panafricaine et hercynienne des Mauritanides face au bassin protérozoïque supérieur à dévonien de Taoudéni dans le secteur clef de Méréria (Taganet, sud RIM). lithostratigraphie et technique. Un exemple de technique tangentielle superposée. *Thèse de doctorat d'état Univ. Aix-Marseille III*, 516 p. 57 tabl., 7 ph, h. t., 3 pl. phot.
- DIAGANA A. (1990). - Etudes des paramètres hydrodynamiques, des aquifères de la basse vallée du fleuve Sénégal, entre Saint-louis et Podor; *rapport de DEA - Départ. Géol., Fac. Sci. Univ. C.A.Diop de Dakar*, 62 p.
- DIAO S.M., (1992). - Etude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal (Secteur Rosso - Dagana - Lac de Guiers) *rapport de D.E.A. Départ Géol., Fac. Sci., Univ. C.A.DIOP de Dakar* 71 p.
- DIENG. B., (1987). - Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitatives du bassin sédimentaire du Sénégal; Essai d'explication des anomalies piézométriques observées, *thèse d'ingénieur: Ec. Nat. Mines de Paris, France*.
- ELOUARD P. (1959) - Etude géologique et hydrogéologique du Guélba mauritanien et de la vallée du Sénégal, *thèse*.
- EQUESEN (1993)., (Environnement et qualité des eaux souterraines) projet CEE TS 2 0198 F EDB - *Rapport de synthèse Tome 4*.
- FAYE A. (1983). - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass et de ses environs (Sénégal). *Thèse de 3ème cycle., Fac. Sci. Départ de Géol., Univ. de Dakar*.
- FONTES J.C., (1976). - Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles: quelques aspects. *Thèse de doctorat d'état Univ. Pierre et Marie curie Paris VI*.
- GAYE C.B., (1990). - Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies, et de décharge évaporatoire des aquifères libres, sous climat semi - aride au nord du Sénégal. *Thèse de doctorat d'état Départ Géol., fac. Sci. Univ. C.A.DIOP, Dakar*, 243 p.
- GENETIER B. (1984). - "La pratique des pompages d'essai en hydrologie", *manuel & méthodes, Editions du B.R.G.M., 88 p.*
- GOUZES R. et GAVROST M. (1968). - Etude de la réalimentation et de la salinité de la nappe des "sables maastrichtiens" du Sénégal *Rapport du BRGM*.
- GUIEU G. et al., (1975). - Excursion géologique en Mauritanie du 19 au 26 Avril 1975. *Rapport Départ Géol., fac. Sci. Univ. de Dakar*, 93 p.
- Illy P., (1973). - Etude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal, Projet hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal *Rapport RAF/65061*, 158 p.
- KARPOFF R., (1970).- Rapport de mission Hydrogéologique préliminaire dans la vallée du fleuve Sénégal entre le Delta et la Falémé. *Rapport Paris 16°, F.A.O.; 29 p.*
- LAMAGAT J. P. (1989). - Modèle de propagation des crues du fleuve Sénégal calage des paramètres, *rapport ORSTOM / OMVS*.
- LINDBERG P., (1974). - Résumé des notions d'hydrogéologie exposées aux cadres maliens du projet des nations unies pour la recherche des eaux souterraines; *Rapport 65 p.*
- MALOU R., (1992). - Etude des aquifères superficiels en basse Casamance: un modèle de bilan hydrique. *Thèse de 3ème Cycle. Départ Géol., fac. Sci. Univ. C.A.DIOP de Dakar*, 107 p.

- MICHEL P. (1969). - "Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie étude géomorphologique"; *Thèse de doctorat d'état es-lettres à l'univ. de Strasbourg 3 tomes.*
- MICHEL P., PASCAL M., DIENG. M., (1967). - Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000 "DAGANA" ,*rapport B.R.G.M. Dakar, 27 p.*
- MICHEL P., PASCAL M., (1967). - Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000 "SAINT-LOUIS" *rapport B.R.G.M. Dakar, 27 p.*
- MONCIARDINI (CH.), 1966. - la Sédimentation éocène au Sénégal, *Editions B.R.G.M. N°43.*
- O.M.V.S./ U.S.A.I.D. 625-095; (1988). - Compte rendu des pompages d'essai; Cellule eaux souterraines secteur de Saint -Louis du Sénégal, *Rapport OMVS.*
- O.M.V.S., 1989. - Répertoires hydrogéologiques, projet O.M.V.S./ U.S.A.I.D. 625-095, ( Bakel, Matam, Kaédi, Podor), *Rapport OMVS.*
- Coupes géologiques et techniques
  - Courbes granulométriques
  - Représentations Graphiques des analyses d'eau.
- O.M.V.S., (1972). - Etude hydroagricole de la vallée du Sénégal Reconnaissance hydrogéologique.: *rapport projet F.A.O., SL - 457.*
- OUEDRAOGO I., (1988). - "Contribution de la géochimie isotopique à la compréhension de la nappe déprimée du Ferlo septentrional". *Rapport de D.E.A. hydrogéologie Départ Géol., Fac. Sci. Univ. C.A.DIOP, Dakar, 57 p.*
- PONSARD F., (1984). - La marge du craton Ouest-africain du Sénégal à la Sierra Leone: Interprétation géophysique de la chaîne panafricaine et des bassins du protérozoïque à l'actuel. *Thèse géol. géophysique. Aix-Marseille III, 198 p.*
- ROUQUET L., (1988). - Principales méthodes graphiques d'interprétation des pompages - Evaluations des paramètres hydrodynamiques des aquifères. *Fascicule de travaux dirigés d'hydrogéologie, Fac. Sci. Départ. Géol. Univ. C.A.DIOP, Dakar, 21 p.*
- SAOS J. L., THIEBAUX J. P., DIAGANA A., DIAO M., KOUSSOUBE Y., - (1992). - Environnement et qualité des eaux du Sénégal (EQUESEN) Volet eaux souterraines. *Rapport d'avancement des travaux, O.R.S.T.O.M.*
- SCHENEBELI G., (1966). - "Hydraulique souterraine" collection du centre de recherches et d'essai de Chatou, *Editions Eyrolles 356 p.*
- SOUGY J., 1962 a. - West african fold belt *Geol. Soc. Am. Bulletin., V. 73.*
- SOUGY J., (1962 b). - Contribution à l'étude géologique des guelbs Bou Lerich (région d'Aoucert, Sahara espagnol) *Bulletin. Soc. Fr., Sér. 7 t. IV.*
- SOUGY J., (1969). - Grandes lignes structurales de la chaîne des Mauritanides et de son avant-pays (socle précambrien et sa couverture infracambrienne et paléozoïque), Afrique de l'Ouest *Bulletin. Soc. géol. Fr., Sér. 7 t. XI , n°2.*
- SPENGLER A. De, CASTELAIN J., CAUVIN J., LKERoy M. , 1966. - Le bassin secondaire-tertiaire du Sénégal. In: "Bassins sédimentaires du littoral africain", *Editions D. Reyre ., 1ère partie: Littoral Atlantique, Ass. Serv. Géol. Afr. Paris.*
- TANDIA A. A. ,(1988). - Synthèse hydrogéologique de la région de Casamance, contribution des techniques isotopiques à la connaissance des nappes d'eau souterraine. *Rapport de D.E.A., Fac des Sci et Tech. Départ. de Géol. Univ. C. A. D. de Dakar.*

- TANDIA A. A., (1990). - Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes Louga - Nord du Sénégal. *Thèse de 3ème cycle Univ. C. A. D. de Dakar.*
- TESSIER F., DARS R. et SOUGY J. (1961) - Mise en évidence des charriages dans la "serie d'Akjoujt" (République Islamique de Mauritanie). C.R. Acad. Sci. Paris, V 252.
- TESSIER F., FLICOTEAUX R., LAPPARTIENT J. R., NAHON D. et TRAT J. M. (1975). - Réforme du concept de Continental Terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'Ouest africain. *rapport IX<sup>e</sup> cong. Int. Séd., Nice, t. I.*
- THIEBAUX J. P., SAOS J. L., BADER J. C., (1992) Variation des hauteurs d'eau journalières du fleuve Sénégal de 1986 à 1992 . Rapport multig. ORSTOM Dakar Oct. 1992.
- TRAVY, Y., Gac J. Y., FONTES J. C. et FRITZ P., (1987). - Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluies du Sénégal. *Rapport Doc Tech. Départ Géol. Univ. Dakar.*

## TABLE DES MATIERES

	PAGE
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>A SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE</b> .....	<b>5</b>
1 GEOLOGIE REGIONALE.....	6
2 LE BASSIN SENEGALO-MAURITANIEN.....	6
2-1 LITHOSTRATIGRAPHIE.....	6
2-1-1 Les dépôts crétacés.....	6
2-1-2 Les dépôts éocènes.....	6
2-1-3 Les formations post-éocènes.....	6
2-2 ASPECT STRUCTURAL.....	9
3 GEOLOGIE DE LA VALLEE ALLUVIALE.....	9
3-1 LA STRUCTURE GEOLOGIQUE.....	9
3-2 LA LITHOSTRATIGRAPHIE.....	11
3-2-1 Maastrichtien.....	11
3-2-1-1 Coupes transversales dans la vallée.....	11
3-2-1-2 Coupes longitudinales dans la vallée.....	12
3-2-2 L'Eocène.....	12
3-2-2-1 Coupes transversales.....	12
3-2-2-2 Coupes longitudinales.....	13
3-2-3 Le Quaternaire.....	13
3-2-3-1 Coupes transversales.....	13
3-2-3-2 Coupes longitudinales.....	14
3-3 REMARQUES ET CONCLUSION.....	14
<b>B HYDRO-CLIMATOLOGIE</b> .....	<b>19</b>
1 HYDROLOGIE.....	20
1-1 LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE.....	20
Rive Gauche.....	20
Rive Droite.....	20
REMARQUE.....	20
1-2 IMPACTS DES BARRAGES SUR LE NIVEAU DES COURS D'EAU.....	22
2 PARAMETRES CLIMATIQUES.....	25
2-1 Les Pluies.....	25
2-2 Les phénomènes évaporatoires.....	26
- Evaporation Piche (EP).....	26
- Evapotranspiration (ETP).....	27
2-3 HUMIDITE RELATIVE.....	28
2-4 TEMPERATURES.....	29
2-5 LES VENTS.....	29
2-6 INSOLATION.....	29
<b>C SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE</b> .....	<b>31</b>
1 ETUDES ANTERIEURES.....	32
1-1 LA NAPPE DU MAASTRICHTIEN.....	32
Alimentation de la nappe maastrichtienne.....	32
1-2 LA NAPPE EOCENE.....	32
Alimentation de la nappe éocène.....	32
Alimentation par les eaux de pluies.....	32
Alimentation par les eaux du fleuve.....	36
Alimentation par la nappe Maastrichtienne.....	36

1-3	LA NAPPE DU CONTINENTAL TERMINAL.....	36
	Alimentation des nappes du Continental Terminal.....	39
1-4	LA NAPPE ALLUVIALE : QUATERNAIRE.....	39
1-5	RELATIONS INTER-NAPPES.....	39
1-6	PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES.....	41
2	PRESENTE ETUDE.....	42
2-1	DELIMITATION DES DIFFERENTS AQUIFERES.....	42
2-1-1	L'aquifère du Maastrichtien.....	42
2-1-2	L'aquifère de l'Eocène.....	42
2-1-3	Les formations du Quaternaire.....	42
2-2	RAPPEL SUR LES POMPAGES D'ESSAI.....	42
2-2	INTERPRETATION DES POMPAGES D'ESSAI.....	47
2-3-1	<b>Relation nappe maastrichtienne / nappe alluviale.....</b>	<b>47</b>
	Double station de pompage à Kanel: GA345-346.....	47
	<u>Pompage dans les formations maastrichtiennes: GA345.....</u>	47
	<u>Pompage dans les formations quaternaires GA346.....</u>	48
	Conclusion.....	50
2-3-2	<b>Relation nappe éocène / nappe alluviale.....</b>	<b>51</b>
	Station de pompage à Mbakhna: GA333-334.....	51
	<u>Pompage dans les formations éocènes: GA333.....</u>	51
	<u>Pompage dans les formations quaternaires: GA334.....</u>	52
	Conclusion.....	53
2-3-3	<b>Relation nappe maastrichtienne / nappe éocène.....</b>	<b>54</b>
	Station de pompage à Boynadji: GA368.....	54
	Conclusion.....	56
2-3-4	<b>Relation nappe / cours d'eau.....</b>	<b>56</b>
	Station de pompage à Youmaniéré: DA241/242.....	56
	<u>Pompage dans les formations éocènes: DA241.....</u>	57
	<u>Pompage dans les formations éocènes: DA242.....</u>	57
	Conclusion.....	58
2-3-5	<b>Mise en évidence d'une limite étanche.....</b>	<b>59</b>
	Station de pompage à Thilogne: GA318/319.....	59
	<u>Pompage dans les formations quaternaires: GA318.....</u>	59
	<u>Pompage dans les formations éocènes: GA319.....</u>	60
	Conclusion.....	62
2-3-6	<b>Mise en évidence de nappes distinctes.....</b>	<b>62</b>
	Station de pompage à Podor: GA237.....	62
	Conclusion.....	66
D	ETUDES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES EAUX.....	67
1	ETUDE DE LA CONDUCTIVITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	68
1-1	LES GRAPHIQUES DE LA CONDUCTIVITE.....	68
1-2	LES CARTES DE CONDUCTIVITE.....	70
2	ANALYSES CHIMIQUES.....	70
2-1	CLASSIFICATION DES EAUX PAR DIAGRAMME DE PIPER.....	70
2-2	RELATION NaCl ET CONDUCTIVITE.....	70
2-2-1	Les pollutions artificielles.....	73
2-2-2	La nature chimique de l'aquifère.....	73
2-2-3	Le transgression nouakchottienne.....	73
	Discussion.....	73
3	CONTRIBUTION DES ISOTOPES A L'ETUDE DES ECHANGES HYDRIQUES DANS LA VALLEE.....	75
3-1	TRAVAUX ANTERIEURS.....	75
3-2	TRAVAUX ENTREPRIS.....	76
3-2-1	Données de base pour l'interprétation.....	76
3-2-2	Interprétation des résultats.....	78











	- Isotopes stables: ( $^{18}\text{O}$ et $^2\text{H}$ ).....	78
	- isotope radioactif: ( $^3\text{H}$ ).....	80
	CONCLUSION.....	82
<b>E</b>	<b>RELATION PIEZOMETRIQUES EAUX DE SURFACE ET EAUX SOUTERRAINES.....</b>	<b>83</b>
1	LE CARTES PIEZOMETRIQUES DANS LA ZONE MANAEL-SALDE.....	84
	1-1 DESCRIPTION GENERALE DES CARTES.....	84
	1-2 INTERPRETATION DES DIFFERENTES CARTES.....	84
	Les dépressions piézométriques.....	84
	Le dôme piézométrique.....	84
	Conclusion.....	84
2	L'INFLUENCE DES COURS D'EAU SUR LE NIVEAU DES NAPPES.....	86
3	FLUCTUATION DE LA NAPPE EN FONCTION DE LA DISTANCE D'UN PLAN D'EAU ET DE L'EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE.....	89
4	LES EFFETS DE L'IRRIGATION SUR LE NIVEAU DE LA NAPPE.....	90
	4-1 LA BASSE VALLEE.....	90
	4-2 LA MOYENNE VALLEE.....	90
	- Périmètre hydroagricole de Nguigilone: ligne n°3.....	90
	- Périmètre pilote du Gorgol (PPG): ligne N°4.....	90
5	LES EFFETS DE LA PLUIE SUR LES EAUX SOUTERRAINES.....	92
<b>F</b>	<b>LES ECHANGES HYDRIQUES DANS LA VALLEE DU SENEGAL METHODE DE.....</b>	<b>93</b>
	INTRODUCTION.....	93
1	ETATS DES TRAVAUX ANTERIEURS DE BILAN HYDRIQUE.....	94
	1-1 ILLY (1972).....	94
	1-2 DIENG (1987).....	95
	1-3 DIAGANA (1990).....	95
	1-4 GAYE (1990).....	96
	Remarques.....	96
2	DOMAINE D'APPLICATION DU BILAN HYDRIQUE.....	97
	2-1 CHOIX ET DESCRIPTION DES SITES.....	97
	2-2 REMARQUES SUR LA NATURE DE LA VALLEE.....	97
3	LES TERMES GENERAUX DU BILAN HYDRIQUE.....	97
	3-1 NOTION DE RESERVE HYDRIQUE DU SOL.....	98
	3-2 LA NOTION DE RUISSELLEMENT.....	100
	3-3 ECOULEMENT DU FLEUVE A BAKEL ET DAGANA.....	102
4	LA METHODE D'APPROCHE DU BILAN HYDRIQUE.....	104
	4-1 MODELE DE BILAN DE Albergel, (1991).....	104
	4-1-1 Les hypothèses de la méthode.....	104
	4-1-2 Application du modèle à la vallée du Sénégal.....	106
	4-1-3 Les résultats du modèle de J. ALBERGEL dans la vallée.....	106
	4-2 METHODE DU FLUX NET DE MALOU, (1992).....	108
	4-2-1 Concept physique du modèle.....	108
	4-2-2 Concept mathématique du modèle.....	108
	4-3 METHODE DE CALCUL PAR LA VARIATION DE NIVEAU DE LA NAPPE.....	112
	4-3-1 Le coefficient d'emmagasinement et la porosité efficace.....	112
	4-3-2 Méthode de calcul et résultats.....	113
	4-4 SYNTHESE DES DIFFERENTES METHODES D'APPROCHE DE BILAN.....	115
	CONCLUSION.....	119
	RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION GENERALE.....	120
	DIFFICULTES ET LIMITES DES METHODES D'ETUDE.....	121
	CONCLUSION GENERALE.....	123

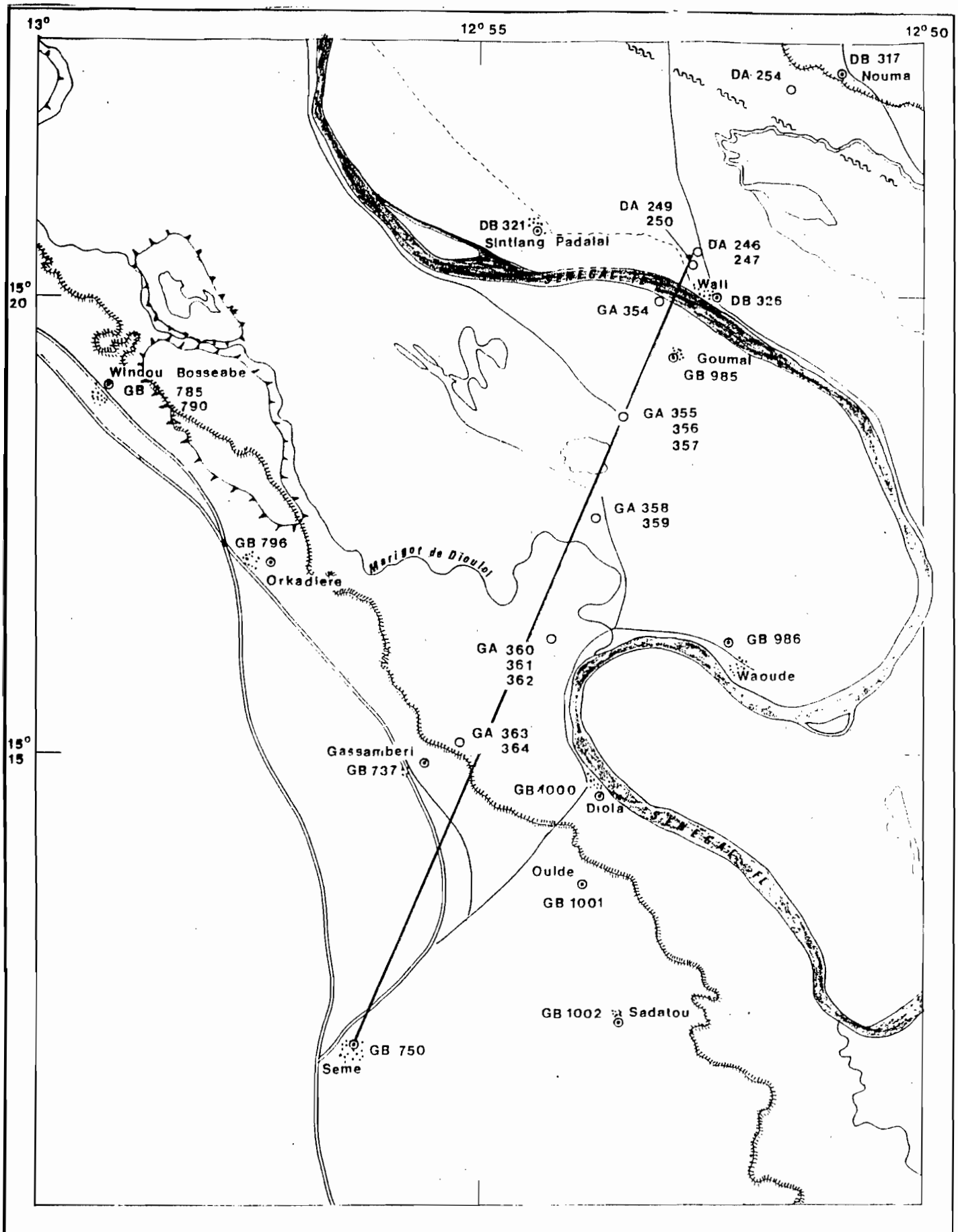


## ANNEXES

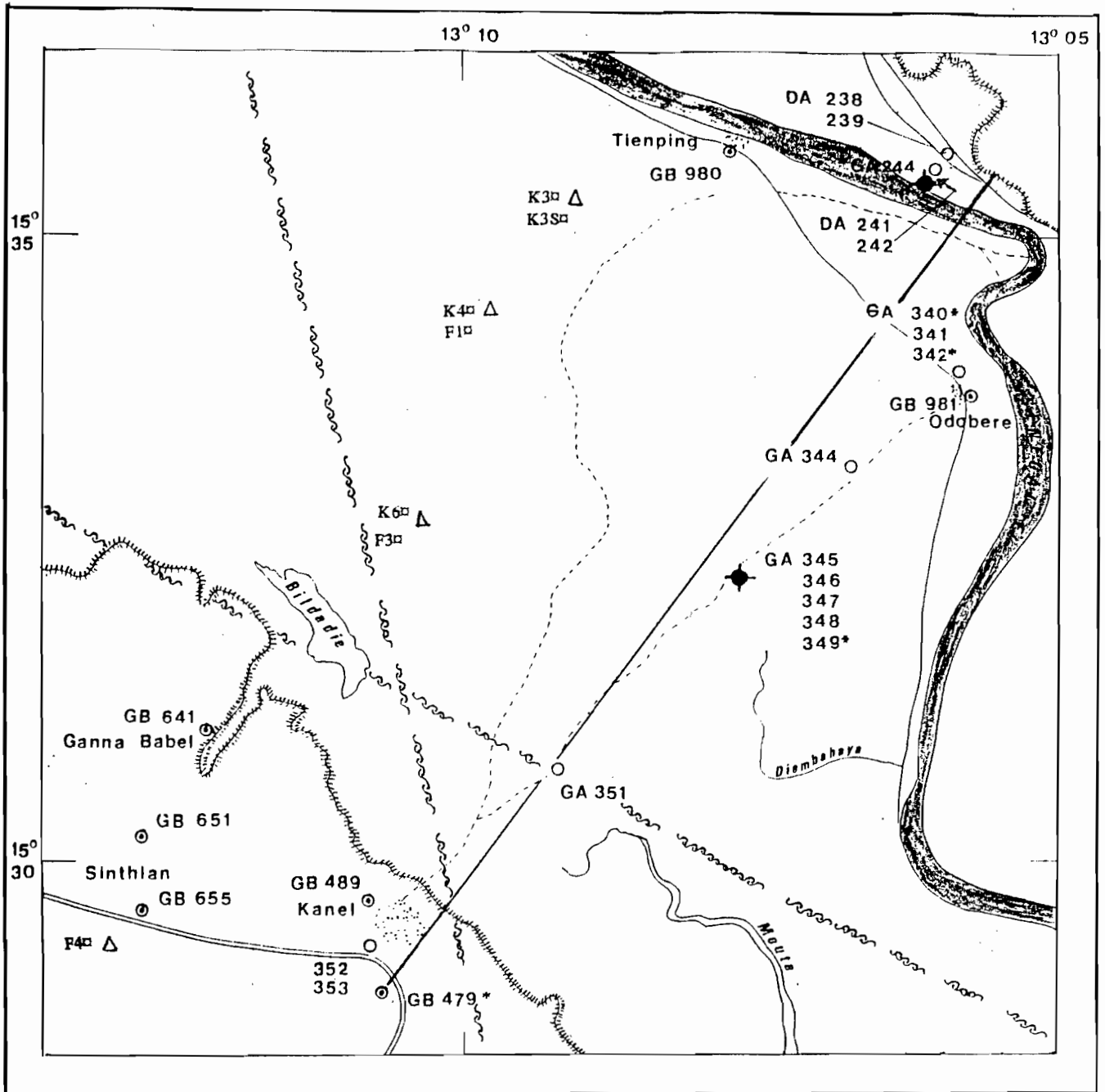
**ANNEXES**  
**CONTEXTE GEOLOGIQUE**

## LEGENDE ANNEXE (An.-1 à An.-7)

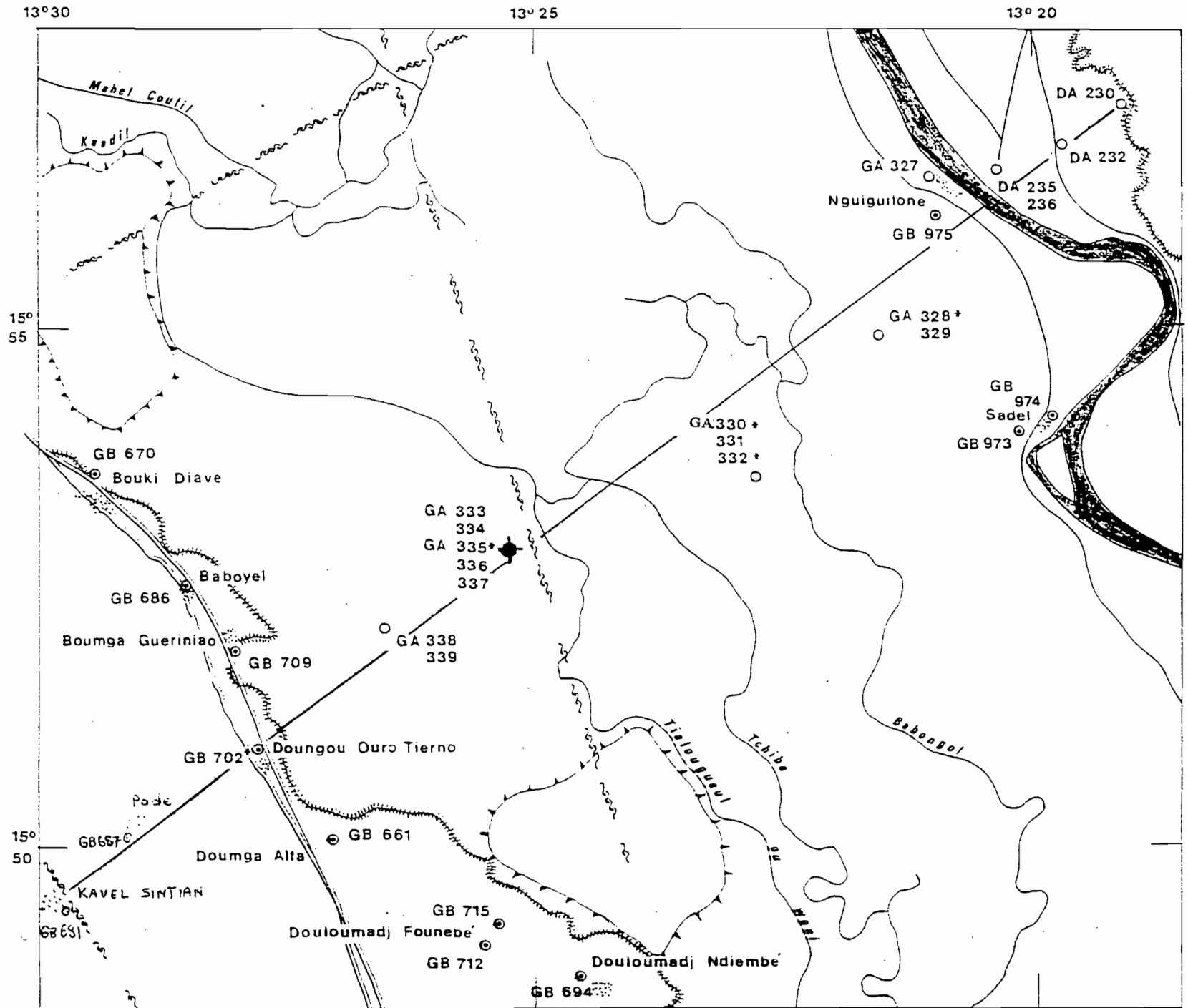
-  limite de la vallée alluviale
-  piste secondaire
-  piste principale
-  route nationale
-  piézomètre
-  puits villageois
-  station de pompage
- PG1 piézomètre N°1 ( projet EQUESSEN)
-  piézomètre (ILLY)
- DA225: piézomètre N°225 sur la rive droite (OMVS)
- GA237: piézomètre N°237 sur la rive gauche (OMVS)
- DB189: puits villageois N°189 sur la rive droite (OMVS)
- GB702: puits villageois N°702 sur la rive gauche (OMVS)
- \* prélèvement isotopique ( Projet EQUESSEN; 1991)
- prélèvement isotopique ( ILLY ; 1972)
-  faille présumée (LEPRIOL)
-  digue de protection de casier agricole



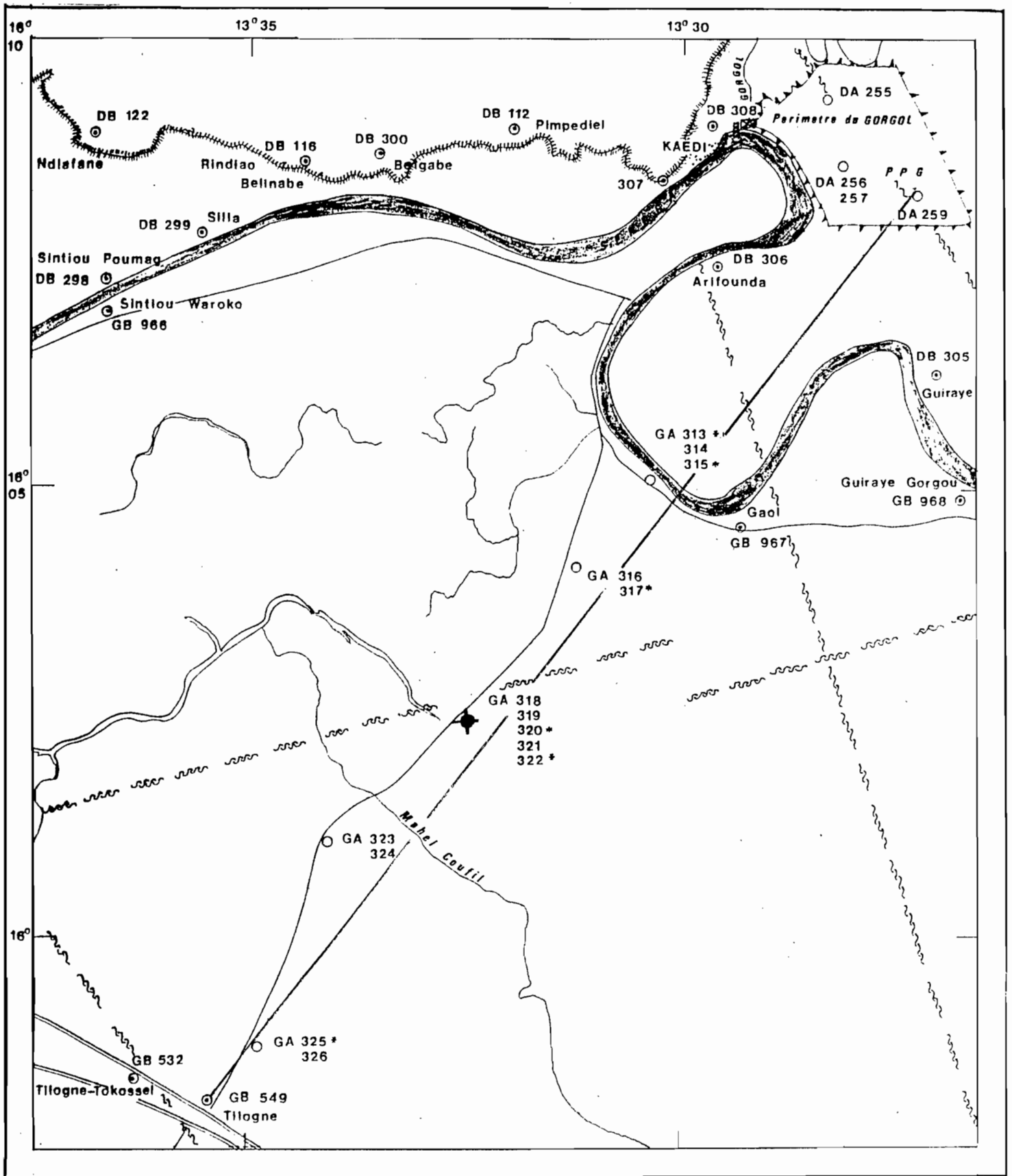
AN.-1: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°1 SEMME



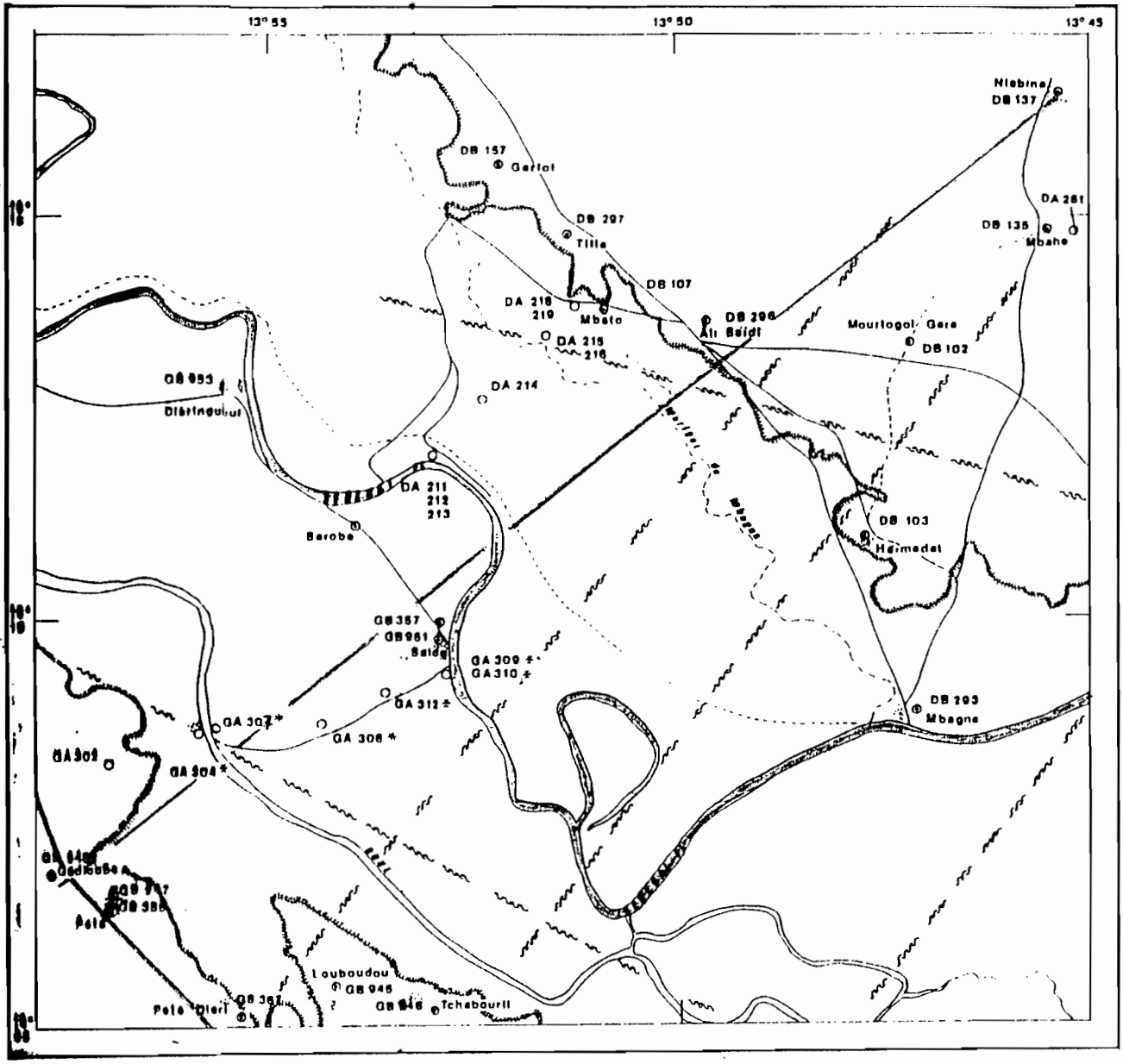
AN.-2: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°2 KANEL



AN.-3: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°3. NGUIGILONE

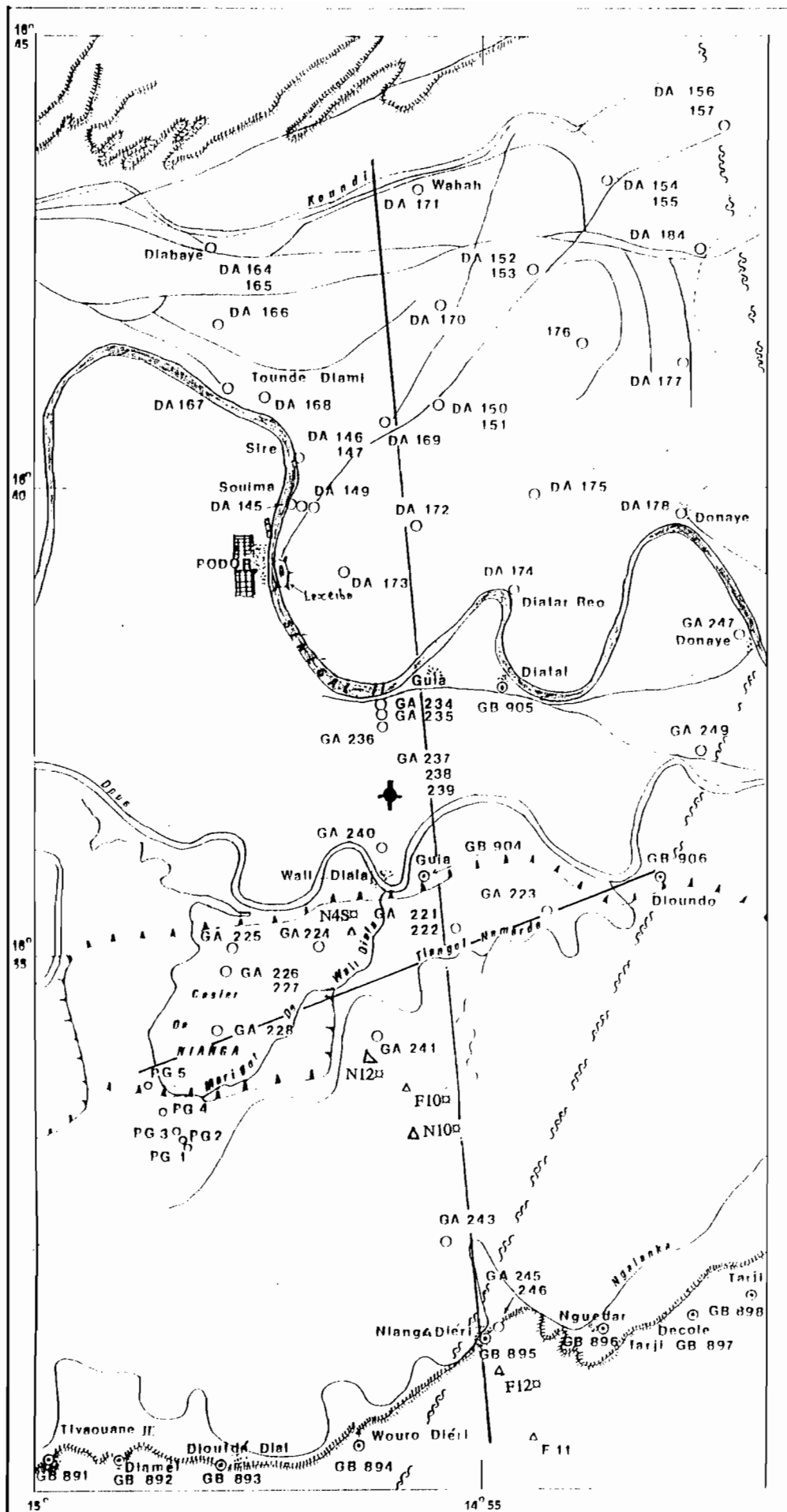


AN.-4: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°4 THILOGNE

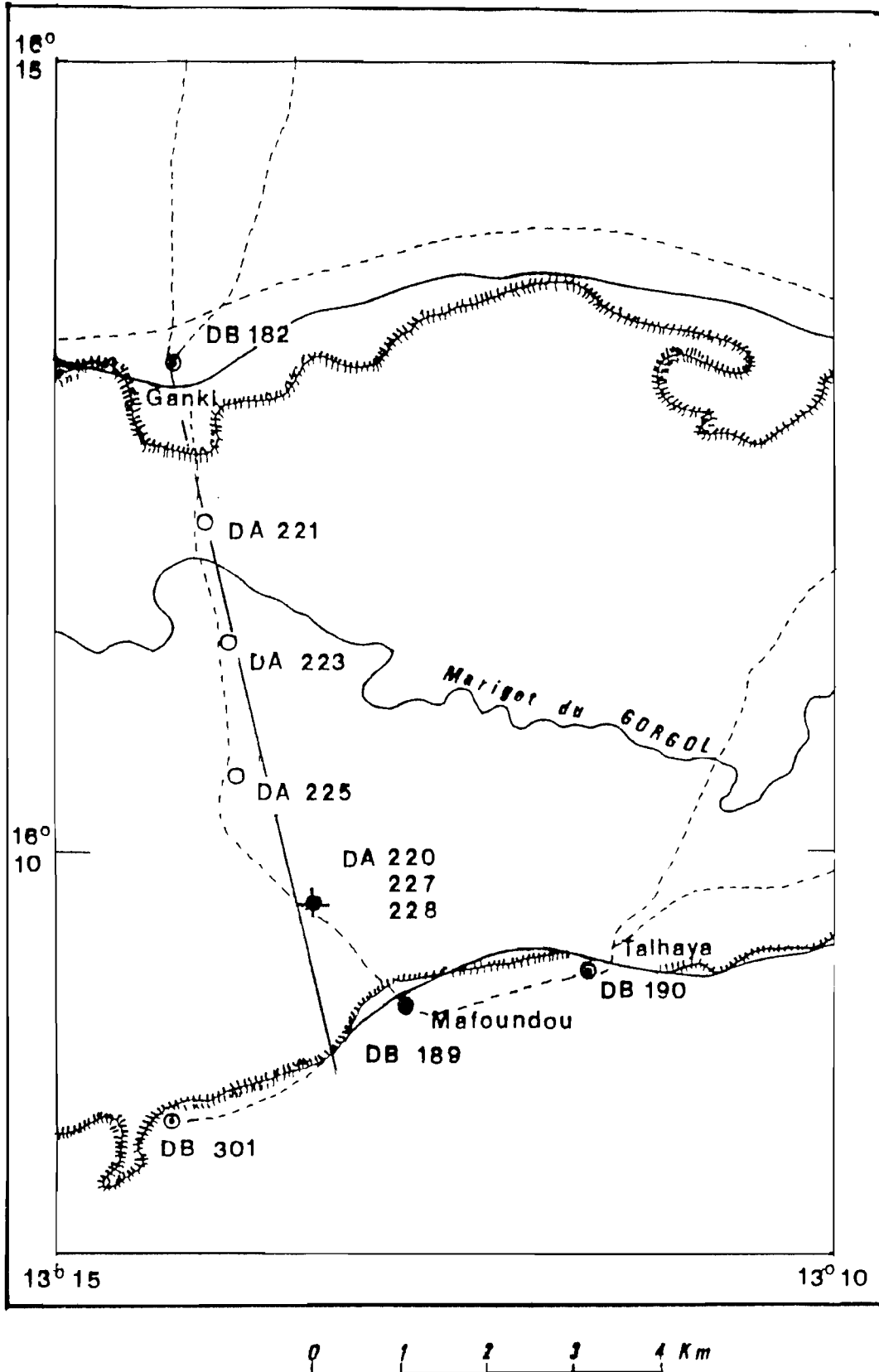


AN.-5: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°5 SALDE




















AN.-6: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE N°6 PODOR





An.-7: LOCALISATION DE LA LIGNE PIEZOMETRIQUE GORGOL

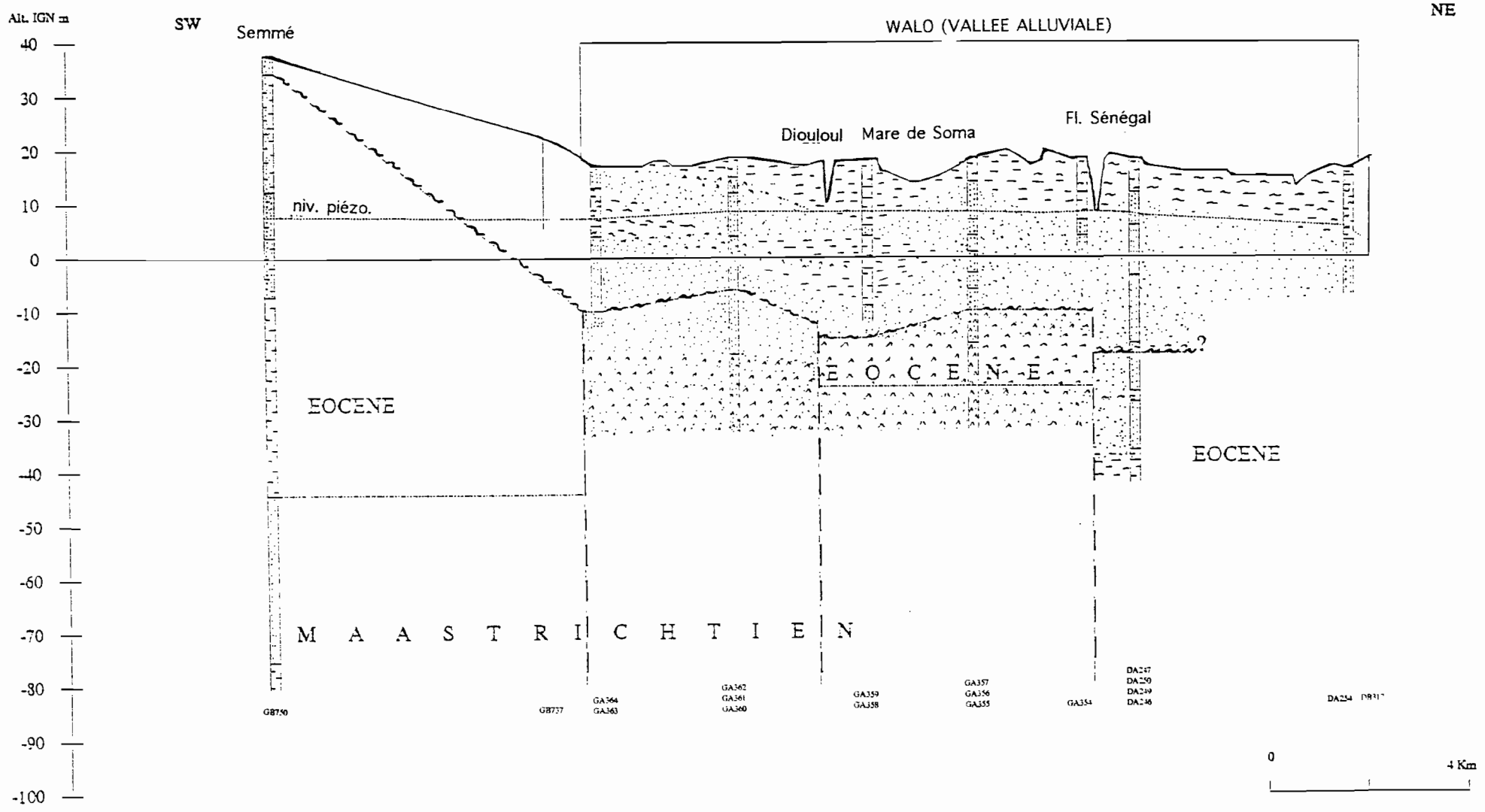
LEGENDE

-  sable fin
-  sable grossier
-  sable argileux / argile sableuse
-  sable silteux / silt sableux
-  sable marneux / marne sableuse
-  silt
-  silt argileux / argile silteuse
-  argile
-  gravier
-  calaire
-  calcaire gréseux
-  calcaire marneux / marne calcaire
-  argile marneuse / marne argileuse
-  marnes

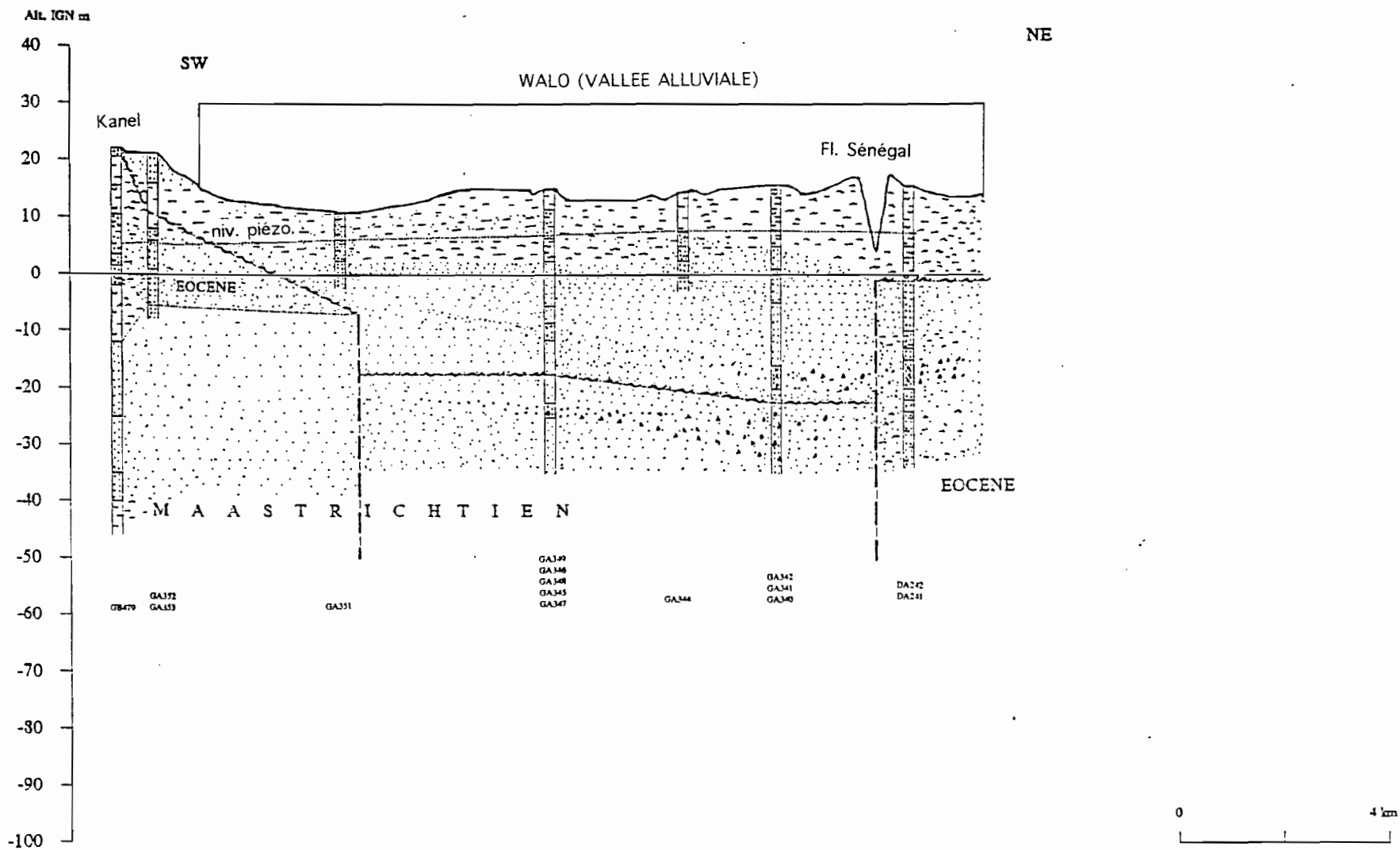
 faille

 Mur du Quaternaire

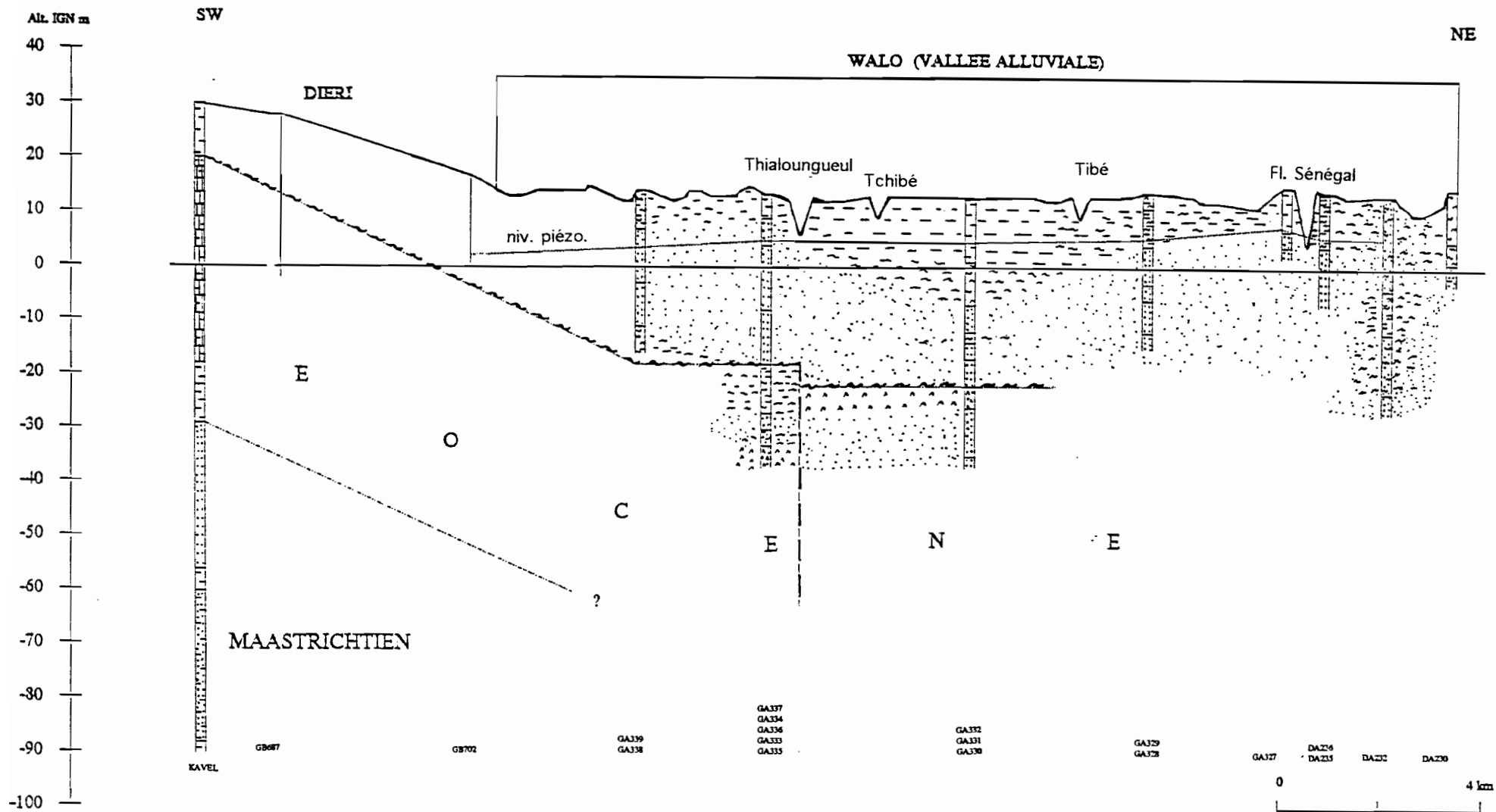
 Mur de l'Eocène



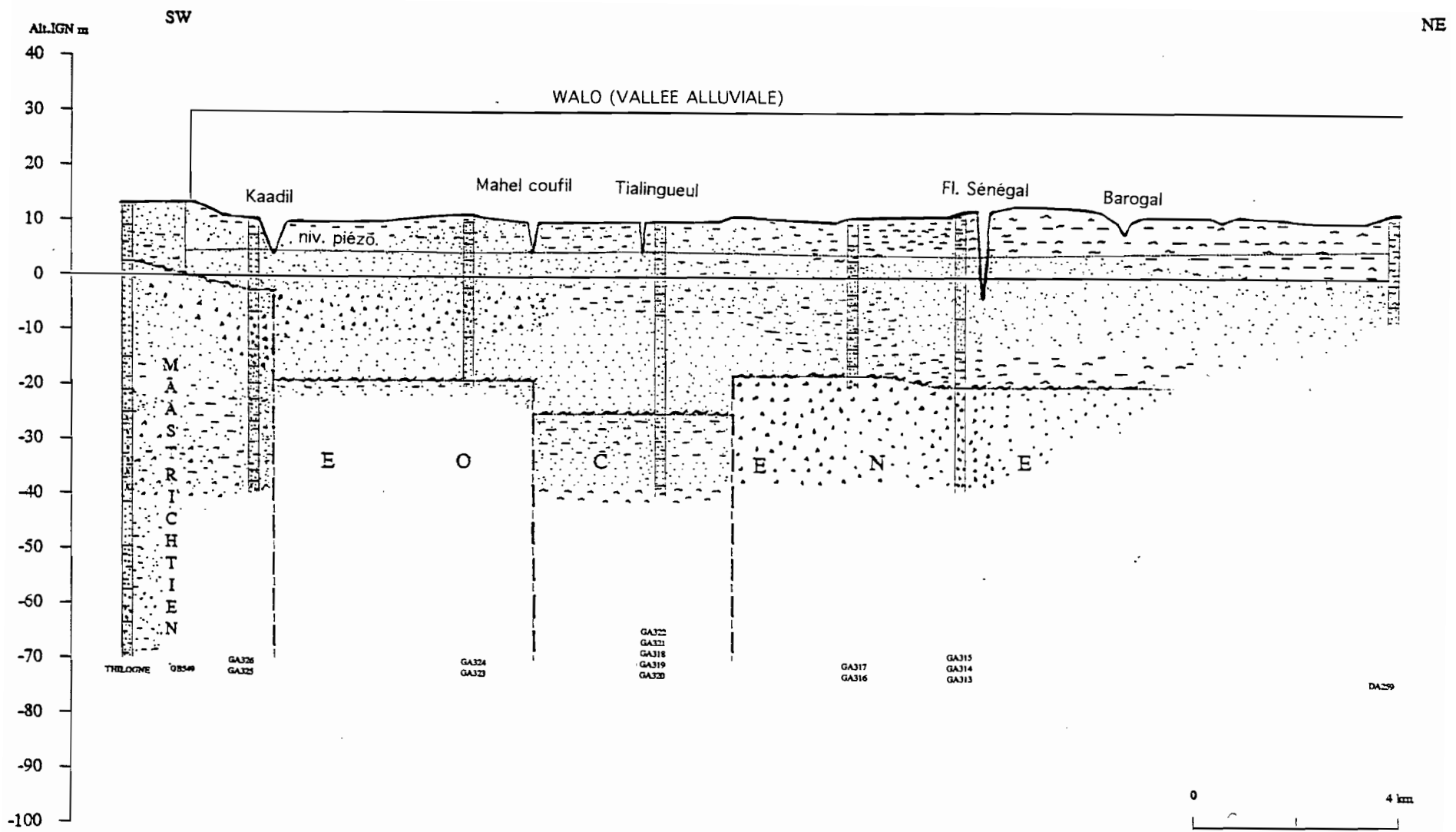
An.-8: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L1 SEMME



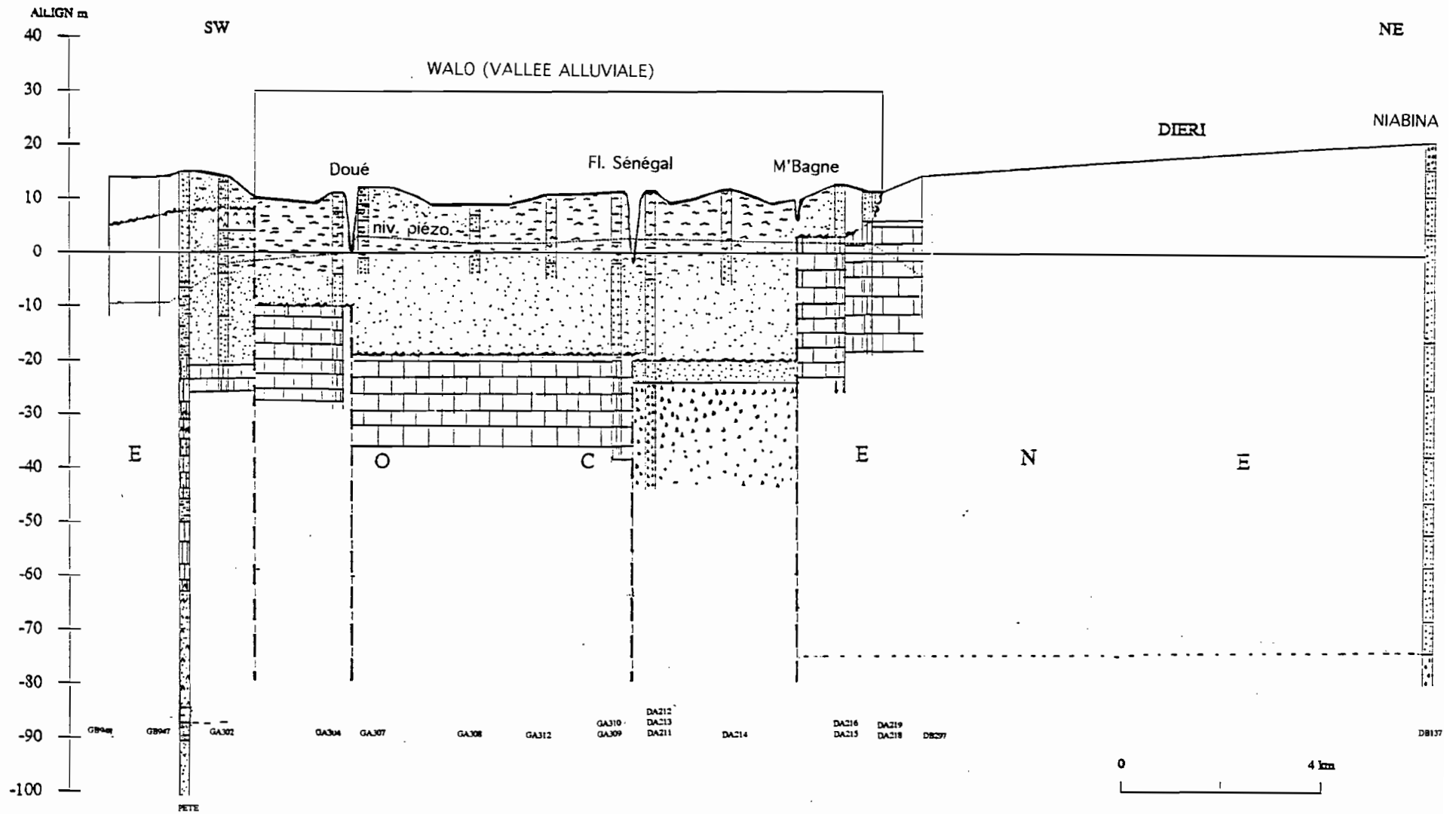
An.-9: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L2 KANEL



An.-10: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L3 NGUIGILONE

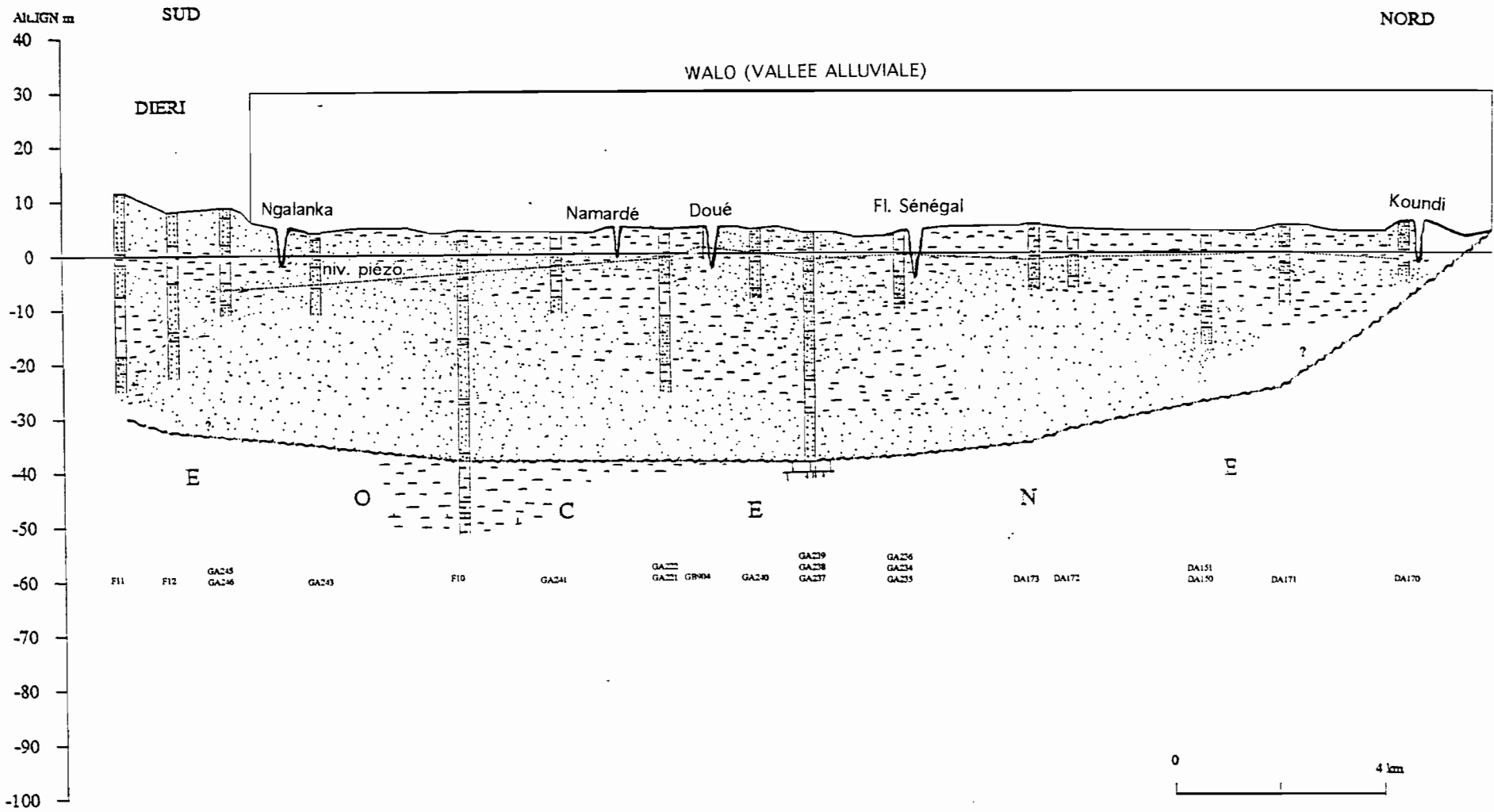


An.-11: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L4 THILOGNE



An.-12: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L5 SALDE





An.-13: COUPE TRANSVERSALE DANS LA MOYENNE VALLEE: L6 PODOR

## ANNEXES

### SYNTHESES HYDROGEOLOGIQUES







## An. 14b: INTERPRETATION COMPLEMENTAIRE DES POMPAGES D'ESSAI

Quatre stations de pompage parmi lesquelles on distingue une double station DA249/250 où les piézomètres sont crépinés soit dans l'Eocène soit dans le Quaternaire et trois stations où les piézomètres sont crépinés uniquement dans les formations éocènes .

### STATION DE POMPAGE DA249-DA250 (Eocène et Quaternaire)

#### Situation

La double station de pompage DA249-DA250 est située sur la rive droite, à environ 0.5km du fleuve, sur la ligne n°1.

#### Lithologie

Le log stratigraphique de la station permet d'identifier deux étages: l'Eocène et le Quaternaire.

Dans l'Eocène on distingue:

- 5m de formation argile limoneuse à la base
- 18m de sable, à sable argileux

Dans le Quaternaire on distingue

- 30m de sable limoneux à silt
- 6m de limon argileux.

#### Caractéristiques techniques des sondages

Station DA249/250

N° PIEZO	DA250(35m)	DA249(58m)	DA247(29m)	DA246(49m)
rayon	3"	3"	1"1/4	3"
long. crépine	11.1m	18.4m	1m	1m
alt. crépine	-16,6	-39,7	-10,5	-30,7
alt. repère	19,31	19,305	19,321	19,288
margelle	0.993m	0.988m	0.775m	1m
formation	sab.QUAT	sab.EOC.	sab.QUAT	sab.EOC.

Deux pompages d'essai de 72h chaque ont été effectués à la station:

- dans le DA249(58m) avec un débit de 20.2m<sup>3</sup>/h
- dans le DA250(35m) avec un débit de 19.8m<sup>3</sup>/h

Interprétation des pompages d'essai:

Pompage dans DA249: (Eocène)

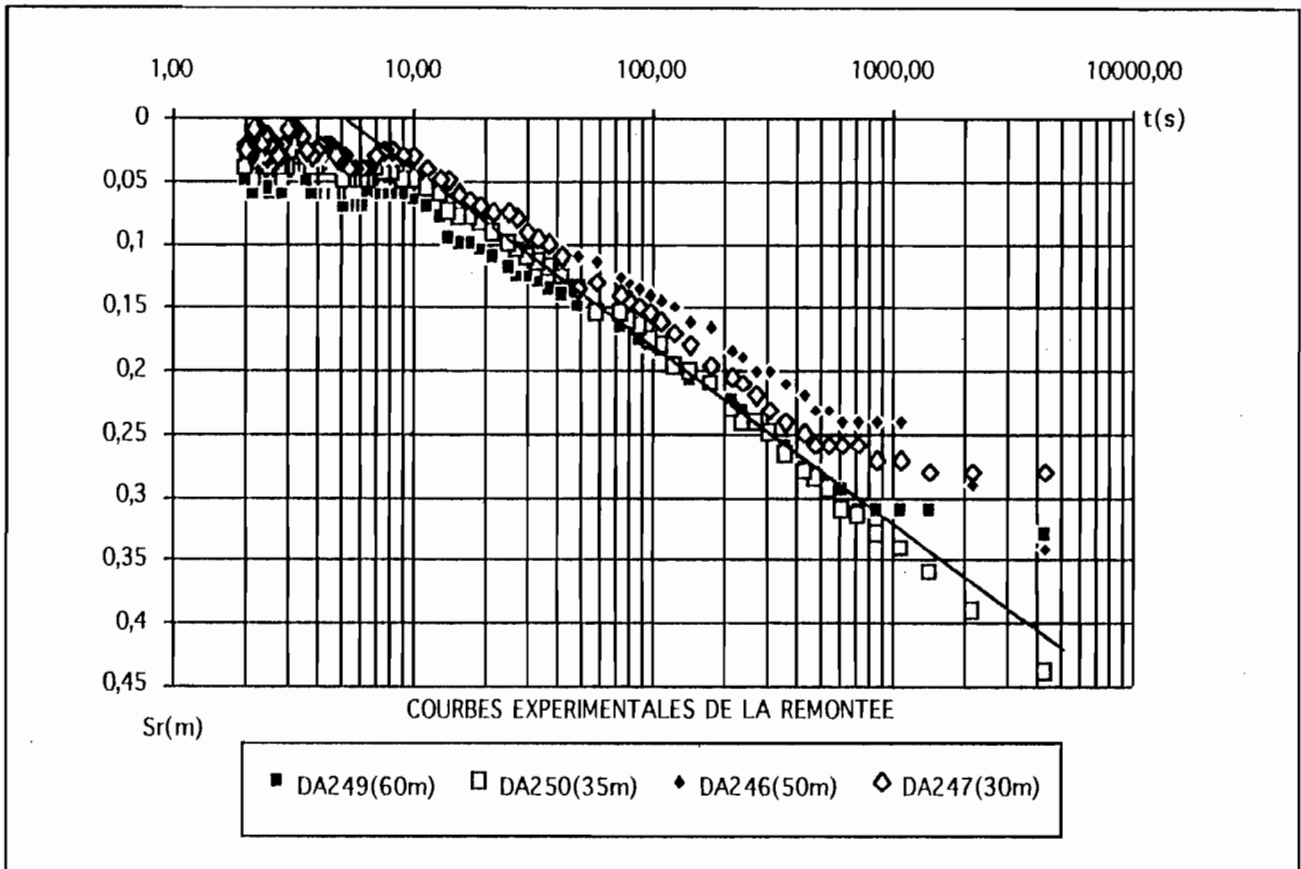
En même temps que le forage tous les piézomètres ont réagi à l'effet du pompage. Les mesures de rabattement pendant la descente et la remontée dans les piézomètres portés sur diagramme semi-logarithmique ont permis d'identifier un régime transitoire suivi d'un début d'alimentation.

Les données du DA246(49m) et celles du forage DA249(58m) ont permis de déterminer par la méthode de JACOB, les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère éocène d'épaisseur égale à 20m.

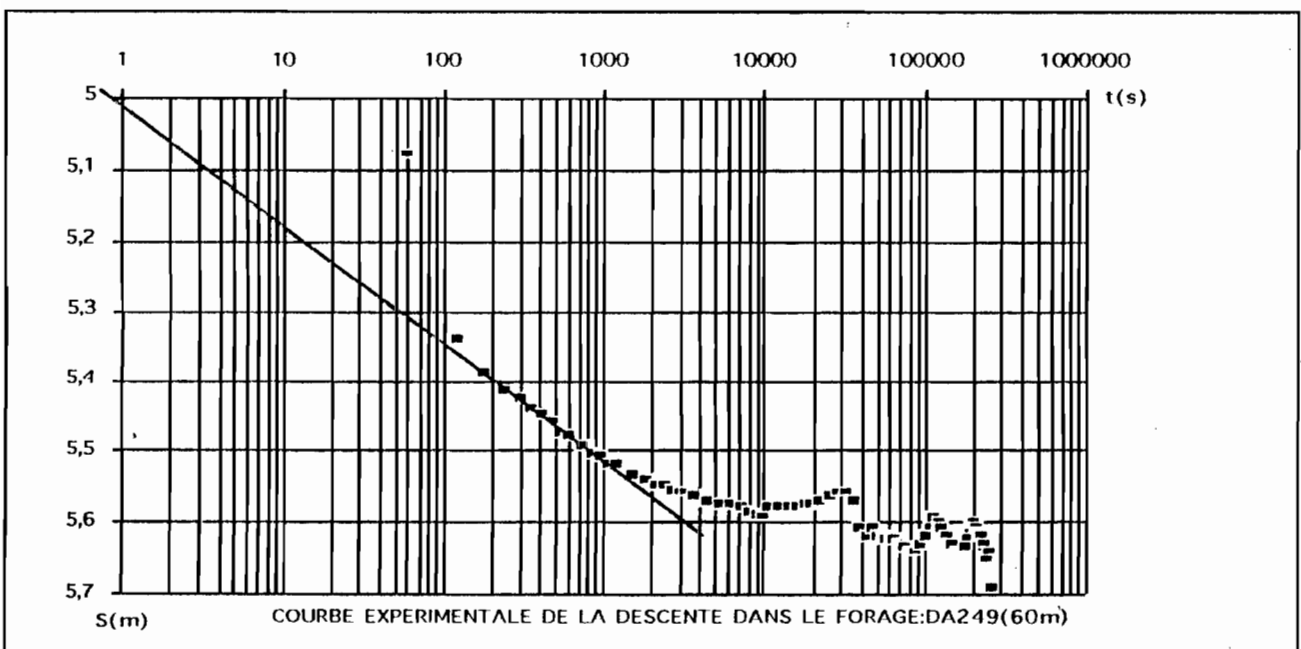
Pompage dans DA250: (Quaternaire)

Les mêmes réactions pendant le pompage dans le DA249 ont été observées lors du pompage dans le DA250(35m).

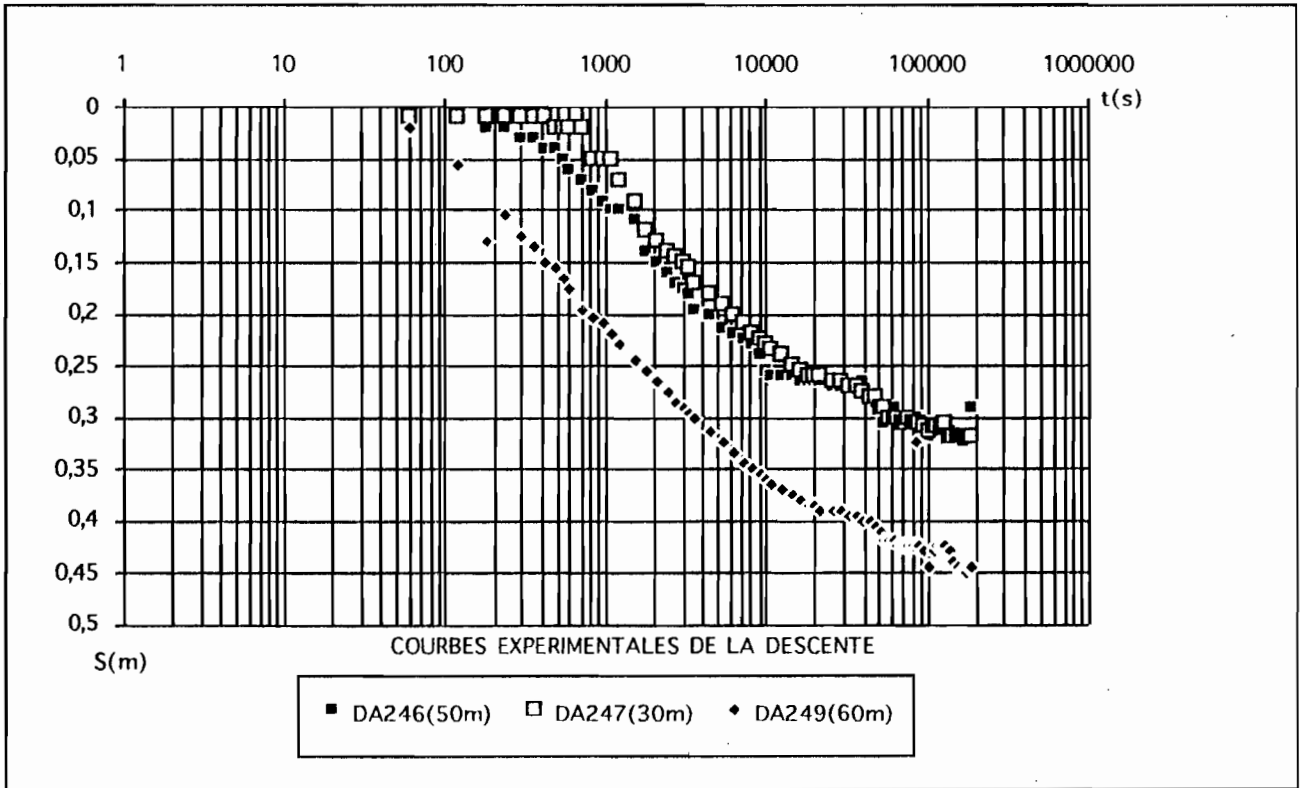
Les données du DA247(29m) et celles du forage DA250(35m) ont été interprétées par la méthode de JACOB pour l'obtention des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère des alluvions du Quaternaire d'épaisseur égale à 30m.



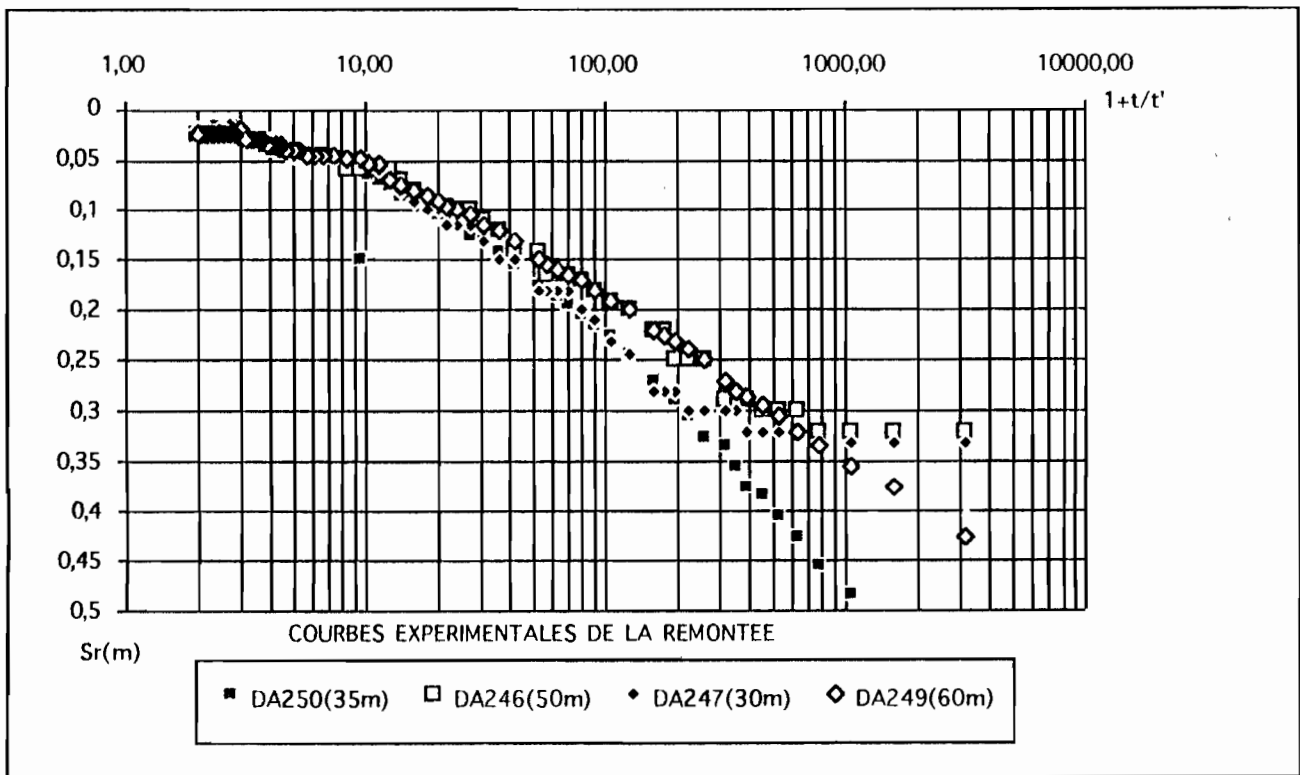
An. 14- FIG. 1: STATION DA249(60m) ESSAI DE NAPPE (72h) DU 11/03/88:  $Q=40\text{m}^3/\text{h}$



An. 14- FIG. 2: STATION DA249(60m) ESSAI DE NAPPE (72h) DU 1/03/88:  $Q=20.2\text{m}^3/\text{h}$

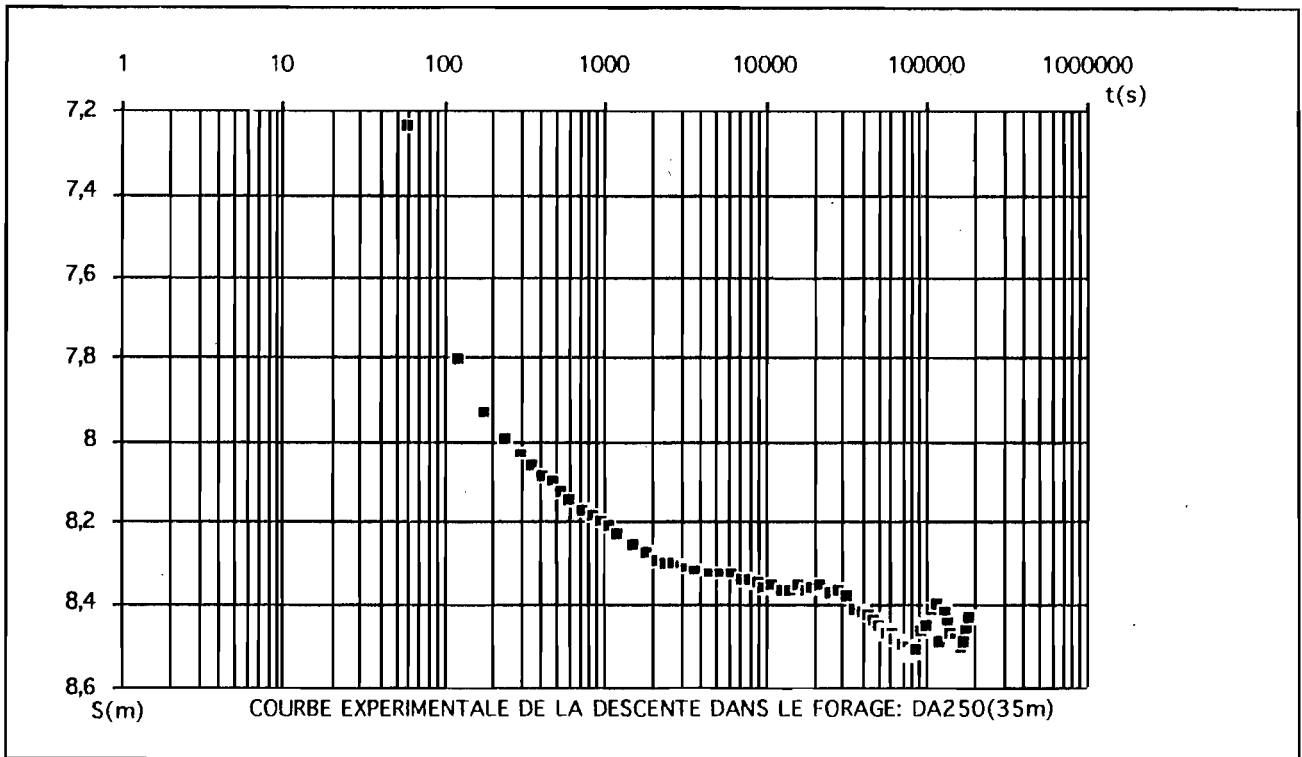


An. 14- FIG. 3: STATION DA250 (35m) ESSAI DE NAPPE (72h) DU 22/03/88: Q=19.8m<sup>3</sup>/h

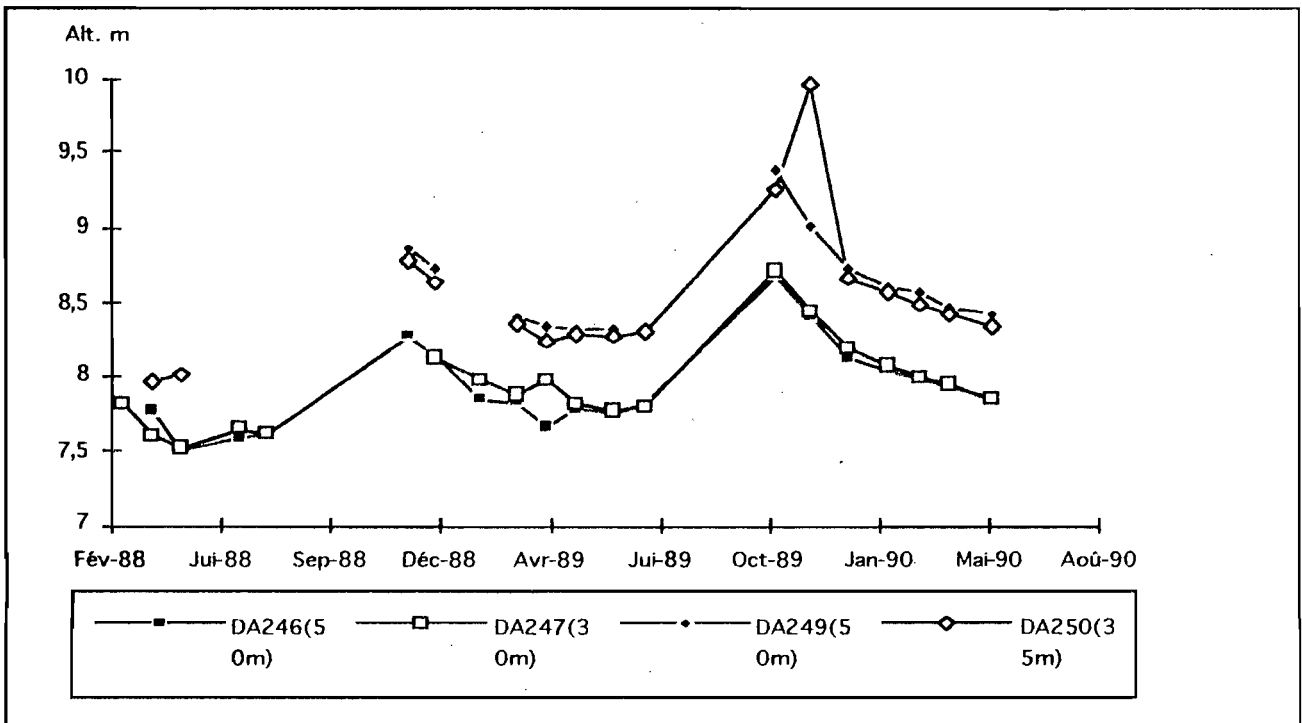


An. 14- FIG. 4: STATION DA250(35m) ESSAI DE NAPPE (72h) DU 22/03/88: Q=19.8m<sup>3</sup>/h





An. 14- FIG. 5: STATION DA250(35m) ESSAI DE NAPPE DU 12/03/88: Q=19.8m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 6: STATION DA249 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

### CONCLUSION

A la station de pompage DA249/250 nous avons un aquifère multicouche dans les formations éocènes et alluviales, de transmissivité moyenne égale à  $7.10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ . Cet aquifère contient une nappe semi-captive en relation avec le fleuve.

## STATION DE POMPAGE DA220: (Eocène)

### Situation

A la différence des autres stations, la DA220 se trouve, à 20km à l'Est du fleuve, dans la vallée alluviale du marigot le Gorgol à environ 2,5km du lit de ce dernier. le marigot est inondé pendant la saison des pluies, alors qu'il tarit en période sèche.

### Lithologie

- L'observation de la coupe lithologique de la station montre de bas en haut:
- Un Eocène partiellement atteint de 40m, composé de sables quartzeux grossiers
  - 12m de formations alluviales, composées d' argile et de sable limoneux.

### Caractéristiques techniques des sondages

N° PIEZO	GA220(50m)	DA227(49m)	DA228(14m)
rayon	3"	1"1/4	1"1/4
long. crépine	20m	1m	1m
alt. crépine	-37,9	-36,8	-1,9
alt. repère	13,157	13,159	13,059
margelle	1.06m	0.97m	0.91m
formation	sab.EOC.	sab.EOC.	sab.EOC.

Un pompage de 48h a été effectué dans le DA220(50m) le 20/2/88 au débit de 12.1m<sup>3</sup>/h.

### Interprétation du pompage d'essai:

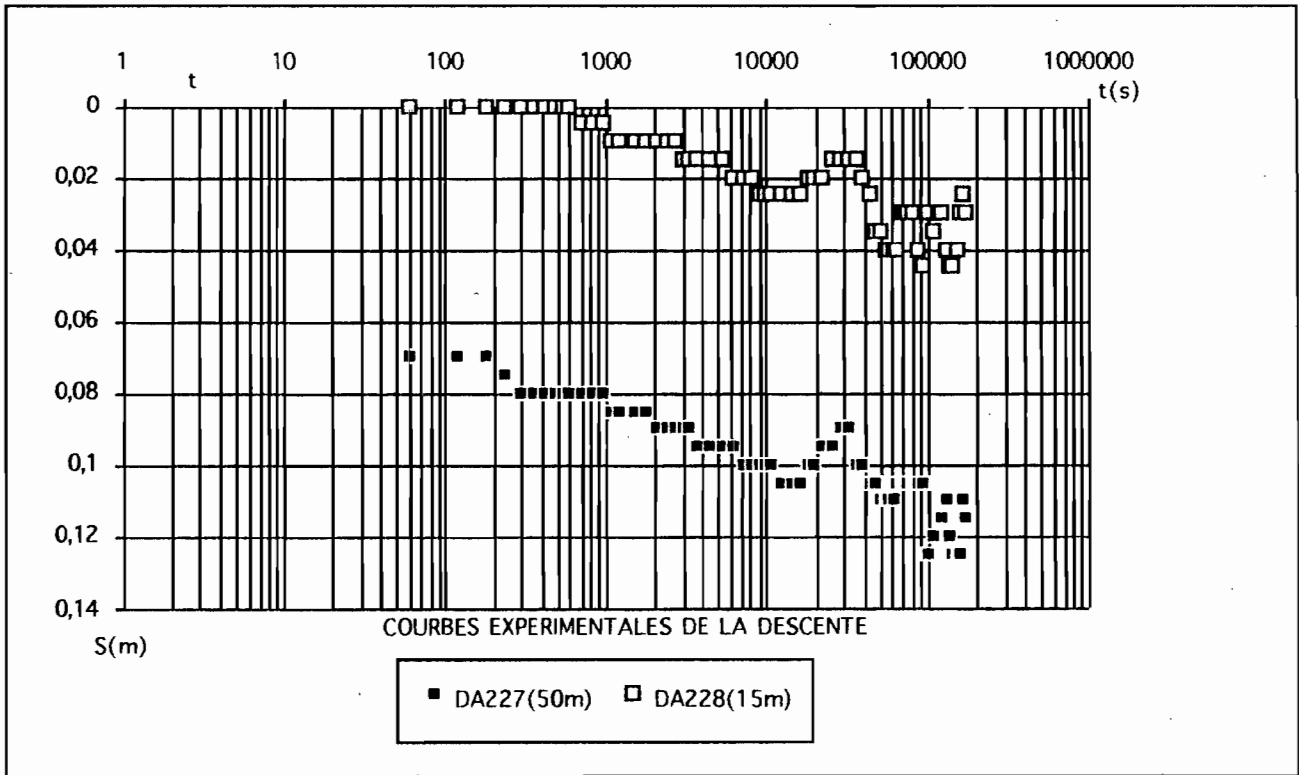
Les mesures de rabattement et de remontée effectuées dans les piézomètres DA228(14m), 2 DA227(49m) et le forage DA220(50m) ont été reportées sur diagramme semi-logarithmique de JACOB en fonction du temps.

L'interprétation des mesures dans le DA227 et dans le forage ont permis la détermination des paramètres hydrodynamiques des formations éocènes testées.

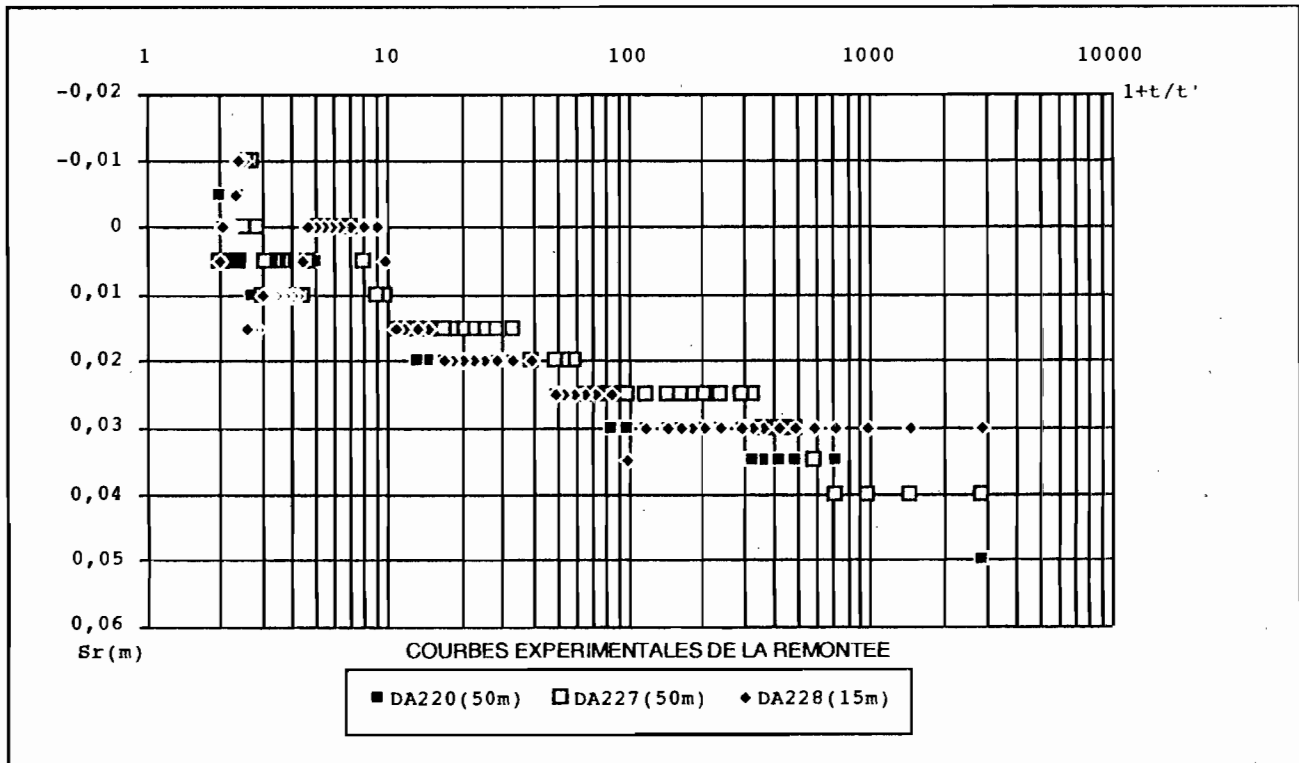
### CONCLUSION

L'absence de piézomètre dans les formations alluviales empêche d'établir une quelconque relation entre les formations éocènes et celles du Quaternaire.

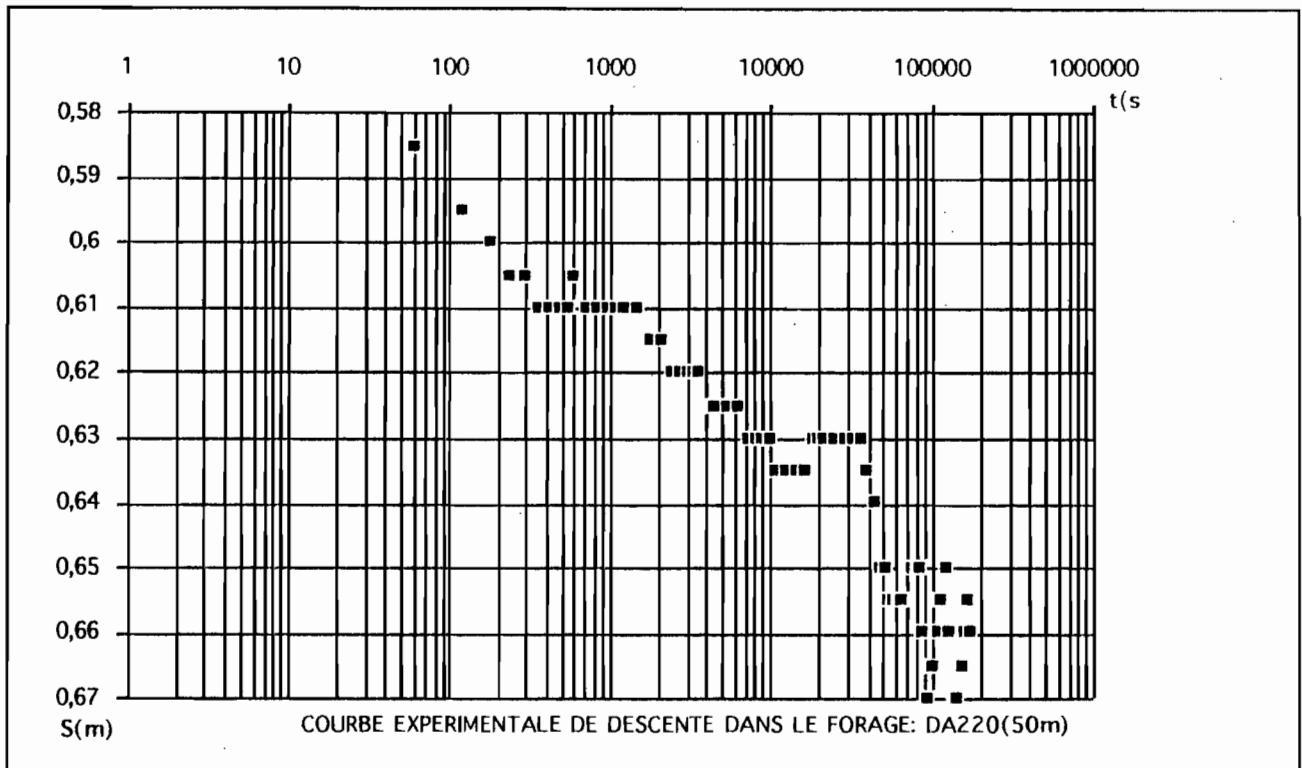
L'aquifère testé est celui de l'Eocène de transmissivité égale à  $4.10^{-2}m^2/s$  et qui contient une nappe semi-captive.



An. 14- FIG. 7:            STATION DA220(50m) ESSAI DE NAPP DU 20/02/88: Q=12.1m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 8:            STATION DA 220(50m) ESSAI DE NAPPE DU 20/02/88: Q=12.1m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 9: STATION DA220(50m) ESSAI DE NAPPE DU 20/02/88:  $Q=12.1\text{m}^3/\text{h}$

**STATION DE POMPAGE DA264: (Eocène)**

**Situation**

La station DA264 se trouve sur la rive droite à environ 7.5km du fleuve.

**Lithologie**

Les formations de la coupe lithologique de la station montre de bas en haut:

- 48m de sable éocène ( 21m de sable grossier et 27m de sable fin)
- 3m de sable moyen alluvial

Ainsi toutes les formations de la station sont sableuses.

**Caractéristiques techniques des sondages**

**Station DA264**

N° PIEZO	DA262(19m)	DA263(47m)	DA264(49m)
rayon	2"1/4	2"1/4	3"
long. crépine	1m	1m	10m
alt. crépine	-7,3	-35,3	-37,4
alt. repère	12,751	12,726	12,559
margelle	1.05m	1.01m	1m
formation	sab.EOC.	sab.EOC.	sab.EOC.

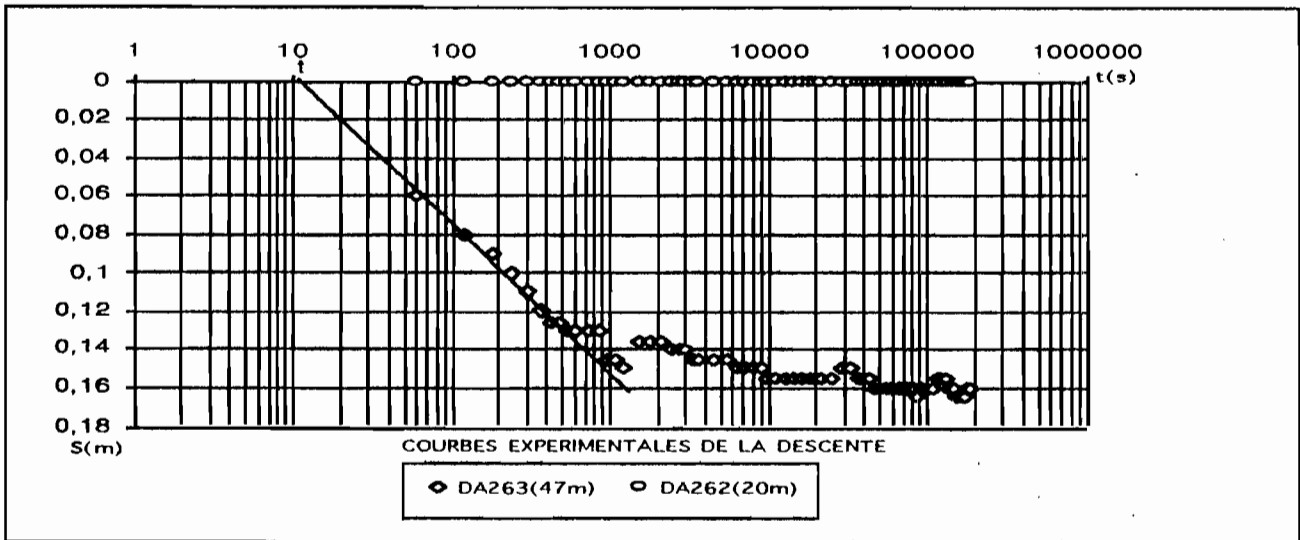
Un pompage de 51 h au débit de  $11.8\text{m}^3/\text{h}$  a été effectué dans le forage DA264(49m) le 8/2/88.

### Interprétation du pompage d'essai

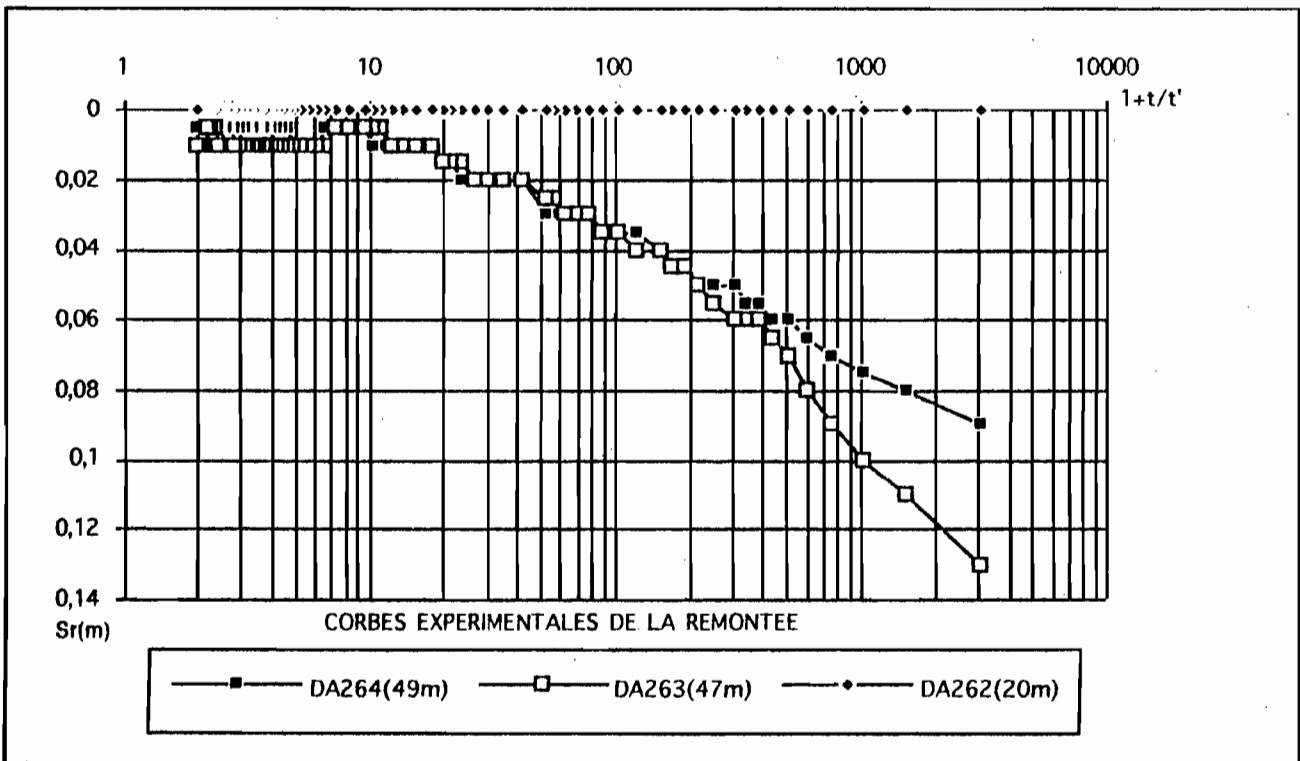
Le piézomètre DA263(47m) a réagi en même temps que le forage à l'effet du pompage par un rabattement caractéristique d'un régime transitoire suivi d'une alimentation, par contre le DA(262m) n'a pas réagi.

- Calcul des paramètres:

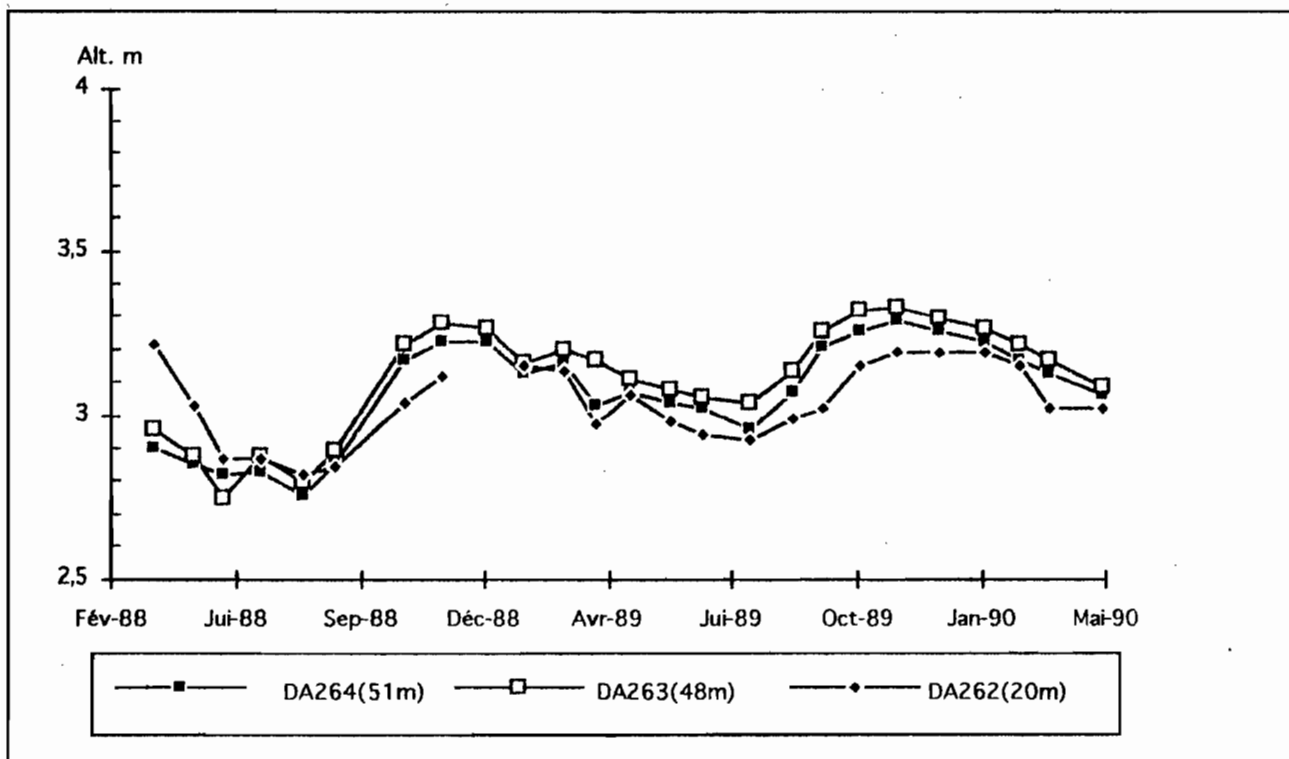
Les mesures effectuées dans le piézomètre DA263 ont permis de calculer les paramètres hydrodynamiques des sables éocènes.



An. 14- FIG. 10: STATION DA264(50m) ESSAI DE NAPPE(51h) DU 8/02/88 :Q=11.88m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 11: STATION DA264(50m) ESSAI DE NAPPE (51h) DU 8/02/88 : Q=11.88m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 12: STATION DA264 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

#### Conclusion

La station DA264 comporte un aquifère sableux des formations éocènes. L'absence de réaction du piézomètre DA262 ne se justifie pas *a priori* car aucune formation étanche n'a été signalée dans la lithologie de la station, elle peut être liée à un état défectueux du piézomètre qui peut être bouché ou une erreur de mesure. L'évolution du niveau piézométrique montre une même nappe.

#### STATION DE POMPAGE DA268: (Eocène)

##### Situation

La station DA268 se trouve sur la rive droite à environ 10km du fleuve

##### Lithologie

La coupe géologique de la station montre de bas en haut:

- 36m de formation sableuse, de l' Eocène
- 4m de formation argileuse, du Quaternaire

##### Caractéristiques techniques des sondages

#### Station DA268

N° PIEZO	DA267(33m)	DA268(38m)
rayon	2"1/4	3"1/4
long. crépine	1m	10m
alt. crépine	-21,7	-26,7
alt. repère	12,346	12,35
margelle	1,05	1,06
formation	sab.EOC.	sab.EOC.

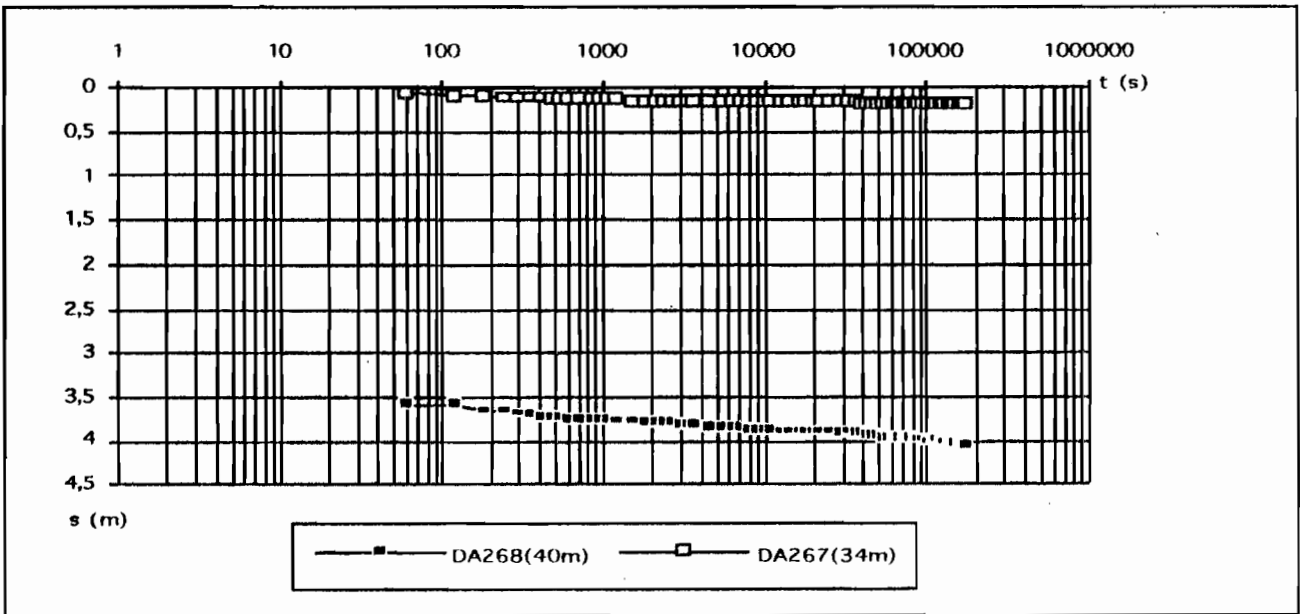
Dans le forage DA268(38m) un pompage de 48h a eu lieu au débit de 17.5m<sup>3</sup>/h le 14/02/88.

Interprétation du pompage d' essai:

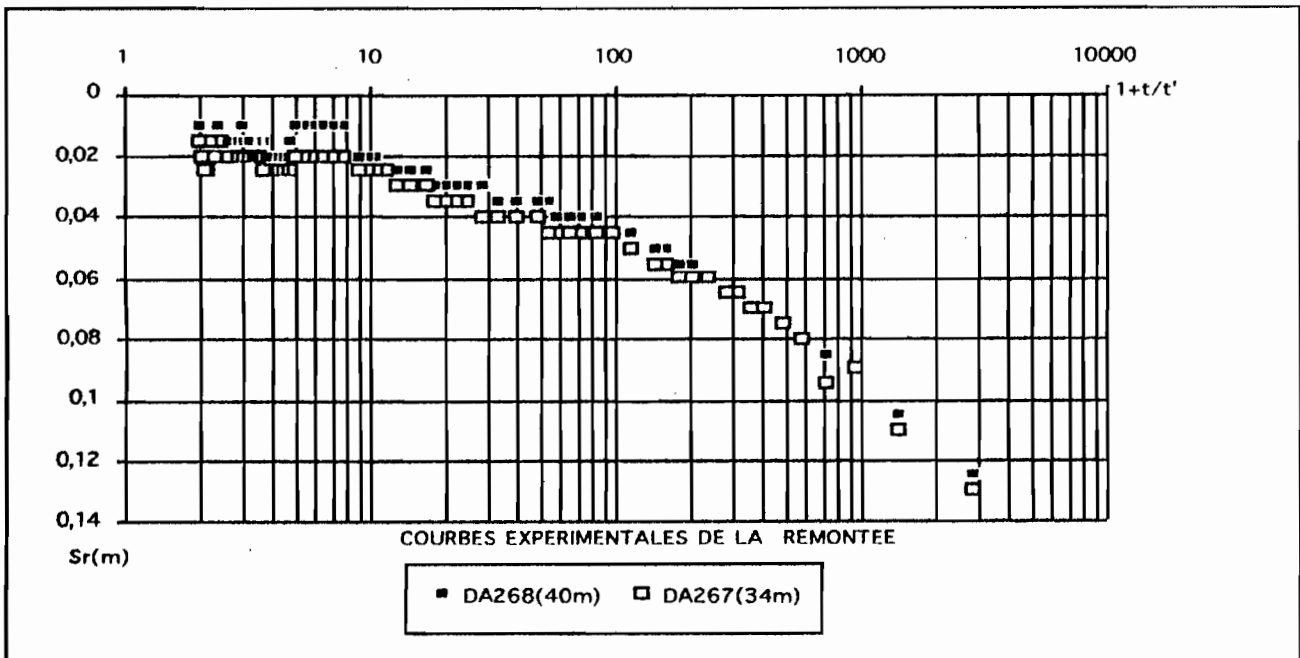
Le piézomètre DA267(33m) a réagi au même titre que le forage par un régime transitoire.

Calcul des paramètres hydrodynamiques

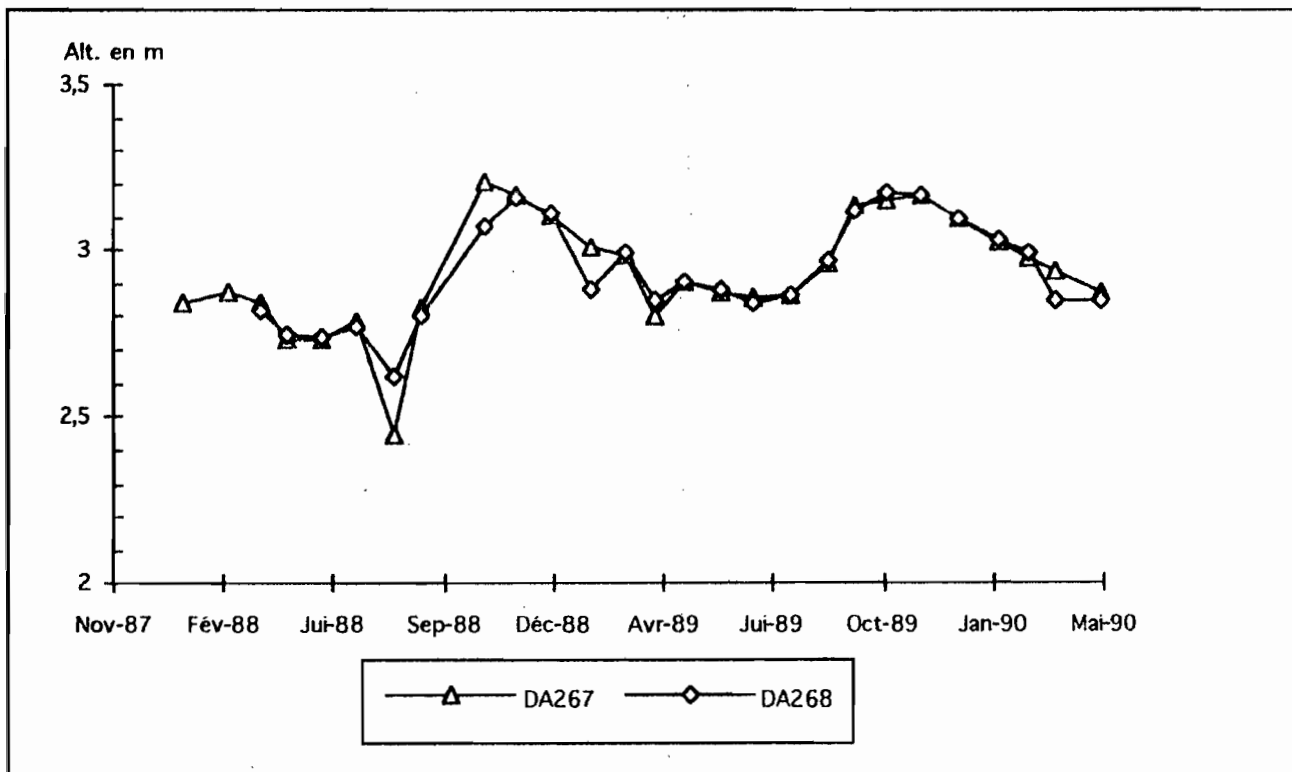
Les mesures de rabattement et de remontée dans le DA267 plus celles de remontée dans le forage ont permis le calcul des paramètres hydrodynamiques des formations éocènes testées.



An. 14- FIG. 13: STATION DA268(50m) ESSAI DE NAPPE DU 14/02/88: Q=17.5m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 14: STATION DA268(50m) ESSAI DE NAPPE (48h) DU 14/02/88: Q=17.5m<sup>3</sup>/h



An. 14- FIG. 15: STATION DA268 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

### CONCLUSION

La station DA268 comporte une nappe dans les formations sableuses de l'EOCENE. Cette nappe, identique à celle de la station DA264, possède une source d'alimentation pouvant être le fleuve sénégal.



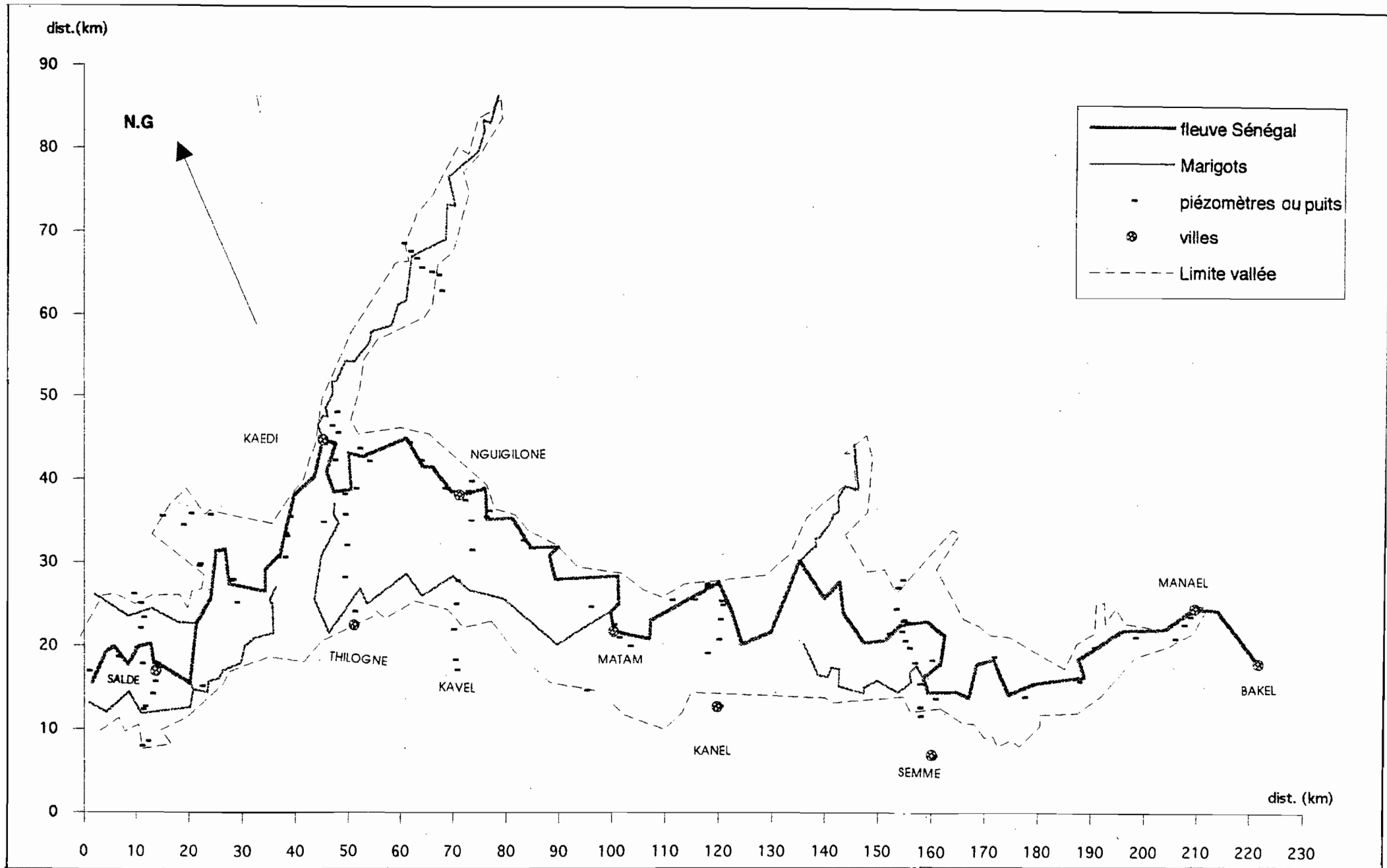
An. 15a: METHODE D'OPERATION POUR UN CHANGEMENT DE REPERE

Passage de coordonnées géographiques (X; Y) à celles (X'; Y') d'un repère personnalisé par méthode de translation puis de rotation d'un angle ( $\mu$ ).

$$X' = X \cos \mu - Y \sin \mu$$

$$Y' = X \sin \mu + Y \cos \mu$$

N° OUV.	X	Y	X'	Y'	N° OUV.	X	Y	X'	Y'
DA211	618.40	1791.20	9.74	19.76	DB325	729.20	1710.40	146.14	33.92
DA212	618.40	1791.20	9.74	19.76	DB326	728.50	1696.00	155.26	22.76
DA213	663.60	1786.40	46.53	46.46	DB327	744.60	1674.10	181.88	17.27
DA214	620.40	1792.50	10.36	22.07	DB328	760.40	1669.10	196.96	24.14
DA221	668.70	1791.90	46.64	53.96	GA307	614.80	1784.90	11.28	12.67
DA223	689.00	1790.50	62.65	66.51	GA308	616.90	1785.10	12.71	14.23
DA230	679.80	1764.40	73.29	40.96	GA310	619.50	1786.40	13.77	16.93
DA232	678.80	1763.70	73.02	39.77	GA312	618.30	1785.80	13.28	15.68
DA235	677.60	1763.20	72.46	38.60	GA315	659.90	1778.70	48.94	38.26
DA236	677.60	1763.20	72.46	38.60	GA317	658.30	1776.80	49.02	35.78
DA247	727.90	1696.80	154.28	22.95	GA321	656.10	1773.80	49.39	32.08
DA250	728.15	1696.75	154.50	23.08	GA322	656.10	1773.80	49.39	32.08
DA254	729.80	1700.50	153.21	26.97	GA327	676.30	1763.70	71.16	38.10
DA255	663.90	1786.40	46.75	46.66	GA328	675.60	1760.20	72.98	35.03
DA256	663.90	1785.00	47.69	45.62	GA329	675.60	1760.20	72.98	35.03
DA259	665.40	1787.00	47.46	48.11	GA331	673.30	1757.50	73.08	31.49
DA261	633.30	1796.50	17.26	33.67	GA332	673.30	1757.50	73.08	31.49
DB102	629.80	1793.90	16.40	29.40	GA334	668.90	1756.10	70.75	27.50
DB103	628.70	1789.00	18.86	25.02	GA336	668.90	1756.10	70.75	27.50
DB107	623.10	1794.30	11.16	25.21	GA337	668.90	1756.10	70.75	27.50
DB112	656.90	1785.80	41.95	41.53	GA338	666.80	1754.70	70.13	25.05
DB122	648.00	1785.60	35.48	35.42	GA339	666.80	1754.70	70.13	25.05
DB124	633.70	1790.60	21.51	29.56	GA341	704.10	1721.50	120.06	25.36
DB127	639.50	1795.40	22.60	37.01	GA342	704.10	1721.50	120.06	25.36
DB128	648.60	1790.00	32.98	39.09	GA344	702.50	1720.00	119.88	23.18
DB129	637.20	1796.60	20.09	36.36	GA346	700.70	1718.40	119.61	20.79
DB132	640.90	1793.00	25.25	36.16	GA348	700.70	1718.40	119.61	20.79
DB135	632.70	1796.40	16.88	33.20	GA349	700.70	1718.40	119.61	20.79
DB159	677.50	1772.60	66.09	45.51	GA351	698.00	1718.60	117.47	19.13
DB161	669.40	1793.40	46.15	55.54	GA354	726.90	1696.00	154.07	21.69
DB162	667.50	1791.50	46.01	52.86	GA356	726.70	1693.60	155.53	19.77
DB170	673.70	1776.00	60.99	45.49	GA357	726.70	1693.60	155.53	19.77
DB173	671.20	1785.60	52.71	50.95	GA358	726.20	1691.60	156.50	17.95
DB174	673.90	1792.50	50.10	57.88	GA359	726.20	1691.60	156.50	17.95
DB175	675.50	1788.20	54.16	55.76	GA362	725.20	1689.10	157.43	15.42
DB176	680.80	1786.80	59.04	58.27	GA364	723.40	1687.00	157.50	12.66
DB180	662.40	1797.00	38.54	53.53	GA366	687.30	1732.80	100.02	22.51
DB182	688.40	1793.50	60.20	68.34	GA367	687.30	1732.80	100.02	22.51
DB186	687.20	1782.40	66.74	59.29	GB1000	726.20	1685.80	160.38	13.64
DB187	700.00	1788.10	72.43	72.09	GB951	619.60	1787.50	13.11	17.82
DB189	690.80	1786.20	66.87	64.52	GB952	617.80	1789.10	10.70	17.80
DB190	693.20	1782.50	71.13	63.38	GB953	615.00	1792.80	6.14	18.67
DB196	702.30	1727.40	114.78	28.54	GB954	609.70	1795.20	0.60	16.91
DB198	713.20	1717.80	129.30	28.71	GB963	637.00	1785.30	27.51	27.83
DB200	707.60	1722.00	122.33	28.08	GB964	636.00	1782.70	28.51	25.23
DB211	727.00	1706.30	147.25	29.41	GB965	646.40	1780.60	37.64	30.63
DB212	734.00	1696.60	158.94	26.89	GB966	648.40	1782.20	38.05	33.16
DB293	629.80	1785.50	22.03	23.16	GB967	662.00	1777.70	51.17	38.92
DB294	637.30	1785.20	27.80	27.96	GB968	666.00	1778.50	53.60	42.20
DB295	645.40	1781.50	36.29	30.63	GB969	673.20	1775.00	61.29	44.42
DB296	625.30	1794.30	12.79	26.68	GB970	673.50	1771.80	63.66	42.24
DB297	622.30	1796.40	9.16	26.24	GB971	685.50	1737.40	95.60	24.72
DB298	648.40	1782.60	37.78	33.46	GB972	681.20	1751.90	82.70	32.61
DB299	650.40	1783.60	38.60	35.54	GB973	678.00	1758.60	75.84	35.45
DB300	654.00	1785.30	40.13	39.21	GB974	678.90	1758.80	76.37	36.20
DB301	688.30	1784.70	66.01	61.73	GB975	676.40	1762.80	71.84	37.50
DB302	703.20	1796.30	69.32	80.32	GB976	674.50	1766.40	68.02	38.90
DB303	698.30	1793.90	67.28	75.26	GB977	670.10	1743.80	79.88	19.17
DB304	674.40	1793.40	49.86	58.89	GB978	683.00	1720.80	104.86	10.72
DB305	665.70	1780.80	51.84	43.70	GB979	685.30	1715.70	109.98	8.47
DB306	661.30	1782.90	47.16	42.32	GB980	700.50	1725.00	115.05	25.55
DB307	660.00	1784.80	44.93	42.86	GB981	704.00	1721.00	120.32	24.93
DB308	661.10	1785.70	45.14	44.26	GB982	687.80	1728.90	103.00	19.95
DB309	679.40	1767.00	71.25	42.63	GB983	687.00	1731.00	101.00	20.97
DB310	686.40	1745.50	90.85	31.34	GB985	726.60	1694.80	154.65	20.60
DB311	687.70	1731.90	100.92	22.11	GB986	728.80	1689.70	159.70	18.28
DB312	697.30	1727.80	110.79	25.49	GB988	772.80	1655.80	215.08	22.56
DB315	727.30	1709.60	145.26	32.06	GB989	780.50	1661.30	217.12	31.80
DB316	727.00	1707.70	146.31	30.45	GB990	768.40	1661.20	208.20	23.62
DB317	731.10	1700.60	154.11	27.92	GB991	766.90	1661.20	207.08	22.62
DB318	734.40	1688.10	164.93	20.84	GB992	764.50	1661.10	205.37	20.94
DB319	739.60	1684.60	171.14	21.72	GB993	759.00	1666.30	197.80	21.12
DB320	737.70	1682.30	171.27	18.74	GB994	758.10	1671.10	193.92	24.08
DB321	725.00	1697.40	151.72	21.46	GB995	747.60	1669.40	187.26	15.79
DB323	734.50	1711.30	149.47	38.14	GB996	738.80	1674.80	177.10	13.91
DB324	732.40	1709.80	148.92	35.62	GB997	773.00	1649.00	219.78	17.64



An. 15 b: CARTE DE LOCALISATION DES OUVRAGES DANS LA MOYENNE VALLEE

## **ANNEXES**

**ETUDES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DES EAUX ET  
RELATIONS EAUX DE SURFACE ET EAUX SOUTERRAINES**

An. 16 : ESSAI DE REGENERATION DES VALEURS MANQUANTES ET CORRELATION  
(STATION DE BAMAKO)

Le tritium ( $^3\text{H}$ ) par sa courte période (12,43 ans) et sa faible teneur dans l'atmosphère, avant les expériences thermonucléaires, commencées en 1953, constitue un bon marqueur pour l'étude de la recharge actuelle des aquifères. Il permet de déterminer la période de recharge des aquifères, selon que sa teneur dans les eaux est relativement faible ou importante par rapport à la teneur corrigée des eaux météoriques locales, ceci en tenant compte aussi bien de la décroissance radioactive du tritium que de la recharge de type "piston flow" de la nappe.

Pour l'interprétation des résultats, la station de référence de la chronique des teneurs en tritium des précipitations enregistrées au Sénégal, est celle de Bamako corrélée elle même sur la station d'Ottawa pour ses valeurs manquantes (voir tableau ci dessous)

Méthode de calcul

La régénération des valeurs manquantes dans la chronique des teneurs en tritium des eaux de pluies à Bamako, est obtenue par la formule droite de corrélation :

$$Y = aX + b$$

$$a = 0.44 \text{ (constante)}$$

X = teneur en tritium des eaux de pluies à Ottawa

$$b = 11.3 \text{ (constante)}$$

Y = teneur corrigée en tritium des eaux de pluies à Bamako

La formule de détermination de la teneur en tritium des eaux souterraines en tenant compte de l'effet "piston flow" s'écrit:

$$UT_x = UT_i \cdot e^{-\lambda(x - i)}$$

UT = teneur en tritium de l'échantillon (en unité de Tritium)

x = année de prélèvement (1972)

i = année origine (1953)

$$\lambda = \text{Ln } 2/T = 5.576 \cdot 10^{-2} \text{ /an}$$

T = période du tritium = 12.43 ans

isotope radioactif

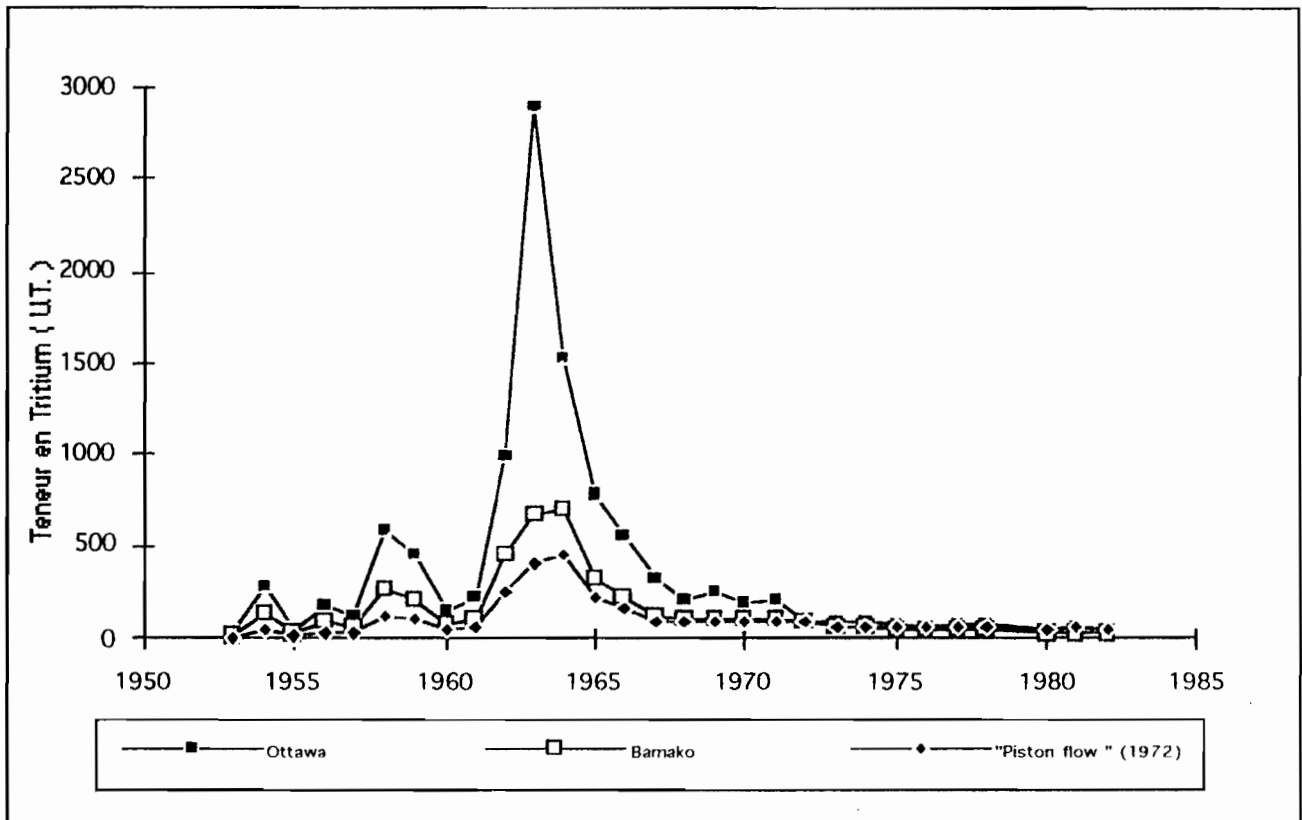
Après régénération des valeurs manquantes de la teneur en tritium des eaux de pluies de la station de Bamako, nous avons établi la chronique des teneurs corrigées en tritium des eaux souterraines dans la vallée issues des eaux de pluies de 1953 à 1982 en tenant compte à la fois de l'effet "piston flow", c'est à dire que les eaux de pluies de chaque année seraient repoussées dans le sol (zone non saturée) par celles de l'année suivante, et de la décroissance radioactive du tritium.

### Chronique des teneurs de Tritium des eaux de pluies

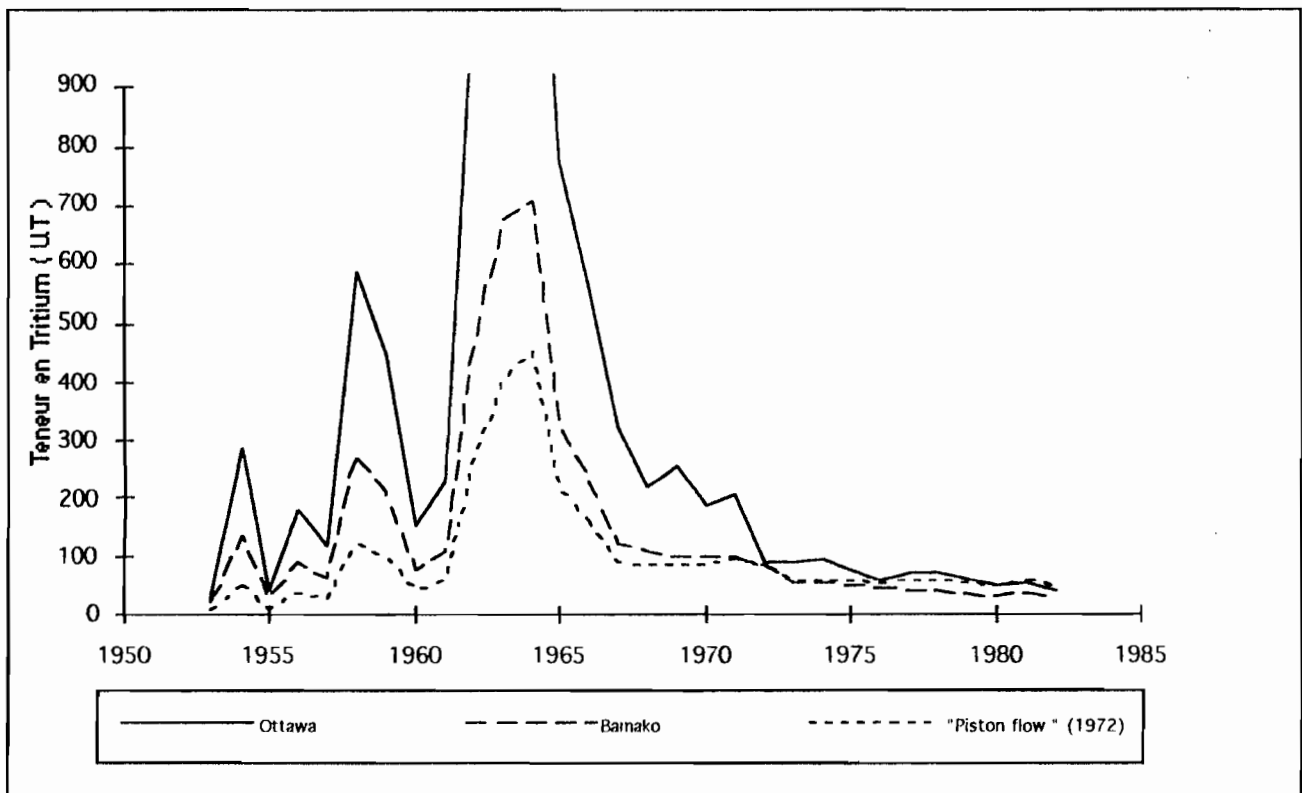
Années	Ottawa	Bamako	Vallée du Sénégal "Piston flow " (1972)
1953	26,4	22,92 *	7,94
1954	287,7	137,89 *	50,50
1955	41,3	29,47 *	11,41
1956	183,8	92,17 *	37,75
1957	118	63,22 *	27,37
1958	587	269,58 *	123,43
1959	451,6	210,00 *	101,67
1960	156,3	80,07 *	40,99
1961	227,3	111,31 *	60,25
1962	992,4	447,96 *	256,39
1963	2900,1	674,60 °	408,27
1964	1532,8	708,60 °	453,45
1965	778,2	324,70 °	219,71
1966	560,8	230,90 °	165,20
1967	324,2	122,40 °	92,60
1968	216,9	109,30 °	87,44
1969	253,7	101,10 °	85,52
1970	190,8	99,50 °	88,99
1971	206,1	102,70 °	97,13
1972	92,3	86,00 °	86,00
1973	90,4	56,90 °	60,17
1974	98,1	54,20 °	60,60
1975	75,9	49,40 °	58,40
1976	58,9	45,40 °	56,75
1977	73,9	43,82 *	57,92
1978	73,6	43,68 *	61,06
1980	49,5	33,08 *	51,69
1981	55,1	35,54 *	58,73
1982	39,7	28,77 *	50,26

\* Valeurs corrélées

° Valeurs observées



An. 16- FIG. 1: Chronique des teneurs en tritium des eaux de pluies.  
(régénération des valeurs manquantes de la vallée du Sénégal)



An. 16- FIG. 2: Chronique des teneurs en tritium des eaux de pluies.  
(régénération de celles de la vallée du Sénégal: détail)

**An-17: Classification des piézomètres par distance par rapport aux cours d'eau et par rapport à l'épaisseur de la zone non saturée (zone Manaël-Saldé)**

N° OUV.	Amp. (m)	dist./c.e. (km)	ZNS (m)
DA215	0.35	4.50	10.56
DA218	0.36	3.50	10.33
DA220	0.21	2.30	7.53
DA225	0.25	1.60	7.54
DA227	0.21	2.30	8.05
DA228	0.21	2.30	7.97
DA238	0.72	0.60	7.17
DA239	0.70	0.60	7.76
DA241	0.72	0.30	7.80
DA242	0.74	0.30	8.03
DA244	0.68	0.05	7.80
DA246	0.59	0.80	8.83
DA257	0.91	0.80	5.63
DA262	0.25	7.20	8.64
DA263	0.27	7.20	8.53
DA264	0.27	7.20	8.41
DA267	0.31	4.80	8.29
DA268	0.33	4.80	8.34
DA269	0.22	7.10	8.66
DA270	0.63	2.80	9.48
GA304	0.32	0.12	10.81
GA309	1.01	0.06	9.09
GA330	0.31	4.80	10.42
GA365	1.86	0.07	8.70
GA325	0.74	0.40	6.08
GA326	0.85	0.40	6.09
GA333	0.44	0.96	8.04
GA335	0.31	0.96	8.83
GA352	0.10	8.20	15.73
GA355	0.75	2.60	9.65
GA360	1.53	0.70	9.38
GA363	1.06	2.30	9.32
GA368	0.08	9.00	16.51
GA369	0.04	8.70	16.30
GA370	0.08	8.70	16.45
GA371	0.06	9.20	16.62
GA372	0.11	9.20	16.58
DA213	0.86	0.10	7.33
DA221	0.78	0.30	6.83
DA223	0.29	0.50	7.09
DA232	0.80	1.50	7.38
DA235	1.08	0.30	7.65
DA236	1.10	0.30	7.91
DA247	0.64	0.80	10.29
DA250	0.65	0.50	9.80
DA254	0.25	4.50	11.62
DA256	0.91	0.80	5.70
DA259	1.04	2.10	6.92
DA261	0.25	8.00	8.94
GA307	2.08	0.07	9.66
GA308	0.37	2.30	7.45
GA310	1.52	0.06	8.53
GA312	0.17	1.50	9.08
GA328	0.59	3.00	8.55
GA329	0.36	3.00	8.79
GA331	0.31	4.80	9.16
GA332	0.34	4.80	9.12
GA334	0.36	0.96	8.80
GA336	0.33	0.98	8.83
GA337	0.33	0.98	8.90
GA338	0.11	3.30	10.75
GA339	0.10	3.30	10.82
GA351	0.39	5.20	4.83
GA356	0.69	2.60	9.69
GA357	0.70	2.60	9.68
GA358	0.76	2.50	9.60
GA359	0.63	2.50	9.95
GA364	1.04	2.30	9.31
GA366	1.84	0.08	8.77
GA367	1.81	0.07	8.75

**ANNEXES**  
**LES ECHANGES HYDRIQUES DANS LA VALLEE DU SENEGAL**  
**METHODES DE BILAN HYDRIQUE**



An-18: Résultats de l'application de la méthode de J. Albergel pour une RFU estimée représentative

Station de : BAKEL RFU=160mm			Station de : MATAM RFU = 300			Station de : PODOR RFU = 300			
PA(mm)	LRC(mm)	LIC(mm)	PA(mm)	LRC(mm)	LIC(mm)	PA(mm)	LRC(mm)	LIC(mm)	
1922	516	158	13	641	381	0	(-10)	(-10)	(-10)
1923	513	129	0	(-10)	(-10)	(-10)	180	49	0
1924	544	162	0	(-10)	(-10)	(-10)	182	20	0
1925	496	144	0	(-10)	(-10)	(-10)	244	65	0
1926	304	63	0	335	169	0	(-10)	(-10)	(-10)
1927	532	115	0	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)
1928	(-10)	(-10)	(-10)	452	155	0	310	105	0
1929	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)
1930	552	174	38	(-10)	(-10)	(-10)	237	83	0
1931	447	113	0	(-10)	(-10)	(-10)	200	35	0
1932	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	292	97	0
1933	(-10)	(-10)	(-10)	640	249	0	633	341	0
1934	525	151	3	743	360	0	220	72	0
1935	461	105	0	(-10)	(-10)	(-10)	361	110	0
1936	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	339	114	0
1937	564	174	7	551	217	0	272	109	0
1938	(-10)	(-10)	(-10)	538	220	0	466	172	0
1939	427	112	0	475	183	0	316	101	0
1940	501	122	0	563	236	0	233	55	0
1941	526	153	10	255	57	0	269	130	0
1942	375	83	0	516	246	0	98	15	0
1943	407	90	0	456	116	0	433	133	0
1944	345	71	0	295	56	0	375	152	0
1945	587	147	0	419	155	0	332	109	0
1946	611	192	0	550	232	0	321	151	0
1947	553	156	1	380	108	0	388	167	0
1948	(-10)	(-10)	(-10)	414	155	0	187	16	0
1949	(-10)	(-10)	(-10)	381	124	0	329	100	0
1950	(-10)	(-10)	(-10)	714	273	0	336	102	0
1951	497	122	0	681	286	0	384	136	0
1952	458	87	0	603	204	0	366	106	0
1953	427	88	0	471	136	0	337	103	0
1954	357	57	0	482	129	0	199	49	0
1955	514	113	0	477	141	0	793	370	15
1956	595	178	2	583	287	0	334	92	0
1957	484	119	0	452	131	0	279	79	0
1958	235	42	0	689	287	0	375	163	0
1959	689	267	53	538	228	0	223	66	0
1960	(-10)	(-10)	(-10)	485	179	0	310	101	0
1961	366	75	0	480	184	0	309	101	0
1962	317	59	0	445	149	0	125	10	0
1963	528	164	0	486	147	0	329	125	0
1964	469	117	0	507	189	0	352	150	0
1965	751	273	57	701	341	0	342	156	0
1966	700	209	5	624	273	0	247	46	0
1967	903	367	58	341	95	0	271	74	0
1968	484	140	0	308	88	0	210	31	0
1969	575	139	0	534	194	0	431	152	0
1970	457	118	0	281	71	0	255	106	0
1971	541	144	0	431	185	0	137	38	0
1972	394	96	0	175	9	0	110	33	0
1973	396	97	0	220	34	0	153	24	0
1974	682	235	29	328	88	0	151	25	0
1975	667	242	20	408	130	0	225	27	0
1976	321	71	0	335	124	0	264	90	0
1977	391	103	0	194	53	0	132	40	0
1978	563	146	0	293	50	0	304	94	0
1979	409	105	0	260	54	0	226	64	0
1980	411	100	0	217	19	0	220	75	0
1981	533	194	3	372	125	0	141	15	0
1982	574	192	0	277	45	0	170	33	0
1983	(-10)	(-10)	(-10)	277	92	0	69	11	0
1984	250	42	0	209	30	0	67	4	0
1985	532	143	0	350	128	0	140	38	0
1986	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)	(-10)
1987	433	93	0	459	192	0	201	36	0
1988	654	222	52	(-10)	(-10)	(-10)	309	114	0
1989	459	125	0	357	91	0	343	118	0
1990	450	119	0	350	170	0	132	10	0
1991	482	128	0	218	65	0	135	50	0
1992	330	70	0	163	25	0	143	63	0

PA = pluie annuelle  
LRC = lame ruisselée calculée  
LIC = lame infiltrée calculée  
(-10) = année incomplète