

ALAIN BLOT

LES NAPPES PHREATIQUES
AU SÉNÉGAL ORIENTAL
—
DONNÉES GÉOCHIMIQUES
SUR LES EAUX

NOVEMBRE 1970

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE O.R.S.T.O.M. DE DAKAR-HANN



Laboratoire de GÉOLOGIE

Centre ORSTOM - DAKAR

LES NAPPES PHREATIQUES DU SENEGAL-ORIENTAL

DONNEES GEOCHIMIQUES SUR LES EAUX

Alain B L O T

S O M M A I R E

Présentation	1
Résumé	2
Cadre climatique	3
Cadre hydrogéologique	5
Evolution de la composition des eaux au cours de la saison sèche	7
Mobilité des éléments	9
Composition des eaux phréatiques	10
1 - Comparaison avec les séries sédimentaires	
2 - Influence de la nature de l'aquifère	
3 - Les indices géochimiques	
Les traces dans les eaux	17
1 - Teneur moyenne des eaux	
2 - Influence de la nature lithologique de l'aquifère	
3 - Nature des anomalies sur quelques exemples	
4 - Les traces, indicateurs de concentration	
Prospections et prospection hydrogéochimique	21
Fond régional et teneurs anormales : tableau 10	25
Documents consultés	28
Annexes	30
Tabl. 11 : liste des points d'eau	
Tabl. 12 : résultats des analyses de 69 points d'eau	
Fig 1 : données climatiques de la station de KEDOUGOU	
Fig 2 : l'évaporation pour quelques station du SENEGAL	
Fig 3 : carte 1/1 000 000 situation des points d'eau H.T.	
Fig 4 : carte 1/1 000 000 synthèse des anomalies des eaux H.T.	

Nous présentons ici les résultats de 69 analyses d'eaux effectuées sur des échantillons du SENEGAL ORIENTAL, prélevés de 1965 à 1969 par J. WACKERMANN, J.C. PION et A. BLOT.

Certaines de ces analyses ont déjà été publiées, utilisées ou citées par J. WACKERMANN - 1967 (1), Y. TARDY (2) et P. MICHEL - 1970 (3)

Les analyses ont été effectuées au Laboratoire de Spectrographie de l' ORSTOM sous la direction de M. PINTA.
Les méthodes utilisées dans ce laboratoire ont été décrites par M. DEFOSSEZ, J. Ph. MANGIN, M. PINTA, R. VAN DEN DRIESSCHE - 1967 (4), d'après M. PINTA - 1962 (5).

R E S U M E

66 analyses d'eaux phréatiques et 3 de cours d'eau ont été effectuées sur des échantillons du socle du SENEGAL ORIENTAL prélevés durant la saison sèche.

Les eaux sont assez peu minéralisées par comparaison avec l'eau des nappes phréatiques du sédimentaire de la même Région.

Les résultats sur les majeurs montrent la richesse en silice et bicarbonates de ces eaux. Le calcium est le cation dominant comme dans toute la Région.

L'hétérogénéité de la composition des eaux confirme les observations des hydrogéologues, d'aquifères discontinus et limités.

Les résultats des traces portant sur Mn, Mo, Sn, V, Cu, Fe, Ni, Co, Ti, Cr, Sr, Ba, Rb, Li, Al, ont permis de donner une première approche pour la définition d'un fond régional, et de distinguer des teneurs anormales dont certaines sont attribuées à des anomalies des aquifères.

L'utilisation des anomalies hydrogéochimiques est envisagée dans un but prospectif. La présence généralisée de cuirasses et recouvrements gravillonnaires, difficulté de l'utilisation des prises de sols pour la prospection géochimique, ne parait pas un obstacle pour l'eau. Les éléments constitutifs des cuirasses (Fe et Al) sont en effet très peu mobiles et ne masquent pas les autres éléments.

CADRE CLIMATIQUE

1 - ORIGINE DES INFORMATIONS

Les données climatiques sur la Région sont les températures et la pluviométrie à partir desquelles sont calculés les différents indices climatiques intéressant le cycle de l'eau (indices d'évaporation, indices d'évapotranspiration). Les principales stations météorologiques sont TAMBACOUNDA et KEDOUGOU. Des données partielles ont pu être collectées dans des stations peu équipées ou temporaires (GOUDIRY, TINKOTO...).

Nous avons relevé dans quelques rapports des indications climatiques d'après les données des stations de la Région :

- en hydrogéologie H. CAMUS et J. DEBUISSON - 1963 (6)
- en pédologie A. CHAUVEL - 1966 (7)
J.C. LEPRUN - 1967 (8)
- en géographie P. MICHEL - 1970 (3)

Nous retenons deux représentations figurées pour rendre compte de ce cadre climatique :

fig. 1 données moyennes sur une station : KEDOUGOU

fig. 2 l'évaporation piche de quelques stations du SENEGAL

2 - INCIDENCE SUR LES EAUX PHREATIQUES

L'incidence du climat sur l'eau peut schématiquement être considéré sous l'aspect quantitatif et sous l'aspect qualitatif.

En première analyse, on peut en effet considérer que la quantité d'eau disponible pour les nappes est fonction de la pluviométrie. Dans ce cas le Sénégal Oriental présente un gradient pluviométrique lié à la latitude allant de 1400 mm/ an au sud (climat soudanien à influence guinéenne) à moins de 700 mm/ an au nord (influence sahélienne nette.

Dans ce cadre la qualité de l'eau est directement tributaire de la température par son influence sur la dynamique chimique.

3 - NOS OBSERVATIONS

Nos observations portent sur les mesures de la température des eaux au moment des prélèvements : à partir de 66 mesures effectuées par le BRGM et par nous, il a été possible d'établir des moyennes mensuelles de température des eaux phréatiques à l'affleurement. Ces moyennes suivent les températures moyennes mensuelles calculées d'après les relevés météorologiques.

Tableau
1 COMPARAISON DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES
DE TAMBACOUNDA ET DES EAUX PHREATIQUES DU S.O.

	Février	Mars	Avril	Mai	Décembre
Tambacounda	26,9	29,8	31,8	32,5		27,6
Eaux	26,0	27,5	29,5	31,0		27,0

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

LES UNITES HYDROLOGIQUES

Les deux grandes unités hydrologiques de la Région drainent la totalité des eaux qui s'écoulent vers la mer : bassin de la GAMBIE et bassin du SENEGAL par son affluent la FALEME; nos observations sur ces cours d'eau ont été faites en saison sèche et principalement au moment de l'étiage.

Les eaux de ces deux cours d'eau, à l'étiage, sont peu minéralisées; la charge totale exportée en fin de saison sèche est à peu près nulle et le débit considérablement limité. Ce transport s'arrête d'ailleurs complètement pour la FALEME pendant quelques semaines, et il ne reste alors que des mares jointes par une circulation intra alluvionnaire.

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

Nous devons à H. CAMUS et J. DEBUISSON une étude hydrogéologique sur les terrains anciens du SENEGAL ORIENTAL dont Monsieur J.L. MESTRAUD, Directeur du BRGM à DAKAR, nous a communiqué le rapport établi à l'intention du Service de l'Hydraulique de la République du SENEGAL.

Les eaux présentées ici proviennent des unités hydrogéologiques suivantes :

- formations anciennes et leurs altérations
- drainages sous latéritiques
- épandages alluvionnaires (nappes de marigot)

Quatre de nos échantillons s'écartent de ce cadre : trois dans les cours d'eau aux basses eaux et un dans les séries primaires.

Pour CAMUS et DEBUISSON, le caractère fondamental des eaux phréatiques est l'absence de nappes généralisées. Ils en tirent comme conséquence essentielle que la composition chimique des eaux apparaît alors, dans le détail, avec des différences sensibles pour des eaux présentant le même gisement et prélevées dans des puits parfois voisins.

EVOLUTION DE LA COMPOSITION DES EAUX AU COURS DE LA SAISON SECHE

1 - D'après les travaux du B R G M

Nous empruntons à H. CAMUS et J. DEBUISSON, les résultats analytiques de 17 points d'eau ayant bénéficié de 2 analyses. Les points d'eau sont répartis sur tout le SENEGAL ORIENTAL, y compris dans les formations primaires donnant des eaux bien chargées en sodium, bicarbonates chlore et sulfates. Les prélèvements ont été effectués d'une part au début ou milieu de la saison sèche, d'autre part en fin de saison sèche.

	! Ca	! Mg	! Na	! K	! Cl ⁻	! SO ₄ ⁻	! HCO ₃ ⁻	! Résidu sec
Début de	!	!	!	!	!	!	!	!
saison sèche	! 58,00!	! 27,20!	! 55,45!	! 9,80!	! 58,80!	! 22,10!	! 127,25!	! 509,70
Fin de saison	!	!	!	!	!	!	!	!
sèche	! 50,65!	! 23,90!	! 51,05!	! 4,40!	! 53,80!	! 20,10!	! 127,75!	! 452,70

Tableau 2 - Composition moyenne de 17 eaux phréatiques au cours de la saison sèche.

Ces résultats sont suffisamment surprenants pour que nous précisions les effectifs touchés par ce phénomène pour chaque élément : nous donnons un tableau de l'évolution pendant la saison sèche, le bilan des moyennes étant en diminution.

	! Ca	! Mg	! Na	! K	! Cl ⁻	! SO ₄ ⁻	! HCO ₃ ⁻	! Résidu sec
en diminution	! 12	! 8	! 9	! 11	! 12	! 10	! 12	! 12
en augmentation	! 4	! 9	! 6	! 6	! 5	! 5	! 4	! 5
sans changement	! 1	! 0	! 2	! 0	! 0	! 2	! 1	! 0

Tableau 3 - Effectifs touchés par la dilution des éléments au cours de la saison sèche.

La dilution des éléments au cours de la saison sèche peut donc être retenue. La diminution concomitante du volume des aquifères par perte (pompage et exhutoire) ainsi que par évaporation peut faire penser à une moindre charge en suspension, à la fin de la saison sèche.

Du point de vue de l'évolution géochimique, le rapport moléculaire $\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$ est en augmentation de 11,5 à 23,6 par une diminution importante de la teneur en potassium. Ceci peut rejoindre l'hypothèse de suspension de nature argileuse dans les eaux de début de saison sèche.

2 - Nos observations

La notion de concentration des eaux en fin de saison sèche est habituellement admise et peut être observée dans certaines mares comme dans la région de SIAN (observation de J.C. PION en HAUTE VOLTA).

Au SENEGAL ORIENTAL, seule, peut être, l'eau du puits de SARAYA semble s'apparenter aux eaux "saumâtres" de fin de saison sèche.

Pour les autres points d'eau rien ne peut être précisé, les prélèvements étant tous de fin de saison sèche, et nous retiendrons jusqu'à preuve du contraire les enseignements des résultats d'analyses de CAMUS et DEBUISSON :

Les eaux phréatiques du Sénégal Oriental ont une charge minérale qui diminue au cours de la saison sèche.

MOBILITE DES ELEMENTS

Il suffit de se reporter à TARDY (2 et 11) pour avoir une idée des travaux qui ont été accomplis dans ce domaine. Les résultats sont d'ailleurs assez convergents et la discussion porte tout au plus sur les nuances de la place des éléments alcalins et alcalino terreux dans les échelles de mobilité. Pour notre part nous pensons que les anions ont été souvent oubliés dans les échelles de mobilité alors que le chlore et le soufre devraient occuper les premières places de l'échelle, bien avant les cations majeurs.

L'échelle retenue ici reprend les hiérarchies habituellement admises. Elle est établie d'après le rapport de la moyenne de chaque élément calculée sur les 66 analyses d'eaux phréatiques aux mêmes éléments d'un corps fictif ayant la composition de la lithosphère.

Cl - S - Mg - Na - Ca - K - Li -

Si - (Ni) - (Cu) - (Sr) - (Ba) -

P - (Rb) - (Cr) - (V) - (Mn) -

tout au bas de l'échelle nous retrouvons Ti - Fe - Al

la position dans l'échelle de Mo, Sn, Pb et Co établie suivant ce principe est très discutable et nous les avons éliminés du tableau.

Du point de vue quantitatif la mobilité des alcalins et alcalino terreux est du même ordre de grandeur et, à part une mobilité systématique moindre du potassium, il nous paraît inutile de spéculer sur la place respective du Ca, Mg, Na. Par contre la mobilité du chlore est de facteur 10 par rapport à celle des cations, et celle du soufre intermédiaire. Pour la silice, correspondant certainement à la notion de silice des silicates ou silice combinée le facteur est $n \cdot 10^{-1}$. Pour les éléments les moins mobiles Fe, Ti, et Al, le facteur est $n \cdot 10^{-3}$.

En ce qui concerne les anomalies des eaux correspondant à des anomalies dans l'aquifère, on ne peut pas dire que l'anomalie soit due à une augmentation de la mobilité de l'élément. Au contraire il nous semble qu'une anomalie doit être importante pour se répercuter dans l'eau. Ce point est fondamental pour l'utilisation des traces des eaux en tant qu'indicateurs de concentrations et mériterait une étude plus approfondie.

COMPOSITION DES EAUX PHREATIQUES

La composition moyenne des eaux phréatiques du socle du Sénégal Oriental est la suivante d'après 66 analyses :

Ca	26,7 mg / litre
Mg	20,2
Na	25,5
K	4,2
Cl	7,3
SO4	3,8 mg / litre sur 65 analyses
SiO2	56,6

D'après 52 analyses effectuées sur le socle par CAMUS, DEBUISSON, on peut y ajouter :

CO3H	73,0 mg / litre
Résidu sec	203,0 mg / litre

I - COMPARAISON AVEC LA COMPOSITION MOYENNE DES EAUX PHREATIQUES DES SERIES **SEDIMENTAIRES** DU SENEGAL ORIENTAL

D'après les calculs de moyennes sur les résultats analytiques de CAMUS, DEBUISSON, portant sur 92 échantillons, les eaux des séries sédimentaires et détritiques du Sénégal Oriental apparaissent plus chargées en tous les éléments. La différence avec les eaux du socle est nette pour calcium, sodium, sulfates, chlore et bicarbonates. Elle se traduit par une charge totale (résidu sec) moyenne de 388 mg / litre.

Si la comparaison directe est difficile avec nos résultats, le laboratoire d'analyse étant différent et l'époque de prélèvement différente,

nous pouvons établir une comparaison avec les 52 analyses d'eaux du socle de la même étude.

	! Ca	! Mg	! Na	! K	! Cl	! SO ₄	! CO ₃ H	! Résidu sec
Socle	! 31,2	! 12,8	! 10,4	! 3,7	! 14,0	! 4,9	! 73,0	! 203,0
Sédimentaire	! 43,7	! 20,3	! 40,4	! 4,95	! 42,9	! 18,2	! 95,0	! 388,0
	!	!	!	!	!	!	!	!

Tableau 4 - Composition comparée des eaux du socle et des séries sédimentaires d'après les analyses du BRGM.

La moindre charge des eaux du socle peut être attribuée à la nature lithologique des séries sédimentaires constituées en grande partie de formations schisteuses.

En ce qui concerne la place respective des cations, le calcium est le cation dominant dans 60 % des eaux et le sodium dans 30 %, aussi bien sur le socle que sur le sédimentaire.

2 - INFLUENCE DE LA NATURE DE L'AQUIFERE DANS LA ZONE CRISTALLINE

Les informations apportées par TARDY (2) sont complétées par de nouvelles données analytiques qui modifient sensiblement les résultats donnés alors sur les eaux du socle du Sénégal Oriental.

Les eaux ont été classées en deux groupes, l'un d'aquifères granitiques, l'autre d'aquifères basiques (basalte, amphibolite...) représentés respectivement par 23 et 43 échantillons.

élément	aquifère	valeurs extrêmes	moyenne	écart type	médiane
		mg/l	mg/l		
Ca	granite	1, 2 - 92,0	25,5	20,2	23,0
	basite	5, 0 - 74,0	27,3	16,6	23,7
Mg	granite	0, 4 - 45,0	12,6	11,7	7,4
	basite	2, 2 - 115,0	24,2	22,2	16,5
Na	granite	3,2 - 89,0	25,5	20,7	18,4
	basite	2, 2 - 85,0	25,5	20,1	20,6
K	granite	0, 5 - 13,0	5,0	2,3	4,7
	basite	0, 5 - 22,0	3,8	3,9	2,4
Cl	granite	1, 0 - 85,0	13,0	17,0	6,4
	basite	0,7 - 15,0	4,3	2,9	3,9
SO ₄	granite	0, 1 - 25,0	3,95	6,05	1,
	basite	0, 1 - 248,0	3,77 °	9,74	1,
SiO ₂	granite	17,7 - 101,0	53,9	26,2	45,0
	basite	16,0 - 115,0	58,1	23,6	52,5

° sur 42 analyses après suppression de la teneur 248,0 mg / litre
Tableau 5 : nature de l'aquifère et composition des eaux correspondantes du socle du Sénégal Oriental.

D'après les données de CAMUS DEBUISSON, portant sur 52 analyses d'eaux du Socle, les teneurs moyennes en bicarbonates et les valeurs des résidus secs, suivant la nature de l'aquifère sont les suivantes :

CO ₃ H	!	granite (13)	!	51,2	mg / litre
	!	basite (39)	!	80,2	mg / litre
Résidu sec	!	granite (13)	!	183,0	mg / litre
	!	basite (39)	!	210,0	mg / litre

Tableau 5 bis -

Les résultats obtenus pour chaque élément donnent une solution de continuité, et la distinction d'après la nature de l'aquifère est assez artificielle. Elle permet de dégager les tendances de l'influence des deux pôles lithologiques distingués :

- le pôle "acide" est plus riche en chlore et potassium.
- le pôle "basique" est plus chargé en bicarbonates, silice, calcium, magnésium, et présente un résidu sec plus important.

Pratiquement la distinction est subtile, et à partir de la connaissance de la composition d'une eau, il est difficile de définir la nature de l'aquifère. Seules peut-être des teneurs en chlore supérieures à 10 mg / litre apparaissent elles comme indicatrices d'un terrain granitique, mais la réciproque n'est pas vérifiée.

La hiérarchie des cations dans la composition des eaux peut aussi fournir une information dans ce débat, mais elle n'est pas plus décisive que le calcul des moyennes. Ainsi que le montre le tableau ci-dessous, le calcium est le cation dominant dans les eaux phréatiques de la Région dans les séries sédimentaires et sur l'ensemble du socle, mais il ne l'est pas dans les zones granitiques.

Cation dominant	Ca	Na	Mg	K	
aquifère	!	!	!	!	
granite	! 48	! 52	! 0	! 0	
basite	! 63	! 21	! 14	! 2	en pourcentage
socle	! 58	! 32	! 9	! 1	du total des eaux
sédimentaire	! 62	! 35	! 3	! 0	de chaque groupe

Tableau 6 - Cation dominant des eaux suivant l'aquifère

3 - LES INDICES GEOCHIMIQUES

Suivant PEDRO (10) et TARDY (2), nous avons calculé les différents indices utilisés comme indicateurs du type de l'altération. Mais s'il est possible d'obtenir des résultats cohérents au niveau du modèle expérimental, et des moyennes significatives à l'échelle des continents, le niveau régional ou local donne des résultats assez dispersés.

1°/ Les causes de la dispersion des résultats :

Ainsi que l'avait soulignée l'étude de CAMUS DEBUISSON, les nappes sont discontinues dans les terrains anciens du Sénégal Oriental. D'après ces auteurs, la complexité des intrications lithologiques définissant des aquifères limités en sont la cause.

Cette complexité est augmentée par la juxtaposition des différentes espèces d'altérations décrites dans la Région, et les études des sols de la feuille DALAFI au 1/200 000 ont fait écrire à KALOGA (12) : "dans ces régions

où le façonnement du bas glacis et celui de la surface actuelle ont été incapables de faire disparaître, le premier la cuirasse (et les carapaces sous jacentes) du moyen glacis, le deuxième cette cuirasse résiduelle et celle du bas glacis, les cuirasses et carapaces anciennes et subactuelles sont omniprésentes et l'hétérogénéité est la règle ".

L'apparente homogénéité de la Région, avec cette généralisation des accumulations d'oxydes - hydroxydes de fer en surface, n'est en fait qu'une homogénéisation superficielle fort complexe dans le détail.

2°/ Les résultats :

Les rapports moléculaires $\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2 / \text{CaO}$, $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2 / \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, sont donnés dans le tableau 7 en valeur moyenne sur l'ensemble des résultats et d'après la distinction de la lithologie de l'aquifère .

indice	! aquifère!	valeurs extrême	! moyenne
$\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$! granite !	3,65 - 40,50	! 11,97
	! basite !	0,53 - 99,98	! 19,69
	! ensemble!	0,53 - 99,98	! 17,00
$\text{SiO}_2 / \text{CaO}$! granite !	0,33 - 9,83	! 2,31
	! basite !	0,28 - 6,53	! 1,94
	! ensemble!	0,28 - 9,83	! 2,07
$\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$! granite !	0,64 - 8,67	! 2,47
	! basite !	0,53 - 8,44	! 3,18
	! ensemble!	0,53 - 8,67	! 2,94
$\text{SiO}_2 / \sum \text{bases}$! granite !	0,15 - 2,25	! 0,55
	! basite !	0,11 - 1,55	! 0,73
	! ensemble!	0,11 - 2,25	! 0,61
	! !		!

Il nous parait difficile de tirer des conclusions sur cette approche grossière qu'est la séparation en deux groupes d'après la lithologie. Avec ces indices nous retrouvons les principaux traits des deux pôles, mais l'imprécision quant aux caractéristiques des aquifères (nature lithologique, pétrochimique, degré et type de l'altération) ne permet pas un plus grand développement.

LES TRACES DANS LES EAUX

Un certain nombre d'éléments traces ont été analysés systématiquement dans les échantillons d'eau :

Sr, Ba, Li, Ti, Mn, Cu, V, Co, Ni, Pb, Mo, Cr, Sn, Rb, et après modification du protocole de transport des échantillons Fe et Al dans une trentaine d'entre eux.

1°/ Teneurs moyenne des eaux

Les techniques analytiques semi quantitatives ne permettent pas de calculer des moyennes arithmétiques pour les éléments traces. De plus nous constatons qu'il n'existe pas de solution de continuité dans les résultats des divers éléments sauf peut-être pour le plomb et le chrome (mais cela peut tenir à l'effectif analysé) .

Les valeurs proposées comme moyennes, établies au jugé à partir d'histogrammes, sont donc un ordre de grandeur, sans prétention de rigueur. Leur définition est celle ci : teneurs moyennes maximales, en dessous desquelles se trouve la majorité des résultats.

Cette définition permet de donner, en première approche, un fond régional des teneurs en traces des eaux phréatiques des terrains cristallins du Sénégal Oriental

- (Strontium 50-55, Baryum 30-35, Lithium 8-9, Titane 5-6
-) Cuivre 5, Manganèse 15, Vanadium 4-4,5 , Cobalt, Nickel,
- (Plomb, Chrome, Molybdène, Etain, Rubidium moins de 4;
-) Fer 5-20; Aluminium moins de 10 .

Fond régional des teneurs des eaux phréatiques en gammas par litre

Pour chaque élément toute teneur plus élevée que ce fond peut être considéré comme anormale.

2°/ Influence de la nature lithologique de l'aquifère

Les difficultés rencontrées pour la présentation de moyennes arithmétiques ne permettent pas de distinguer avec certitude les affinités des éléments à l'égard de la nature de l'aquifère.

Le pôle granitique peut apparaître plus minéralisé en traces, par le caractère granitophile du Baryum et du Lithium, et par de fortes anomalies en Cuivre et Titane.

Les anomalies en Etain et Molybdène sont au contraire l'apanage des eaux d'aquifère basique.

3°/ Nature des anomalies

Dans deux secteurs étudiés, nous nous sommes attachés à trouver une explication possible à l'origine des teneurs anormales ou fortes des eaux en certains éléments. Un troisième secteur bien étudié au cours des recherches minières de l'O.N.U. nous a donné des compléments d'information.

I - A ALINNGUEL, où nous avons décrit une minéralisation secondaire de cuivre (13), les eaux de deux puits voisins présentent un caractère fortement anormalique en cet élément.

Les caractéristiques de l'eau et de l'aquifère sont représentés dans le tableau suivant d'après trois échantillons d'eau et vingt huit échantillons solides (roche, arène, minéralisation) :

élément	eau gammas / litre		aquifère
	fond régional	teneur max.	teneur maximale dans I échantillon
Cu	5	47	23 %
V	4-4,5	6	1000 PPm
Ni	4	6	30 PPm
Ba	30-35	36	3000 PPm
Li	8-9	22	100- 3000 PPm
Pb	4	5	1000 PPm
Mn	15	92	3000 PPm
	!	!	!

Tableau 8 - Alinnguel les anomalies de la nappe et les anomalies de l'aquifère.

2 - A KENIEBA, le teneur en plomb de l'eau est de 10 gammas par litre. Nous l'attribuons aux fréquentes anomalies du sol ou de l'arène en cet élément, allant jusqu'à 3000 ppm et plus. L'anomalie en lithium(60 / 1) est expliquée par des teneurs de 200 et 300 ppm dans l'arène.

Dans ces appréciations entre une part spéculative, les échantillons d'arène n'étant pas, avec certitude, en relation avec l'aquifère du point d'eau prélevé. Cependant il nous a paru logique de rapprocher ces teneurs anormales de l'eau et de l'arène, géographiquement très proches, dans la mesure ou les anomalies de 3000 ppm en plomb n'abondent pas au Sénégal Oriental et ou la valeur de 10 est la plus forte que nous ayons rencontrée.

3 - A GABOU le puits d'alimentation de la Mission O.N.U est situé dans un secteur ayant été prospecté en 1965 par prise de sol. Dans le tableau ci dessous nous donnons les résultats de l'analyse de l'eau comparée aux résultats de la prospection géochimique de BOIS (14) .

ELEMENT	!	EAU	!	SOL teneurs en PPM
	!		!	Cr, Ni, Co, Cu maille 50 X 100
	!		!	autres éléments maille 200 x 200
Mn	!	160	!	omniprésent
Pb	!	10	!	un point isolé
Ni	!	40	!	clarke régional : 100; anomalie: 3000
Co	!	6	!	clarke régional : 20; anomalie : 150
Ti	!	10	!	omniprésent ✕
Cr	!	2	!	clarke régional : 100; anomalie: 15000 +
Ba	!	40	!	n.d.
Sr	!	60	!	n.d.
Cu	!	2	!	clarke régional : 70 anomalie 350

✕ élément habituellement bien représenté dans les roches de la zone de Gabou sous forme de sphène notamment
+ lentille de chromite
n.d. non déterminé

Tableau 9 - Gabou anomalies de l'eau et anomalies du sol

Il peut être noté que la faible mobilité du chrome se traduit par une teneur basse de l'eau à proximité d'importantes lentilles de chromite.

4°/ Les éléments traces dans les eaux, indicateurs de concentrations

Nous avons montré sur ces exemples les possibilités offertes par les eaux phréatiques dans l'obtention d'une image d'un caractère anormalique de l'aquifère.

Ce comportement de l'eau nous permet d'envisager la prospection hydrogéochimique comme une possibilité supplémentaire d'investigation dans la recherche des concentrations d'éléments utiles.

L'exemple du chrome à GABOU, où l'absence d'anomalie de l'eau n'est pas une preuve d'absence de minéralisation proche, montre évidemment que de toute façon ce ne peut être qu'une méthode supplémentaire, non exclusive.

PROSPECTIONS ET PROSPECTION HYDROGEOCHIMIQUE
AU SENEGAL ORIENTAL

L'utilisation des informations recueillies sur l'eau dans la recherche des éléments prend une part grandissante dans les techniques prospectives géochimiques .

Si la littérature de langue française n'a guère retenu jusqu'ici que la recherche de l'uranium, les travaux anglo saxons et surtout soviétiques font état de recherche de mercure, cuivre, argent, zinc, plomb, nickel, cobalt, chrome, vanadium, uranium... à partir de la géochimie des eaux profondes ou de surface.

1° - Esquisse du Sénégal Oriental

L'essentiel des régions anciennes du Sénégal Oriental (socle et séries primaires) allant de la frontière guinéenne au 14ème parallèle, est masqué par de puissantes formations, souvent continues, d'origine résiduelle.

Constituées principalement d'oxydes - hydroxydes de fer, ces accumulations résiduelles sont le résultat de l'altération et de la pédogénèse de type ferralitique. Elles se présentent le plus souvent sous forme de plateaux cuirassés et n'ont été que faiblement démantelées par l'active érosion actuelle WITSCHARD (9) estime à 5 - 10 % la surface dégagée de ce recouvrement, essentiellement le long des cours d'eau permanents ou temporaires.

2° - Recherche d'éléments utiles dans la Région

C'est dire si la recherche de concentrations d'éléments suivant la méthode du marteau a une faible chance de donner des résultats positifs. Il faudrait supposer que les éventuelles richesses minérales soient concentrées

dans les zones décapées, ou que la région soit suffisamment riche pour que le seul accès à ces affleurements soit décisif dans les recherches. Ceci n'est pas prouvé et loin s'en faut.

Le problème posé aux recherches minières est simple dans son expression :

- 1 - recherche des concentrations dans les zones sans recouvrement important (nord de la latitude 14 ° et secteurs sud dégagés par l'érosion) .
- 2 - recherche des concentrations liées au cuirassement : fer, alumine, manganèse, nickel .
- 3 - recherche des concentrations masquées sous les latérites. L'extention des divers systèmes de glacis et des formations gravillonnaires forme l'essentiel de la surface du sol au sud du 14 ème parallèle .

Pour aborder le problème posé par le point 3, les moyens utilisés ont été des investigations aveugles ou indirectes : prospection géophysique, prospection alluvionnaire, prospection géochimique. La mise au point de ces méthodes, notamment géochimiques, s'est révélée laborieuse, et leur mise en oeuvre simultanée a permis quelques succès dans les zones à faible recouvrement.

3° - Les informations apportées par les analyses d'eaux dans les prospections géochimiques

Les prospections géochimiques ont pris part grandissante dans les moyens de la recherche minière au Sénégal-Oriental. Les informations obtenues sont en partie responsables de la mise en évidence du gisement de GABOU par exemple.

Si cette technique n'a pu être décisive sur l'ensemble de la Région, cela tient en grande partie à l'obstacle du recouvrement généralisé par des cuirasses et formations gravillonnaires. La méthodologie élaborée pour l'obtention d'échantillons "géochimiquement significatifs" a pour but de faire la part du fond régional en éliminant le fond latéritique : tamisages et quartages se succèdent pour éliminer les gravillons.

A notre connaissance aucune prospection hydrogéochimique n'a été réalisée à ce jour au Sénégal Oriental. Les résultats obtenus ici ont pourtant permis de montrer qu'il n'y a pas de fond latéritique, qu'il est possible de préciser un fond régional et de mettre en évidence des anomalies.

L'adoption de la terminologie habituelle des prospections géochimiques n'est pas formelle : la signification des valeurs anormales ou fortes, ainsi que nous l'avons montré sur des exemples, est un fait de même valeur que les anomalies des prises de sols ou du bed rock, et prouve "l'actualisme" de la mobilité des éléments. Leur amplitude par rapport au fond régional et leur extension peuvent en faire des informations déterminantes pour l'extension des investigations .

Quelques enseignements plus généraux peuvent en être tirés :

- la réponse de l'eau à une anomalie de l'aquifère est une anomalie.
- elle paraît d'autant plus franche que le caractère anormal de l'aquifère l'est plus .
- la faible mobilité des éléments constitutifs des cuirasses se traduit par une absence de fond latéritique dans les eaux. .

4° - Les possibilités des prospections hydrogéochimique au Sénégal Oriental

Après les avantages de l'utilisation des eaux comme indicateurs possible de concentrations, notamment par l'inertie des cuirasses (aucune cuirasse n'est imperméable à l'eau et son empreinte chimique est ténue) nous estimerons les réserves possibles à la méthode et les possibilités d'application.

La difficulté majeure est que la recherche de l'eau est un problème en soi sur une grande partie de la région : la prospection suivant une maille géométrique est donc exclue; le coût serait alors incompatible avec les normes des prospections. Les nappes alluvionnaires sont fréquemment pérennes et il est alors possible d'envisager une prospection suivant le réseau hydrographique. L'époque favorable est le début de saison sèche car la densité des points d'eau productifs est alors assez importante et les nappes sont facilement accessibles par creusement.

Dans l'immédiat il peut être proposé une collecte systématique des eaux des puits des villages, des mares et le prélèvement d'échantillons d'eaux phréatiques dans les ouvrages de prospection - comme sous produit - dont l'analyse devrait en faire une source d'informations aussi riche que les habituels échantillons de tiroir .

A la suite des échantillonnages d'eaux phréatiques que nous avons effectués au cours de nos missions nous pouvons présenter, après la définition provisoire d'un fond régional en chaque élément, une liste des points présentant un caractère anormal dans le tableau 10. Une synthèse de ce tableau est esquissée sur une carte au 1/1 000 000 ème de la Région.

Tableau 10 - Fond régional et teneurs anormales .

élément	! fond	! valeur	! stations à teneur élevée ou anormale
	! régional	! maximale	
Sr	! 50-55	! 660	! SARAYA - TIKANKALI - SORETO 1 - LEOBA 1 - EREMOKONO ! SORETO 12 - MANDIARI - KANEMERE - BOUNDOU DIOE - ! TONKOUTO - GABOU - BANTATA - KONDOKO - MISSIRA - ! KANEMERE 16 - MAMAKONO 5 - KANDAMOU - SOUROUNDYOU - ! SOROKOTO KOKA ! >55 gammas / litre
Ba	! 30-35	! 550	! BOUROUMBOUROU - SOROKOTO KOKA - MISSIRA - EREMOKONO ! OUSSOUNKALA - TONKOUTO - ALINNGUEL 3 - TIKANKALI - ! DIALAKATOKA - BARAFOUTE - BOUNDOU DIOE - GABOU - ! BAGNONBA - BARABOYE - SARAYA - KANEMERE 19 - K 31 - ! KANDAMOU - LEOBA 1 - MANDIARI - NIENOKO - SOUROUNDYOU ! >35 gammas / litre
Li	! 8-9	! 208	! KANEMERE - ALINNGUEL 2, 3, 4 - KAYAN - MAMAKONO - ! BARAFOUTE - SORETO 1, 12 - TONKOUTO - KENIEBA - ! BANTATA - OUSSOUNKALA - SARAYA - DIOBI - KONDOKO - ! MISSIRA - KANEMERE 16 - ! >10 gammas / litre
Ti	! 5-6	! 320	! KAYAN - BOUROUMBOUROU - MAKANA - KANEMERE - BARAFOUTE ! TONKOUTO - BOUNDOU DIOE - GABOU - MAMAKONO 5 - ! SANSAMBA - SORETO 3 - BADON - BAGNONBA - BARABOYE - ! >8 gammas / litre

élément	! fond	! valeur	! stations à teneur élevée ou anormale
	! régional	! maximale	!
Mn	! 15	! 780	! FARAKO - GABOU - BAGNONBA 3 - ALINNGUEL 3, 4 - ! KANDAMOU - BARABOYE - SORETO 3 - MANDIARI - LEOBA 1 - ! SOROKOTO Koba - SOUROUNDU - ! > 20 gammas / litre
Cu	! 5	! 47	! ALINNGUEL 2, 3, 4 - SARAYA - LEOBA 1 - SOROKOTO Koba - ! BARABOYE - MANDIARI - MASSACOUNDA - SOUROUNDU - ! KANDAMOU - TIKANKALI - BAGNONBA 7 - KANEMERE 16 - ! ≥ 5 gammas / litre
V	! 4-4,5	! 21	! LEOBA 1 - SARAYA - TIKANKALI - MANDIARI - MAMAKONO - ! BARABOYE - SORETO 1 - ALINNGUEL 2, 3 - BAGNONBA 7 - ! BOUROUMBOUROU - SANSAMBA - S 12 - BOUNDU DIOE - ! BANTATA - BAGNONBA - OUSSOUNKALA - MISSIRA - ! KANEMERE 7, 10 - KANDAMOU - SOROKOTO Koba - ! > 5 gammas / litre
Co	! - 4	! 20	! MISSIRA - GABOU - SARAYA - KANEMERE 7, 16, 24 - ! > 4 gammas / litre
Ni	! - 4	! 60	! MISSIRA - GABOU - MAMAKONO 5 - SARAYA - ALINNGUEL 2, 3 ! BAGNONBA 3, 7, 8 - TIKANKALI - KAYAN - BOUNDU DIOE - ! TONKOUTO - BAGNONBA - BARABOYE - OUSSOUNKALA - ! SEKOTO - SANSAMBA - SORETO 3 - ! > 4 gammas / litre

élément	! fond	! valeur	! stations à teneur élevée ou anormale
	! régional	! maximale	
Pb	! - 4	! 10	! KENIEBA - GABOU - MAMAKONO 5 - SARAYA - BAGNONBA 3,7,8 ! ALINNGUEL 2 - SORETO 1,12 - BARABOYE - SEKOTO - SANSAMBA ! ≥ 4 gammas / litre
Mo	! - 4	! 16	! SORETO 1, 3 12 - KANDAMOU - MASSACOUNDA - SARAYA - ! MAMAKONO - BAGNONBA - BARABOYE - OUSSOUNKALA - MANDIARI - ! > 3 γ / litre
Cr	! - 4	! 7,2	! BARAFOUTE - BOUROUMBOUROU - ALINNGUEL 2, 3 - ! BAGNONBA 3,7,8 - TIKANKALI - KAYAN - MAMAKONO - BANTATA - ! BATRANKE - BAGNONBA - BARABOYE - SARAYA - OUSSOUNKALA - ! MISSIRA - K 19 - ! > 3 γ / litre
Sn	! - 4	! 50	! BAGNONBA 7, 8 - TIKANKALI - ALINNGUEL 2 - BA 3 - ! MAMAKONO 5 - SARAYA - SORETO 1,12 - SANSAMBA - SEKOTO - ! KANEMERE 7 , 16 , 24 - ! > 4 gammas / litre
Rb	! - 4	! 40	! MISSIRA - TIKANKALI - MANDIARI - BAGNONBA 3, 7 - ! BARAFOUTE - KANEMERE 31 - KANDAMOU - SOROKOTO Koba - ! ALINNGUEL 2, 3 - TONKOUTO - SARAYA - KONDOKO - FARAKO - ! SOUROUNDOU - ! > 5 gammas / litre
Fe ^(°)	! 5-20	! 630	! KANEMERE 12, 19, 24, - MAMAKONO - FALOMBO - FARAKO
Al ^(°)	! - 10	! 480	! KANEMERE 12, 19, 24 - K 31 - FARAKO - EREMOKONO -

(°) sur une trentaine d'analyses .

DOCUMENTS CONSULTÉS

- 1 - J. WACKERMANN - Les faciès pétrographiques de la série de Mako dans les régions de Kanéméré et Mamakono (Sénégal Oriental) - 1967
Rapport ronéo ORSTOM DAKAR
- 2 - Y. TARDY - Géochimie; des altérations . Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique - 1969
Thèse Faculté des Sciences STRASBOURG
- 3 - P. MICHEL - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique - 1970
Thèse Faculté des Lettres STRASBOURG
- 4 - M. DEFOSSEZ, J.Ph. MANGIN, M. PINTA, R. VAN DEN DRIESSCHE - Répartition de quelques éléments traces dans les eaux de surface en zone inter tropicale (Côte d'Ivoire) - 1967
Bull. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine 20 , 4 P. 257-276
- 5 - M. PINTA - Recherche et dosage des éléments traces - 1962
Dunod éditeur PARIS
- 6 - H. CAMUS, J. DEBUISSON - Etude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal Oriental . Campagne 1962 - 1963
Rapport ronéo BRGM DAKAR
- 7 - A. CHAUVEL - Notice explicative de la Carte Pédologique du Sénégal au 1 / 200 000 . Feuilles Kédougou, Kossanto, Kéniéba - 1966
Notice ronéo ORSTOM DAKAR

- 8 - J.C. LEPRUN - Les sols de la région de Goudiry (Sénégal Oriental)
Rapport ronéo ORSTOM DAKAR - 1967
- 9 - F. WITSCHARD - Contribution à l'étude géologique, pétrographique et
métallogénique des granites du Sénégal Oriental - 1965
Mémoire du BRGM PARIS n° 44
- 10 - G. PEDRO - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération
géochimique des roches cristallines - 1964
Thèse Faculté des Sciences PARIS Ann. Agron. 1964 15(2) (3) (4)
- 11 - Y. TARDY - Mobilité relative des éléments au cours des phénomènes
d'altération de quelques roches cristallines - 1966
Bull. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine 19, 3-4
- 12 - B. KALOGA - Notice explicative de la Carte pédologique du Sénégal
au 1 / 200 000 - Feuille Dalafi - 1966
Notice Ronéo ORSTOM - DAKAR
- 13 - A. BLOT - Note sur l'indice de cuivre d'Allinnguel (Sénégal Oriental)
1970
Rapport Ronéo ORSTOM - DAKAR
- 14 - J. BOIS - Rapport de fin de projet - Secteur Nord - 1965
Annexe n° 11 au Rapport final du P.N.U.D de Recherches minières
au Sénégal Oriental - Ronéo .
- 15 - J. DEPAGNE , H. MOUSSU - Notice explicative de la carte hydrogéologique
du Sénégal au 1 / 500 000 et de la carte hydrochimique au 1/1 000 000-1967
Ministère de l'énergie et de l'hydraulique du Sénégal.

A N N E X E S

- tableau 11 - liste des points d'eau analysés
- tableau 12 - Résultats des analyses
- fig 1 - Données climatiques sur la station de KEDOUGOU
- fig 2 - L'évaporation mensuelle sur quelques stations du SENEGAL
- fig 3 - Carte schématique de position des points d'eau 1/1 000 000 H.T
- fig 4 - Carte schématique de synthèse des anomalies
au 1 / 1 000 000 H.T

Tableau 11 LEGENDE LISTE DES POINTS D'EAU

Nature de l'aquifère (suivant la distinction faite dans l'étude)

B	roche basique	cours d'eau	(Fal	Falémé
G	roche granitique		(Gan	Gambie

Nature des points d'eau

⊕ puits creusés par les missions ORSTOM
Pv puits des villages
Cv céanes de village
Sv source
M mare
fl cours d'eau

Coordonnées géographiques approchées

longitude W et latitude N

	Aquifère	Origine	Coordonnées		
			Long.	Latitude	
1	GABOU	B	Pv	12° 24	14° 43
2	BOUNDOU DIOE	B	⊕	12° 02	-
3	KENIEBA	G	Cv	12° 04	14° 06
4	ALINNGUEL 1	Fal	fl	12° 11	13° 48
5	ALINNGUEL 2	G	⊕	12° 10	13° 47
6	ALINNGUEL 3	G	⊕	12° 10	13° 47
7	ALINNGUEL 4	G	⊕	12° 10	-
8	TONKOUTO	G	Cv	12° 07	13° 34
9	SANDIKOUBA	B	Cv	12° 06	13° 34
10	LEOBA 1	G	Cv	12° 03	13° 33
11	LEOBA 2	B	Cv	-	-
12	LEOBA 3	B	Cv	-	-
13	NIENOKO	Fal	fl	11° 59	13° 33
14	MANDIARI	G	Cv	12° 00	13° 32
15	KANDAMOU	B	Cv	12° 00	13° 32
16	MASSACOUNDA	B	Cv	12° 01	13° 31
17	FARAKO	B	Cv	12° 01	13° 29
18	SORETO 3	G	⊕	12° 00	13° 30
19	SORETO 1	B	⊕	11° 54	13° 29
20	SORETO 1	B	⊕	11° 54	13° 29
21	SORETO 12	B	⊕	11° 57	13° 29
22	SORETO 12	B	⊕	11° 57	13° 29
23	SOREKOTO KOBA	B	M	11° 58	13° 28
24	SOUROUNDU	G	M	11° 59	13° 27
25	EREMOKONO	G	Cv	12° 00	13° 26
26	BOUROUMBOUROU	G	Cv	11° 58	13° 22
27	DIALAKATOBA	G	Cv	12° 03	13° 21
28	KAYAN	G	Pv	12° 19	13° 19
29	BRANSAN	B	Pv	12° 06	13° 16

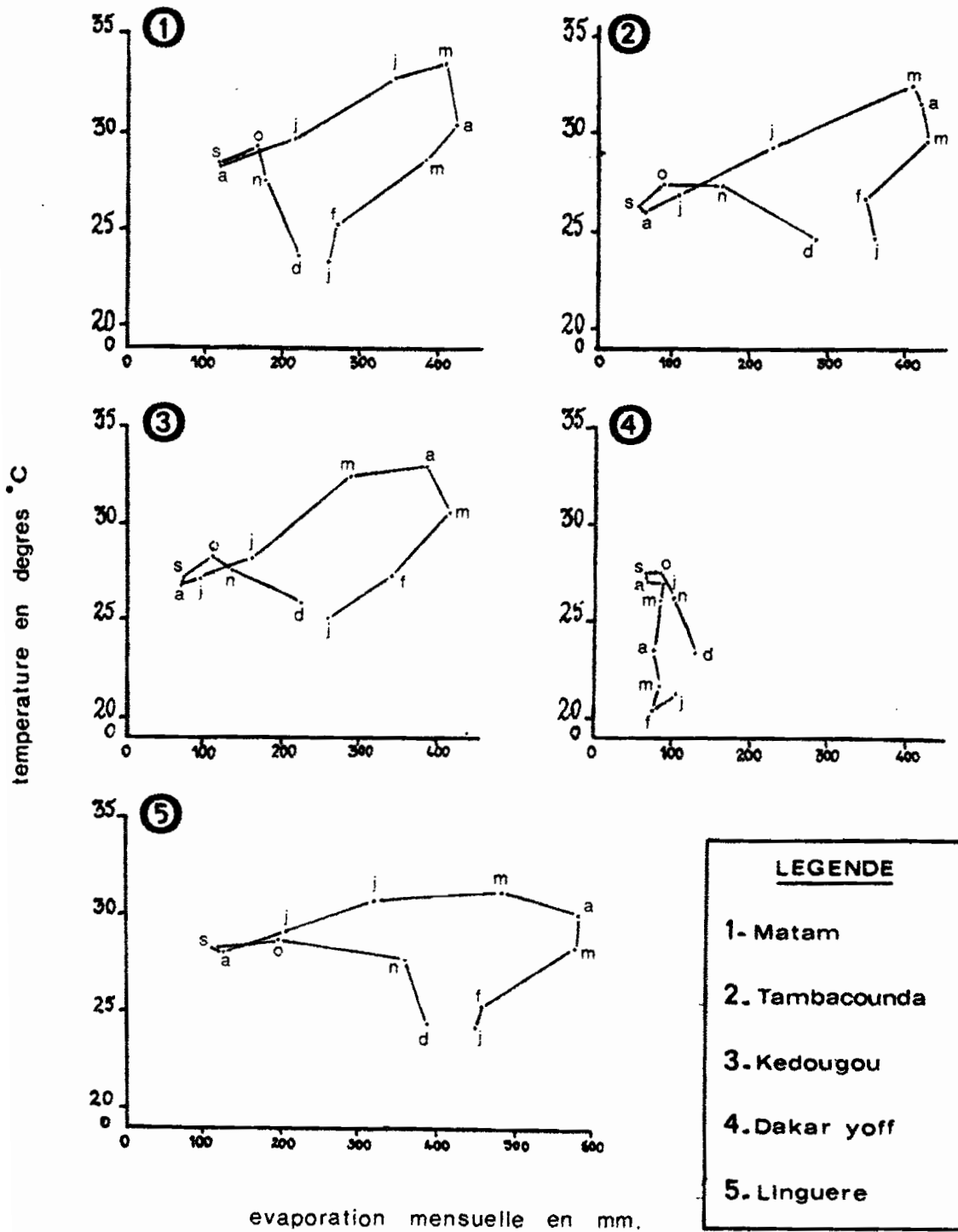
30	SEKOTO	B	Sv	12° 05	13° 12
31	MAMAKONO 5	B	⊙	12° 04	13° 11
32	MAMAKONO	B	Pv	12° 03	13° 11
33	MAMAKONO	B	Pv	12° 03	13° 11
34	FALOMBO	G	Pv	12° 06	13° 13
35	SANSAMBA	B	Cv	12° 00	13° 10
36	SANSAMBA	B	Cv	12° 00	13° 10
37	KOSSANTO	B	Pv	11° 58	13° 08
38	BAMBARAYA	B	Cv	12° 05	13° 06
39	MAKANA	B	Cv	12° 07	13° 04
40	MISSIRA	G	Pv	11° 42	13° 05
41	KONDOKO	G	Pv	11° 43	12° 56
42	DIOBI	G	Pv	11° 44	12° 53
43	SARAYA	G	Pv	11° 45	12° 50
44	BADON	G	Cv	12° 33	12° 55
45	MAKO	Gam	fl	12° 19	12° 51
46	KANEMERE	B	Pv	12° 11	12° 53
47	KANEMERE 7	B	⊙	!	
48	KANEMERE 9	G	⊙	!	
49	KANEMERE 10	B	⊙	! au sud	
50	KANEMERE 12	G	⊙	! et à l'ouest	
51	KANEMERE 14	B	⊙	! du village	
52	KANEMERE 16	B	⊙	! de	
53	KANEMERE 19	B	⊙	! KANEMERE	
54	KANEMERE 23	B	⊙	!	
55	KANEMERE 24	G	⊙	!	
56	KANEMERE 31	G	⊙	!	
57	SIDIOLI	B	Cv	12° 16	12° 43
58	BARAFOUTE	B	Cv	12° 19	12° 40
59	BANTATA	B	Cv	12° 20	12° 41
60	BATRANKE	B	Cv	12° 21	12° 41

61	BAGNONBA	B	Cv	12° 23	12° 43
62	BAGNONBA 3	B	⊙	! au nord et nord est	
63	BAGNONBA 7	B	⊙	! du village	
64	BAGNONBA 8	B	⊙	! de BAGNONBA	
65	BARABOYE	B	Sv	12° 25	12° 41
66	TIKANKALI	B	Sv	12° 24	12° 42
67	OUSSOUNKALA	B	Sv	12° 28	12° 42
68	TIABEDJI	B	Cv	12° 25	12° 38
69	SILAKOUNDA	B	Cv	12° 07	12° 39

POINTS D'EAU EN COURS D'ANALYSE

70	- LAMINIA 4 (LAM 1)	G	⊙	12° 02	13° 36
71	- LAMINIA 6 (LAM 2)	G	⊙	12° 02	13° 36
72	- ALINNGUEL 6 (LAM 3)	G	⊙	12° 10	13° 47
73	- ALINNGUEL 5 (LAM 4)	G	⊙	12° 10	13° 47
74	- LAMINIA 11 (LAM 5)	G	⊙	12° 02	13° 37
75	- LAMINIA 9 (LAM 6)	G	⊙	12° 02	13° 36
76	- LAMINIA FALEME (LAM 7)	Fal	fl	12° 01	13° 36
77	- LAMINIA 29 (LAM 8)	G	⊙	12° 02	13° 36
78	- LAMINIA 19 (LAM 9)	G	⊙	12° 02	13° 36
79	- LAMINIA 36 (LAM 10)	B	⊙	12° 02	13° 39
80	- LAMINIA 37 (LAM 11)	B	⊙	12° 02	13° 39

Evaporation moyenne mensuelle en fonction
de la temperature moyenne mensuelle de l'air.



d'apres H. Camus et J. Debuissou

KEDOUGOU

- Pluie : periode 1931-60 ●—●
- T moy : periode 1954-58 .—.
- E.T.P. Thorthwaite : periode 1954-58 ○—○
- E.T.P. Prescott : periode 1962-64 - - - ●
- E.T.P. Turc : 1964 +—+

