

11480



RAPPORT INTERIMAIRE

NAPPES SOUTERRAINES

TABLE DES MATIERES

Page

A.	INTRODUCTION	1
B.	OBJECTIFS ET CONTENU	2
C.	INVENTAIRE DES DONNEES EXISTANTES	3
C.1	Géologie	4
C.1.1.	Base précambrienne	4
C.1.2.	L'Infracambrien	5
C.1.3.	Le Cambrien	6
C.1.4.	Les Intrusions doléritiques	6
C.1.6.	Tertiaire	7
C.1.6.	Dépôts récents	7
C.2	Hydrogéologie	7
C.2.1.	Description des nappes aquifères dans le Bassin du Fleuve Sénégal	8
C.2.1.1.	Mali	10
C.2.1.2.	Mauritanie	11
C.2.1.3.	Sénégal	12
C.2.1.4.	Résumé des principales ressources des nappes aquifères	14
C.2.2.	Productivité des aquifères	14
C.2.3.	Qualité de l'eau de l'aquifère	18
D.	ETUDES SUR LE TERRAIN	24
E.	IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	26
E.1.	Aménagements prévus	26
E.1.1.	Barrage de Diama	26
E.1.2.	Barrage de Manantali	27
E.1.3.	Périmètres irrigués	28
E.1.4.	Navigation	30
E.2.	Discussion des impacts sur l'environnement	30
E.2.1.	Barrage de Diama	30
E.2.1.1.	Salinité des nappes souterraines	30
E.2.1.2.	Polluants organiques, nitrates et bactéries coliformes	32
E.2.1.3.	Recharge	32
E.2.1.4.	Résumé des effets	33



E.2.2.	Barrage de Manantali	33
E.2.2.1	Salinité des nappes souterraines	33
E.2.2.2	Polluants organiques, nitrates et bactéries coliformes	34
E.2.2.3	Recharge	34
E.2.2.4	Résumé des effets	35
E.3.	Périmètres irrigués	35
E.3.1.	Salinité des nappes souterraines	35
E.3.2.	Polluants organiques	36
E.3.3.	Nutriments	36
E.3.4.	Bactéries coliformes	37
E.3.5.	Substances toxiques	38
E.3.6.	Résumé des effets	39
E.4.	Navigation	
F.	ETUDES PLUS APPROFONDIES	40
G.	BIBLIOGRAPHIE	41



A. INTRODUCTION

Les nappes souterraines sont une importante source d'eau dans le Bassin du Fleuve Sénégal. On les utilise actuellement pour le ravitaillement en eau des collectivités. Les villages situés loin d'une étendue d'eau permanente se servent de l'eau du puits pour boire, faire boire le bétail, faire le linge et le jardinage. L'eau est en général de bonne qualité, mais la qualité et la quantité peuvent être sujet à une variation saisonnière. La préservation et l'amélioration de la qualité et la quantité de l'eau fourniront une source potentielle pour les développements agricole, industriel et municipal.

L'exécution des projets d'aménagement de l'OMVS auront un impact sur la quantité et la qualité de l'eau. Ces effets peuvent être positifs ou négatifs. Par exemple, la recharge croissante due à la régularisation du débit et à l'endiguement est positive, tandis que l'introduction des pesticides et des engrais dans l'environnement due au développement agricole est négative. Il est important de connaître ces impacts et en même temps de faire des recommandations sur le contrôle et la surveillance de la pollution.

B. OBJECTIFS ET CONTENU

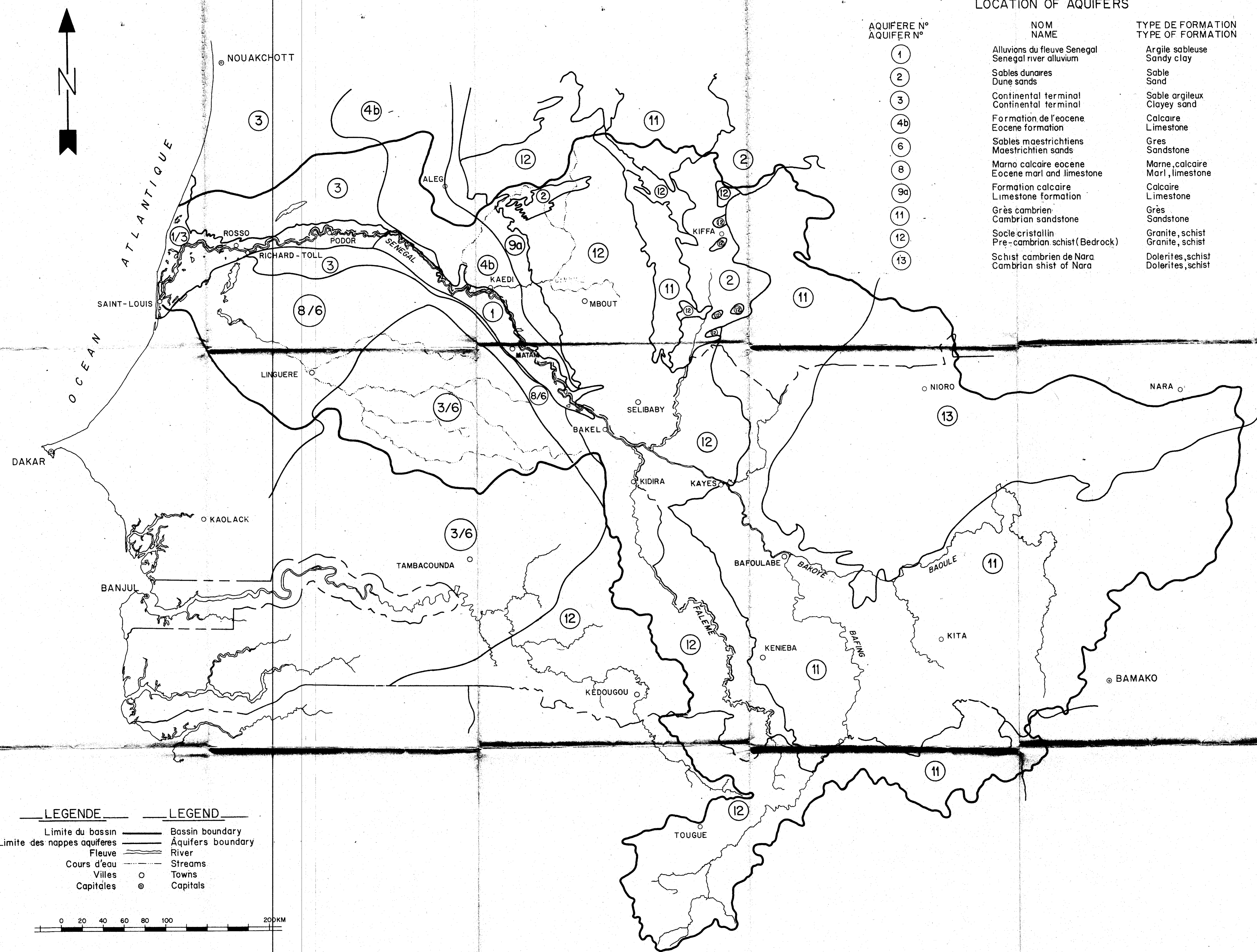
L'évaluation de la ressource sera basée sur les informations géologiques et hydrogéologiques disponibles. Il n'est pas du ressort de ce rapport de développer des informations de base. Les objectifs comprennent les points suivants :

- a) Description de la géologie du bassin
- b) Description de la quantité et la qualité des nappes souterraines existantes
- c) Détermination des impacts sur la recharge et la qualité des nappes souterraines
- d) Identification des méthodes de contrôle de la pollution.
- e) Comparaison et Analyse des méthodes de contrôle.
- f) Préparation des plans pour un système de contrôle des nappes souterraines.
- g) Recommandation pour un plan d'action.

Cette étude sera basée sur des informations hydrogéologiques actuelles et en particulier sur les travaux de Sénégal Consult (1970) et BRGM (1975, 1976).

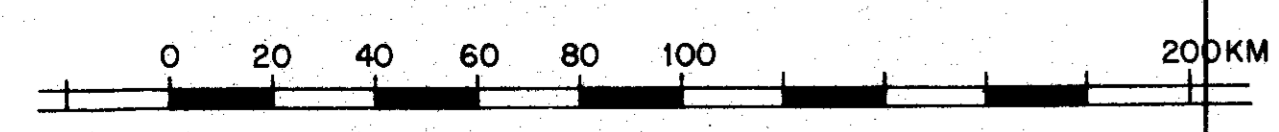
SITUATION DES NAPPEs AQUIFERES
LOCATION OF AQUIFERS

AQUIFERE N° AQUIFER N°	NOM NAME	TYPE DE FORMATION TYPE OF FORMATION
1	Alluvions du fleuve Senegal Senegal river alluvium	Argile sableuse Sandy clay
2	Sables dunaires Dune sands	Sable Sand
3	Continental terminal Continental terminal	Sable argileux Clayey sand
4b	Formation de l'eocene Eocene formation	Calcaire Limestone
6	Sables maestrichtiens Maestrichtian sands	Gres Sandstone
8	Marno calcaire eocene Eocene marl and limestone	Marne, calcaire Marl, limestone
9a	Formation calcaire Limestone formation	Calcaire Limestone
11	Grès cambrien Cambrian sandstone	Grès Sandstone
12	Socle cristallin Pre-cambrian schist (Bedrock)	Granite, schist Granite, schist
13	Schist cambrien de Nara Cambrian schist of Nara	Dolerites, schist Dolerites, schist



LEGENDE **LEGEND**

Limite du bassin	—	Bassin boundary
Limite des nappes aquiferes	—	Aquifers boundary
Fleuve	—	River
Cours d'eau	—	Streams
Villes	○	Towns
Capitales	●	Capitals



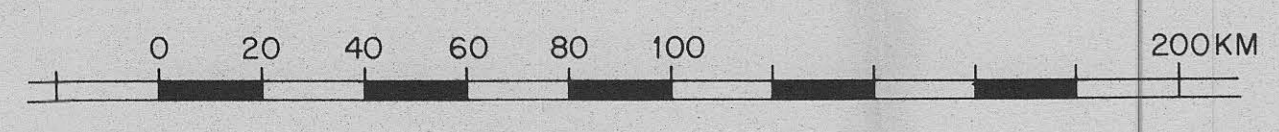
SOURCE:
Carte de planification pour l'exploitation des eaux souterraines
de l'Afrique soudano-sahélienne, BRGM, 1976

SITUATION DES NAPPES AQUIFERES
LOCATION OF AQUIFERS



AQUIFERE N° AQUIFER N°	NOM NAME	TYPE DE FORMATION TYPE OF FORMATION
1	Alluvions du fleuve Senegal Senegal river alluvium	Argile sableuse Sandy clay
2	Sables dunaires Dune sands	Sable Sand
3	Continental terminal Continental terminal	Sable argileux Clayey sand
4b	Formation de l'eocene Eocene formation	Calcaire Limestone
6	Sables maestrichtiens Maestrichtien sands	Gres Sandstone
8	Marno calcaire eocene Eocene marl and limestone	Marne, calcaire Marl, limestone
9a	Formation calcaire Limestone formation	Calcaire Limestone
11	Grès cambrien Cambrian sandstone	Grès Sandstone
12	Socle cristallin Pre-cambrian schist (Bedrock)	Granite, schist Granite, schist
13	Schist cambrien de Nara Cambrian schist of Nara	Dolerites, schist Dolerites, schist

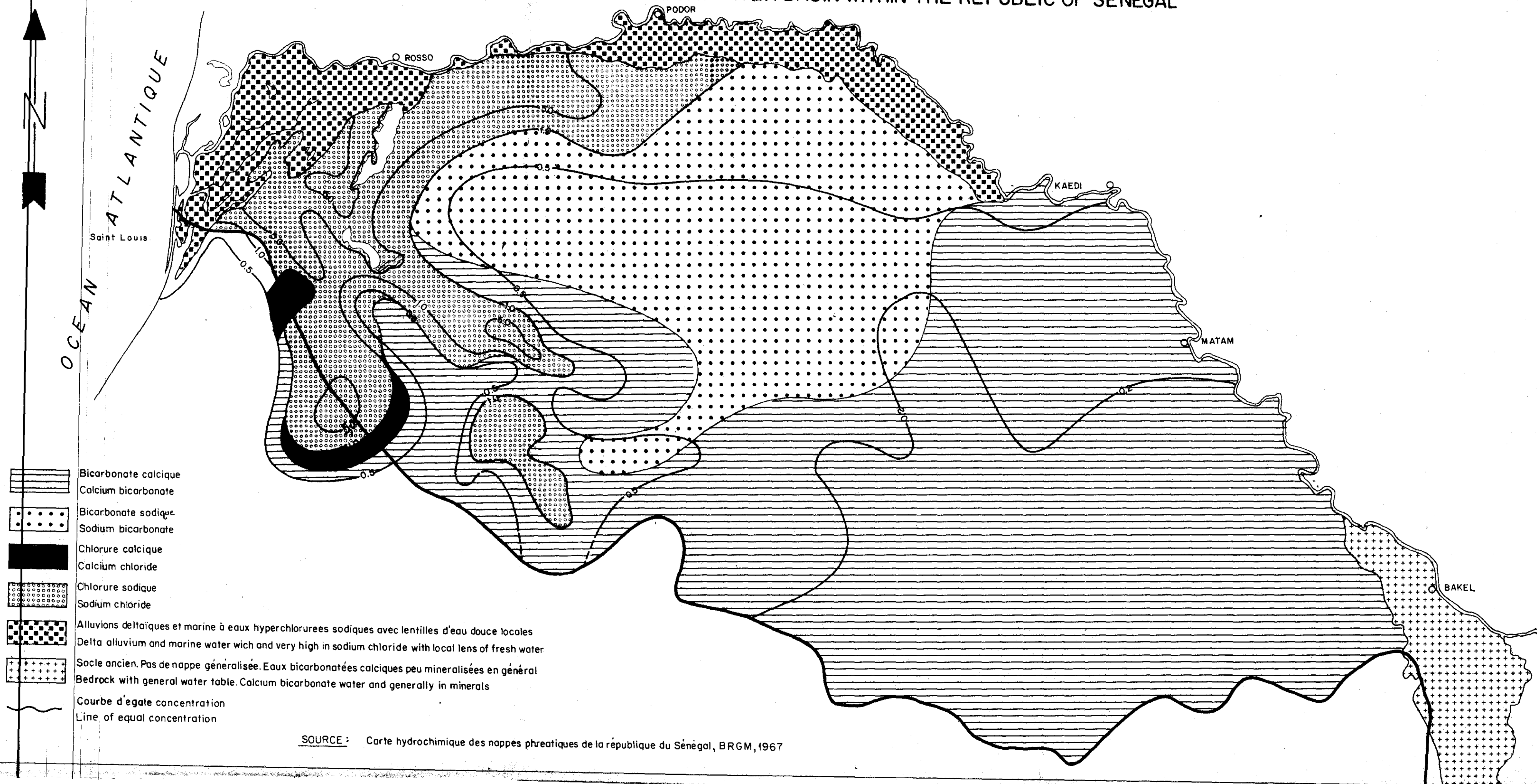
LEGENDE	LEGEND
Limite du bassin	Bassin boundary
Limite des nappes aquiferes	Aquifers boundary
Fleuve	River
Cours d'eau	Streams
Villes	Towns
Capitales	Capitals



SOURCE:
Carte de planification pour l'exploitation des eaux souterraines
de l'Afrique soudano-sahélienne, BRGM, 1976

CARTE HYDROCHIMIQUE DES NAPPES PHREATIQUES DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL ZONE SENEGALAISE MAP OF THE WATER TABLE HYDROCHEMISTRY OF THE SENEGAL RIVER BASIN WITHIN THE REPUBLIC OF SENEGAL

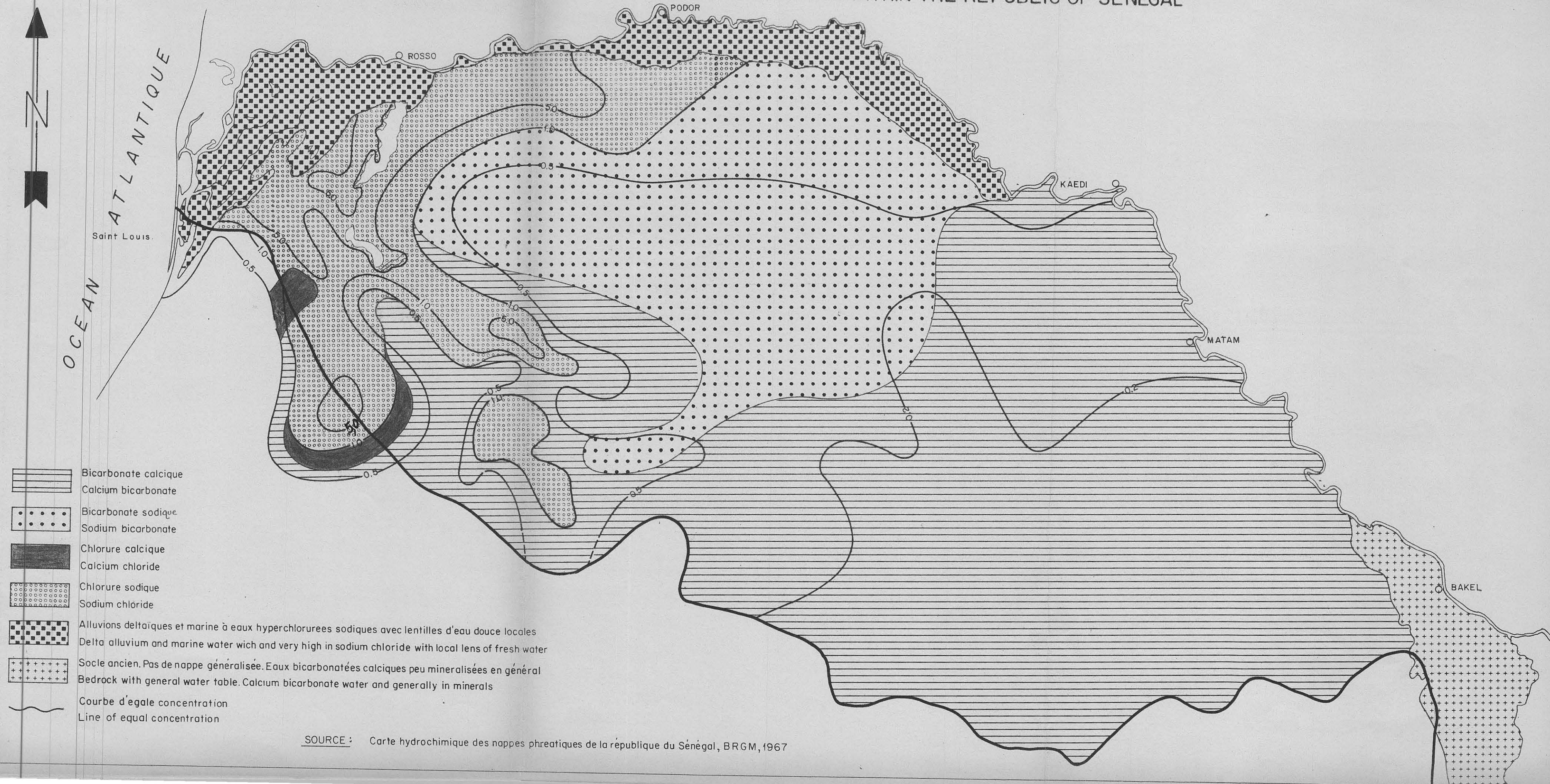
Figure 10



SOURCE : Carte hydrochimique des nappes phréatiques de la république du Sénégal, BRGM, 1967

CARTE HYDROCHIMIQUE DES NAPPES PHREATIQUES DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL ZONE SENEGALAISE
 MAP OF THE WATER TABLE HYDROCHEMISTRY OF THE SENEGAL RIVER BASIN WITHIN THE REPUBLIC OF SENEGAL

Figure 10



SOURCE : Carte hydrochimique des nappes phréatiques de la république du Sénégal, BRGM, 1967

C. INVENTAIRE DES DONNEES EXISTANTES

Cette section du rapport examinera les informations extraites de toutes les sources disponibles dans les domaines de la géologie et de l'hydrogéologie.

C.1 Géologie

La zone comprend le bassin hydrologique formé par le Fleuve Sénégal et ses tributaires, les fleuves Falémé, Bafing, Bakoye et Baoulé. Les cartes et l'interprétation des formations géologiques sont basées sur des cartes géologiques et informations contenues dans Brigaud (1960), Michel (1969), Rezier (1974), Rochette (1974) et Sénégal-Consult (1970).

Le Bassin du Fleuve Sénégal et ses tributaires comprend les formations géologiques qui sont rangées dans l'ordre chronologique suivant :

- Base Précambrien

Birrimien, faciès de schiste

Birrimien, faciès de roche verte

Granite syntectonique

Granite Postectonique

- Infracambrien

Grès de quartz, pélite

Cambrienne

Tillite, dolomie, pélite

Ordovicien

Grès

Intrusions de Post-ordovicien

Dolérite

Tertiaire

Continental terminal

Grès, calcaire

Quaternaire

Dépôts alluviaux

Deux cartes qui montrent les emplacements de ces formations sont incluses comme figures 1 et 2. (ces cartes ne sont pas disponibles à temps pour être incluses dans le rapport interimaire). Les descriptions suivantes sont tirées de Sénégal-Consult (1970).

C.1.1 Base précambrienne

Cette série affleure dans les vallées de la Falémé et du Bafing. Dans le bassin de la Falémé, il rencontre la structure montagneuse cambrienne du Fouta Djallon au sud et la colline infracambrienne de Tambaoura à l'est. Dans le Bassin du Bafing, elle affleure au sud et à l'est où elle est arrêtée par les reliefs infracambriens et cambriens du Fouta Djallon.

Elle est composée de roches métamorphiques dissymétriques et volcaniques composées d'un côté de schistes, quartzites pélites et autres calcaires et de l'autre côté des roches métaandésites et des verts antiques orientés dans le sens sud sud-ouest et nord nord-est. Cette série métamorphique est traversée à l'ouest et au sud par les intrusions syn et postectoniques.

Pendant l'évolution du Birrimien, une formation géologique a donné lieu au soulèvement d'une série métamorphique formant une importante chaîne de montagnes. Plus tard, cette chaîne a été aplaniée et transformée en pénoplane sous l'action des fleuves qui ont balayé leurs alluvions près de la base de la chaîne. Dans le bassin Guinéen du Bafing, cette formation est représentée par du gneiss et des granites syntectoniques.

C.1.2 L'Infracambrien

Les roches détritiques de l'infracambrien forment la totalité du plateau Mandingue et s'étendent sans interruption de Kayes à Bamako. Elles sont reliées par la

grande géoclaste de Kayes-Toukouto au nord et par le Fouta Djallon au sud.

Cette structure est caractérisée par une couche profonde composée d'une assise croisée de grès de sable feldspathiques supportant du quartz. Les grauwacks, pélites et jaspes sont souvent intercalés sous des séries de quartz sous forme de couches plutôt minces.

L'infracambrien forme un plateau sub-horizontale coupé par un réseau de failles rectilignes. Après un soulèvement général, la région est passée par un moment de refroidissement qui a touché une grande partie du continent Africain.

C.1.3 Le Cambrien

Une moraine pétrifiée a recouvert la région pendant cette période glaciaire; c'est un indicateur remarquable de la limite inférieure du cambrien par son étendue et sa durée.

A la suite de cette période froide, le climat est devenu normal, facilitant la sédimentation des dépôts marins classiques. Il y a une succession de dolomies, jaspes et pélites accumulés à une grande profondeur. Ces dépôts affleurent plus particulièrement au Nord du Fleuve Sénégal et à la masse rocheuse du Fouta Djallon.

La série cambrienne, comme l'infracambrienne n'a pas subi des plissements mais d'un autre côté, elle comporte beaucoup de failles verticales. La morphologie de cette série forme des collines douces avec des flancs sillonnés de ravins en fort contraste avec les falaises des plateaux. Dans le massif montagneux de Kaarta, qui sépare la région du Nioro au Fleuve Sénégal, ces collines sont protégées de l'érosion grâce aux seuils dolérites. Dans le Fouta Djallon, ces roches ont été très latérisées et affleurent

seulement par endroit.

C.1.4 Les Intrusions doléritiques

Les roches veines, pour la plupart des dolérites ont été intercalées dans la série métamorphe sous forme de seuils qui étaient quelquefois étendus et, moins souvent sous forme de petites digues. Ces intrusions sont éparpillées par groupes dans toute la région, dont la plupart constitue le Fouta Djallon et la stature du Kaarta. Dans le plateau Mandingue elles affleurent sous forme de petits seuils et digues, en direction des fissures de la roche avoisinante.

Ces dolérites sont souvent quartzifères; leur structure est isophitiques ou micro-granulaires. Elles contiennent des plagioclases, du pyroxène chlorisé et épidoté, du biotite, des oxides de fer, du quartz et par moment du pyroxène orthohombique.

Les intrusions ont entraîné seulement un petit contact de métamorphose qui touche de façon sélective les séries pélitiques ou calcaires. Selon les études de corrélation faites en Guinée, ces formations ont eu lieu plus tard que l'Ordovicien.

C.1.5 Tertiaire (omis de l'étude de Sénégal Consult)

Pendant les périodes du Crétacé et Eocène l'océan s'est étendu sous la forme d'un golf vers le sud-est de la Mauritanie et l'est du Sénégal. Le calcaire et une masse argilo-gréseuse ont été déposés pendant l'Eocène moyen constituant le Continental Terminal. Cette série couvre une grande partie du bassin au Sénégal.

L'Eocène a affleuré dans la vallée du Fleuve Sénégal entre Bakel et Boghé, dans la basse vallée du Gorgol et au Lac de Guiers. Il forme beaucoup de seuils dans le

lit du fleuve. Les intrusions rocheuses sont formées de grès, de quartzite et de calcaire.

C.1.6 Dépôts récents

Les dépôts de laterite et de fluviatile sont les formations récentes les plus importantes.

Le terme latérite est employé ici au sens large, et inclut la désintégration de la roche de fond avec l'accumulation du fer. Lorsqu'on considère la taille du grain, la latérite apparaît sous différentes formes : les concrétions d'argile, le gravier fin et une croûte dure appelée la cuirasse. La succession varie selon les conditions physicochimiques. L'évolution aboutit très souvent à la formation de la cuirasse.

Les dépôts alluviaux sont généralement composés d'argile de sables boueux amassés dans la longueur du lit visible. Ils forment souvent des rives élevées ou érigées, dominant le thalweg de 2 à 5 m. Les dépôts alluviaux de gravier sont assez rares et sont localisés dans les lits des rivières en amont des falaises de roche ou dans les rainures du Thalweg.

C.2 L'Hydrogéologie

Cette section discutera de l'hydrogéologie du bassin. Pour les besoins de l'évaluation environnementale, la meilleure source d'informations est la compilation des données hydrogéologiques publiées par BRGM (1975, 1976). Ces documents contiennent des cartes et des informations descriptives associées qui sont basées sur des centaines de documents. Pour la convenance du lecteur qui ne possède pas ces documents, on extraira des informations pertinentes et les présentera dans ce rapport.

Les rapports du BRGM définissent deux grands types d'aquifères : les aquifères généralisés et les aquifères discontinus.

Les aquifères généralisés. Cette catégorie comprend les aquifères de formations sédimentaires à porosité d'interstices (sable, grès, gravier) ou des formations compactes contenant de larges fissures (dolomite, calcaire). Ces aquifères ont une certaine uniformité spatiale bien qu'il puisse y avoir quelque hétérogénéité verticale et horizontale. Les ressources de ces aquifères sont d'habitude substantielles. Cette classification comprend à la fois des aquifères captifs et libres.

Les aquifères discontinus. Cette catégorie comprend des aquifères de formations compactes de faible porosité (granite, gneiss, schiste). La perméabilité de la formation dépendra des fractures. Cette classe peut comprendre aussi quelques formations sédimentaires et alluviales selon le degré de la consolidation ou cimentation des roches.

C.2.1 Description des nappes aquifères dans le Bassin du Fleuve Sénégal.

Ces informations sont extraites du rapport du BRGM (1976) et donnent des estimations quantitatives des ressources des nappes souterraines. Les ressources renouvelables sont exprimées en mètre cube par kilomètre carré et par an et sont évaluées sur la base de :

- a) données mensuelles sur la pluviosité
- b) Estimations mensuelles d'évapotranspiration
- c) Estimations d'infiltration basées sur la morphologie, le degré de fissuration, le couvert végétatif et la profondeur de la nappe phréatique.

La recharge provenant des fleuves est négligée avec la seule explication qu'elle est mineure, particulièrement si on prend en compte l'effet des sécheresses.

Les ressources exploitables sont exprimées en mètre cube par kilomètre carré et tiennent compte du drainage partiel des aquifères jusqu'aux limites techniques et économiques. En ce qui concerne les aquifères libres, les estimations sont basées sur les coefficients d'emmagasinement et sur la baisse à 100 mètres sous la surface du sol de la nappe phréatique. Pour les nappes aquifères captives, le coefficient d'emmagasinement est utilisé en combinaison avec la baisse à 100 mètres sous le sol de la surface piézométrique. Tous les aquifères n'ont pas de ressources exploitables. Certaines formations discontinues contiennent des quantités d'eau négligeables pour l'exploitation. On a redessiné et inclus comme fig. 3 les parties du Bassin du Fleuve Sénégal de la carte de BRGM. Les aquifères sont clairement mis en relief. Les symbols géologiques utilisés sur la carte originale ont été inclus. Le lecteur est renvoyé à la fig.1 pour les renseignements supplémentaires sur la géologie du bassin.

La table 1 présente les résultats assemblés sur les ressources exploitables mesurées en mètre cube par kilomètre carré. Il y a une grande variété dans les ressources exploitables (de moins de $0,05 \times 10^6$ m³/km² dans tout le Mali à $0,9 \times 10^6$ m³/km² dans le delta du Fleuve Sénégal). Bien sûr, ceci ne donne aucune indication sur la qualité de l'eau et le taux économique du captage. Ces facteurs seront examinés dans les sections qui suivent.

Cette section en plus tirera des informations sur les ressources renouvelables dans les discussions spécifiques à chaque aquifère. Chaque aquifère a un numéro de référence qui lui est assigné dans le document original. On utilisera ces mêmes numéros dans ce rapport et sur les

cartes. Le tableau 1 résume les informations sur chaque aquifère.

C.2.1.1 Mali

Les principales formations hydrogéologiques comprises dans le Bassin du Fleuve Sénégal sont :

Le Grès de Bafoulabé et Kenieba

Le Schiste de Nara

Elles sont respectivement d'âge infracambrien et cambrien et ne sont pas considérées comme des sources prometteuses de nappes souterraines.

Le Grès de Bafoulabé et Kenieba (11)

On n'a pas établi l'existence des aquifères généralisés dans cette formation; cependant les fractures peuvent être des sources d'aquifères. Le rapport du BRGM (1976) contient des données provenant des puits creusés dans cette formation géologique discontinue. La moyenne des débits mesurés était de 0,01 à 80 m³/jour avec une valeur caractéristique de 1,0. La profondeur de l'eau sous le sol variait de 5,0 à 14,0 mètres avec une valeur caractéristique de 8,0 mètres.

Le Schiste de Nara (13)

Cette formation cambrienne est considérée comme étant imperméable; cependant, les fractures peuvent fournir de l'eau. Les productions typiques de puits individuel varient entre 0,5 et 10 m³/jour. La profondeur de la nappe phréatique est typiquement de 10 à 12 mètres. Les dolérites dans le secteur sud-ouest de cette formation produisent des débits plus importants (40 à 75 m³/jour).

C.2.1.2 Mauritanie

TABLEAU I -

Ressources des nappes souterraines dans le
Bassin du Fleuve Sénégal

Numéro de la carte	Nom de l'A- quifère	Période Géo- logique	Type de Formation	Ressources renouvela- bles ($10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$)	Ressources Expérimen- tables ($10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	Coefficient de stockage (10^{-2})	Rabattement (m)	Pays
11	-	Infra- Cambrien	Grès	50-100	-	-	-	Mali
13	-	Cambrien	Schiste	0-25	-	-	-	Mali
1	Alluvial	Quaternaire	Alluvion	0-25	0.05-0.10	1-2	5	Mauritanie
3	Continen- tal Terminal	Tertiaire Post- Eocène	Sable/ Grès	0-10	0.40-0.90	2-8	Aquifère d'1/3 d'épaisseur	Mauritanie
4b	-	Tertiaire Eocène	Calcaire	0-10	0.15-0.30	1-5	10	Mauritanie
11	-	Cambrien	Grès	0-25	-	-	-	Mauritanie
12	-	Pré- Cambrien	Schiste/ Granite	0-25	-	-	-	Mauritanie
1	Alluvial	Quaternaire	Alluvion	0-25	0.05-0.10	1-2	5	Sénégal
3	Continen- tal Terminal	Tertiaire Post-Eocène	Sable/Grès	25-100	0.40-0.90	1-10	Aquifère d'1/3 d'épaisseur	Sénégal
6	Maestrich- tien	Crétacé	Sable/Grès	-	0.25-0.50	0.2-1.5	100m sous le sol	Sénégal
8	-	Tertiaire	Calcaire	0-10	-	-	-	Sénégal

Les aquifères en Mauritanie ont une grande variété de caractéristiques. La vallée alluviale du Fleuve Sénégal est composée de dépôts non compacts, tandis que la roche de fond qui est exposée près de M'Bout est de granite et schiste.

L'Alluvion du Fleuve Sénégal (1)

Le dépôt libre est composé de sable, d'argile et de gravier et est très perméable. La recharge de cette nappe aquifère générale provient du fleuve. Tandis que la taille de cette ressource est petite, elle est une source d'eau assez importante pour les habitants de la vallée. On peut facilement y creuser les puits à la main. Les débits vont jusqu'à 30 m³/heure et on peut obtenir un rabattement à 2 mètres. Les ressources renouvelables et exploitables sont respectivement de 20×10^6 m³/an et $80-150 \times 10^6$ m³.

Continental Terminal

Cette formation a été déposée pendant la fin du Tertiaire dans la plupart du Sénégal et certaines parties de la Mauritanie. Le Fleuve Sénégal est considéré comme une source principale de recharge. L'épaisseur de l'aquifère varie cependant; elle est généralement d'environ 100 à 200 mètres d'épaisseur. L'aquifère est libre ou semi-libre selon sa relation aux couches d'argile. Le débit spécifique moyen est de 30 m³/jour/par mètre de rabattement. On dit que ce chiffre peut varier de façon considérable.

L'Eocène (4^b)

Cet aquifère libre est composé essentiellement de calcaire et de dolomie. Le continental terminal la recouvre à l'ouest de l'affleurement et elle est bordée à l'est par le schiste dans le dépôt de la roche de fond cristalline précambrienne. Les piézomètres ont démontré que le Fleuve Sénégal procure une recharge à cette formation. Les débits dans le puits indiquent qu'on peut obtenir

jusqu'à 10 m³/heure.

Le Grès cambrien (11)

Cette formation contient de l'argile et du grès. Le degré de cimentation est variable. Il y a des dépôts mineurs locaux de calcaire, dolomie et d'argile. On trouve en général de l'eau dans les petites poches d'alluvion, dans des changements de sol et des fractures. Les débits typiques sont 0,5 à 2,0 m³/jour.

B. 1.2.5 Schiste précambrien (12)

Cette formation de roche de fond est composée essentiellement de schiste et de granite. L'affleurement s'étend sur un axe nord-sud le long de la bordure et du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien. Il faut en général y creuser jusqu'à 100 - 150 mètres pour avoir suffisamment d'eau. Les débits maximum sont de l'ordre de 25 m³/jour; cependant à Akjoujt à cause de la couche fracturée il est possible d'obtenir 1000 à 2000 m³/jour.

C.2.1.3 Sénégal

Les formations géologiques au Sénégal ont été très étudiées et il y a beaucoup d'informations disponibles sur ce sujet. Le continental terminal et les formations alluviales discutés dans la section précédente sont communes à la Mauritanie et au Sénégal. Les deux formations sont rechargées par le Fleuve Sénégal qui constitue une frontière commune. Le Sénégal est aussi situé sur la formation maestrichtienne qui contient de grandes réserves de nappes souterraines.

Alluvion du Fleuve Sénégal

Il s'agit du même dépôt que celui de la Mauritanie. Il est important de noter que le rapport du BRGM exclut de ses évaluations de ressources cette portion

d'aquifère libre touchée par l'intrusion marine. Les ressources renouvelables et exploitables sont respectivement de 50×10^6 m³/an et $210-410 \times 10^6$ m³.

Continental terminal

Cette formation est libre et a été déposée à la fin du tertiaire. Les aquifères couvrent les 4/5 du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien et sont approximativement de 100 à 200 mètres d'épaisseur. La source de recharge est attribuée aux pluies en Gambie et en Casamance.

Le débit moyen spécifique est de 100 m³/jour par mètre de rabattement. Ceci constitue six fois le volume relevé de l'aquifère de Mauritanie. Les ressources renouvelables et exploitables de cet aquifère au Sénégal sont respectivement de 7500×10^6 m³/an et $40-90 \times 10^9$ m³. Le rapport du BRGM note plus loin que cette eau est avant tout extraite des puits avec de faibles productions.

Maestrichtien (6)

Cet aquifère est captif et est la ressource de nappes souterraines, la plus importante au Sénégal. L'aquifère de 200 à 250 mètres de profondeur s'étend sous la plupart du Sénégal. La profondeur jusqu'à l'aquifère peut varier de 50 à 500 mètres. Les rendements typiques de puits sont de 150 à 200 m³/heure. Plus d'informations détaillées sur les rendements de puits sont données dans la section sur la productivité de ce rapport. Le rapport publié par BRGM (1971) indique que les sources de recharge sont les régions de la Casamance, du Sénégal Oriental, du Cours du Fleuve Sénégal, et la partie de l'aquifère qui traverse l'anticlinal au Lac de Guiers. Le mouvement horizontal de l'eau a été calculé et établi à 10 mètres par an basé sur l'analyse isotopique des nappes souterraines. L'âge de l'eau au centre de la nappe a été estimée à 40.000 ans.

A cause peut être des sources incertaines de recharge, le rapport BRGM (1975) n'a pas spéculé sur les ressources renouvelables disponibles. L'estimation sur les sources exploitables est de $40.000 - 80.000 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Eocène marno-calcaire

Ce dépôt recouvre l'aquifère maestrichtien dans la partie nord-ouest du Sénégal. La formation contient du marle, de l'argile et du calcaire en escaliers. Les aquifères sont localisés et produisent très peu d'eau.

C.3 Résumé des principales ressources de nappes aquifères

Les principaux aquifères qui peuvent être touchés par les aménagements dans le Bassin du Fleuve Sénégal sont la nappe alluviale du Fleuve Sénégal, le Continental Terminal et les aquifères maestrichtiens. Le Fleuve Sénégal est une source principale de recharge de ces nappes. La formation de grès cambrien au Mali entourant le site proposé du réservoir de Manantali peut être touché de façon significative. Les aquifères examinés plus profondément afin de déterminer l'ampleur des impacts des aménagements sur eux.

C.4 Productivité des aquifères

Le meilleur résumé sur la productivité des aquifères est le rapport mentionné du BRGM (1975). La productivité est mesurée en mètre cube par jour. La formule utilisée pour évaluer la productivité est :

$$P_{th} = Q_{s_{th}} \times R_{th}$$

dans laquelle P_{th} = productivité théorique en m^3/jour

Q_{th} - débit spécifique théorique exprimé en m³/jour de rabattement basé sur l'épaisseur entière de l'aquifère sans défaut d'étanchéité.

R_{th} = rabattement théorique applicable compte tenu des caractéristiques de l'aquifère

Ces différents cas ont été identifiés dans le but d'évaluer le rabattement. Ce sont :

Cas 1 - Le rabattement est considéré égal au 1/3 de l'épaisseur de la nappe. Ceci est limité aux aquifères libres.

Cas 2 - Ceci se rapporte aux aquifères complexes qui sont soit compacts soit libres. Le rabattement est donné de façon spécifique.

Cas 3 - Pas de rabattement donné. La productivité est estimée directement à partir des caractéristiques de l'aquifère.

Le tableau 2 contient les cas types d'aquifères sélectionnés du bassin.

<u>TABLEAU 2</u>			
<u>Nappe aquifère N°</u>	<u>Dénomination</u>	<u>Cas N°</u>	<u>Rabattement</u>
1	Alluvion du Fleuve Sénégal	2	5
3	Continental Terminal	1	-
4b	-	2	10
6	Maestrichtien	2	30
8	-	3	-

TABLEAU 2 (suite)

<u>Nappe aquifère N°</u>	<u>Dénomination</u>	<u>Cas N°</u>	<u>Rabattement</u>
11	-	3	-
12	-	3	-
13	-	3	-

Les estimations de la productivité dans le Bassin du Fleuve Sénégal faites par le BRGM sont présentées à la Figure 5. Les estimations pour les aquifères Maestrichtiens sont présentées séparément à la figure 6. Les estimations de la productivité sont faites compte tenu de l'espacement des puits de telle sorte que les courbes de rabattement ne s'interfèrent pas. Les estimations d'espacement peuvent être faites en utilisant les données sur la ressource renouvelable fournies dans la section précédente. Il est important de noter que la productivité ne tient pas compte de la qualité de l'eau ou/et de sa convenance pour l'usage envisagé.

Les formations de grès et de schiste au Mali produisent de très faibles quantités d'eau. L'eau est obtenue à partir des fractures et des formations alluviales des vallées des fleuves. Au nord-est de Bafoulabé il y a des dépôts de dolomie qui produisent de grandes quantités d'eau (autour de 40 à 75 m³/jour). Les parties Est de la Mauritanie du Bassin du Fleuve ont aussi une faible productivité (habituellement moins de 50 m³/jour). Le schiste précambrien et le granite entourant M'Bout et Sélibaby constituent l'exception. Les formations de schiste et de granite produisent de très faibles quantités d'eau (moins de 50 m³/jour); cependant, l'alluvion recouvrant les petites lignes de formations précambriennes peuvent produire de 40 à 75 m³ jour. L'aquifère Continental terminal à l'ouest produit jusqu'à 600 m³/jour. Les productions sont maximales près de la côte.

L'aquifère alluvial dans la vallée du Fleuve Sénégal est utilisé par les habitants comme eau potable

et ils s'en procurent en creusant à la main des puits peu profonds. L'eau est de bonne qualité et s'obtient facilement. Les productions des puits creusés à la main sont faibles à cause de leur faible profondeur; cependant, le potentiel de productivité serait très grand (jusqu'à 1100 m³/jour) si on aménageait des puits de façon optimale. Ces productions plus élevées seraient possibles dans la vallée entre Boghé et Bakel. En aval de Boghé les productions seraient entre 40 à 380 m³/jour.

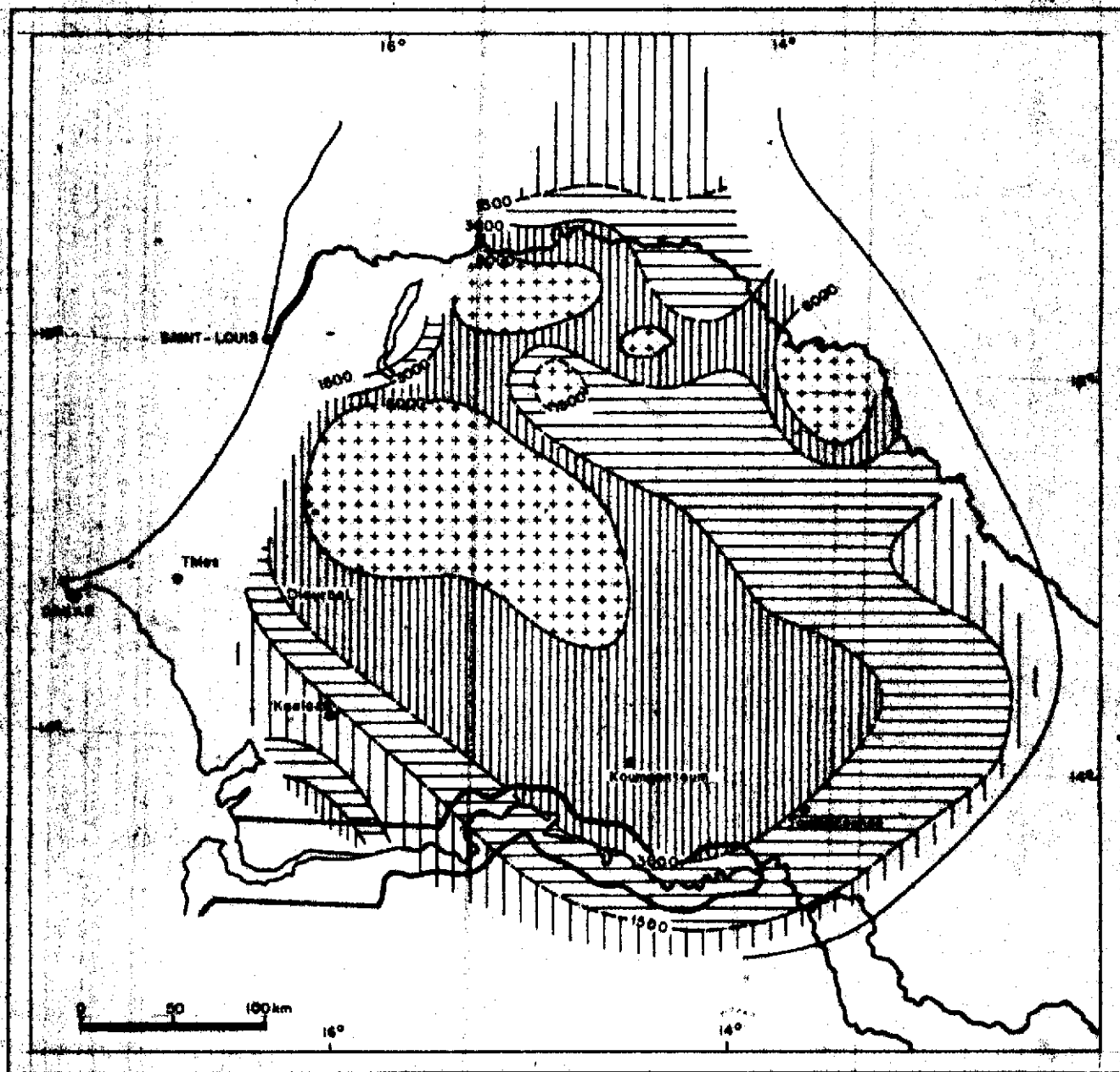
Le Continental Terminal peut produire de 2.200 m³/jour grâce à la préfiguration et l'espacement optimum des puits. La recharge de cette formation provient des bassins des fleuves Casamance et Gambie. Comme indiqué auparavant, les productions avoisinant ce chiffre n'ont pas été obtenues à cause du manque de préfiguration optimum des puits.

L'aquifère maestrichtien contient la plus importante ressource d'eau dans le Bassin du Fleuve Sénégal; cependant pour utiliser cette eau il faudra adopter une construction moderne de puits et investir suffisamment. Les sources de recharge sont l'objet de recherche perpétuelle, cependant quelques-unes ont été identifiées. Ce sont : les bassins des fleuves Casamance, Gambie, la région près du Lac de Guiers et le Fleuve Sénégal entre Boghé et Bakel. Il peut y avoir un potentiel de fuite d'eau des formations superposées telles que le Continental Terminal.

Les estimations de la productivité d'aquifère sous trois conditions sont extraites du rapport du BRGM (1976) et présentées à la figure 6. On a estimé les productions pour quelques secteurs du Sénégal à au plus 10.000 m³/jour. Il semble que de grandes quantités peuvent être extraites de cet aquifère. Il s'avérera important de s'assurer que la recharge est suffisante pour remplacer l'eau retirée. La source de recharge peut être modifiée par les changements dans le régime du fleuve.

PRODUCTIVITE DE LA NAPPE DES SABLES MAESTRICHIENS

PRODUCTIVITY OF THE MAESTRICHTIAN AQUIFER

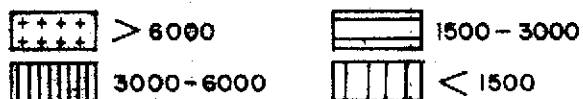


RABATTEMENT UNIFORME SUR TOUS LES OUVRAGES EGAL A 30 METRES

UNIFORM DRAWDOWN IN ALL AREAS EQUALS 30 METRES

PRODUCTIVITE EN $M^3/24$ hrs

PRODUCTIVITY IN $M^3/24$ hrs



SOURCE: CARTE DE PLANIFICATION POUR L'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES
DE L'AFRIQUE SAHELIEUNE BRGM, 1975

C.5 Qualité de l'eau de l'Aquifère

La productivité et le potentiel de recharge ne sont pas les seuls facteurs touchant la factualisation, la viabilité des ressources de nappes souterraines. On doit aussi tenir compte de la qualité des nappes souterraines. Le rapport du BRGM (1975) contient un résumé des informations utilisant les types d'eau pour l'agriculture comme moyen de comparaison.

Les caractéristiques de l'eau d'irrigation considérées les plus importantes sont (Richards, 1954) :

- 1) Concentration totale des sels solubles
- 2) part relative de sodium et d'autres sels.
- 3) Concentration de boron ou d'autres éléments qui peuvent être toxiques.
- 4) l'alcalinité en relation à la crudité sous certaines conditions.

Le diagramme développé par Walcox (1948) est un moyen par lequel on peut examiner les deux premières caractéristiques. Le diagramme classifie l'eau sur la base de la conductivité (une mesure des sels dissous) et du taux d'absorption du sodium. Le taux d'absorption du sodium (SAR) est défini comme :

$$SAR = N^{at} / \sqrt{(Ca \text{ } tt + mg \text{ } tt) / 2}$$

D'où les éléments sont exprimés en milliéquivalents par litre. Ce diagramme est présenté à la figure 1. Les descriptions de conductivité et les classifications de sodium ont été prises directement de Richards, (1954 et sont :

Conductivité.

On peut utiliser de l'eau à faible salinité pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols avec très peu de chance de voir la salinité se développer. Il faut quelque filtration, mais cela arrive

avec les pratiques normales d'irrigation sauf pour les sols de très faible perméabilité.

L'eau de salinité moyenne (C2) peut être utilisée s'il y a un volume modéré de filtration on peut faire pousser les plantes à tolérance modérée de sel sans méthodes spéciales de contrôle de salinité.

L'eau de forte salinité (C3) ne peut pas être utilisée sur les sols de drainage limitée. Même avec un système adéquat de drainage, il faut une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité et on devra sélectionner les plantes à bonne tolérance de sel.

L'eau de forte salinité (C4) ne convient pas à l'irrigation sous des conditions ordinaires, mais peut être utilisée de temps en temps dans des circonstances particulières. Les sols doivent être perméables, le drainage doit être adéquat, on doit utiliser beaucoup d'eau d'irrigation pour permettre une filtration considérable, et on doit sélectionner des plantes à très grande tolérance de sel.

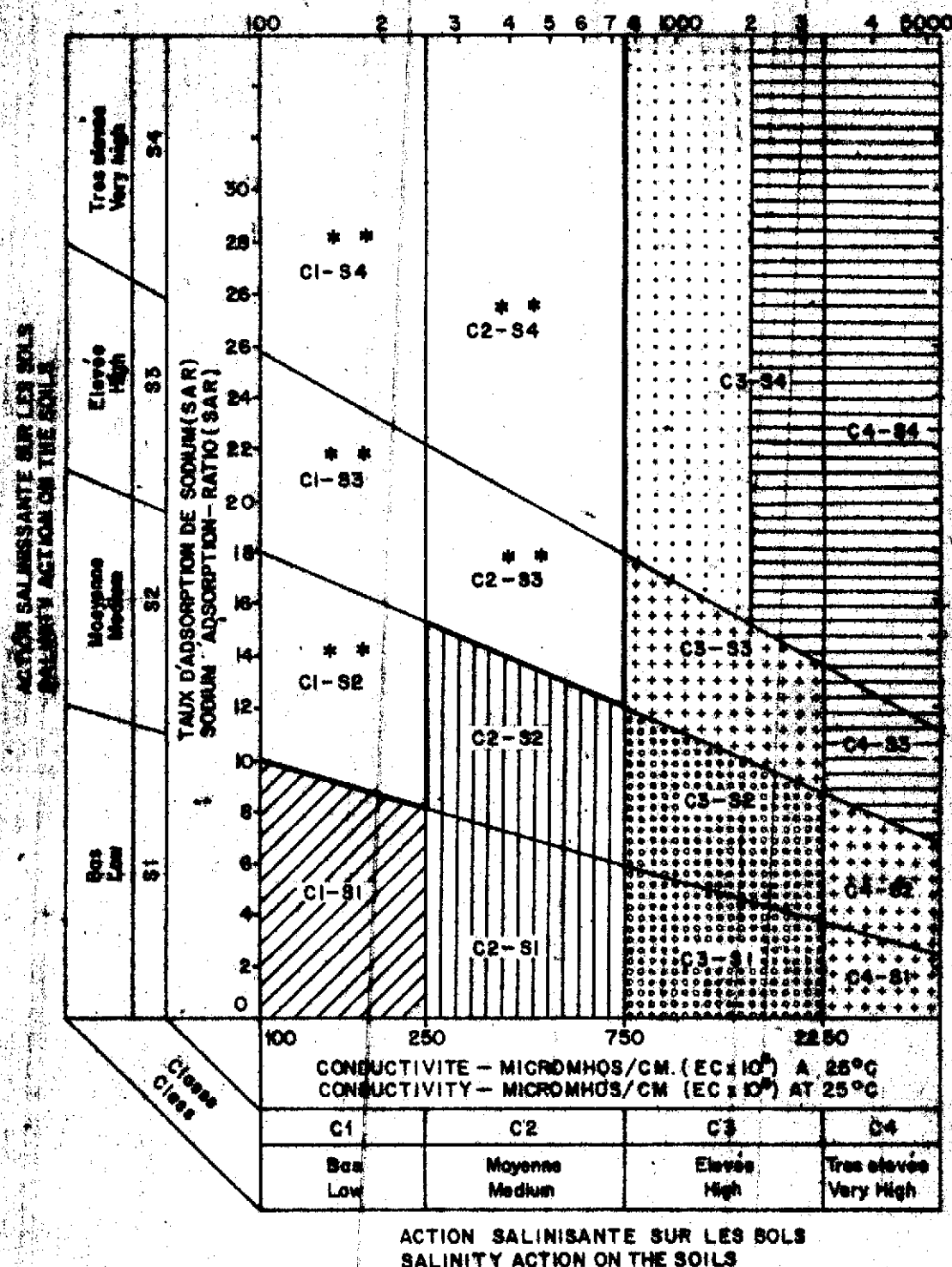
SODIUM

La classification des eaux d'irrigation par rapport au taux d'absorption de sodium du sol est fonction avant tout de l'effet d'échange du sodium sur la condition physique du sol. Les plantes sensibles au sodium peuvent cependant subir des dégâts par suite de l'accumulation de sodium dans les tissus de la plante, lorsque les valeurs d'échange du sodium sont plus basses que celles réelles causant la détérioration de la condition physique du sol.

L'eau à faible teneur de sodium (S_1) peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les sols avec peu de danger de développement des niveaux nocifs d'échange de sodium. Cependant, les plantes sensibles au sodium.

Figure 7

DIAGRAMME POUR LA CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION DIAGRAM FOR THE CLASSIFICATION OF IRRIGATION WATERS



- | | | | | | | |
|--|-------------------------|--|--------------------------|--|-----------------|---------------|
| | Excellente
Excellent | | Admissible
Acceptable | | Mauvaise
Bad | } R.S. < 1g/l |
| | Bonne
Good | | Médioce
Mediocre | | Mauvaise
Bad | |

* * (Classe non rencontrée sur cette feuille)
 (Category not mentioned on this sheet)

L'eau à teneur moyenne de sodium (S2) constituera un danger notable de sodium pour les sols à constitution délicate qui ont de haute capacité d'échange de cation, particulièrement sous des conditions de filtration, à moins qu'il n'y ait de la pierre à plâtre dans le sol. Cette eau peut être utilisée sur des sols communs ou des sols organiques de bonne perméabilité.

L'eau à haute teneur de sodium (S3) peut produire des niveaux dangereux d'échange de sodium dans la plupart des sols et nécessitera une gestion spéciale c'est à dire un bon drainage, une bonne filtration et des additions de matières organiques. Les sols avec des pierres à plâtre peuvent ne pas développer des niveaux dangereux d'échange de sodium provenant de telles eaux. Il se peut que des modifications chimiques soient nécessaires pour le remplacement du sodium d'échange sauf que les modifications ne peuvent être pas être faisables avec les eaux de très forte salinité.

L'eau à très forte teneur de sodium (S4) ne convient généralement pas pour l'irrigation sauf à une faible ou moyenne salinité, où la solution de calcium provenant du sol ou de l'usage de la pierre à plâtre ou des autres modifications peuvent rendre ces eaux utilisables.

Quelquefois l'eau d'irrigation peut dissoudre suffisamment de calcium provenant des sols calcaires pour diminuer de façon notable le danger du sodium et on doit tenir compte de ce facteur en utilisant les eaux G - S3 et G) S4. Pour les sols calcaires avec de hautes valeurs de ph ou pour les sols non calcaires, la condition du sodium des eaux des classes G - S3, G - S4 et C2 - S4 peut être améliorée en ajoutant de la pierre à plâtre à l'eau. De même, il peut s'avérer bénéfique d'ajouter périodiquement de la pierre à plâtre au sol lorsqu'on utilise les eaux C2 - S3 et C3 - S2.

Le boron est un facteur important à considérer mais il n'y a à présent aucune donnée disponible sur ça. Le boron est nécessaire pour la croissance de la plante; cependant, des concentrations excessives peuvent être toxiques. Les seuils pour les plantes sensibles et tolérantes sont de 1,0 et 2,0 mg/l.

Le rapport du BRGM (1975) utilise la classification précédente pour caractériser la qualité de l'eau d'irrigation dans les nappes aquifères libres. Ceci est présenté à la figure 8. Seules les formations du Continental terminal, de l'alluvion du Fleuve Sénégal et du calcaire éocène ont été classifiées à cause de l'impossibilité d'utiliser les dépôts de schiste et de grès pour les grandes sources d'eau d'irrigation. Le Delta du fleuve et les secteurs entourant le lac de Guiers et le lac R'Kiz ont été classés comme eaux C4 - S4 et C4 - S3. Les discussions avec les experts en irrigation de la Compagnie sucrière de Richard-Toll (C.S.S.) confirment cette classification.

La compagnie sucrière a fait d'importants efforts pour mettre en valeur des sols salins grâce à l'utilisation du drainage artificiel, de l'addition de la pierre à plâtre au sol et à la filtration. Bien que difficile et long, ce procédé a eu de très bons résultats. Avec l'utilisation des techniques agricoles modernes, la compagnie sucrière peut mettre en valeur d'autres terres dans le delta.

En amont de Dagana dans la vallée de l'alluvion du Fleuve Sénégal la qualité de l'eau s'améliore à cause de l'absence de l'intrusion marine. L'eau dans le secteur Podor à Kaédi est classifiée comme C2 - S1 et comme C1 - S1 du secteur de Kaédi à Bakel. Ces eaux doivent poser peu de problèmes si on les utilise pour l'agriculture.

La qualité de l'eau du Continental terminal est classée d'excellent à bon ($C_1 - S_1$ à $C_2 - S_1$). L'eau de la formation calcaire éocienne localisée dans le Delta de l'alluvion du Fleuve Sénégal et du Continental Terminal varie en qualité. L'eau dans le Continental Terminal en Mauritanie est aussi de bonne qualité ($C_2 - S_1$ ou $C_2 - S_2$).

La figure 9 présente les résultats du travail du BRGM sur l'aquifère Maestrichtien. L'eau de la partie ouest de l'aquifère contient de hautes concentrations de solides dissous (plus de 1.000 mg/l). L'eau de la partie est de bonne qualité, bonne pour l'irrigation. La partie de l'aquifère située en Mauritanie semble de mauvaise qualité.

D'autres données sur la qualité de l'eau spécifique au Sénégal ont été publiées par le BRGM. Ces données portent sur les solides dissous, la concentration et la prédominance d'ions. Les figures 10 et 11 montrent les profils des solides dissous et la prédominance d'ions des aquifères de surface et de l'aquifère maestrichtien associés au Bassin du Fleuve Sénégal. En aval de Kaédi l'eau est constituée en grande partie de calcium-bicarbonate, faible en solides dissous. A mesure que l'eau se rapproche du delta la prédominance change au chlorure de sodium à mesure que la concentration de solides dissous dépasse 5 grammes par litre.

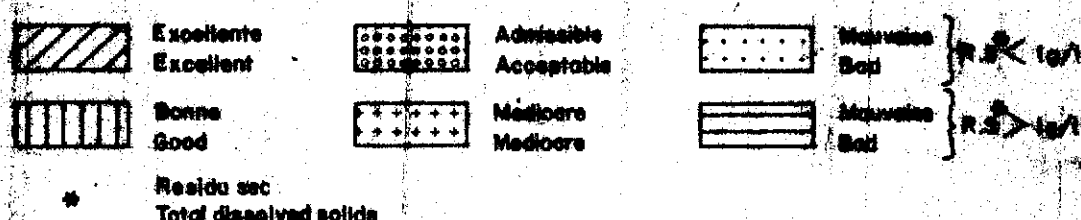
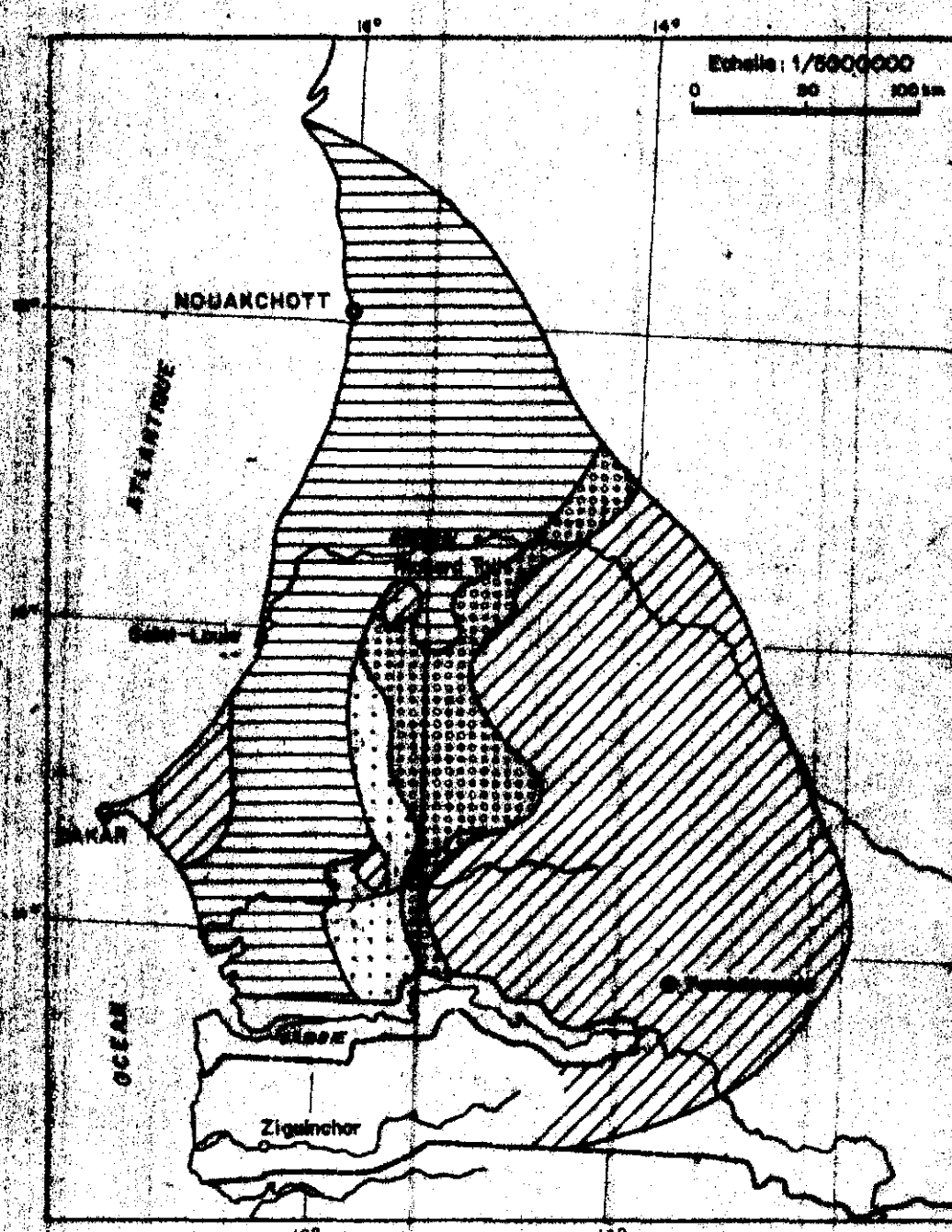
Dans les secteurs en aval au Mali, l'eau est très faible en solides dissous avec une prédominance de bicarbonate de calcium. D'une façon générale les nappes souterraines du bassin sont basses en solides dissous sauf dans les zones qui ont été ou qui sont sujettes à l'intrusion marine. Le granite, schiste et grès qui sont les formations prédominantes au Mali, solubilisent de faibles quantités de minéraux.

BASSIN SENEGALO MAURITANIEN

Nappe profonde des sables maestrichtiens

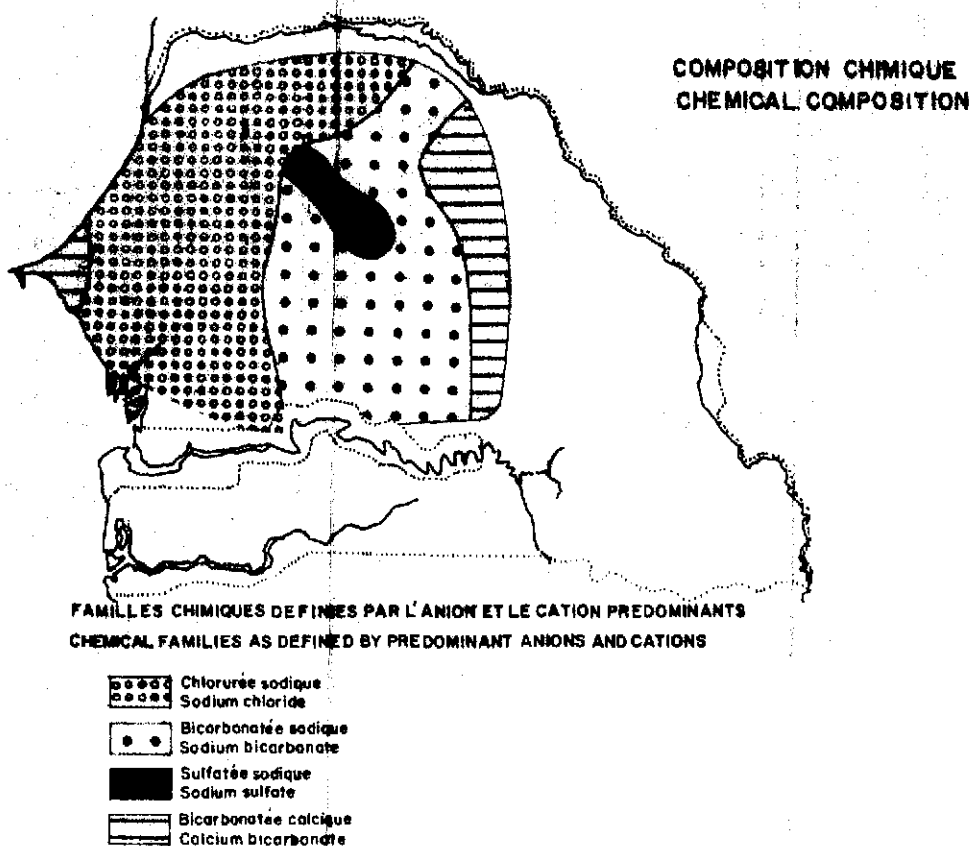
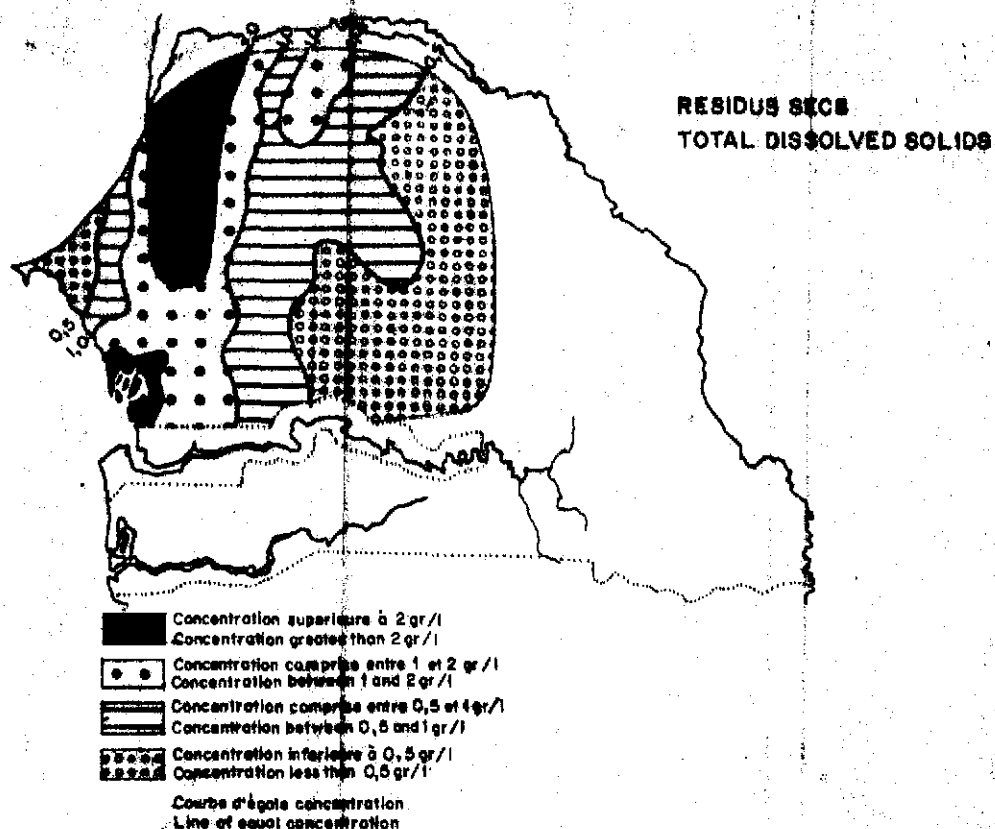
SENEGAL MAURITANIAN BASIN

Deep aquifer of maestrichtian sands



LEGÈDE : CARTE DE PLANIFICATION POUR L'EXPLOITATION DE SEAUX SOUTERRAINES
DE L'AFRIQUE SAHÉLIENNE, BRGM, 1975

ESQUISSES HYDROCHIMIQUES DE LA NAPPE DES SABLES MAESTRICHTIENS
 OUTLINE OF THE HYDROCHEMISTRY OF THE MAESTRICHTIAN AQUIFER



La partie ouest de la Mauritanie et du Sénégal a formé un bassin sédimentaire pendant la période tertiaire. Des sels ont été déposés dans ces zones. Actuellement l'intrusion marine touche le fleuve jusqu'à Podor pendant la saison sèche. Etant donné que le Fleuve est la principale source de recharge des aquifères alluviaux, ces aquifères contiennent de l'eau à haute teneur de solides dissous. Les travaux sur le terrain qui seront inclus ultérieurement dans ce rapport démontrent que la qualité de l'eau dans le delta varie selon la saison.

Les analyses d'eau sont incluses dans beaucoup de rapports tels que (Audibert, 1970; BRGM, 1971; CIEH, 1967a, 1967b; Elouard, 1962; LIY, 1973; Karpoff, 1970; Lalèye, 1964). Elles confirment la présentation générale de la qualité de l'eau portée sur les cartes du BRGM. Pour les fins de ce rapport, ces analyses ne seront pas citées ici.

D. ETUDES SUR LE TERRAIN

Une importante partie de ce rapport contiendra des données collectées sur environ 40 puits dans tout le bassin du fleuve par l'équipe. Au moment de la rédaction de ce rapport, l'échantillonnage des puits n'était pas terminé. Deux voyages sont prévus; un en juin pour collecter les données représentatives de la fin de la saison sèche et un en août pour collecter les données sur la saison des pluies. Il est prématuré d'analyser et d'enregistrer les résultats avant que ces données ne soient collectées.

Une liste des sites des 40 puits qui ont été échantillonnés est ici-jointe à titre de tableau 2. Ces puits ont été échantillonnés 1 à 3 fois selon leur emplacement. Les données ont été mises en tableau mais, comme noté auparavant, d'autres données doivent être encore collectées. Les analyses suivantes ont été faites :

TABLEAU 4

ANALYSES EFFECTUEES SUR LES ECHANTILLONS DE PUITs

Température	Demande d'oxygène dissous
Ph	Nitrogène Kjeldahl total
Alcalinité	Amonique
Total des solides	Nitrate
Total des solides suspendus	Phosphate total
Total des solides dissous	Dureté
Conductivité	Chlorure
Total des bactéries	Fer
Bactéries fécales	

Remarques : Les analyses de manganèse, fluor et boron seront effectuées lorsque les équipements nécessaires arriveront à Dakar.

TABLEAU 3

LISTE DES PUIITS ECHANTILLONES

<u>N° du Puits</u>	<u>Nom du Village</u>	<u>Pays</u>
1	DIAMA	Sénégal
2	MAKA	Sénégal
3	RHONE	Sénégal
4	MARAY	Sénégal
5,6	BOUNTOU-NDIGOU	Sénégal
7	DIAGLE	Sénégal
8,9,10	KAMSAN	Mauritanie
11,12	DAR EL BARKA	Mauritanie
13	DIOMANDOU	Sénégal
14	GADIOBIE	Sénégal
15	GALOYA	Sénégal
16	BOGGUEL	Sénégal
17	MBOLO ALI	Sénégal
18,19	DIABA	Sénégal
20	RINDIAO	Mauritanie
21,22	OUOLOUM NERE	Mauritanie
23,24	DIOKE	Mauritanie
25	SENO PALEL	Sénégal
26	POKELAJI	Sénégal
27, 28	BONDI	Sénégal
29,30,31	TOURIME	Sénégal
32	MORIBOUGOU	Sénégal
33	HOUGOTER	Mali
34	KOULINEGOTE	Mali
35	MALOU	Mali
36	BANSA	Mali
37	DIATANALI	Mali
38	SANTANKOTO	Mali
39	TONDIDJI	Mali
40	MADINA	Mali

Après que toutes les données soient rassemblées, les résultats seront interprétés par histogrammes et par les méthodes de distribution par fréquence. Il est important que ces données soient collectées car celles-ci sont représentatives de la qualité de l'eau que les gens boivent maintenant. La plupart des analyses actuelles présentent les concentrations de cations et d'anions. Bien que ces concentrations soient importantes, elles ne révèlent pas de façon nette le degré de contamination. Les paramètres tels que les bactéries, les bactéries fécales, la demande d'oxygène chimique, l'ammoniac et le nitrate n'indiquent pas de contamination.

E. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Les impacts sur l'environnement doivent être qualitativement et dans certains cas quantitativement évalués. Dans le rapport final, les impacts seront présentés en utilisant les matrices qui relient les zones d'impact aux facteurs créant l'impact. Les principaux impacts prévisibles seront examinés et discutés dans les sections qui suivent après une discussion des différentes composantes des plans de développement à partir du point de vue des ressources de nappes souterraines.

E.1 Aménagements prévus

E.1.1 Barrage de Diama

Le barrage de Diama servira de barrière à l'eau salée. Actuellement, l'eau salée s'introduit jusqu'à l'estuaire du fleuve Sénégal de décembre à juillet, moment où l'eau douce remplace l'eau salée dans l'estuaire. Cela se traduit par un manque d'eau potable et d'eau d'irrigation dans la région du delta (jusqu'à Dagana) pendant cette période de sécheresse.

On se sert de l'eau du Lac de Guiers comme eau d'irrigation à Richard-Toll et eau potable à Dakar. La capacité du lac est limitée et déjà le volume d'eau à boire est insuffisante les années de faible chute de pluie. Il est évident que si l'agriculture doit se développer et si l'on veut faire face aux demandes croissantes d'eau potable, il est impératif d'améliorer les conditions actuelles.

Le barrage de Diama arrêtera l'intrusion de l'eau salée et formera un lac étroit et peu profond. Son effet sur l'approvisionnement en eau sera traité en détail dans les rapports sur la qualité de l'eau et le développement municipal et industriel. Empêcher l'intrusion du sel dans le Delta affectera aussi la salinité des nappes souterrai-

nes. L'eau de recharge sera à teneur faible de sel toute l'année, après un certain temps, le sel sera filtré des sols du delta.

L'endiguement lui-même fournira une source de recharge d'eau étalée sur une plus importante superficie que celle recouverte par l'estuaire. Cette étendue d'eau influera non seulement sur la recharge mais accentuera l'évaporation. Les aspects micro-climatiques du problème sont traités ailleurs. La salinité de l'endiguement augmentera à mesure que la saison s'avance. Si la salinité devient excessive, de l'eau salée peut s'infiltrer dans l'aquifère alluvial. Naturellement cela ne sera pas le cas si l'on réalise la régularisation du débit à partir de Manantali.

Les endiguements provoquent aussi l'élévation des nappes phréatiques. Ceci est plus particulièrement vrai dans le cas des dépôts alluviaux. Actuellement, la nappe phréatique dans le delta est près de la surface. Ceci est dû à l'égalité des surfaces dans la topographie. La surface de la terre sur plusieurs kilomètres à partir du fleuve peut être à un ou deux mètres plus haut que le niveau du fleuve. Les nappes souterraines dans l'aquifère alluvial répondent aux changements dans le niveau du fleuve. Il est probable que les nappes souterraines s'élèveront de presque 1,5 mètre (le barrage élèvera le niveau de l'eau qui se trouve derrière lui de 1,5 mètre).

L'endiguement provoquera aussi le déplacement de quelques personnes et leur communauté. A ce moment précis on ne sait rien des plans de recasement. A moins que les mesures sanitaires adéquates pour la destruction des déchets ne soient prises, il est possible que les nappes souterraines près des recasements deviennent contaminées.

E.1.2. Barrage de Manantali

Le barrage de Manantali sera construit pour ré-

gulariser le débit qui est nécessaire à la navigation et la mise en place de l'agriculture irriguée. Le barrage formera un grand lac d'environ 50 mètres de profondeur et couvrant une importante superficie. On peut trouver des informations détaillées sur ce sujet dans la section sur les Fleuves et l'estuaire de ce rapport. L'effet de l'eau endiguée est d'augmenter la recharge des aquifères. L'étendue d'eau augmente l'ampleur de l'effet. L'ampleur varie aussi avec la perméabilité des formations. Le granite, le schiste et le grès très consolidé ne laissent pas facilement passer l'eau à moins qu'ils n'aient des fractures et des fissures. Les formations calcaires peuvent laisser passer d'importantes quantités d'eau selon la présence ou non des chenaux de solution. Les formations libres contenant du sable et du gravier peuvent être très perméables. En règle générale, l'eau de l'endiguement accroît la recharge. Le barrage permettra la régularisation du débit. Ceci diminuera l'ampleur de la crue pendant la saison des pluies et fournira par conséquent de l'eau au fleuve pendant la saison sèche. La crue est une source de recharge. Le volume de la recharge est directement lié à la durée et à l'aire de la crue. L'eau du fleuve est aussi une source de recharge. Ceci est cependant de moindre importance que l'effet de la crue.

E.1.3 Périmètres irrigués

La mise en place de l'agriculture irriguée sera un des principaux bénéfices découlant des plans de développement de l'OMVS. La régularisation du débit du fleuve Sénégal fournira de l'eau pour l'irrigation toute l'année. L'irrigation est une méthode qui consiste à fournir de l'eau aux cultures dans des conditions où il n'y a pas suffisamment d'humidité. Le drainage est la méthode par laquelle l'eau appliquée naturellement ou artificiellement à la terre est évacuée. Le drainage peut se faire naturellement, ou si le drainage naturel est inadéquat, il peut être amélioré grâce aux canaux souterrains. Si le drainage est inadéquat, il y aura une stagnation des eaux

résultant d'une agglutination des sels dans le sol. La situation de la nappe phréatique et les caractéristiques du sol influent sur la stagnation des eaux. Une nappe phréatique élevée près de la surface du sol alliée à une action capillaire peut aboutir à l'évaporation et à l'agglutination de sel. Si la nappe phréatique est élevée et/ou si le drainage est pauvre, l'agglutination du sel empêchera de tirer les bénéfices optimum de l'irrigation. Ceci est un problème très complexe et variera selon les périmètres. Il n'est pas du ressort de ce rapport sur les nappes souterraines de traiter en détail cet aspect de l'irrigation. Pour plus de détails sur ce sujet, le lecteur intéressé doit se référer au rapport sur le Développement Agricole.

Si l'on veut éviter l'agglutination du sel, l'eau de drainage doit entraîner les sels. Si on utilise la méthode du drainage artificiel, l'eau captée sera déchargée dans le fleuve ou dans les cuvettes utilisées pour le stockage de l'eau de drainage. De l'eau du drainage sera certainement perdue aux nappes souterraines. L'eau contiendra non seulement des sels mais aussi des résidus de pesticide et de fertilisant.

Les pesticides et les fertilisants sont généralement nécessaires pour optimiser le fonctionnement de l'agriculture moderne. Ils ne seront pas seulement dans l'eau de drainage du périmètre mais s'étendront d'une façon générale dans tout l'environnement sous l'action du ruissellement et du vent. Naturellement l'ampleur de l'impact de plusieurs facteurs y compris la taille du périmètre, du taux d'application des caractéristiques biologiques et chimiques du fertilisant ou du pesticide, de la climatologie et des méthodes d'utilisation. Pour des informations spécifiques sur ce sujet, le lecteur est référé au rapport sur le Développement Agricole.

On aura besoin de main d'oeuvre pour faire fonctionner les périmètres irrigués. Il est évident que

beaucoup de travailleurs et leurs familles seront attirés par cette activité. Il y aura un recasement temporaire et permanent en plus de la croissance de la population dans les recasements existants. Ces personnes auront un impact sur les ressources des nappes souterraines.

L'agriculture moderne conduira à l'établissement des industries agricoles. Ces industries laisseront échapper des polluants dans l'environnement. On peut trouver des informations détaillées dans le rapport sur le Développement Municipal/Industriel. Certains polluants peuvent pénétrer dans les nappes souterraines.

E.1.4. Navigation

La navigation devrait avoir très peu d'impact sur les nappes souterraines sauf indirectement du fait de la régularisation du débit. Une des raisons de la régularisation du débit est le maintien de la navigation jusqu'à Kayes, Mali. Ce facteur d'impact a été discuté dans la section sur le barrage de Manantali.

E.2. Discussion des impacts sur l'environnement.

La section suivante discutera des impacts sur l'environnement associés à chacun des quatre projets de développement de l'OMVS.

L'identification de ces impacts est sujette à révision et le degré n'est pas quantifié. Il est possible que l'analyse du problème changera le degré prévu de certain de ces impacts.

E.2.1 Barrage de Diama

E.2.1.1. Salinité des nappes souterraines

Le barrage de Diama réduira la salinité de l'eau

dans les aquifères alluviaux du delta. Ceci est dû au barrage formant une barrière à l'intrusion de l'eau salée qui se passe normalement pendant la saison sèche et l'effet de l'endiguement d'eau douce sur la qualité de l'eau rechargeant les aquifères. Bien que l'effet se fasse sentir immédiatement il est probable que cela prendra beaucoup d'années avant que le sel ne soit filtré de façon adéquate.

Un autre effet sera la stabilisation du Lac de Guiers par l'endiguement. On peut trouver les détails sur la situation physique du lac dans le rapport sur les fleuves et l'estuaire. La stabilisation résultera en de plus faibles concentrations de sel dans les aquifères adjacents au lac.

Les niveaux des nappes souterraines seront altérés à cause de la montée du niveau de l'eau de l'endiguement d'1,5 mètre. L'alluvion est perméable et on peut prévoir que les niveaux des nappes souterraines s'élèveront. L'évaporation de l'eau près de la surface du sol déposera du sel sur les étendues planes supérieures du sol et peuvent entraîner quelque augmentation dans la salinité des nappes souterraines. Ceci tendrait à contredire ce qui a été décrit dans le paragraphe précédent à savoir que l'effet de la recharge abaisse la salinité des nappes souterraines. L'ampleur peut être quelque peu limitée pendant les premières années; cependant l'effet peut devenir cumulatif après un certain nombre d'années.

L'effet d'ensemble de la barrière de Diama et de l'endiguement sur les nappes souterraines du Delta sera de réduire la salinité. Les cartes qui figurent dans la section précédente sur la qualité de l'eau montrent que la concentration actuelle de solides totaux dissous dépasse 2.000 mg/l dans presque tout le delta. Bien qu'il faille un certain nombre d'années pour filtrer ce sel,

l'impact d'ensemble sera bénéfique du point de vue de la qualité de l'eau.

E.2.1.2 Polluants organiques, nitrates et bactéries coliformes.

L'amélioration de la qualité de l'eau en ce qui concerne la salinité dans le delta rendra cette source d'eau plus viable pour la boisson. C'est facile de creuser des puits dans l'alluvion car la nappe phréatique est près de la surface. A moins qu'on prenne soin de détruire proprement les déchets sanitaires et industriels, il est possible qu'un danger sanitaire se manifeste.

Les formations alluviales sont très perméables. Ceci allié à des méthodes de destruction impropres de déchets peut entraîner la pénétration de polluants organiques, de nitrates et des bactéries coliformes dans la source d'eau potable. L'effet du lac de Diama sera d'élever la nappe phréatique et d'occasionner le recasement. Ces facteurs augmentent le degré de risque potentiel.

E.2.1.3 Recharge

Le lac augmentera la recharge à cause de l'élévation et l'extension des surfaces d'eau. A moins qu'on sache que l'eau doit être captée en vue d'utilisation, la quantité nette de la recharge croissante ne peut être mesurée. Son usage actuel est infime à cause de sa forte salinité. C'est possible que cette ressource puisse servir à l'irrigation.

Un facteur que cette possibilité peut rendre viable c'est l'effet que l'élévation de la nappe phréatique aura sur la salinité du sol. Il est probable qu'à moins qu'on ne mette en place le drainage artificiel, les projets d'irrigation dans le delta souffriront du problème du sel. Ces problèmes surgiront du résultat de l'évaporation exces-

sive de l'eau provenant du sol sous l'action capillaire et des hautes nappes phréatiques. Pomper pour abaisser la nappe phréatique combinée au drainage artificiel devrait atténuer ces risques. On devrait examiner ce facteur et la solution possible lorsqu'on aménage les périmètres dans le Delta.

E. 2.1.4. Résumé des effets

Le barrage de Diama aura un potentiel d'impacts à la fois négatif et positif. La salinité des nappes souterraines sera réduite à cause du barrage au sel et à la recharge en eau douce. La nappe phréatique élevée peut présenter un problème dans les périmètres irrigués du delta à cause de la stagnation des eaux des sols. Le potentiel de recharge sera accru; cependant on ne tirera pas de bénéfice de ceci à moins que l'eau ne soit utilisée.

La nappe phréatique élevée peut accroître les risques associés à la destruction impropre des déchets sanitaires et industriels. Les formations alluviales sont perméables et transmettront des polluants aux puits d'eau potable. On doit prendre des précautions adéquates pour s'assurer de l'emplacement des puits et des bonnes méthodes de destruction des déchets.

E.2.2 Barrage de Manantali

E.2.2.1 Salinité des nappes souterraines

L'impact sur la salinité des nappes souterraines devrait être très insignifiant sauf dans le delta. La régularisation du débit fournira une source fixe d'eau de recharge de faible salinité en amont du barrage. A l'exception du delta, l'eau dans les aquifères libres est déjà de faible salinité. La réduction de la zone de la plaine d'inondation jouera un rôle mineur. Les activités minières

peuvent laisser échapper des quantités de sel jusqu'aux nappes souterraines; cependant, à cause de l'emplacement des mines, cela ne devrait pas être un problème notoire.

E.2.2.2. Polluants organiques, nitrates et bactéries coliformes.

La construction du barrage de Manantali entraînera l'inondation de la végétation et le recasement villageois. L'inondation laissera échapper des matériaux organiques et des nutriments dans les eaux du réservoir. Une partie de cette eau sera rechargée jusqu'aux aquifères avoisinants. Le recasement villageois augmentera la possibilité de contamination des nappes souterraines. L'impact de ces deux facteurs sera insignifiant car :

- 1) La contamination sera insignifiante à cause de la faible perméabilité des formations.
- 2) Les nappes souterraines ne seront probablement pas une source importante de ravitaillement en eau.

E.2.2.3 Recharge

Le barrage de Manantali influencera de façon notoire la recharge. Il y a deux zones d'influence : le voisinage immédiat et l'amont du réservoir. La profondeur de la zone d'endiguement entraînera la montée de la nappe phréatique dans la zone du réservoir. La géologie du secteur est composée de grès cambrien. Bien que sa porosité soit faible, le grès cambrien est fracturé et répond par conséquent au fleuve (Butenweg, 1978). Améliorer la recharge dans ce secteur est d'importance minime comparé à l'alternative d'utilisation du réservoir comme une source d'eau de bonne qualité.

La recharge des aquifères sera très altérée en amont de Manantali à cause de la régularisation du débit

et des changements des modèles de crue. Le Fleuve Sénégal est une source de recharge du continental terminal, des aquifères alluviaux et maëstrichtsiens. Actuellement, la plupart de la recharge provenant du fleuve se fait pendant la saison des pluies quand la vallée du fleuve est inondée. La régularisation du débit réduira la zone d'inondation. Le modelage mathématique a pour objectif principal de déterminer le degré de réduction de cette zone. Le facteur de contrepois est que le débit du fleuve sera régularisé pendant la saison sèche, partant il fournira une recharge supplémentaire. Quantifier les ampleurs relatives de ces impacts sera l'objectif d'une analyse plus poussée. Il est important de se rappeler que les bienfaits et les dommages ne peuvent pas être déterminés directement à partir des changements dans le potentiel de recharge si on ne se sert pas actuellement de la ressource et s'il n'y a pas de plans pour son utilisation future.

E.2.2.4 Résumé des impacts

L'impact majeur associé au barrage de Manantali sur les nappes souterraines sera les modifications dans le potentiel de recharge en amont dans la vallée du Fleuve Sénégal. On doit effectuer des analyses plus approfondies en utilisant le modèle mathématique de la plaine d'inondation pour évaluer ces changements.

E.2.3 Périmètres irrigués

E.2.3.1. Salinité des nappes souterraines

Ceci est intrinséquement lié aux aspects de la salinité du sol d'irrigation. Les ampleurs ne peuvent se mesurer seulement qu'à partir de l'examen cas par cas. Ceci parce que les facteurs qui touchent la salinité varient énormément selon l'emplacement. Ces facteurs comprennent :

le taux d'application de l'eau d'irrigation
 le taux d'évaporation
 la hauteur de la nappe phréatique
 la perméabilité de l'aquifère
 des concentrations de solides dissous
 des méthodes de drainage.

Quelques commentaires généraux sont de rigueur. L'eau du périmètre de drainage tendra à accroître la salinité des nappes souterraines. La perte d'eau des endiguements et des canaux d'irrigation aura tendance à décroître légèrement la salinité. Il y a quelques exceptions avec l'eau de drainage dans le delta. A ce point, il est possible que l'eau du drainage soit plus basse en salinité que l'eau de la nappe phréatique dans le delta (ceci peut être modifié par les effets de l'endiguement et la barrière de Diama). L'ensemble du problème devra être analysé par l'équipe du Développement Agricole.

E.2.3.2 Polluants organiques

Les principales sources des polluants organiques seront les pesticides provenant des périmètres agricoles et des développement agro-industriel et municipal associés aux périmètres. On discutera des pesticides dans le paragraphe sur les substances toxiques. Les développements agro-industriel et municipal produisent des déchets liquides et solides qui peuvent s'infiltrer dans les nappes souterraines. Le degré d'impact dépendra de l'emplacement et des méthodes de destruction.

E.2.3.3 Nutriments

Les nutriments peuvent entrer dans les nappes souterraines à partir des déchets sanitaires et des fertilisants. Les nitrates posent la plus grande inquiétude car s'ils sont présents en concentrations suffisamment grandes, ils peuvent causer la méthémoglobinémie, un problème médical sérieux chez les enfants (OMS, 1963). Certaines eaux

contiennent de hautes concentrations de nitrate dues à des causes naturelles; cependant, la destruction impropre des déchets sanitaires alliée aux méthodes inadéquates de ravitaillement d'eau peut créer des problèmes de concentration de nitrate.

Les nitrates provenant des fertilisants et des déchets sanitaires produits par les municipalités maintenant les périmètres irrigués peuvent avoir un impact considérable sur les concentrations du nitrate des nappes souterraines. L'impact variera selon l'emplacement, la source d'eau de ravitaillement des méthodes de destruction des déchets sanitaires et des méthodes d'application de fertilisants.

Le drainage des périmètres sera un important facteur. Les méthodes d'application inadéquates sont non seulement pas bien du point de vue de l'environnement mais aussi conduisent à un usage inefficace du fertilisant.

Les nutriments peuvent aussi être déchargés dans les nappes souterraines à cause des déchets des produits agro industriels qui se sont accumulés. Ceci est discuté en détail dans la section sur le Développement Municipal/Industriel.

E.2.3.4 Bactéries coliformes

Les bactéries coliformes sont des indicateurs de la pollution fécale. Les mêmes commentaires de la section précédente sur les nutriments sont valables ici. Il est important de souligner que l'impact variera selon l'emplacement et les méthodes. La principale source de contamination par matériau fécal sera les centres urbains actuels et ceux créés à partir de l'afflux des travailleurs dans les périmètres.

E.2.3.5 Substances toxiques

Les pesticides sont nécessaires à l'accoutumée dans l'agriculture moderne pour obtenir des résultats optimaux. Pour éviter des conséquences néfastes, on doit prendre grand soin pour le stockage, le transport et la manutention de ces produits toxiques. L'impact des pesticides sur les nappes souterraines dépend principalement de la phase d'utilisation du pesticide. Il n'y a aucun doute que les pesticides ou leurs résidus pénétreront dans l'environnement. Il est nécessaire de minimiser cet impact en utilisant des méthodes appropriées.

Le comportement des pesticides dans l'environnement est complexe et difficile à déterminer quantitativement, même s'il est possible de déterminer de manière empirique la concentration des résidus, il reste encore beaucoup de questions sans réponse à propos de la toxicité et spécialement la relation de la concentration et l'exposition aux effets chroniques.

Le drainage du périmètre et l'infiltration sont les principaux moyens de transport des pesticides. Ceci est altéré par les propriétés chimiques/physiques, les caractéristiques du sol, le rôle et le temps des applications du pesticide et de l'eau d'irrigation, des conditions climatiques et de la profondeur de la nappe phréatique.

Que les pesticides qui pénètrent ou non dans les nappes souterraines puissent avoir un effet néfaste sur l'homme ou les animaux dépendra de si l'eau des nappes souterraines est utilisé pour boire.

Il est apparent que l'impact de l'utilisation du pesticide dépendra des circonstances du cas à l'étude. Il sera nécessaire de travailler en coopération avec l'équipe du Développement Agricole pour formuler les recommandations.

F. ETUDES PLUS APPROFONDIES

On a envisagé les impacts pour les quatre composantes du projet de développement de l'OMVS. Pendant le temps qui reste, nous ferons des efforts pour :

- a) Examiner la dynamique et la filtration du sel dans les nappes souterraines du delta.
- b) Etudier l'effet de l'élévation de la nappe phréatique sur la stagnation de l'eau des sols.
- c) Mettre au point des recommandations sur la destruction des eaux sanitaires et industrielles usées.
- d) Faire des recommandations sur l'emplacement, le dessin et le contrôle des puits.
- e) Quantifier les effets relatifs et les "gains-pertes" de l'inondation et de la régularisation du débit sur la recharge.
- f) Etudier les effets des pesticides et des fertilisants sur la qualité des nappes souterraines.

Ceci s'ajoutera à deux voyages futurs sur le terrain pour collecter des échantillons de puits.

LITERATURE CITED

- AUDIBERT, M. 1962. Hydrogéologie de la Nappe Maestrichtienne du Senegal. BRGM, Dakar.
- _____. 1963. Etude de la Nappe Maestrichtienne - Essai de Débit à Tivaoune. BRGM, Dakar.
- _____. 1970. Delta du Fleuve Senegal-Etude Hydrogéologique, Projet Hydro-Agricole. FAO, Saint Louis.
- _____. 1966. Etude Hydrogéologique de la Nappe Profonde du Senegal - Nappe Maestrichtienne. BRGM, Paris.
- BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUE ET MINIERES. 1967. Notice Explicative de la Carte Hydrogéologique du Senegal et de la Carte Hydrochimique. Dakar.
- _____. 1971. Nappe Profonde du Senegal - Nappe Maestrichtienne. Paris.
- _____. 1975. Notices Explicatives des Carte de Planification pour l'Exploitation des Eaux Souterraines de l'Afrique Sahélienne. Dakar.
- _____. 1976.. Notice Explicative de la Carte de Planification des Ressources en Eau Souterraine de l'Afrique Soudano-Sahélienne. Orleans.
- BLANCHOT, A. et al. 1957. L'eau dans l'Ouest Maritainien et le bas Sénégal, Rapp. Serv. Geol. of Prosp. Min. AOF, Dakar.
- BRIGAUD, F. 1960. Connaissance du Sénégal-Geologie, Etudes Sénégalaises N° 9. Centre IFAN, Saint-Louis.
- BUTENWEG, P. 1978. (Personal communication with Engineering Geologist of Groupeement Manantali.)
- COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUE. 1967a. Etude Géochimique des Eaux Souterraines de l'Afrique de l'Ouest. Nappe des Sables Maestrichtiens du Senegal. BRGM, Paris.
- _____. 1967b. Etude Géochimique des Eaux Souterraines de l'Afrique de l'Ouest, Nappes du Sud Ouest Mauritanien du Senegal. BRGM, Paris.
- DAVIS, S. N. and DEWIEST, R. J. 1966. Hydrogeology. Wiley, New York.

- ELOUARD, P. 1962. Etude Géologique et Hydrologique des Formations Sédimentaires du Guebla Mauritanien et de la Vallée du Sénégal. BRGM N° 7, Dakar.
- FAO/UNESCO. 1973. Irrigation, Drainage and Salinity. Hutchinson, London.
- ILLY, P. 1973. Etude Hydrogéologique de la Vallée du Fleuve Sénégal. OMVS/FAO, Saint-Louis.
- KARPOFF, R. 1970. Rapport de Mission Hydrogéologique Préliminaire dans la Vallée du Fleuve Sénégal entre le Delta et la Falémé. Saint Louis.
- LALÉYE, J. 1964. Etude Hydrogéologique de la Nappe Phréatique du Haut Delta du Fleuve Sénégal. BRGM, Saint-Louis.
- MICHEL, P. 1969. Notice de la Carte Géomorphologique de la Vallée du Sénégal. Dakar.
- REIZER, C. 1971. Contribution a l'Etude Hydrobiologique du Bas-Sénégal. Paris.
- _____. 1974. Définition d'une Politique d'Aménagement des Ressources Halieutiques d'un Ecosystème Aquatique Complexe par l'Etude de son Environnement Abiotique, Biologique et Anthropique. Arlon.
- RICHARDS, L. A. ed. 1954. Saline and Alkali Soils. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C.
- ROCHETTE, C. 1974. Le Bassin du Fleuve Sénégal, Monographies Hydrologiques. ORSTOM, Paris.
- SENEGAL-CONSULT. 1970. Feasibility Study for the Regulation of the Senegal River. Dakar.
- WALTON, W. C. 1970. Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill, New York.
- WILCOX, L. V. 1948. The Quality of Water of Irrigation Use. U. S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 962, Washington D. C.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. 1963. International Standards for Drinking Water. Geneva.