

Pascal BOIVIN

**ETUDE PÉDOLOGIQUE
DE LA VALLÉE DE KOUBALAN
(Kalounayes Casamance)**

**ETUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE
DU pH ET DE LA CONDUCTIVITÉ
D'UN SOL DE TANNE**



SEPTEMBRE 1984

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE-MER

CENTRE DE DAKAR-HANN



S O M M A I R E

| | <u>Pages</u> |
|---|--------------|
| Première Partie : Etude pédologique du marigot de Koubalan | |
| CHAPITRE I - Présentation..... | 2 |
| CHAPITRE II - Etude du Milieu..... | 4 |
| 2-1 Géologie..... | 4 |
| 2-2 Climat..... | 5 |
| 2-3 Les milieux de mangrove - Quelques généralités..... | 12 |
| CHAPITRE III - Etude pédologique et factibilité rizicole..... | 14 |
| 3-1 Méthodologie et mode de représentation choisis..... | 14 |
| 3-2 Le contenu des cartouches - Considérations analytiques..... | 14 |
| 3-3 Géochimie des eaux de nappes..... | 23 |
| 3-4 Appréciation des aptitudes culturales..... | 23 |
| 3-5 Description des unités..... | 28 |
| 3-6 Conclusion..... | 43 |
| Première Partie Annexe | |
| Deuxième Partie : Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne.... | |
| I - Introduction..... | 54 |
| II - Lieu de l'étude - Méthode de travail - Paramètres mesurés... | 54 |
| III - Exploitation des résultats - La théorie des variables aléatoires régionalisées..... | 55 |
| IV - Résultats..... | 58 |
| IV-1 - Les valeurs de conductivité..... | 58 |
| IV-2 - Les valeurs de pH..... | 60 |
| Conclusion..... | 61 |

CHAPITRE I

PRÉSENTATION

L'étude pédologique de la vallée de Koubalan a été réalisée sur demande de la Direction de l'Équipement Rural du Sénégal afin de s'insérer dans un projet d'aménagement des marigots de Koubalan et Tapilane.

Ces marigots sont de très ancienne vocation rizicole (exploitation par les Diola) et connaissent, à l'occasion de la sécheresse affectant l'ensemble des pays du sahel, un développement considérable de la salure et de l'acidification de leurs sols. A l'heure actuelle, les paysans des marigots de Koubalan et Tapilane ont dû abandonner la quasi-totalité de leurs rizières. Bien entendu, ce phénomène se manifeste pour l'ensemble des marigots débouchant sur la Casamance, et nombre d'entre eux font l'objet d'aménagements en vue de pallier ces dégâts (Guidel - Bignona, Baïla, Sougrougrou).

L'étude pédologique réalisée a donc pour but de décrire l'état actuel des sols des marigots de Koubalan et Tapilane, et de fournir des indications quant aux aménagements nécessaires à une préservation et une amélioration de ces sols en vue d'une exploitation rizicole.

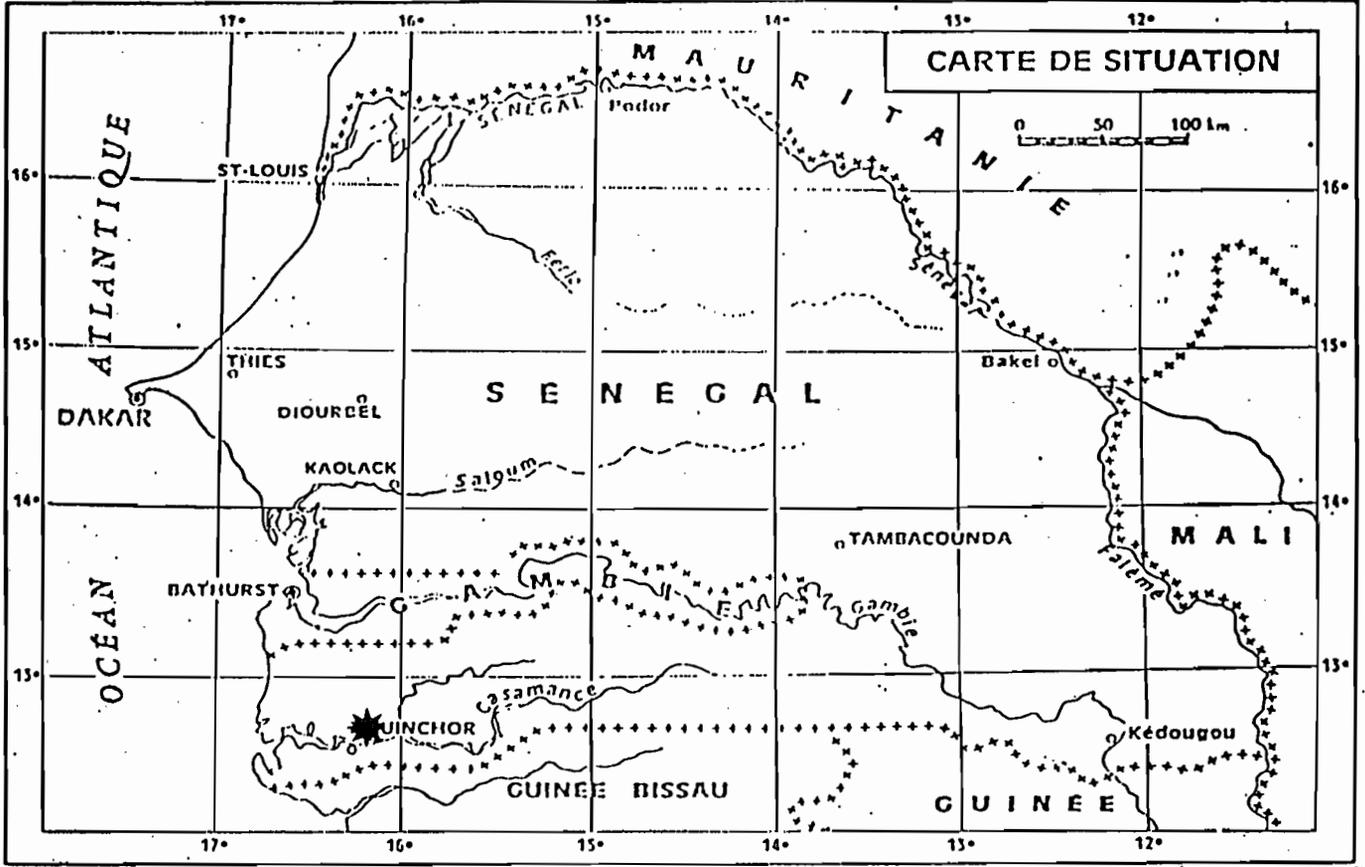
LOCALISATION :

Les marigots de Koubalan et Tapilane se trouvent sur la rive Nord du fleuve Casamance dans lequel ils se déversent en amont de Ziguinchor. Les vallées de ces marigots s'avancent dans la forêt classée des Kalounayes, au Sud de Bignona.

Carte topographique : Feuille 1/50 000° Ziguinchor 4b - 2d
Feuille 1/200 000° Ziguinchor NO 28 11

Les études pédologiques couvrant déjà ce secteur sont :

- R. MAIGNIEN - Carte 1/1 000 000° - Sénégal.
- MARIUS - CHEVAL : Note sur les mangroves et tannes de la région des Kalounayes (1979).



CHAPITRE II :

ÉTUDE DU MILIEU

2.1. G E O L O G I E

2.1.1. Evolution

La Basse-Casamance est la partie méridionale du vaste bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien occupé par les formations sédimentaires du secondaire et qui a connu sa plus grande extension au Lutétien (P. MICHEL - 1971). A partir de l'Eocène, se produit un fort mouvement de subsidence à l'Ouest d'une ligne de flexure continentale Sédhiou/Dagana. Il y a un dépôt de sédiments secondaire-Tertiaire de plusieurs milliers de mètres en Basse-Casamance et de quelques 400-600 m en Haute-Casamance. Le Miocène s'est caractérisé par des mouvements tectoniques responsables des coudes brusques affectant les cours de la Casamance et de ses affluents. La mer s'est manifestée par une série de transgressions et de regressions suivies de dépôts des sédiments. Les derniers, déposés principalement en milieu continental, consolidés en grès argileux bariolés, forment le Continental terminal de faciès Sidérolithique. Ce matériau a été déposé sous l'action d'un climat tropical à tendance subaride, à pluviométrie irrégulière, en période de rhéxistase. Ces dépôts datent de la fin du tertiaire (Miocène-Pliocène).

En Basse-Casamance, le Continental terminal a été modelé en bas-plateaux mollement ondulés. Dans la partie Sud de l'estuaire, (région d'Oussouye), ils sont très morcelés et ceinturés d'alluvions de différentes époques quaternaire. Par contre, dans la partie Nord (région de Bignona), le plateau est tranché au-dessous des sédiments récents par un système de failles mettant en évidence, à travers les entailles du réseau hydrographique, plusieurs niveaux cuirassés.

Sous l'impulsion de la houle du Nord-Ouest, s'est mis en place un système de flèches et de cordons littoraux qui ont fermé le vaste golfe déblayé lors de la grande régression pré-Holocène (15 000 - 20 000 B.P.) responsable du creusement des vallées, plus ou moins colmatées lors du Nouakchottien, qui disloquent le plateau du Continental terminal dont notamment les vallées de Bignona et Baïla.

La transgression Nouakchottienne (5 000 B.P.) entraîne le comblement général de l'estuaire et des basses vallées, et la construction de terrasses étagées, sableuses, fréquentes dans l'estuaire et ourlant parfois le plateau du Continental terminal.

Entre les cordons littoraux, les terrasses et les plateaux, s'est produite une sédimentation récente qui est à l'origine des vasières à mangroves, sillonnées de chenaux profonds.

2.1.2. Les formations de surfaces

Les formations de surfaces représentées dans le secteur des marigots de Koubalan et Tapilane se répartissent en trois ensembles :

- Les bas-fonds : domaine intéressé par le réseau hydrographique et les marées. Ce domaine constitué de vases noirâtres, connaît en tête de talweg, un engorgement sous des colluvions sableuses ou argilo-sableuses.
- Les terrasses : zone sableuse de transition entre le talweg et le plateau
- Le plateau qui comprend des formations de sables rouges et de grès.

2.1.3. Les associations végétales

Les associations végétales rencontrées dans les marigots de Koubalan et Tapilane sont celles que l'on rencontre classiquement dans les zones de mangroves et dont une description de séquence est donnée par J. VIEILLEFON - (Les sols de mangrove et de tanne de Basse-Casamance) - (fig. 1).

La végétation de palétuviers qui borde le lit du marigot (*Rhizophora mangle*, *Avicenia nitida*) est, à l'heure actuelle, presque totalement détruite par les effets de la sécheresse, dans le périmètre d'étude.

En revanche, subsistent sur certains tannes et entre les souches de palétuviers : *Sesuvium portulacastrum* (entre les souches), *Paspalum vaginatum* (limite tanne/terrasse), *Heliocharis mutata* (tannes). Ces espèces halophytes semblent à l'heure actuelle se développer dans les rizières et les bordures de forêt jusqu'alors non affectées par la salure.

L'excellente correspondance entre la végétation et le type de sol ou le degré de salure nous a été très utile lors de l'exploitation des photos aériennes.

2.2. C L I M A T

Les données générales sont issues du rapport de R. GALLAIRE sur le marigot de Baïla - 1980.

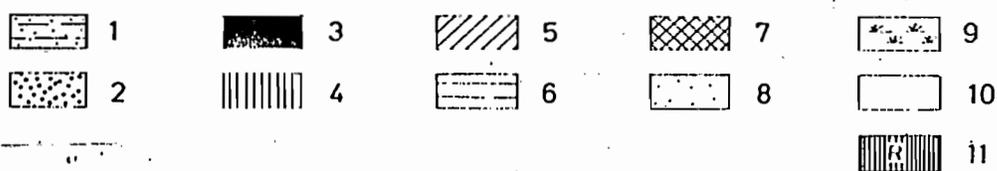
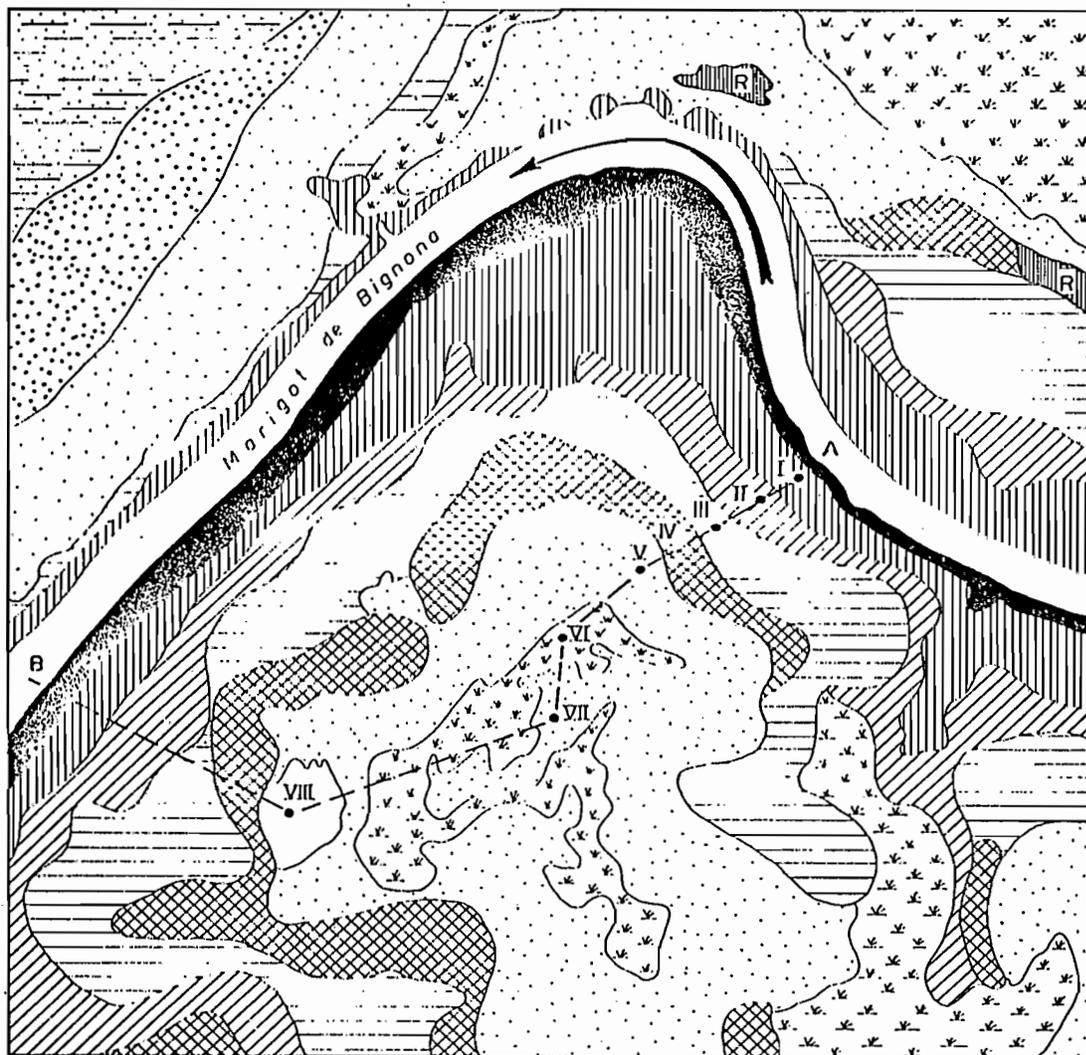
Trois stations régionales fournissent des renseignements sur une longue période :

- Ziguinchor (1921)
- Diouloulou (1937)
- Bignona (1956)

2.2.1. Caractéristiques générales du climat

Il faut tout d'abord rappeler le caractère particulier des données pluviométriques de l'ensemble des pays du sahel pour les quinze dernières années. La sécheresse qui sévit dans ces régions et parmi celles-ci en Casamance, est sans commune mesure avec les variabilités interannuelles estimées à partir des données antérieures. Cette sécheresse a atteint, aux Kalounayes, un maximum en 1983.

LES SOLS DES MANGROVES ET DES TANNES



0 100 200 300 400 500 m

I à VIII : n° des profils

Fig. 1. Répartition des formations végétales.

| | | | |
|---|--|----|------------------------------------|
| 1 | Savane (Continental Terminal) | 7 | <i>Avicennia</i> <i>Sesuvium</i> |
| 2 | Prairie à <i>Schizachirium</i> (terrasse sableuse) | 8 | Tanne VII |
| 3 | <i>Rhizophora racemosa</i> | 9 | Tanne à <i>Eleocharis</i> |
| 4 | <i>Rhizophora mangle</i> | 10 | Lanette |
| 5 | <i>Rau</i> <i>Paspalum</i> | 11 | Rizière |
| 6 | <i>Avicennia</i> <i>Scirpus</i> | | |

FIG 1

Le climat de Basse-Casamance est caractérisé par deux saisons très contrastées. Il n'y a aucune précipitation pendant l'hiver, de Novembre à Mai, par contre, les pluies sont abondantes en Août et Septembre, mais très irrégulièrement réparties. La pluviométrie moyenne diminue rapidement du Sud-Ouest au Nord-Ouest, de 1 800 mm à 1 200 mm ce qui, du point de vue hydrologique, classe ce climat comme climat tropical de transition (RODIER - 1964). On l'appelle encore climat tropical subguinéen (BRIGAUD - 1965).

Cependant, températures élevées et absence de pluies en hiver, font classer cette région dans une zone avec 100 à 150 jours biologiquement secs (MICHEL 1971, d'après EMBERGER et Al. 1962).

a) Les températures (Fig. 2)

La comparaison entre les données établies sur une normale de 40 ans et celles établies sur les dix dernières années ne met pas en évidence des variations sensibles au niveau des températures moyennes mensuelles. La température moyenne mensuelle minimale se situe toujours en Janvier et la température moyenne mensuelle maximale en Mai/Juin, à la veille des premières pluies. Un minimum relatif existe en Août au coeur de l'hivernage, et un maximum relatif en Octobre à la fin de la saison des pluies.

Par contre, l'amplitude moyenne mensuelle des 10 dernières années apparaît comme affaiblie de 3 à 4° par rapport à la normale.

b) L'humidité relative (Fig. 3)

La moyenne mensuelle, minimale de Janvier à Mars, croît progressivement jusqu'à son maximum en Août. Jusqu'au début d'Octobre, elle reste importante pour décroître ensuite assez rapidement.

c) L'évaporation PICHE (Fig. 3)

Seule, la station de Ziguinchor possède une période d'observation intéressante. On peut vérifier que l'évaporation évolue en sens inverse de l'humidité relative : Maximale en Mars et minimale en Août/Septembre.

d) L'insolation

Si l'on observe le tableau (3) ci-dessous, on constate qu'elle est importante toute l'année avec un fléchissement de sa durée d'environ 30 % seulement au cours de la saison des pluies.

| Année 1979 | J | F | M | A | M | J | Jt | A | S | O | N | D |
|--------------------------------------|-----|-----|---|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| Insolation | | | | | | | | | | | | |
| Moyenne Journalière en Heure et 1/10 | 7,9 | 9,7 | 9 | 9,9 | 10 | 7,7 | 7,4 | 6,7 | 7,2 | 7,5 | 8,9 | 8 |

e) Les vents

La direction : au cours de la saison sèche, de Novembre à Avril, les vents secs de secteurs N à E sont dominants. A partir de Mai s'établissent les vents humides de secteur S à W qui restent prépondérants au cours de l'hivernage (Fig. 4).

ÉTUDE COMPARATIVE DES TEMPÉRATURES A ZIGUINCHOR

— Normale : sur 40 ans
 - - - Décennie 1970-1979

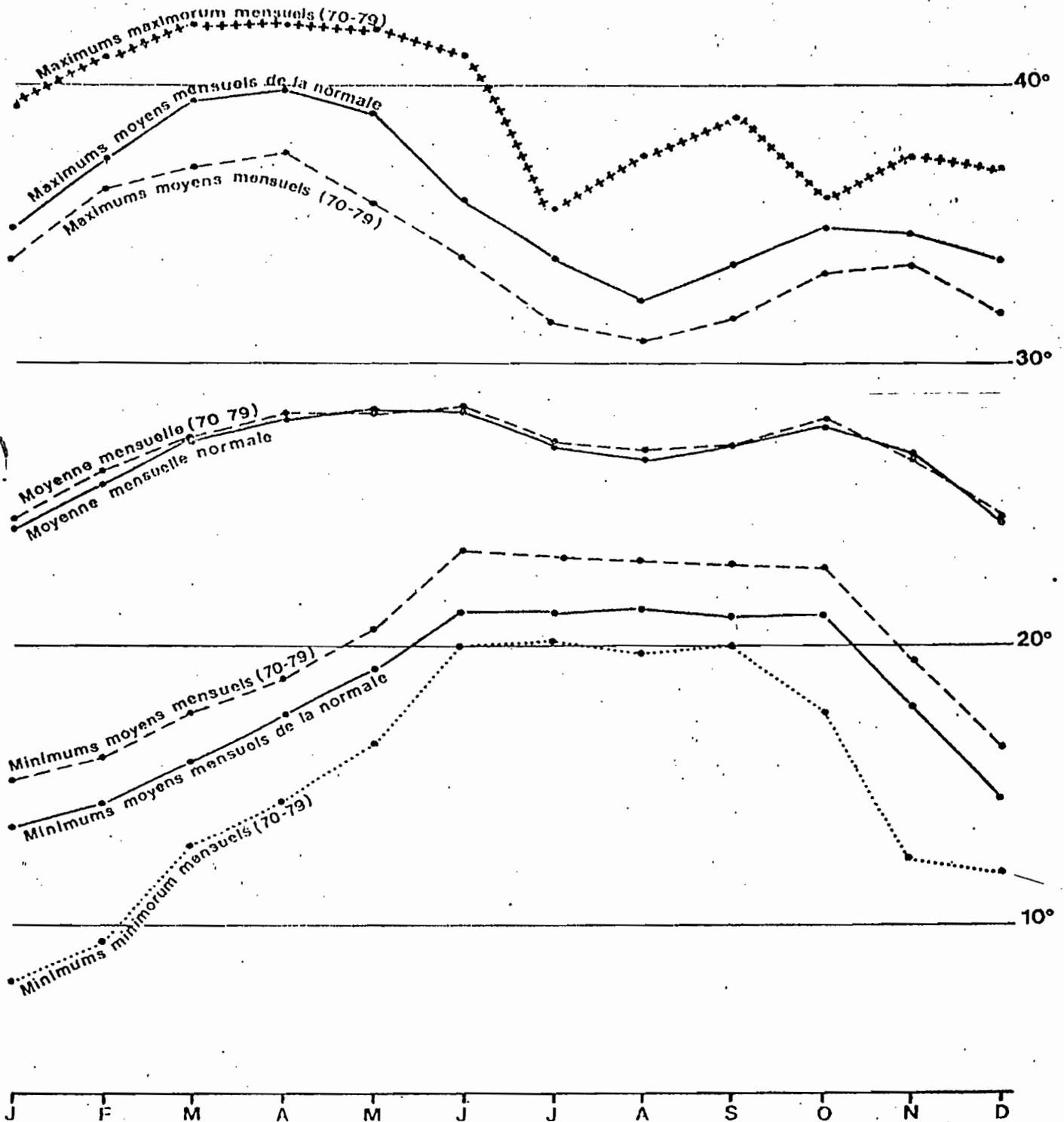


Fig.3 - VARIATIONS MENSUELLES DE L'HUMIDITÉ RELATIVE (U) ET DE L'ÉVAPORATION PICHE (E) - Période 70-79

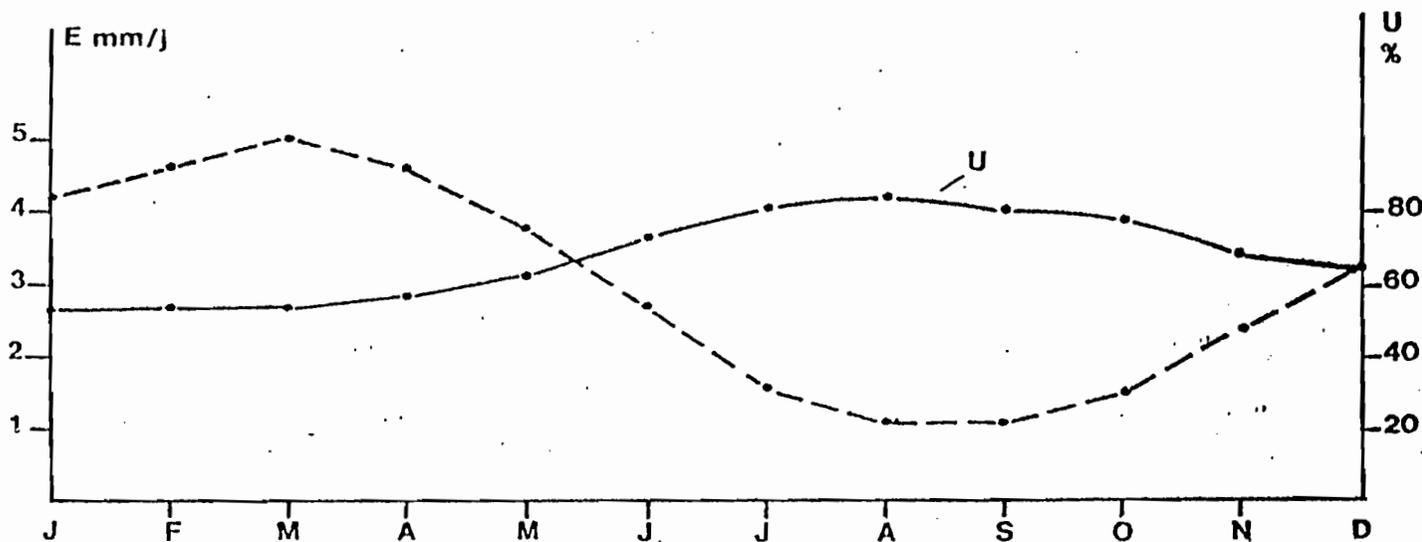
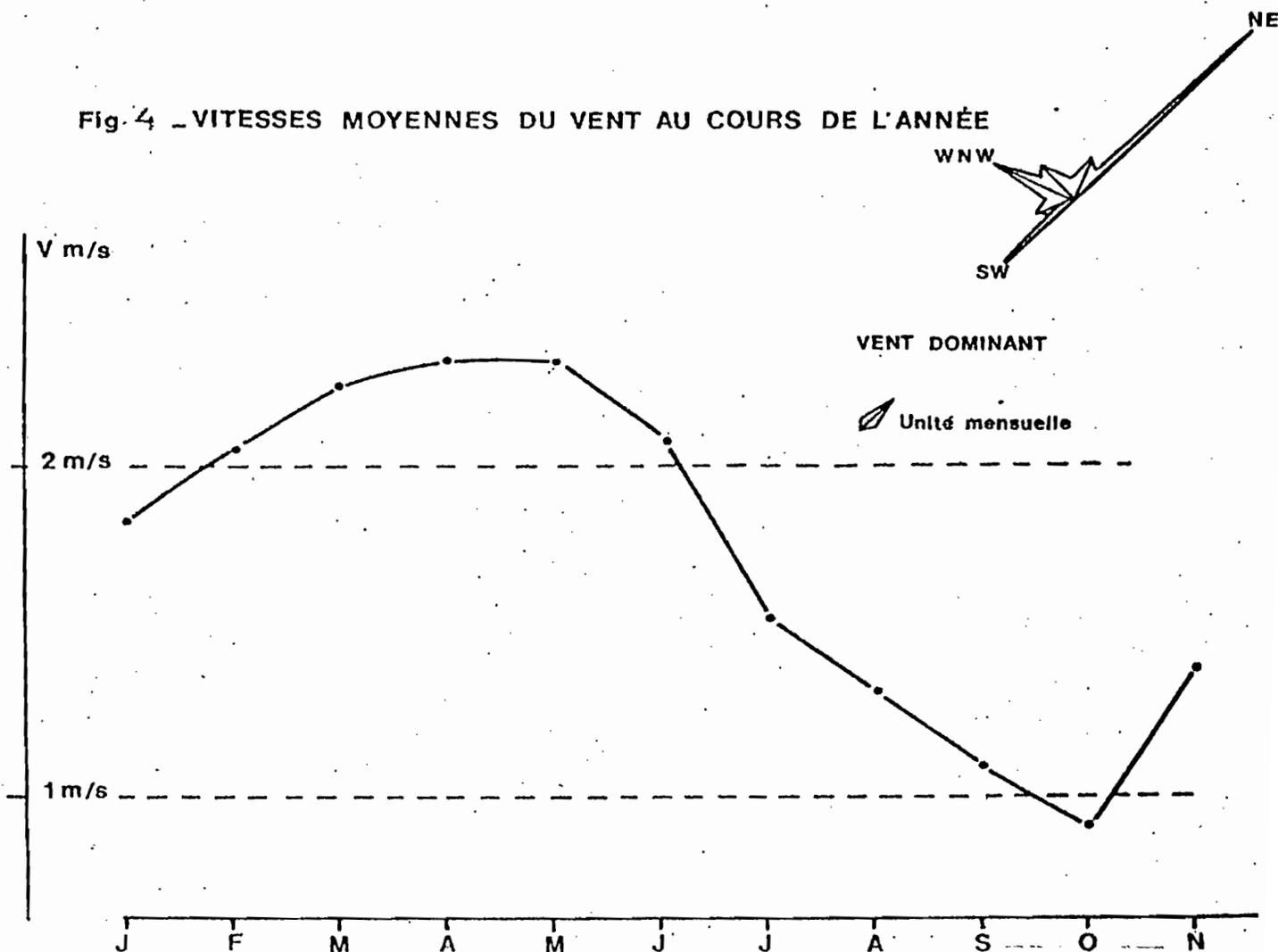


Fig.4 - VITESSES MOYENNES DU VENT AU COURS DE L'ANNÉE



La vitesse : Elle n'est pas négligeable dans l'ensemble si l'on tient compte du fait que les vents tombent le plus souvent au crépuscule. Maximale en fin de saison sèche, Avril/Mai, où elle dépasse régulièrement 4 m/seconde dans la journée, elle décroît en saison humide jusqu'en Octobre, et compte tenu des coups de vents S/SE relatifs aux tornades et qui gonflent la moyenne, on peut estimer que les vitesses diurnes dépassent peu 1 m/seconde.

f) La pluviométrie

Un document SOMIVAC de 1978 met en évidence l'évolution du tracé des isohyètes interannuelles sur la Basse-Casamance en 1968 (par Y.B. MORET) et en 1978 (Fig. 5). L'incidence de la sécheresse est nette au cours de ces dix dernières années.

Les données moyennes du tableau ci-dessous ont été établies à partir des relevés de Ziguinchor (54 ans), Diouloulou (30 ans) et Bignona (24 ans),

| Série / Paramètre | Ziguinchor 1921-1979 | Diouloulou 1937-1979 | Bignona 1954-1979 |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Moyenne en mm | 1514 | 1339 | 1292 |
| Ecart type en mm | 295,7 | 328,5 | 372,4 |

2.2.2. Les données de la campagne 1983

En ce qui concerne le marigot de Koubalan, la pluviométrie en 1983 relevée par le PIDAC à l'extrémité Sud de la zone cartographiée, au village de Koubalan a été particulièrement défavorable, avec un total de 751,8 mm de précipitation.

| Mois | J | F | M | A | M | J | Jt | A | S | O | N | D |
|---------------------|---|---|---|---|------|-----|-------|-------|-------|------|---|---|
| Précipitation en mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 11,5 | 138 | 177,8 | 258,5 | 212,5 | 53,5 | - | - |

La répartition mensuelle des précipitations confirme la tendance observée au cours des dernières années de sécheresse : concentration de la saison des pluies avec des mois d'Août et Septembre excédentaires, pour une valeur annuelle nettement inférieure aux données moyennes de la période 1921/1979 (environ 1 300 mm au marigot de Koubalan).

Conclusion :

La sécheresse enregistrée ces quinze dernières années est lourde de conséquences dans la zone fluviomarine des marigots de Koubalan et Tapilane. Sursalure et oxydation des sols de mangrove ont entraîné la disparition de cette dernière.

Les précipitations d'hivernage ne permettent plus de dessaler les secteurs rizicoles anciennement exploités, la salure et l'acidité remontent vers les hauts de vallée, et latéralement sur les terrasses, par l'intermédiaire des nappes. Celles-ci sont en baisse, les puits doivent régulièrement être recreusés et ne suffisent plus à l'abreuvement du bétail. Dans cette région à forte pression démographique, un tel phénomène est durement ressenti par la population.

CASAMANCE - ISOHYÈTES MOYENNE ANNUELLES

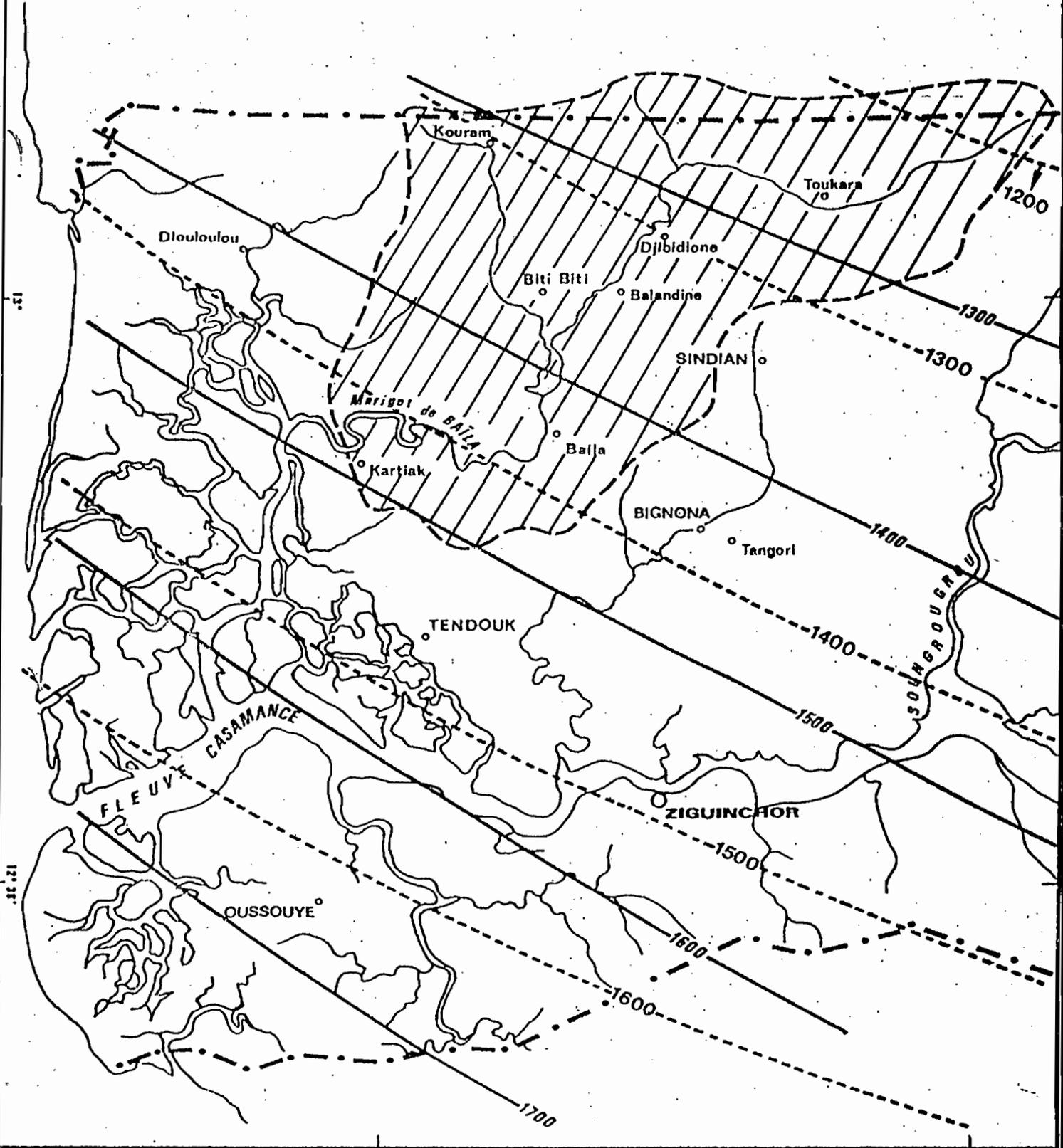
----- Isohyète (1978 SOMIVAC)

———— Isohyète (1968 ORSTOM)



Bassin versant du marigot de BAÏLA

Echelle: 1/500 000



2.3. LES MILIEUX DE MANGROVES - QUELQUES GENERALITES (cf. MARIUS C. : Les mangroves du Sénégal - 1979).

Le terme de mangrove désigne initialement une formation végétale composée de palétuviers et se développant en milieu fluviomarin ; par extension, on appelle mangrove l'ensemble du milieu spécifique à ce type de végétation. On parle ainsi de sols de mangrove.

Les sédiments marins des mangroves sont tous caractérisés par l'accumulation en leur sein de soufre. Cette accumulation est favorisée par les racines des palétuviers. Le soufre de l'eau de mer est fixé sous l'influence de bactéries sulfato-réductrices principalement sous forme de pyrite.

Lorsque ces sédiments sont exondés et subissent une oxydation, l'oxydation de la pyrite libre dans le milieu de ions SO_4^{--} et H^+ et provoque une chute du pH du sol, pouvant passer de 6-7 à 2,5 au cours de l'oxydation. Le sol devient alors hautement toxique pour la faune et la flore qui disparaissent totalement.

La sécheresse qui sévit actuellement dans les pays du sahel a favorisé l'oxydation des sols de mangrove, tout en induisant une sursalure du milieu. On assiste donc à une disparition de la mangrove et à une extension des zones de tannes : zones nues (cf. séquence - Fig. 1) généralement sursalées et acidifiées. Les mangroves du Sénégal - particulièrement celles de Koubalan et Tapilane - n'échappent pas à cette règle et forment un véritable paysage de désolation : souches d'arbres morts et surfaces nues où ne subsistent que quelques rares palétuviers en bordure des canaux.

Le décès de la mangrove est d'abord dû à la sursalure (les eaux des marigots et des nappes sont fréquemment deux fois plus concentrées en sels que l'eau de mer, avec des conductivités dépassant 100 m S/cm) mais l'oxydation des sols qui intervient ensuite compromet une éventuelle récupération de ces zones.

La répartition dans l'espace de ces différents facteurs délimite trois ensembles dans les marigots tels que ceux de Koubalan et Tapilane :

- Les zones potentiellement sulfatées-acides ; zones non oxydées, où subsiste généralement la mangrove (sauf en cas de sursalure) et où le pH est resté voisin de 6-7, le soufre contenu dans le milieu étant à l'état réduit.
- Les zones sulfatées acides : anciens sols de mangrove ayant subi une oxydation et une chute du pH à des valeurs souvent inférieures à 4. Ce sont les zones de tannes qui sont, par ailleurs, généralement hypersalées.
- Les têtes de vallées, non affectées par la salure et l'acidification, mais pouvant résulter d'une très ancienne évolution des sols de mangrove.

2.4. MISE EN VALEUR DES MARIGOTS : LES SYSTEMES TRADITIONNEL

Cf. P. PELISSIER "Les paysans du Sénégal"

C. MARIUS "Les Mangroves du Sénégal - Ecologie - Pédologie - Utilisation".

L'activité dominante est la riziculture qui s'effectue schématiquement dans deux domaines :

- Les rizières sur alluvions non salées de haut de vallées. Cultures soit en riz pluvial soit en riz repiqué, en fonction de la pluviométrie, et dont le principal problème est la ressource en eau.
- Les rizières du domaine de mangrove proprement dit installées en domaine salé, après défrichement de la mangrove, elles nécessitent un savant système de gestion de l'eau à base de digues et de drains pour assurer un dessalement préa-

lable au repiquage du riz. Les Diolas - ethnique dominante dans la région, ont acquis une grande maîtrise de ces techniques.

Ce deuxième type de rizières est, en pluviométrie normale - le plus productif. A l'heure actuelle, ces zones sont sursalées, voire acidifiées, et les précipitations d'hivernage ne permettent plus leur mise en valeur, privant ainsi les Diolas de la majeure partie de leurs domaines rizicoles. Domaines dont l'extension se voit chaque année réduites au dépend des zones acidifiées de tannes.

CHAPITRE III

LES SOLS : ÉTUDE PÉDOLOGIQUE ET FACTIBILITÉ RIZICOLE

3.1. METHODOLOGIE ET MODE DE REPRESENTATION CHOISIS

Le résultat de l'étude pédologique devant permettre d'envisager le problème de l'aménagement de la vallée en secteur rizicole, nous avons choisi notre méthode de travail et notre mode de représentation en privilégiant l'aspect thématique de l'étude, de façon à acquérir et transmettre un maximum d'information sur la factibilité rizicole des marigots de Koubalan et Tapilane.

Nous avons décrit et prélevé un certain nombre de profils (60 sur Koubalan) puis réalisé des sondages complémentaires, totalisant environ 200 points d'observation par vallée.

Les paramètres que nous avons systématiquement relevés sont les suivants:

- Texture
- Structure
- États d'oxydo-réduction du fer
- États d'oxydo-réduction du soufre
- Matière organique
- pH (sur extrait 1/5 au laboratoire et in situ)
- Conductivité de l'extrait 1/5

A partir des données dont nous disposons, nous avons choisi de représenter l'information acquise sur un unique document. Ce document comprend des unités cartographiques définies par un cartouche et une classe d'aptitude culturale. Ce mode de définition des unités cartographiques nous a semblé plus performant que le recours à une classification des sols, très contestée dans les milieux de mangrove. D'autre part, les paramètres représentés dans le cartouche ayant été retenus en raison de leur impact sur la factibilité rizicole, il y a naturellement une relation univoque entre unité cartographique et classe d'aptitude culturale (à une unité cartographique correspond une classe d'aptitude et une seule) ce qui nous a permis de réunir toute l'information sur un document unique.

3.2. LE CONTENU DES CARTOUCHES, CONSIDERATION ANALYTIQUE

3.2.1. Les sels solubles

Deux éléments principaux sont à prendre en considération ici :

- L'abondance des sels solubles par unité de masse du sol, estimée par une mesure de conductivité sur un extrait aqueux
- L'équilibre entre l'ion sodium et les ions calcium et magnésium, calculé à partir de résultats d'analyse sur extrait aqueux.

Pour connaître la quantité totale de sels solubles dans un sol, on prépare généralement un extrait aqueux, de rapport sol/solution donné. Pour des raisons de commodité, c'est généralement l'extrait 1/5 qui est retenu au laboratoire ORSTOM de

Dakar. La mesure de conductivité, en mmhos/cm (ou mS) à 20° est une estimation de la quantité totale de sels solubles contenus initialement dans l'échantillon. Pour les sols des Kalounayes, on trouve la corrélation suivante entre la conductivité de l'extrait 1/5 et la teneur en sels, en grammes/100 g de sol :

$$(\text{gr. de sel}/100\text{g}) = 0,0438 + 0,275(\text{conductivité } 1/5) + 1,3210^{-3}(\text{conduct. } 1/5)^2.$$

La conductivité est mesurée en mmhos/cm à 25°.

Deux problèmes se posent pour l'utilisation des extraits 1/5 comme estimateur de la salinité du sol :

- L'extrait ne dissout pas nécessairement tous les sels, surtout si le sol est riche en gypse : ce n'est pas le cas ici. Nous avons cependant vérifié, par des calculs thermodynamiques, que les extraits obtenus étaient sous-saturés vis-à-vis du gypse, et donc avait certainement bien dissout la totalité du gypse éventuellement présent.
- Les normes de salinité des sols sont en général exprimées en conductivité de pâte saturée. Nous considérerons, comme l'ont montré pour le Delta du fleuve Sénégal LE BRUSQ J.Y. et LOYER J.Y. (1981) qu'un facteur de 7 à 9, fonction de l'humidité à saturation (RICHARD P. et GOURY P. - 1965) situé en moyenne entre 40 et 60 %, est valable pour des conductivités électriques < 10 mmhos/cm, peut être utilisé pour le calcul de la conductivité de cet extrait.

Les classes de salure suivantes ont été choisies

| Classe | Conductivité 1/5 (mmhos/cm, 20) | Appréciation |
|--------|-------------------------------------|--------------------------|
| 0 | < 0,2 | non salé |
| I | 0,2 - 0,5 | non salé à très peu salé |
| II | 0,5 - 2 | peu salé |
| III | 2 - 5 | salé |
| IV | 5 - 10 | fortement salé |
| V | >10 | très fortement salé. |

Les limites entre classes de salure ont été essentiellement établies à partir des observations de terrain.

Ainsi, la limite de 0,2 mmhos concerne la zone qui n'est absolument pas affectée par la salure. La limite des 0,5 mmhos correspond à l'apparition des premiers caractères de salure (quelques plantes halophytes, légère structure poudreuse par endroits) et pour les Diolas à la limite des zones où l'on doit envisager un dessalement avant repiquage du riz.

3.2.1.2. L'équilibre entre le Sodium et les alcalino-terreux (Calcium + Magnésium)

3.2.1.2.1. Le S.A.R. d'une solution aqueuse

Le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) d'une solution aqueuse quelconque est calculé de la façon suivante :

$$\text{S.A.R.} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}$$

où Na, Ca et Mg sont exprimés en mé/l

Ce paramètre mesure le risque de fixation du sodium sur le complexe échangeable (argiles surtout) en présence d'une eau d'un S.A.R. donné, le E.S.P. (échangeable sodium percentage), ou pourcentage de sodium sur le complexe adsorbant (LE BRUSQ, 1982). A partir de 10 à 15 % de sodium, les propriétés physiques et chimiques du sol se dégradent.

On peut aussi calculer le S.A.R. à partir des activités ioniques au lieu des concentrations, et prendre en compte de cette façon les multiples interactions entre les différents ions. Les valeurs de S.A.R. ainsi trouvées sont en général supérieures aux précédentes (cf. Fig. 6), en raison notamment de la formation préférentielle d'ions complexes entré $SO_4^{=}$ et le calcium ou le magnésium.

Cependant, dans le cas des eaux de nappe et des extraits qui nous intéressent ici, les taux de sodium échangeable calculés à partir de ces S.A.R. sont très proches de ceux calculés à partir des molalités (cf. Fig. 7). Ce fait a également été constaté dans les eaux de nappes du Delta du Sénégal (LE BRUSQ, 1982). Ce n'est que pour les forts taux de sodium échangeable (>50 %) que l'introduction des activités augmente le E.S.P. prévisible.

3.2.1.2.2. Le S.A.R. de la solution du sol

Dans le cas des extraits 1/5, le S.A.R. calculé n'est pas celui de la solution du sol, pour plusieurs raisons :

- 1) Le S.A.R. diminue lorsque la dilution augmente : en diluant 5 fois une eau, le numérateur de S.A.R. est divisé par 5, le dénominateur par $\sqrt{5} \approx 2,24$, et donc le S.A.R. est divisé par $\approx 2,24$.
- 2) Les échanges solution-complexe adsorbant font que la dilution d'une eau favorise l'adsorption des divalents et le passage en solution des monovalents : le S.A.R. tend donc à augmenter.
- 3) Par dilution d'un extrait, on solubilise d'avantage de sels peu solubles (gypse notamment) et on tendrait donc à diminuer le S.A.R. plus que prévu pour la raison 1.

Pour les mêmes raisons, le S.A.R. de la solution du sol n'est pas constant en fonction du taux d'humidité du sol.

Aussi, nous proposons de retenir, pour caractériser l'équilibre sodium/(calcium + magnésium) dans les sols, le S.A.R. de l'extrait 1/5 multiplié par 2. Cette valeur ne peut être évidemment qu'indicative. Nous la noterons (SAR)th. Pour fixer les idées, d'après une étude faite dans le Delta du Sénégal, des sols dont le (S.A.R.)th était en moyenne de 25 se sont fortement alcalisés après lessivage des sels, tandis que des sols où le (S.A.R.)th était d'environ 4 n'ont montré que de faibles indices d'alcalisation (LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., 1982/1983). Il a été également constaté que les rapports entre constituants des sels (Na/Ca, Cl/SO₄...) variaient fortement lors du dessalement, et pas toujours dans le sens attendu d'une élimination préférentielle du Sodium et du Chlore. Aussi, sera-t-il bon de suivre l'évolution du (S.A.R.)th des sols étudiés ici, surtout lorsque la valeur initiale dépasse 15.

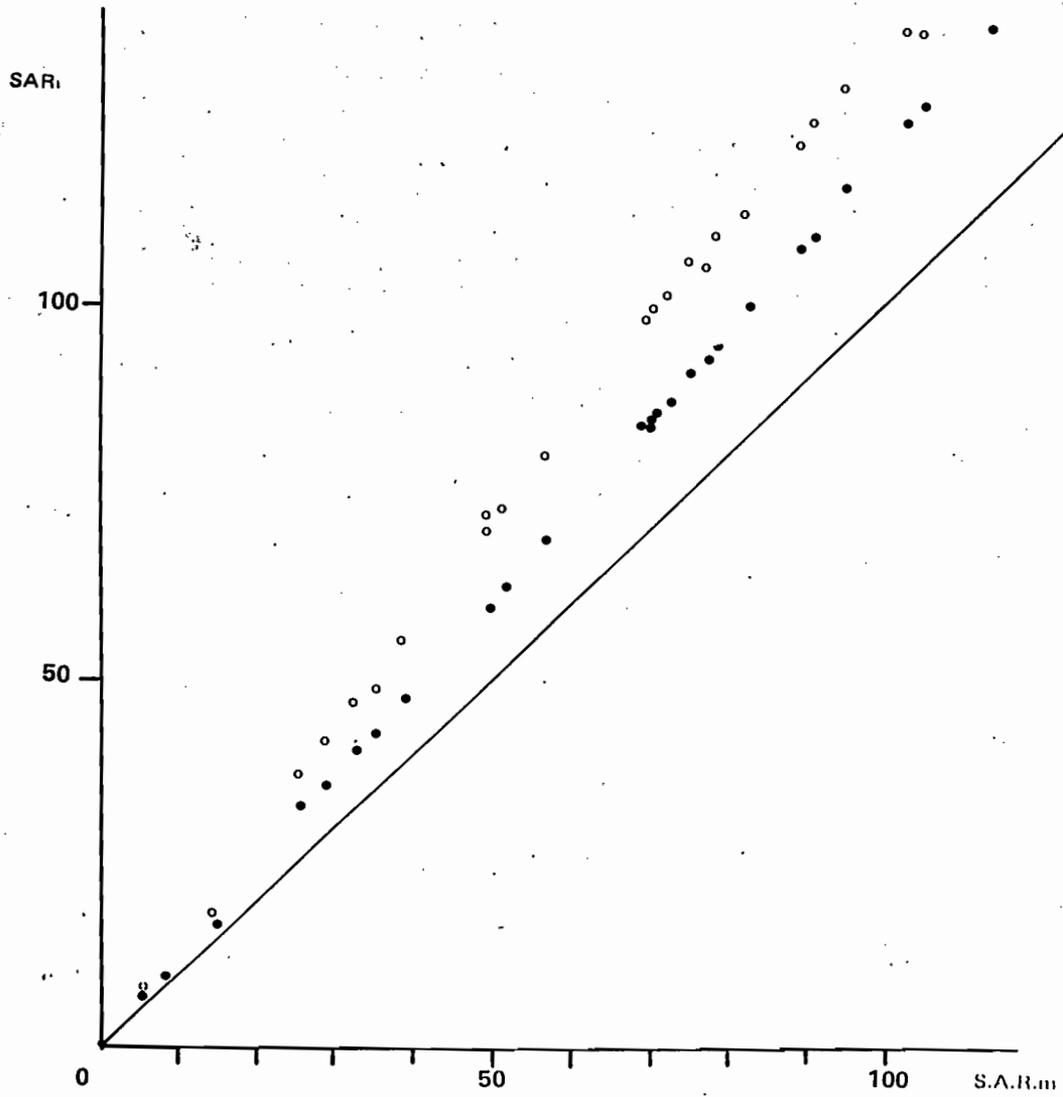
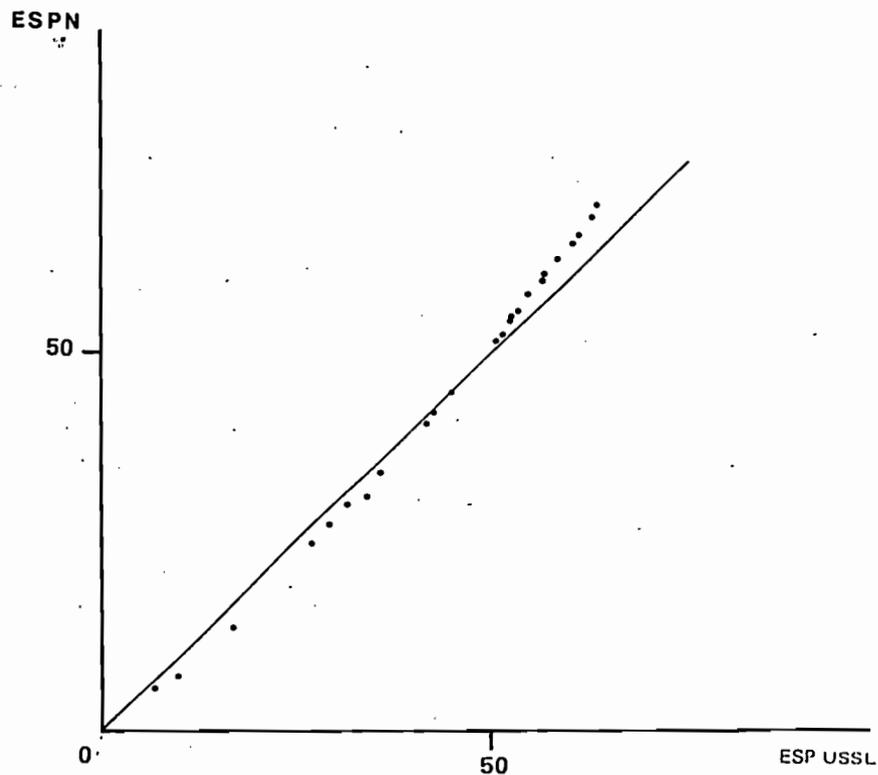


Figure 6 Relation SARm - SAR pour les eaux des nappes des Kalounayes

- SARm - SARt
- SARm - SARp



Relation entre les E.S.P. calculés par la formule du V.S. Salinity Laboratory et la formule de NAKAYAMA (1975) (ESPN)

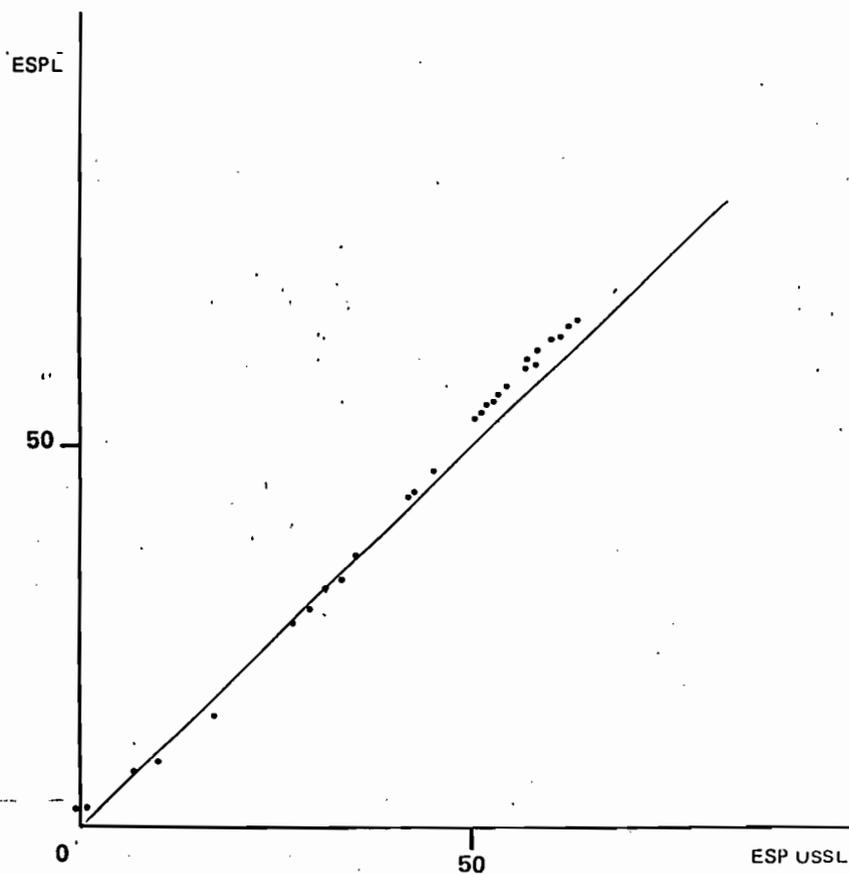


Figure 7 Relation entre les E.S.P. calculés par la formule du V.S. Salinity Laboratory et la formule de Le Brusq (1982) (ESPL)

Nous proposons enfin de retenir pour classes de (SAR)th :

| Classe | (SAR)th | Appréciation |
|--------|---------|---|
| I | 0 - 5 | Faible degré d'alcalisation |
| II | 5 - 15 | Alcalisation modérée |
| III | > 15 | Alcalisation importante. Amendement calcique à prévoir. |

3.2.1.3. Rapport Chlorure/Sulfate

Dans la plupart des sols analysés ici, le rapport Cl/SO₄ (en mé/l) est très supérieur à 1 (valeur moyenne : 5,02).

Cependant, localement, ce rapport peut être inférieur à 1. On observe alors fréquemment en surface des précipitations de sulfates acides d'aluminium (alunite, picharingite, halotrichite). Par contre, la présence de jarosite dans le profil n'a pas été notée dans ces cas.

Il semble que les profils concernés représentent un stade très avancé d'évolution en milieu sulfaté acide. La totalité du soufre est oxydée en sulfates, la jarosite se décompose en SO₄⁼ et K⁺ solubles et goethite : les diagrammes de stabilité des minéraux montrent en effet que si la jarosite est stable vis-à-vis d'oxyhydroxydes de fer amorphes, elle ne l'est pas vis-à-vis de la goethite, sauf à pH très bas (< 1,7) (VAN BREEMEN N., HARMSEN K. - 1975).

Les zones à rapport Cl/SO₄ inférieur à 1, outre des pH très bas, pourront produire des phénomènes de toxicité aluminique particuliers; elles seront donc notées sur la carte.

3.2.2. L'acidité

3.2.2.1. L'acidité d'un sol peut avoir de multiples causes :

lixiviation poussée, matière organique libérant des acides fulviques, engrais acidifiants, pluies acides, oxydation de sulfures organiques ou minéraux. Ses formes sont également multiples : ions H⁺, Al³⁺ ou Fe³⁺ en solution, ou sous forme échangeable, acides organiques, réserves d'acidité sous forme de minéraux tels que la jarosite ou l'alunite.

Par ailleurs, le pH, fréquemment utilisé pour caractériser l'acidité du sol, ne mesure qu'une concentration d'ion (en fait une activité) dans la solution du sol à un moment donné, mais ne donne aucune indication sur les réserves d'acidité, le pouvoir tampon du sol face à une cause de variation du pH.

Dans le cas qui nous concerne, la situation est particulièrement complexe. L'acidité provient essentiellement de l'oxydation de formes réduites du soufre (pyrite, hydrogène sulfuré, soufre des matières organiques), et du fer ferreux, mais cette oxydation est en partie réversible, en fonction notamment de la submersion du sol.

Aussi, doit-on distinguer :

- une acidité "actuelle", caractérisée par une mesure de pH à un moment donné, sur un sol dans un certain état d'évolution.
- une acidité "potentielle", susceptible d'apparaître après oxydation de tous les éléments réduits du sol.

La connaissance de ces deux paramètres est nécessaire. Le premier est éminemment variable dans les sols que nous avons étudiés. En outre, on ne possède que peu d'indications sur ces variations au cours de l'année, durant une campagne rizicole par exemple. Le second paraît mieux défini, mais n'aura d'incidences sur la riziculture que dans certaines conditions (assèchement des sols).

3.2.2.2. Mesures effectuées

Aussi souvent que possible, le pH a été mesuré sur le terrain, directement sur l'échantillon de sol lorsque son humidité le permettait, ou après addition d'un peu d'eau distillée. Cette mesure représente l'acidité "actuelle". Le pH a également été mesuré au laboratoire, sur extrait 1/5 d'un échantillon séché et broyé. Une réoxydation partielle de l'échantillon a pu avoir lieu. Mais la dilution due à l'extrait tend à faire remonter la lecture. Dans certains échantillons, il est en outre probable qu'une hydrolyse du sodium échangeable s'est produite, d'où des pH élevés, supérieurs à 8. Dans les cas où une forte baisse de pH a eu lieu, c'est une estimation de l'acidité potentielle que l'on a obtenue.

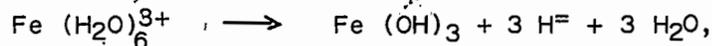
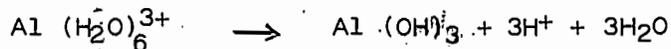
Les classes de pH retenues sont les suivantes :

| | |
|-----------|----------------|
| I | pH < 3,8 |
| II | 3,8 < pH < 4,6 |
| III | 4,6 < pH < 7 |

3.2.2.3. Réserves d'acidité

Le pouvoir tampon des sols, qui conditionne les possibilités d'amendement est assez mal connu. Il est lié en grande partie à l'acidité d'échange, sous forme d'ions Al^{3+} , Fe^{3+} et H^+ adsorbés sur les argiles. Lors de l'acidification du sol, les ions H^+ libérés, s'échangent dans un premier temps sur les cations adsorbés (Na, Ca, Mg) : on obtient une argile $-H^+$. Mais rapidement, les protons s'échangent contre des ions Al^{3+} constituant la structure des argiles (couche octaédrique) et parfois Mg^{2+} ou Fe^{3+} .

La capacité d'échange de l'argile est donc saturée en partie par Al^{3+} et Fe^{3+} . Ces ions peuvent passer en solution où ils se comportent comme des acides faibles. Il est possible d'estimer la réserve d'acidité constituée par ces ions échangeables à partir de la capacité d'échange du sol et du taux de saturation en bases (Na, K, Ca, Mg). En supposant que la capacité d'échange "non saturée" est occupée par Al^{3+} , Fe^{3+} , H^+ , et que Al et Fe comptent chacun pour 3 protons, selon les réactions :



on peut estimer à 25 tonnes la quantité de $CaCO_3$ nécessaire pour neutraliser l'acidité d'échange contenue dans 3 000 t d'un sol ayant une C.E.C. de 22 mé/100 g saturée à 23 %.

Une autre réserve d'acidité peut être constituée par les acides organiques venant de la dégradation des matières organiques.

Enfin, des minéraux comme la jarosite, l'alunite, libèrent de l'acidité en se décomposant. Par exemple, pour la jarosite :



Cette réaction est probablement très lente. Grossièrement, l'acidité stockée dans 1 g de

jarosite serait neutralisée par 0,1 g de CaCO_3 . On pourrait estimer qu'environ 20 t de calcaire seraient nécessaires pour neutraliser sur 20 cm d'épaisseur la jarosite d'un hectare de tanne riche en jarosite.

Au total, on pourrait arriver à une cinquantaine de tonnes de calcaire nécessaires pour neutraliser 1 hectare de sol acidifié, sur 20 cm d'épaisseur. En fait, la dynamique de ces formes d'acidité, notamment lors d'un lessivage à l'eau douce ou à l'eau salée, est mal connue, et pourrait conduire à réviser ces chiffres en baisse.

En l'absence de données sûres, on définira 3 classes de pouvoir tampon pour les sols :

- Pouvoir tampon faible (sol sableux)
- Pouvoir tampon important (sol moyennement argileux, minéraux sulfatés acides non abondants)
- Pouvoir tampon très important (sol très argileux, minéraux sulfatés acides abondants).

3.2.3. Caractérisation des états du fer

Dans la grande majorité des sols, les manifestations de l'hydromorphie s'observent essentiellement au niveau de la dynamique du fer : états d'oxydation, mise en mouvement, concentration locale ou élimination. Dans les sols de mangrove sulfatés acides ou potentiellement sulfatés acides, la dynamique du fer est contrôlée, non seulement par les réactions d'oxydo-réduction, mais aussi par l'acidité, qui peut mobiliser le fer à l'état ferrique (Fe^{3+}), par la présence de sulfures qui précipitent le fer ferreux (Fe^{2+}) dans la pyrite, la mackinardite, la gréigite, par la présence de matières organiques à divers stades d'évolution, susceptibles de le complexer.

La mobilité du fer ne permet donc pas de façon évidente, de caractériser l'ampleur des phénomènes d'hydromorphie. On peut cependant distinguer 4 types d'occurrence du fer, qui permettent de repérer des stades d'évolution des sols :

I - Fer réduit (Fe^{2+}), soit soluble, soit précipité par les sulfures.

L'horizon considéré est dépourvu de taches, gris-vert, gris-bleuté ou noir. Le pH est neutre à moyennement acide.

II - Présence de fer ferreux et de fer oxydé, généralement précipité sous forme de jarosite jaune-paille, ou d'oxyhydroxydes de fer. Le pH est généralement inférieur à 4.

III - Fer oxydé, formant des taches, des imprégnations, des concrétions ocres ou rouges d'oxyhydroxydes plus ou moins cristallisés.

IV - Le fer, essentiellement oxydé, ne forme pas ou peu de précipitations individualisées reconnaissable (pas de taches). Il est, soit lié à la nature organique, soit inclu dans les minéraux argileux; soit précipité à leur surface.

L'occurrence I caractérise un gley, les occurrences II et III un pseudogley

3.2.4. Caractérisation des états du soufre

- La dynamique du soufre est un aspect essentiel de l'évolution des sols de mangrove.
- Dans la phase réduite, le soufre est sous forme de sulfures (HS^-), a un potentiel redox d'environ -400 mV. Il s'accumule dans le sol sous forme de sulfures de fer, d'hydrogène sulfuré (H_2S), ou lié à la matière organique. Une forte odeur d'oeufs pourris se dégage des matériaux.
- Dans la phase oxydée, le soufre forme des ions sulfatés, qui s'associent avec Fe^{2+} , Fe^{3+} ou Al^{3+} pour former respectivement l'Halo-trichite, la jarosite, l'alunite, ou d'autres minéraux caractéristiques des sols sulfatés acides. Le soufre s'oxydant en sulfate à un Eh plus bas que le fer ferreux s'oxydant en fer ferrique, pour un pH donné, on peut théoriquement observer Fe^{2+} en présence de SO_4^- . Pratiquement, lors du drainage et donc de la réoxygénation du sol, le soufre et le fer ferreux se réoxydent presque simultanément.

Dans tous ces processus, le rôle des micro-organismes est fondamental.

On distinguera 3 types de milieu en fonction du soufre :

- I - Accumulation importante de soufre réduit : odeur d'oeufs pourris, présence de pyrite, sulfures de fer donnant une coloration noire au matériau
- II - Présence de sulfates en quantité notable : précipitation de jarosite, de sulfates d'aluminium, forte acidité liée à la formation d'acide sulfurique
- III - Milieu pauvre en sulfates ou soufre total.

3.2.5. La matière organique

Dans les sols de mangrove, en raison du caractère anaérobie du sol (submersion fréquente ou permanente) et de la présence d'une végétation souvent luxuriante (palétuviers), des taux importants de matière organique s'accumulent sous des formes peu évoluées. Localement, on peut avoir des tourbes fibreuses. Lorsque ce milieu est drainé, la matière organique s'oxyde et se transforme, sa teneur diminue.

On distinguera les types suivants de matières organiques :

- I - Tourbe : matière organique peu évoluée, formée de fibres (racines de palétuviers), de débris de feuilles... La teneur en matière organique dépasse 15 %
- II - Matière organique évoluée, abondante : les débris végétaux ne sont pas reconnaissables, le sol a une teinte noire ou brun foncé, est gras ou onctueux au toucher, est friable, et souvent peu dense. La teneur en matière organique est supérieure à 5 %
- III - Matière organique évoluée, peu abondante. Les caractères indiqués ci-dessus sont peu marqués, voir très discrets. La teneur en matière organique est inférieure à 5 %
- IV - Présence de matière organique non discernable.

3.3. GEOCHIMIE DES EAUX DE NAPPE

La salure des eaux des nappes des vallées de Tapilâne et Koubalan est d'origine manifestement marine. Parmi les cations, le sodium est en général dominant, suivi du magnésium, puis du calcium. Parmi les anions, les chlorures sont les plus abondants, suivis des sulfates. Cependant, on observe des variations dans les proportions entre les ions (cf. Fig. 8-19) lorsque la concentration totale augmente : diminution du pourcentage de calcium, augmentation du pourcentage de sodium. La composition des eaux les plus concentrées est moins variable que celle des eaux diluées. Les S.A.R. sont le plus souvent très élevés, dépassant en général 30, jusqu'à 150.

En plus des ions présents dans l'eau de mer (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄) on note souvent des quantités notables de Al et Fe, liés au caractère très acide des eaux. Ces ions proviennent de l'attaque des minéraux argileux et des oxyhydroxydes du sol par l'acidité produite par l'oxydation de composés réduits (sulfures essentiellement). Leur toxicité pour la plupart des végétaux cultivés est connue.

Nous avons calculé pour ces eaux de nappe les activités des ions dissouts, puis les produits d'activité relatifs à divers minéraux (cf. tableau 2). Lorsque le produit des activités atteint ou dépasse le produit de solubilité du minéral correspondant, ce minéral est susceptible de précipiter dans la solution. D'après le tableau 2, la kaolinite serait instable dans presque toutes les nappes considérées, sauf une : la gibsite et le gypse sont partout instables. Par contre, les eaux sont toujours sursaturées vis-à-vis de la jarosite, et parfois vis-à-vis de l'alunite et de la jurbanite. La précipitation de jarosite a effectivement été observée dans de nombreux profils et des sulfates acides d'aluminium, non identifiés, ont été recueillis en surface localement. Tous ces minéraux immobilisent des ions sulfatés.

Ceci expliquerait les teneurs en sulfate, souvent faibles des eaux analysées.

3.4. APPRECIATION DES APTITUDES CULTURALES

Les aptitudes culturelles de chaque unité cartographique figurent sous chaque cartouche, avec les codes suivants.

- 3.4.1. Classes :
- Classe R₄ : aptitudes rizicoles (terrains argileux)
 - Classe M : autres cultures (terrains sableux).

- Sous-classes :
- M₁, R₁ : Bonnes aptitudes, terrains actuellement cultivables sans aménagements particuliers.
 - M₂, R₂ : Aptitudes moyennes, aménagements nécessaires avant culture.
 - M₃, R₃ : Aptitudes médiocres : importants aménagements nécessaires avant culture.
 - R₄ : Aptitude très médiocre : très nombreux facteurs limitants.

Les classes 1, 2, 3 et 4, ont été définies de manière relative, en ne tenant compte que de l'éventail des sols de la vallée. Le nombre et l'importance des facteurs limitants déterminent l'affectation à l'une ou l'autre des 4 sous-classes.

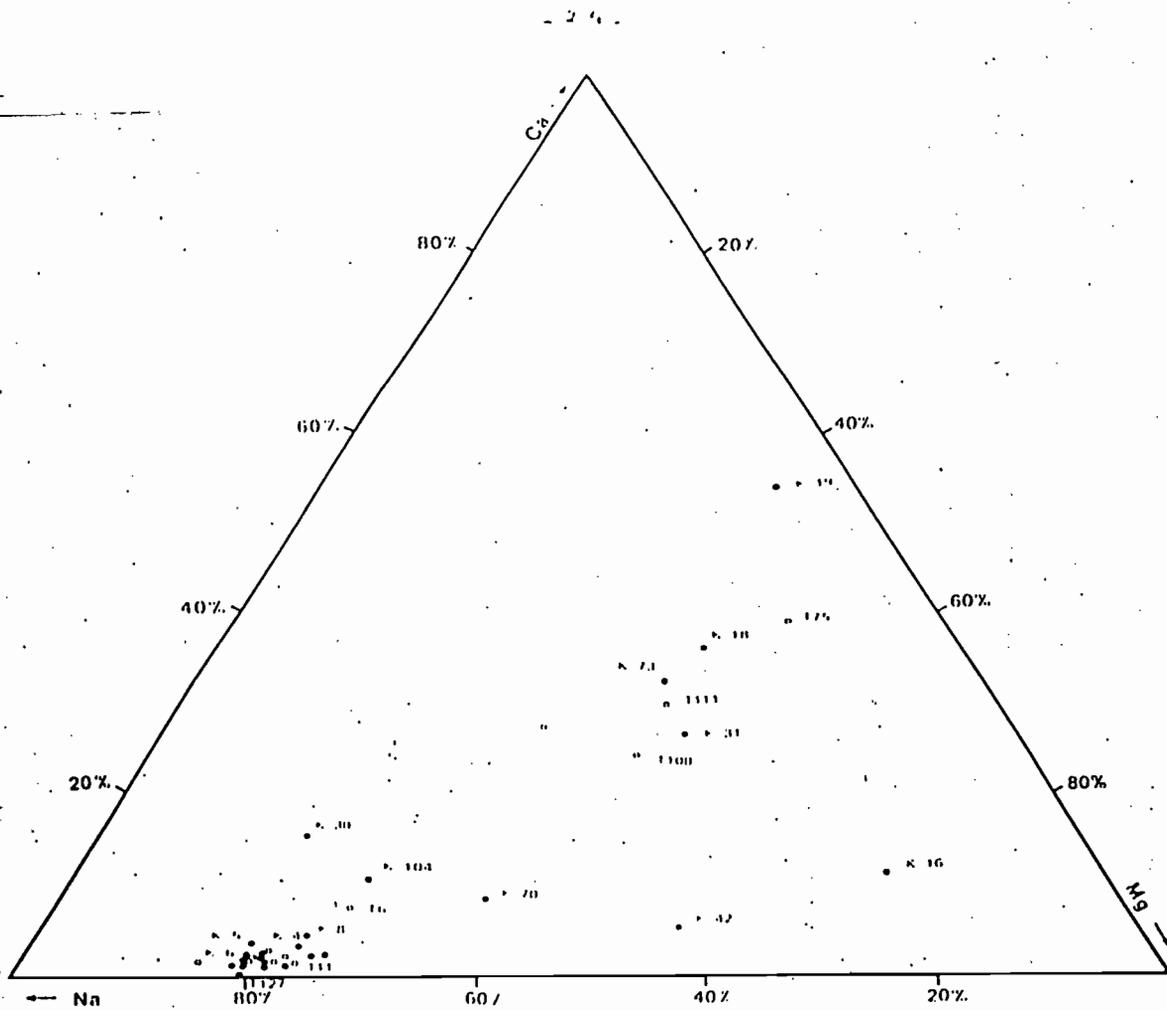


Figure 8 Balance cationique des eaux de nappe

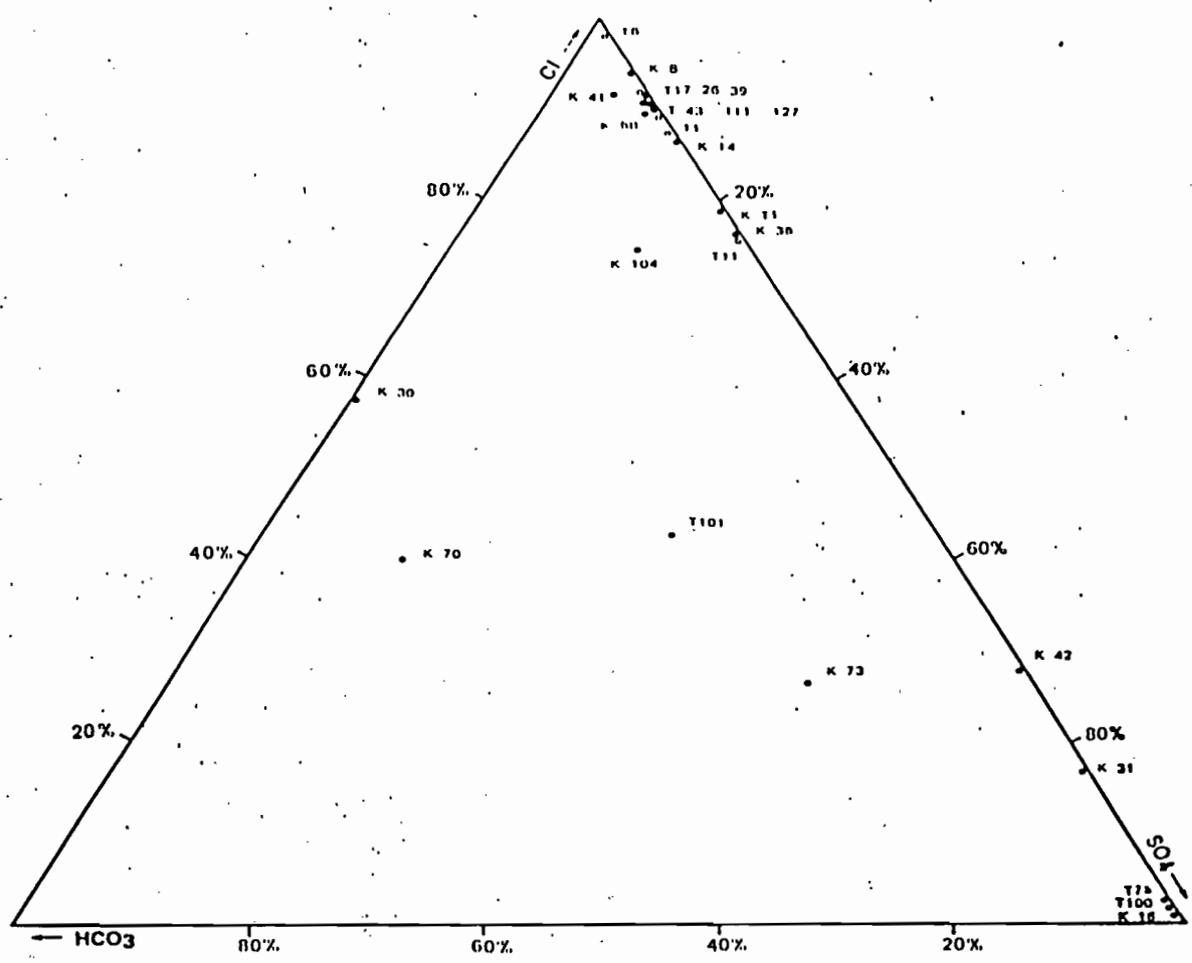


Figure 9 Balance anionique des eaux de nappe

| Echantillon | pH in situ | pH labo. | Kaolinite | Gibbsite | Silice | Fe(OH ₃) | Jarosite | Alunite | Jurbanite | Tama | Basalum | Picker | Gybse |
|-------------|------------|----------|-----------|----------|--------|----------------------|----------|---------|-----------|--------|----------|---------|--------|
| T1 | 3,74 | 3 | 3 | - 37,8 | - 2,73 | - 39 | - 92,3 | - 88 | - 18,4 | - 10,6 | - 131,8 | - 21,95 | - 5,53 |
| T6 | 4,71 | 4,1 | 7,46 | - 34,8 | - 3,52 | - | - | - 85,3 | - 19 | - 14,9 | - 123 | - 28,9 | - 7,22 |
| T11 | 3,5 | 2,8 | 2,52 | - 38,1 | - 2,73 | - 39,2 | - 91,72 | - 88,25 | - 18,1 | - 10,2 | - 132,3 | - 20,75 | - 5,52 |
| T26 | 3,58 | 3,2 | 2,66 | - 37,4 | - 3,33 | - 39,8 | - 95,4 | - 87,4 | - 18,5 | - 10,7 | - 130,7 | - 22,47 | - 5,22 |
| T43 | 3,6 | 3 | 3,89 | - 37,2 | - 2,84 | - 39 | - 92,6 | - 87,1 | - 18 | - 10,7 | - 129,7 | - 21,7 | - 5,68 |
| T50 | 4,08 | 3,7 | 5,7 | - 36,3 | - 2,87 | - 38,3 | - 92,7 | - 85,45 | - 18,37 | - 10,9 | - 127,4 | - 22,9 | - 5,07 |
| T75 | 3,47 | 2,9 | 2,2 | - 37,5 | - 3,39 | - 38,8 | - 91 | - 88,3 | - 17,8 | - 12,9 | - 130,4 | - 22,04 | - 6,16 |
| T100 | 2,75 | 2,5 | 2,25 | - 37,9 | - 2,92 | - 39,3 | - 91,56 | - 87,5 | - 17,1 | - 10,8 | - 130,96 | - 19,07 | - 5,96 |
| T111 | 3,55 | 3,9 | 7,03 | - 35,1 | - 3,36 | - | - | - 86,1 | - 18,4 | - 15,6 | - 123,8 | - 27,53 | - 7,61 |
| K6 | 3,25 | 2,8 | 0 | - 39 | - 3,09 | - 40,4 | - 94,4 | - 90,1 | - 19,2 | - 10,6 | - 136 | - 17,66 | - 5,05 |
| K8 | 3,68 | 2,7 | - 0,27 | - 38,9 | - 3,2 | - 39,3 | - 94,1 | - 92,9 | - 19,7 | - 13,2 | - 136,5 | - 19,3 | - 6,48 |
| K9 | 3,74 | 3,6 | 7 | - 35,4 | - 3,1 | - | - | - 83,1 | - 17,34 | - 10,2 | - 123,6 | - 21,11 | - 5,26 |
| K11 | 3,69 | 2,7 | 1,57 | - 38,7 | - 2,85 | - 40 | - 93,9 | - 89,33 | - 18,8 | - 10,4 | - 134,9 | - 21,83 | - 5,16 |
| K13 | 3,87 | 2,6 | - | - 39,3 | - | - 40,2 | - 94 | - 90,7 | - 19,1 | - 10,5 | - 137 | - 22,2 | - 5,09 |
| K14 | 3,36 | 2,7 | 1,1 | - 38,5 | - 2,97 | - 39,9 | - 93,8 | - 89,6 | - 18,6 | - 10,7 | - 134 | - 21,9 | - 5,39 |
| K16 | 2,95 | 2,6 | 1,6 | - 37,9 | - 3,33 | - 39,7 | - 91,77 | - 87,34 | - 17,2 | - 10,9 | - 130,9 | - 18,95 | - 5,92 |
| K18 | 3,35 | 3,2 | 6,72 | - 35,9 | - 2,79 | - 38,6 | - 92,32 | - 84,85 | - 17,12 | - 12,2 | - 124,7 | - 21,45 | - 5,96 |
| K19 | 4,32 | 3,4 | - | - 38,9 | - | - 39,1 | - 90,76 | - 91 | - 18,62 | - 12,6 | - 135,3 | - 22 | - 4,89 |
| K26 | 3 | 2,6 | 1,24 | - 38,8 | - 2,6 | - 40,2 | - 94,2 | - 89,12 | - 18,6 | - 9,94 | - 134,8 | - 21,05 | - 5,15 |
| K27 | 3,85 | 3,2 | - | - 37,8 | - | - 39,4 | - 94,1 | - 88,3 | - 19 | - 11 | - 132,4 | - 23,11 | - 5,26 |
| K34 | 4,18 | 4,6 | - | - 33,9 | - | - 34,7 | - 85,5 | - 80,5 | - 17,7 | - 11 | - 119,4 | - 23,35 | - 5,11 |
| K35 | 3,05 | 2,6 | 1,49 | - 38,36 | - 2,9 | - 39,1 | - 90,5 | - 88,8 | - 18 | - 10,1 | - 133,1 | - 20,23 | - 5,53 |
| K42 | 3,51 | 2,9 | 4,17 | - 37,3 | - 2,66 | - 38,9 | - 90,51 | - 86,32 | - 17,15 | - 9,89 | - 128,9 | - 18,59 | - 5,38 |
| K50 | - | - | 7,43 | - 33,9 | - 2,71 | - 37,2 | - 96,5 | - 85,4 | - 17,8 | - | - 117,7 | - | - 4,61 |

Tableau : Produits d'activité pour les eaux des nappes des Kalounayes

3.4.2. Facteurs limitants

En majuscules sont indiqués les facteurs limitants principaux. En minuscules les facteurs limitants secondaires.

a) La salure

Nous avons considéré que la salure influait sur les aptitudes culturales à partir de 0,5 mS/cm.

- Le symbole "s" désigne une salure comprise entre 0,5 et 5 mS/cm.
- Le symbole "S" désigne une salure supérieure à 5 mS/cm.

Dans les deux cas, un drainage à l'eau douce doit être réalisé avant toute mise en culture.

A partir de 5 mS/cm, les sols de la vallée n'étaient pas suffisamment dessalés pour permettre le repiquage du riz après 600 mm de pluie en 1984. Il faut donc prévoir une quantité importante d'eau douce, même en cas de barrage de marigot, pour remettre en valeur ces zones.

b) L'acidité

- Le symbole "PH" indique une très forte acidité ($\text{pH} < 3,8$), le
- Le symbole "ph" indique une importante acidité ($3,8 < \text{pH} < 4,5$)

L'acidité est le facteur limitant le moins bien connu. Sa toxicité est due non seulement à l'agressivité des ions H^+ à l'égard des végétaux (ou des microorganismes) mais aussi à l'influence du PH sur la teneur en certains éléments. Ainsi, nous avons signalé de très forte teneur en ion Al^{+++} dans certaines unités (unité 13).

Les conditions de récupération de ces sols sont également mal connues. Nous avons signalé au paragraphe 3.2.2 la possibilité de chauler, en montrant que les quantités de CaCO_3 à apporter pour réaliser une neutralisation, sont énormes. Toutefois, la cinétique de dissolution de la jarosite est très lente et le chiffre de 50 t/ha avancé au paragraphe 3.2.2. est certainement très supérieur à la quantité pratiquement nécessaire. On peut également envisager d'autres modes d'apport de CaCO_3 : sous forme de coquillages par exemple. Enfin, il semblerait que la matière organique joue un rôle protecteur vis-à-vis de l'acidité, notamment en complexant les ions Al^{3+} (toxicité aluminique). Toutefois, tous ces faits restent à quantifier avant de pouvoir envisager une récupération de ces sols dans des conditions économiquement réelles. Les expérimentations actuellement en cours à l'ORSTOM de DAKAR vont dans ce sens.

c) L'acidité potentielle

- Le symbole "(PH)" indique une forte acidité potentielle.
- Le symbole "(ph)" indique une acidité potentielle moyenne.

Comme nous l'avons signalé, cette acidité potentielle est due à la présence dans le sol de sulfures, sous forme de sulfures de fer, d'hydrogène ? etc...

Tant que ces sols restent en conditions réduites (submersion), le pH reste à des valeurs voisines de 6 - 7 et une mise en culture de ces parcelles ne pose pas de problème.

Cependant, les unités actuellement potentiellement sulfatées acides représentent une faible part de la superficie de la vallée de Koubalan. Ces unités sont hypersalées et actuellement inexploitable.

En cas d'oxydation de ces sols, leur pH chute à des valeurs comprises entre 2 et 4, et leur aménagement est alors soumis aux conditions du paragraphe précédent.

d) Les nappes

Le symbole "N" indique une nappe très salée et superficielle (plus de 80 mS/cm, environ 40cm de profondeur).

Un dessalement complet de cette nappe, par apport d'eau douce et isolement des eaux saumâtres du marigot, doit précéder toute mise en culture.

Le symbole "n1" indique une nappe salée et moyennement profonde de 80 à 120 cm, 60 mS environ).

Cette nappe est impropre à l'irrigation et la remontée des sels en saison sèche provoque la salure des sols concernés.

Il faut donc également prévoir un dessalement de cette zone avec si possible, un blocage des eaux saumâtres du marigot. Toutefois, le dessalement sera ici plus rapide que dans le cas précédent, de même que la nappe est moins directement influencée par les eaux du marigot.

Le symbole "n2" indique une nappe profonde (plus de 120 cm généralement plus de 2 m) et moyennement salée (moins de 60 mS/cm, généralement 10 à 20 mS/cm). Ces nappes correspondent à Koubalan à d'anciens horizons de mangrove enfouis. Elles sont trop profondes et trop peu salées pour engendrer une forte salure des horizons supérieurs (on ne dépasse pas 2 mS/cm) mais elles sont impropres à l'irrigation.

e) La topographie

Le symbole "t" indique une topographie irrégulière, bosselée.

Ces bosses sont généralement accompagnées d'horizons sableux peu profonds (30 à 60 cm). Un planage nuierait donc considérablement aux caractéristiques hydriques de ces sols et ne doit pas être envisagé.

Les Diolas tirent partie de ces zones en élaborant de petites diguettes suivant les courbes de niveau, ou en les réservant au pâturage.

3.5. DESCRIPTION DES UNITES

3.5.1. Les sols de haut de vallée

Ces sols sont actuellement isolés du marigot, et donc de l'influence marine. Ils ne sont, en principe, pas concernés par les problèmes de salinité et d'acidité.

Ils peuvent s'être formés sur d'anciennes zones de mangrove (cf. ci-après), sur des colluvions argileuses, argilo-sableuses ou sableuses d'origine diverse. Le plus souvent on retrouve dans un même profil ces diverses origines ("lits" de sable, horizons profonds à racines de palétuviers, etc...).

Unité n° 1 : Tout à fait en haut de vallée, cette unité se caractérise par un profil entièrement argileux, une conductivité sur extrait 1/5 très faible ($< 0,2$ mmhos/cm) et un pH généralement supérieur à 4,5. On n'y trouve pas de trace de sulfate ou d'ancien horizon de mangrove en profondeur (3,50 m et plus).

Ils présentent de légers caractères d'hydromorphie sur l'ensemble du profil.

* Profil type :

- 0 - 30 cm : Horizon gris-clair, argileux, structure polyédrique fine peu développée, quelques taches rouilles et jaune-rouille le long de fines racines, faible porosité.
- 30 - 60 cm : Horizon gris moyen, argileux, structure polyédrique moyenne bien développée. Nombreuses taches rouilles sur les faces des agrégats.
Bonne porosité.
- 60 - 90 cm : Horizon gris moyen à gris-foncé, structure polyédrique moyenne, parfois à surstructure prismatique. On trouve fréquemment à ce niveau une structure grumeleuse "fondue" et la trace d'un important enracinement ancien - (cf. remarque p.36).
- 90 - 120 cm : Horizon gris-clair argileux à nombreuses taches rouilles. Structure polyédrique grossière bien développée.

Les nappes sont profondes (3,50 m environ en Mars 1984), non salées et de pH > 5

* Utilisation actuelle :

Les paysans y cultivent du riz pluvial. Les parcelles sont entourées de petites diguettes (H = 15 cm ≈) qui suivent à peu près la microtopographie légèrement ondulée.

La récolte de riz en 1983 a été presque totalement compromise par manque d'eau en fin de cycle végétatif.

* Aménagements

Ces sols sont tout à fait favorables à la riziculture, leur seul problème étant l'approvisionnement en eau (échaudage du riz à l'épiaison).

Ils ne sont pas concernés par un aménagement en bas de vallée. Peut-être une meilleure gestion de l'eau pourrait-elle être envisagée (au moment des fortes précipitations d'Août et Septembre). Ces sols peuvent également, en année sèche, être affectés à d'autres types de cultures moins exigeantes en eau.

. Classe d'aptitude culturale : R1.

Unité n° 2 : Cette unité se différencie de la première par la présence d'horizons profonds (90 cm et plus) contenant des fibres végétales brunes nombreuses, émettant une forte odeur de H₂S (oeuf pourri). Le fer et le soufre y sont à l'état réduit, le pH, supérieur à 4,5 in situ chute après réoxydation, la conductivité sur extrait 1/5 est supérieure à 2 mmhos/cm.

Ce sont d'anciens horizons de mangrove, enfouis sous un à deux mètres de colluvions.

. Exemple : Profil K 75 - Profondeur 110 cm et plus :

- pH sur extrait 1/5 : 3,57
- Conductivité sur extrait 1/5 : 3,5 mmhos/cm.

La nappe est ici de moins bonne qualité qu'en 1, impropre à l'irrigation.

* Utilisation actuelle :

Ce secteur de la vallée est actuellement inexploité (manque d'eau). Il était autrefois consacré au riz pluvial. Il y pousse une végétation peu dense de graminées.

* Aménagements : même situation que pour l'unité n° 1.

. Classe d'aptitude culturale : 2 n₂.

Unité n° 3 : Le profil type de cette unité est proche du précédent, avec principalement une conductivité sur extrait 1/5 nettement plus élevée, surtout en profondeur. Les horizons profonds sont semblables à ceux de l'unité précédente, le pH à 170 ayant chuté à 2,5 après réoxydation.

* Utilisation actuelle :

Comme pour l'unité n° 2 : riz pluvial abandonné et faible peuplement de graminées.

* Aménagements : Même situation que pour l'unité 1.

. Classe d'aptitude culturale : R₂ n₂ s

Unité n° 4 : Cette unité occupe une surface importante des hauts de vallée et est également représentée en bordure de basse vallée, lorsque les rizières forment une avancée sous la palmeraie.

Le profil argileux comporte toujours de nombreux caractères d'hydromorphie. La principale distinction avec les unités précédentes est due aux faibles valeurs de pH, notamment en profondeur. La conductivité sur extrait 1/5 des horizons de surface est assez hétérogène, pouvant localement dépasser 0,5 mmhos. Les nappes sont de mauvaise qualité et moyennement profondes de 2 à 3 m en Mars 1984.

* Utilisation actuelle : Même que 2 et 3.

* Aménagements : Il faut noter ici une microtopographie irrégulière (bosselée) à laquelle s'ajoutent des limites peu précises avec les terrasses sableuses de la palmeraie. Au voisinage de cette dernière, on rencontre des horizons sableux à faible profondeur.

. Classe d'aptitude culturale : R₂ ph s n₂ t.

Unité n° 5 : Cette unité, en haut de vallée, possède le même aspect de surface et fait l'objet de la même utilisation que l'unité précédente.

Profil type : K 20.

- 0 - 25 cm : Horizon gris foncé, argileux. Structure polyédrique anguleuse fine. Taches ocres rouilles sur les faces des polyèdres.
- 25 - 30 cm : Transition argilo-sableuse plus compacte que l'horizon supérieur.
- 30 - 70 cm : Sable blanc massif - nombreuses taches ocres.
- 70 - 110 cm : Sable brun-beige clair avec quelques raies argileuses apparemment plus organiques.
- 110 - 140 cm : Sable beige - nombreuses raies noires.
- 140 - 180 cm : Sable gris verdâtre - nombreux débris organiques fibreux et odeur de H₂S.
- 170 - 210 cm : Argile brunâtre. Débris organiques abondants sous forme de fibres blanches et de morceaux de bois. Forte odeur de H₂S.

On notera la présence, comme en 2 - 3 et 4, d'un horizon profond présentant les caractères d'un horizon de mangrove.

* Utilisation - Aménagements :

Le profil sableux rend ces sols peu propices à la riziculture en raison de leur faible capacité de rétention d'eau. Les trente premiers centimètres de sol argileux ne doivent pas être enlevés (pas de planage).

. Classe d'aptitude culturale : M₂ ph n₂.

Unité n° 6 : Cette unité, représentée dans le bas Ouest de la vallée, correspond à une zone topographiquement perturbée : de nombreuses petites buttes de quelques mètres de diamètre encombrant la vallée. Ce sont de buttes sableuses (cf. unité n° 8).

Le profil est argileux sur au moins 80 cm, puis on rencontre généralement le sable à partir de cette profondeur. L'ensemble du profil présente des caractères importants d'hydromorphie (taches d'oxydo-réduction), le niveau argileux est bien structuré : structure polyédrique argileuse moyenne à surstructure prismatique.

La nappe est assez proche : 150 cm en Mars 1984 pour le profil K 18.

La végétation de cette zone est constituée de hautes graminées, abondantes.

* Utilisation et aménagements

Cette zone n'est plus cultivée depuis le début de la sécheresse. Elle sert de pâturage aux troupeaux. La topographie irrégulière et l'abondance de petites buttes sableuses, ainsi que les valeurs faibles de pH justifient son abandon.

. Classe d'aptitude culturale : R₂ ph.

Unité n° 7 : Cette unité est représentée en bordure de vallée et correspond, d'un point de vue textural, à un mélange de matériaux fins argileux et de matériaux plus grossiers venant du plateau.

Le profil présente de nombreuses taches d'oxydo-réduction du fer. On rencontre généralement 40 premiers centimètres d'argile, puis un niveau sableux.

La texture redevient progressivement argilo-sableuse ou argileuse en profondeur.

Les conductivités sur extrait 1/5 sont faibles, mais le pH assez bas (généralement < 4,5)

Les nappes se trouvent vers 2 m en saison sèche (Mars 1984) mais remontent à moins de un mètre au coeur de l'hivernage.

* Utilisation :

Ces rizières sont cultivées en riz pluvial, le principal problème semble être le manque d'eau en fin de campagne qui explique leur abandon pour la campagne 1983. D'une façon générale, la texture sableuse rend ces sols peu favorables au riz en année sèche.

. Classe d'aptitude culturale : M₂ ph.

Unité n° 8 : Cette unité est représentée par des buttes sableuses, soit en milieu de vallée, soit en bordure. Ces buttes sont généralement occupées par des palmiers.

Le profil est sableux sur au moins 2 m, sauf 20 à 30 premiers centimètres argilo-limoneux. Cet horizon de surface, lorsque la végétation est décapée (piétinement des troupeaux) prend un aspect glacé de couleur bleutée. Il est alors très compact bien que peu dense.

Les horizons sous-jacents sont tous très marqués par des caractères d'hydromorphie.

Le pH chute généralement en profondeur, pouvant être inférieur à 3 dans la nappe. On note quelquefois parallèlement une augmentation de la conductivité dans les horizons profonds.

* Utilisation :

A l'heure actuelle, ces zones sont occupées par le palmier à huile et de hautes graminées utilisées pour confectionner le toit des cases. Elles ne font l'objet d'aucune culture.

Les unités n°s 9 et 10 sont équivalentes à l'unité 8 mais marquent des termes plus avancés de la salure. Les palmiers à huile et les graminées ont tendance à disparaître au profit d'une végétation halophyte.

. Classe d'aptitude culturale : Unité n° 8 : M₂ ph s

Unité n° 9 : M₂ ph s

Unité n°10 : M₂ s pH n₂

Unité n° 11 : Cette unité marque la limite entre les zones salées sulfatées acides de l'aval et la zone non salée en amont.

Le profil est entièrement argileux et très organique (couleur noire et toucher gras) sur 80 cm. Puis, de 80 à 120, on rencontre un horizon de pseudogley bien structuré - (structure polyédrique).

Enfin, à 120 se trouve, dans la nappe, un gley gris bleuté dégageant une forte odeur de H₂S.

Cette unité est déjà fortement affectée par la salure avec des conductivités sur extrait 1/5 supérieures à 2 mS/cm. D'autre part, l'ensemble du profil et particulièrement la nappe, sont riches en sulfates. Il est fréquent de trouver dans cette unité des pH in situ de nappes inférieurs à 3.

Profil analysé K 35 : cf. Tableau. 3

La végétation est composée de plantes halophytes, assez rares, et quelquefois de petites graminées rases, qui restent vertes durant toute la saison sèche lorsque la nappe est peu profonde.

Il est étonnant de constater que ces graminées puissent tirer partie d'une nappe dont le pH atteint parfois 2,4 in situ. La matière organique présente en quantité dans le profil, joue sans doute un rôle complexe de protecteur vis-à-vis de l'acidité et des toxicités qui en résulte.

* Utilisation :

Autrefois exploitées en rizières, les meilleures de la vallée selon les paysans, ces terres sont abandonnées.

. Classe d'aptitude culturale : R₂ ph s n₂.

Unité n° 17 : Cette unité correspond à une butte en bordure de vallée. On y rencontre le sable sous environ 80 cm d'argile.

Le pH est supérieur à 4,5 et la conductivité inférieure à 0,2 mS/cm sur l'ensemble du profil, ces sols ne connaissent donc ni problème de salure, ni problème d'acidité.

Ils sont actuellement cultivés en riz repiqué.

. Classe d'aptitude culturale R₁.

Unité n° 18 : Elle correspond aux profils sableux de haut de vallée, à très faible conductivité, de pH > 4,5. Ces profils sont peu marqués par l'hydromorphie.

Les nappes sont profondes et de bonne qualité.

Ex. : profil K 104 - nappe à 3,50 m. pH = 5,3 - E_c = 0,1 mS/cm.

* Utilisation :

En raison de la faible réserve en eau et de la profondeur des nappes (plus de 3 m), ces sols sont peu favorables à la riziculture. Leur exploitation est quasi abandonnée ces dernières années.

. Classe d'aptitude culturale : R₁.

Tableau 3 : PROFIL K 35

| Profondeur en cm | 0-10 | 10-35 | 35-50 | 50-70 | 70-90 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| ANALYSE MECANIQUE | | | | | |
| Argile % | 13,3 | 54,7 | 76,4 | 37,3 | 53,7 |
| Limon fin % | 40,6 | 24,1 | 12,3 | 13,4 | 17,8 |
| Limon grossier % | 1,9 | 3,9 | 2 | 7,3 | 9,5 |
| Sable fin % | 21,8 | 9,4 | 6 | 4,1 | 14,8 |
| Sable grossier % | 13,9 | 2,3 | 0,9 | 0,5 | 0,4 |
| Humidité | 7,9 | 5 | 3,2 | 1,6 | 2,9 |
| Total | 99,4 | 99,4 | 100,8 | 101,1 | 99,1 |
| MATIERE ORGANIQUE - SOUFRE - PHOSPHORE - pH | | | | | |
| Carbone % | 93,28 | 50,38 | 20,49 | 10,62 | 26,21 |
| Azote % | 4,9 | 4,18 | 1,64 | 0,57 | 1,09 |
| C/N | 19 | 12 | 12,5 | 19 | 24 |
| P ₂ O ₅ total % | 1,58 | 0,15 | | | |
| P ₂ O ₅ assimilable % | 1,35 | 0,16 | | | |
| S total % | | | | | |
| pH 1/2,5 eau | 4,3 | 3,8 | 3,6 | 3,5 | 3,5 |
| pH 1/2,5 KCl | 4,1 | 3,6 | 3,3 | 3,3 | 3,2 |
| BASES ECHANGEABLES ME POUR 100 G DE SOL | | | | | |
| Calcium | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | |
| Magnésium | 2,2 | 1,15 | 1,2 | 0,95 | |
| Potassium | 0,14 | 0,28 | 0,2 | 0,08 | |
| Sodium | 3,8 | 1,4 | 1,26 | 1,16 | |
| S | 7,14 | 2,88 | 3,16 | 2,59 | |
| T | 26,6 | 33,4 | 23 | 13,3 | |
| S/T = V % | 27 | 9 | 14 | 19 | |
| SELS SOLUBLES - EXTRAIT 1/5 | | | | | |
| Conductivité | 1,75 | 0,91 | 0,67 | 0,55 | 2,2 |
| pH | 4,6 | 4 | 4 | 4 | 3,7 |
| Calcium | 2,19 | 0,94 | 0,7 | 0,64 | 1,37 |
| Magnésium | 4,25 | 2,87 | 1,56 | 1,25 | 4,1 |
| Potassium | 0,16 | 0,10 | 0,12 | 0,09 | 0,26 |
| Sodium | 7,75 | 2,25 | 2,7 | 2,62 | 12,25 |
| Fer | - | - | - | - | 0,015 |
| Acidité totale | 1 | 2,8 | 1,6 | 0,84 | 1,4 |
| Cl | 9,65 | 3,15 | 3,03 | 3,35 | 13,7 |
| SO ₄ | 6,08 | 5,83 | 3,77 | 2,06 | 6,17 |

Tableau 4: P R O F I L K 34

| | | | | |
|------------------|------|-------|-------|--------|
| Profondeur en cm | 0-10 | 10-40 | 60-80 | 80-100 |
|------------------|------|-------|-------|--------|

ANALYSE MECANIQUE

| | | | | |
|------------------|------|------|------|------|
| Argile % | 19,4 | 68,8 | 10,7 | 36,7 |
| Limon fin % | 35,9 | 11,6 | 4,5 | 17,2 |
| Limon grossier % | 5,6 | 0,9 | 3,3 | 5,9 |
| Sable fin % | 28,7 | 11,7 | 74,6 | 34,3 |
| Sable grossier % | 2,8 | 2,2 | 4,8 | 1,8 |
| Humidité | 8,2 | 4,5 | 1,3 | 3,4 |
| Total | 98,6 | 99,7 | 99 | 99,3 |

MATIERE ORGANIQUE - SOUFRE - PHOSPHORE - pH

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Carbone ‰ | 49,82 | 24,72 | 18,97 | 29,89 |
| Azote ‰ | 4,1 | 1,88 | 0,53 | 1,03 |
| P ₂ O ₅ total ‰ | 2,4 | 0,95 | | |
| P ₂ O ₅ assimilable ‰ | 0,45 | 0,21 | | |
| S. total % | 39,22 | 14,22 | 8,3 | 33,8 |
| pH 1/2,5 eau | 4,1 | 4,2 | 3,9 | 3,7 |
| pH 1/2,5 KCl | 4 | 4 | 3,7 | 3,5 |

CAPACITE D'ECHANGE

| | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| C.E.C. mé/100 g | 33,3 | 23,2 | 11,3 | 17,5 |
|-----------------|------|------|------|------|

SELS SOLUBLES - EXTRAITS 1/5

| | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Conductivité | 43 | 17 | 10,5 | 21,5 |
| pH | 4,3 | 4,9 | 4,5 | 4,1 |
| Calcium | 11 | 3 | 2,25 | 4,06 |
| Magnésium | 92,5 | 23,5 | 16,5 | 35 |
| Potassium | 4 | 2,94 | 1,56 | 3,44 |
| Sodium | 362,5 | 130 | 80 | 180 |
| Fer | 0,034 | | | 0,74 |
| Acidité totale | 1,36 | 0,5 | 0,4 | 1,8 |
| Cl | 426,5 | 146,5 | 90 | 198,8 |
| SO ₄ | 50,4 | 16,62 | 11,31 | 27,76 |

Unité n° 25 : Comme l'unité n° 7, la texture est ici hétérogène au sein du profil, avec un horizon sableux intercalé entre deux horizons argileux. A partir de 80 cm, on rencontre un ancien horizon de mangrove caractéristique : fibres de palétuviers, consistance de beurre, odeur de H₂S.

Ex. : Profil K 11.

100 - 130 : pH = 3,25 sur extrait 1/5.

Ec = 4,3 mS/cm sur extrait 1/5.

. Classe d'aptitude culturale : M₂ s pH m₂.

REMARQUES SUR LES SOLS DE HAUT DE VALLEE -

1 - Dans la vallée de Koubalan comme dans celle de Tapilane, on trouve pour tous les profils argileux un ensemble d'horizons en profondeur, présentant les caractères suivants :

Profil K 19 :

(0 - 25 cm) : Horizon de surface gris moyen, limono-argileux, structure polyédrique anguleuse fine, quelques gaines ocres le long de rares racines de taille millimétrique.

(a) 25 - 40 cm : Horizon gris-foncé à noir, apparemment très organique. Structure grumeleuse plus ou moins fondue, nombreux revêtements de couleur rouille sur des chenaux racinaires de taille variant de 1 mm à 10 mm.

(b) 40 - 70 cm : Horizon gris-clair argileux. Structure polyédrique moyenne très nette. Traces d'un très important enracinement non actuel, très fortement gainé de rouille.

Cet ensemble d'horizons (a) et (b) se rencontre à des profondeurs variables dans la vallée. Cette profondeur augmente à mesure que l'on remonte vers l'amont allant de 25 cm (profil K 19) à 180 cm (profil K 31).

Leur morphologie et leur présence systématique nous incitent à les présenter comme un ancien niveau de base, l'horizon (a) étant un ancien horizon de type A₁. L'horizon (a) a généralement une limite supérieure ondulée et présente des poches de matériau pulvérulent, jaune pâle et sec, très léger. Ce matériau est très proche des cendres résultant de la combustion d'un mélange de terre et de débris végétaux, et que l'on peut observer à l'occasion des brûlis que provoquent les Diolas après un défrichement. Nous ne disposons toutefois d'aucune analyse pour préciser cette analogie.

2 - Nous avons été surpris de constater que les valeurs de pH in situ des horizons de surface des hauts de vallée - zone non atteintes par l'acidité, et actuellement productives pour le riz - dépassaient rarement 4,5. Les valeurs les plus fréquentes sont comprises entre 4 et 4,2.

Dans la littérature, ces valeurs sont considérées comme très basses pour une exploitation rizicole.

Nous avons pu vérifier par des séries de mesures en cours d'hivernage que ce pH in situ des horizons de surface ne remonte pas pendant les pluies, même après 500 mm de précipitation.

Dans ce type de situation - à ne pas confondre avec les sols de tannes - le

riz s'accommode donc très bien de pH in situ de l'ordre de 4,2.

Conclusion -

Le point important à souligner concernant les sols de haut de vallée est la progression de la salure et de l'acidité vers l'amont, à partir des nappes. Les Diolas se voient peu à peu contraints d'abandonner des parcelles à l'aval, et l'ensemble du bras ouest de la vallée de Koubalan est quasi-abandonné. Hormis ce problème, ces sols sont dans l'ensemble favorables à la riziculture, pourvu que leur approvisionnement en eau soit suffisant.

3.4.2. Le domaine des sols salés sulfatés-acides

Les tannes vifs représentent une part importante de la superficie du marigot de Koubalan, leur extension se faisant au dépend de la mangrove.

La quasi-totalité des unités correspond à des profils argileux, les distinctions interviennent au niveau de la salinité, du pH, de la profondeur de la nappe et de la matière organique.

La présence de sulfate dans les eaux de nappe n'est pas limitée aux zones de tannes à jarosite. Il semble que l'évolution des sols sulfatés acides ait atteint ici un terme très avancé, provoquant une contamination des nappes de l'ensemble des parties médianes et basses du marigot. C'est ainsi que l'on trouve des eaux sulfatées acides dans la nappe des zones réduites de bordure de marigot, ainsi que sous les premières terrasses de la palmeraie. Cette palmeraie est décimée par le phénomène dans les points les plus bas.

Unité n° 12 : Avec les unités 11, 16 et 15, l'unité n° 12 représente la zone de limite d'avancée du marigot. Elle est caractérisée par une teneur importante en matière organique de 5 à 9 % pour les horizons de surface, de couleur noire sur 60 à 90 cm.

Profil K 12 :

Surface : Moquette poudreuse de couleur brune, très salée, épaisseur 1 cm environ
Pas de végétation.

- 0 - 25 cm : Horizon gris moyen à gris-clair. Très faible densité, peu cohérent. Argilo-limoneux. Structure polyédrique anguleuse peu nette. Quelques gaines rouilles sur de rares anciens chenaux racinaires.
- 25 - 45 cm : Niveau noir apparemment riche en matière organique, à limite supérieure ondulée. Structure polyédrique, localement grumeleuse, très bonne porosité.
- 45 - 85 cm : Horizon gris-clair avec de nombreuses taches rouilles sur les faces des agrégats et en gaine le long d'anciens conduits racinaires. Horizon argileux, à structure polyédrique, plus grossière vers la basse.
- 85 - 110 cm : Horizon argileux gris-beige à consistance de beurre. Quelques anciens chenaux racinaires gainés de rouille et de jarosite.
- 110 et plus : Gley argileux gris-bleuté contenant de nombreuses racines de palétuviers en décomposition ; forte odeur de H₂S.
Nappe à 160 - pH in situ : 3,69.

Analyse physique et chimique : cf. Tableau 5

REMARQUE :

On retrouve dans la description du profil K 12 l'ancien niveau de base enfoui sous 25 cm de limons et signalé précédemment. Les unités 12 et 15 étaient avant 1969, les secteurs les plus productifs de la partie moyennée et basse de la vallée. Ils sont actuellement complètement abandonnés depuis plus de dix ans. Leur salure est très forte (de 5 mS/cm à plus de 10 mS/cm) et leur acidité également (pH in situ et sur extrait 1/5 compris entre 4 et 3).

L'unité n° 16 est moins riche en matière organique.

L'unité n° 15 diffère de l'unité n° 12 par la profondeur de la nappe : de 80 à 120 cm. La nappe est hypersalée : jusqu'à 90 mS/cm (rappel : conductivité de l'eau de mer \approx 45 mS/cm pour 35 g de sel par litre).

. Classe d'aptitude culturale : R3 S pH n2
Unité n° 15 : R3 S pH (ph) n1
Unité n° 16 : R4 S PH (ph) n1

Unité n° 13 : De texture sableuse sur plus de 100 cm, cette unité représente un cas extrême d'évolution en milieu sulfaté acide. Localisée en bordure de vallée, elle correspond à des buttes sableuses à peine marquées, très proches des zones de tannes argileux et donc présentant une limite texturale nette.

Profil type : K 42

- 0 - 25 cm : Horizon argilo-sableux gris-foncé, massif, porosité tubulaire importante de diamètre inférieur à 1 mm, quelques rares racines mortes, quelquefois gainées de rouille.
- 25 - 65 cm : Horizon sableux, gris-clair à blanc avec de très nombreuses taches ocres. Structure particulière. Frais à humide (Mars 1984).
- 65 - 105 cm : Horizon argilo-sableux, gris moyen. Structure polyédrique peu nette, lits de sable - Jarosite dans la macroporosité.

Si le profil K 42 possède un niveau argileux à la base, il est fréquent de trouver plus de 2 m de sable dans cette même unité, sans jarosite ni trace de végétation de mangrove.

Or, la composition des eaux de nappes montre que l'on a atteint ici un stade extrême avec une teneur en SO_4^{--} d'environ 80 mg/l et un rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$ inférieur à 1, parfois inférieur à 10^{-2} .

L'inversion du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$ (de valeur moyenne égale à 5 pour Koubalan) se fait très rapidement dans l'espace (20 à 30 mètres).

Le pH in situ des eaux de nappes sont inférieurs à 3, pouvant atteindre la valeur extrême de 2.

En surface, au pied de touffes disparates de graminées, se forment des granules blancs de saveur non salée, acide et amère. Ce sont des sulfates acides d'aluminium signalés au paragraphe 3.2.1.3.

. Classe d'aptitude culturale : M3 PH n2 s

Tableau 5 : P R O F I L K 12

| Profondeur en cm | 0-25 | 25-45 | 45-85 | 85-110 | 110-160 |
|------------------|------|-------|-------|--------|---------|
|------------------|------|-------|-------|--------|---------|

ANALYSE MECANIQUE

| | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Argile % | 16,8 | 76,2 | 73,8 | 72,8 | 52,1 |
| Limon fin % | 48,8 | 9,5 | 16,1 | 15,4 | 21 |
| Limon grossier % | 1,5 | 0,5 | 2,7 | 2,9 | 2,4 |
| Sable fin % | 19,3 | 4,7 | 1,8 | 1,4 | 18,4 |
| Sable grossier % | 5,1 | 2,9 | 0,8 | 0,2 | 0,8 |
| Humidité | 7,9 | 4,3 | 3,1 | 4 | 4,3 |
| Total | 99,4 | 98,1 | 98,3 | 99,2 | 99 |

MATIERE ORGANIQUE - PHOSPHORE - SOUFRE - pH

| | | | | | |
|---|-------|------|------|-------|-------|
| Carbone % | 50,6 | 17,8 | 7,63 | 15,82 | 32,82 |
| Azote % | 4,2 | 1,37 | 0,73 | 0,96 | 1,14 |
| C/N | 12 | 13 | 10 | 16 | 29 |
| P ₂ O ₅ total % | 3,5 | 0,64 | | | |
| P ₂ O ₅ assimilable % | 0,81 | 0,08 | | | |
| S total % | 21,25 | 3,74 | 4,15 | 12,41 | 41,56 |
| pH 1/2,5 eau | 3,8 | 3,8 | 3,6 | 3,5 | 3,1 |
| pH 1/2,5 KCl | 3,6 | 3,5 | 3,3 | 3,3 | 2,9 |

SELS SOLUBLES - EXTRAIT 1/5

| | | | | | |
|-----------------|-------|------|------|-------|-------|
| Conductivité | 11,5 | 4,3 | 5,2 | 15 | 20 |
| pH | 3,9 | 4,2 | 4,2 | 3,9 | 3,9 |
| Calcium | 2,56 | 1,56 | 1,31 | 3,75 | 4,44 |
| Magnésium | 23,25 | 5,4 | 5,5 | 25 | 31 |
| Potassium | 0,39 | 0,69 | 0,94 | 2,37 | 3,25 |
| Sodium | 75 | 32,5 | 40,5 | 120 | 166 |
| Fer | - | - | - | - | 2,35 |
| Acidité totale | 6,5 | 1,1 | 0,4 | 1 | 7,2 |
| Cl | 101,5 | 34,9 | 39 | 127,5 | 182,5 |
| SO ₄ | 7,98 | 6,34 | 8,68 | 19,02 | 33,93 |

Unité n° 14 : Morphologiquement semblable à l'unité 13, cette unité possède un rapport chlorures/sulfates supérieur à 1. La salure et ses manifestations sont classiques : moquette de poudre et cristaux de sel en surface.

Le profil est entièrement sableux et très marqué par l'hydromorphie. La salure et l'acidité y sont très fortes mais sont essentiellement apportées par les nappes.

. Classe d'aptitude culturale : M₃ S PH n₂.

Unités n°s 19 et 20 : Ces deux unités correspondent aux zones de tannes dont la nappe est à moins de 80 cm de profondeur.

L'unité 20 diffère de l'unité 19 par la présence de jarosite au sein du profil.

Description du profil K 60 (cf. Tableau 6) -

- 0 - 6 cm : Horizon brun-gris non taché, argileux, structure polyédrique fine.
- 6 - 26 cm : Horizon argileux gris-clair. Structure polyédrique fine. Taches ocre-rouille sur d'anciens conduits racinaires, très fins conduits gainés de rouge, parfois contenant de la jarosite.
- 26 - 90 cm : Horizon argileux. Saturé même en saison sèche. Couleur gris-beige. Nombreuses taches ocre-jaune et jarosite abondante dans d'anciens conduits racinaires centimétriques.
- 90 -105 cm : Horizon de gley gris-foncé, argileux, contenant des gravillons de couleur de H₂H. Nombreuses fibres de palétuviers en décomposition.
- pH in situ : pH de nappe in situ : 4,57
à 30 : 3
à 60 : 3,4
à 90 : 4,2.

La nappe est influencée par la marée : sa profondeur varie de 30 cm au cours d'un cycle.

Au cours des saisons, la nappe se trouve entre 0 (hivernage) et 90 cm de profondeur (fin de saison sèche).

Les horizons ont tous plus de 10 mS/cm de conductivité sur extrait 1/5, la nappe a une conductivité double de celle de l'eau de mer (cf. tableau analyses 6).

Au sein du profil, on peut observer une transformation continue depuis les horizons de gley où se trouvent les fibres de palétuviers en décomposition, jusqu'aux horizons de surface.

Les fibres de palétuviers sont brunes en profondeur, puis sont remplacées par des filets de jarosite plus haut dans le profil. Un peu plus haut, ces filets de jarosite sont gainés de rouille puis entièrement remplacés par des oxyhydroxydes de fer, qui prennent une teinte rouge vif en sommet de profil.

Nous n'avons pas trouvé de différence significative en pH ou conductivité entre les profils contenant de la jarosite et ceux, par ailleurs équivalents, n'en contenant pas. D'autre part, nous n'avons pas pu déterminer dans l'espace une loi de répartition de la jarosite. Aussi, les unités 19 et 20 figurent-elles comme une association sur la carte.

. Classe d'aptitude culturale : R₄ S N (PH) ph.

Tableau 6 : P R O F I L K 60

| Profondeur en cm | 0 - 6 | 6-25 | 25-90 | 90-110 | 110-130 |
|------------------|-------|------|-------|--------|---------|
|------------------|-------|------|-------|--------|---------|

ANALYSE MECANIQUE

| | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Argile % | 44 | 58,4 | 60,5 | 25,9 | 10,1 |
| Limon fin % | 57,2 | 16,4 | 17 | 12,7 | 10,7 |
| Limon grossier % | 12 | 7,1 | 5,2 | 4,6 | 6,6 |
| Sable fin % | 34 | 13,1 | 11,2 | 24,1 | 50,8 |
| Sable grossier % | 2,3 | 0,8 | 1,4 | 29,7 | 19,8 |
| Humidité | 3,4 | 3,9 | 3,8 | 2,2 | 1,1 |
| Total | 99,3 | 99,7 | 99,1 | 99,2 | 99,1 |

MATIERE ORGANIQUE - SOUFRE - PHOSPHORE - pH

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carbone ‰ | 6,92 | 3,81 | 9,07 | 8,74 | 3 |
| Azote ‰ | 0,46 | 0,38 | | | |
| C/N | 15 | 10 | | | |
| P ₂ O ₅ total ‰ | 0,43 | 0,3 | | | |
| P ₂ O ₅ assimilable ‰ | 0,01 | 0,01 | | | |
| S. total ‰ | 16,62 | 14,57 | 20,08 | 32,86 | 11,12 |
| pH 1/2,5 eau | 5,1 | 3,5 | 3,4 | 3,1 | 3,7 |
| pH 1/2,5 KCl | 4,8 | 3,3 | 3,2 | 2,9 | 3,4 |

CAPACITE D'ECHANGE

| | | | | | |
|-----------------|------|------|------|--|--|
| C.E.C. mé/100 g | 12,9 | 16,2 | 17,2 | | |
|-----------------|------|------|------|--|--|

SELS SOLUBLES - EXTRAITS 1/2,5

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Conductivité | 19,5 | 19,5 | 20,5 | 11 | 5,5 |
| pH | 5,3 | 3,9 | 3,3 | 3 | 3,7 |
| Calcium | 4,31 | 3,5 | 3,81 | 2,62 | 1,5 |
| Magnésium | 35 | 33,75 | 28 | 15,5 | 6,7 |
| Potassium | 3,12 | 2,31 | 2,81 | 1,62 | 1,12 |
| Sodium | 162 | 164 | 168,8 | 79 | 41,25 |
| Fer | | | 0,047 | 2,14 | 0,29 |
| Acidité totale | - | 0,72 | 1,3 | 2 | 0,86 |
| Cl | 180 | 186,3 | 191,3 | 91,5 | 45,5 |
| SO ₄ | 28,96 | 18,51 | 16,97 | 15,77 | 6,68 |

Unités n°s 21 et 22 : Ces unités, correspondant également aux zones de tannes, mais plus excentrées par rapport au marigot, diffèrent des unités 19 et 20 respectivement par la profondeur de la nappe (de 80 à 120 cm) et par une salure plus faible (de 5 à 10 mS/cm).
La texture est argileuse, avec parfois un niveau sablo-argileux en profondeur.

REMARQUE SUR LES ZONES DE TANNES :

- a) Nous n'avons pas différencié tannes vifs et tannes herbacés sur la carte de Koubalan, pour deux raisons :
- 1/ Les rares tannes herbacés sont à l'état de relique, la végétation (*Eleocharis mutata*) est décédée et nous avons pu vérifier au cours de l'hivernage 1984 qu'il n'y avait pratiquement pas de repousses en saison des pluies.
 - 2/ Les mesures de conductivité effectuées dans les deux situations : Tanne vif et tanne herbacé, ne nous ont pas permis, en saison sèche, de différencier ces zones (ni avec aucun autre paramètre).
- b) La structure de sols de tannes est généralement très nette, polyédrique anguleuse, et ce, jusqu'au niveau de la nappe. Généralement, ce type de sol a plutôt une structure massive ou dite "de beurre" en condition saturée. La bonne structuration est ici probablement due aux cycles de dessiccation renouvelés.
- . Classe d'aptitude culturale : R₄ S (PH) ph n₁.

3.4.3. Le domaine des sols potentiellement sulfatés acides

Ce domaine correspond aux zones où le soufre et le fer sont à l'état réduit. Il constitue une bande étroite en bordure de marigot.

Unité n° 23 : Profil type K 1 (sondage pelle à vase).

Surface craquelée en réseau polygonal, croûte blanche salée.

- 0 - 15 cm : Horizon argileux découpé en polygones bruns noirs à taches noires et contenant quelques fibres organiques brunes. Débit polyédrique anguleux.
- 15 - 60 cm : Horizon argileux brun-gris, saturé, structure de "Beurre", quelques fibres organiques de couleur rouille, forte odeur de H₂S (nappe à 30).
- 60 - 85 cm : Horizon argileux gris-brun-foncé contenant de nombreuses fibres organiques de couleur grise, quelques taches rouille.
- 85 - 115 cm : Idem - mais sans taches rouille.

Les pH in situ sont de l'ordre de 6, passant à 4 - 4,5 après séchage de l'échantillon.

Les profils de l'unité 23 contiennent peu de fibres organiques dans leur 60 à 80 premiers centimètres. La matière organique est déjà sous une forme évoluée, donnant une couleur brune caractéristique. Classiquement, le pH augmente en profondeur dans ce type de profil, en fonction de l'état d'oxydo-réduction des matériaux.

Fréquemment à Koubalan, le schéma est inversé : le pH diminue en profondeur bien que l'on se trouve dans des horizons réduits. Ceci est sans doute dû à une contamination par les nappes acides des tannes voisins.

D'autre part, au sein de l'unité 23, on peut fréquemment observer des caractères de réoxydation des 15 ou 20 premiers centimètres de sols, à la faveur de micro-variations topographiques. Le pH chute alors à des valeurs de l'ordre de 3,5 in situ.

La nappe a un pH voisin de 6; et est hypersalée (Ct_e > 80 mS/cm).

. Classe d'aptitude culturale : R₄ S (PH) N

L'unité 24 : est très riche en fibres organiques et correspond à un sol très peu évolué. Sa densité est très faible (= 0,8). Le pH varie de 6 à 6,4 in situ.

Conclusion

Les unités 23 et 24 sont des reliques des sols potentiellement sulfatés acides qui occupaient la majeure partie de la vallée. Traditionnellement exploités par les Diolas, ils ne le sont plus depuis 15 années en raison de la sursalure. La végétation naturelle de mangrove est presque totalement décimée. Ces sols subiraient une acidification brutale en cas d'exondation, en raison de leur richesse en sulfures.

. Classe d'aptitude culturale : R₄ S (PH) N

3.6. CONCLUSION

1 - Au niveau de l'étude pédologique

La vallée de Koubalan représente un terme très avancé de l'évolution des sols de mangrove par oxydation.

La sursalure, responsable en premier lieu du décès de la végétation, tend à se propager vers l'amont où l'on assiste à un développement des espèces végétales halophytes. La salinité des eaux de nappe augmente également latéralement par rapport à la vallée : les palmiers sont par endroits décimés. L'acidité des nappes se propage de la même façon, et contamine également les zones restées à l'état réduit.

Le phénomène de précipitation de sulfates acides d'aluminium constitue un cas extrême d'évolution. La brutale inversion du rapport chlorure/sulfates qui l'accompagne n'est pas expliquée. une séquence d'étude détaillée sur l'un des sites va prochainement être installée afin de préciser les conditions géochimiques du milieu.

2 - La situation du marigot vis-à-vis de la riziculture ; Conséquence sur son aménagement

a) Sursalure et acidification opèrent actuellement une véritable stérilisation du marigot, le rendant presque totalement abiotique : disparition des mollusques et crustacés, de la flore, dans certains cas même des poissons. On peut penser que l'activité microbiologique est également très compromise.

La toxicité de l'acidité vis-à-vis de la flore est un phénomène complexe. Dans les sites naturels tels que Koubalan, son effet est masqué par celui de la sursalure qui la précède et l'accompagne toujours.

Cependant, les taux d'aluminium rencontrés dans les eaux de nappes des tannes sont très élevés (jusqu'à 390 mg/l), ce qui représente une cause certaine de toxicité pour le riz. La toxicité due à l'acidité est donc probablement due davantage aux conséquences de cette acidité sur la composition des eaux, qu'à l'action directe des ions H^+ .

Parallèlement, on connaît mal l'action protectrice que peuvent avoir certains éléments vis-à-vis de ces toxicités. Ainsi, nous avons signalé la présence de matière organique abondante dans certaines unités : dans l'unité n° 11 où les nappes, relativement proches de la surface, sont très acides et peu à moyennement salées, de petites graminées vertes se développent toute l'année, s'accommodant de pH inférieurs à 3 dans une nappe à 90 cm de profondeur.

La matière organique peut avoir notamment un rôle complexant vis-à-vis des ions Al^{3+} .

- b) Classiquement, lorsque l'on parle des sols de mangrove, la première recommandation est d'éviter de les exonder, pour ne pas déclencher le processus d'acidification.

C'est dans cet esprit que sont réalisés de nombreux ouvrages tels que celui de la vallée de Guidel en Casamance.

La situation est ici tout à fait différente puisque la quasi-totalité des sols sont acidifiés. Le peu de surface potentiellement sulfatée acide est en bordure du marigot et constitue un secteur d'exploitation ingrate, actuellement interdite par la sursalure.

Il n'y aurait donc pas de conséquences négatives à réaliser une digue empêchant définitivement l'entrée des eaux saumâtres du marigot.

Un tel ouvrage permettrait d'autre part d'évacuer peu à peu la salure qui gagne actuellement sur les terres rizicoles.

La solution d'un ouvrage barrant l'accès de la vallée aux eaux saumâtres et permettant l'évacuation des excédents de pluie en hivernage, semble être la seule offrant un espoir d'amélioration de l'aptitude rizicole de la vallée, les problèmes qui restent un suspens sont les suivants :

- Quelle sera la durée (en nombre d'hivernages) nécessaire à un dessalement de la vallée.

Sur ce point, on peut penser que les résultats seront tout à fait appréciables après un à deux hivernages, suivant la qualité de ces derniers. L'effet se fera notamment sentir dans les zones de progression actuelle de la salure : protection de la palmeraie, protection des rizières de haut de vallée.

- Le facteur le moins connu est celui de la durée de récupération des zones de tanne par élimination de l'acidité et des toxicités qui lui sont associées.

On ne peut, à l'heure actuelle, se prononcer sur ce point. Un programme de recherche a été lancé cette année par l'équipe ORSTOM de Dakar, sur ce thème. Il doit envisager et tester toutes les méthodes de récupération pratiquement réalisables dans le contexte local (amendements organiques, apports de coquillages, diverses méthodes d'irrigation, etc...).

PREMIERE PARTIE :

A N N E X E S

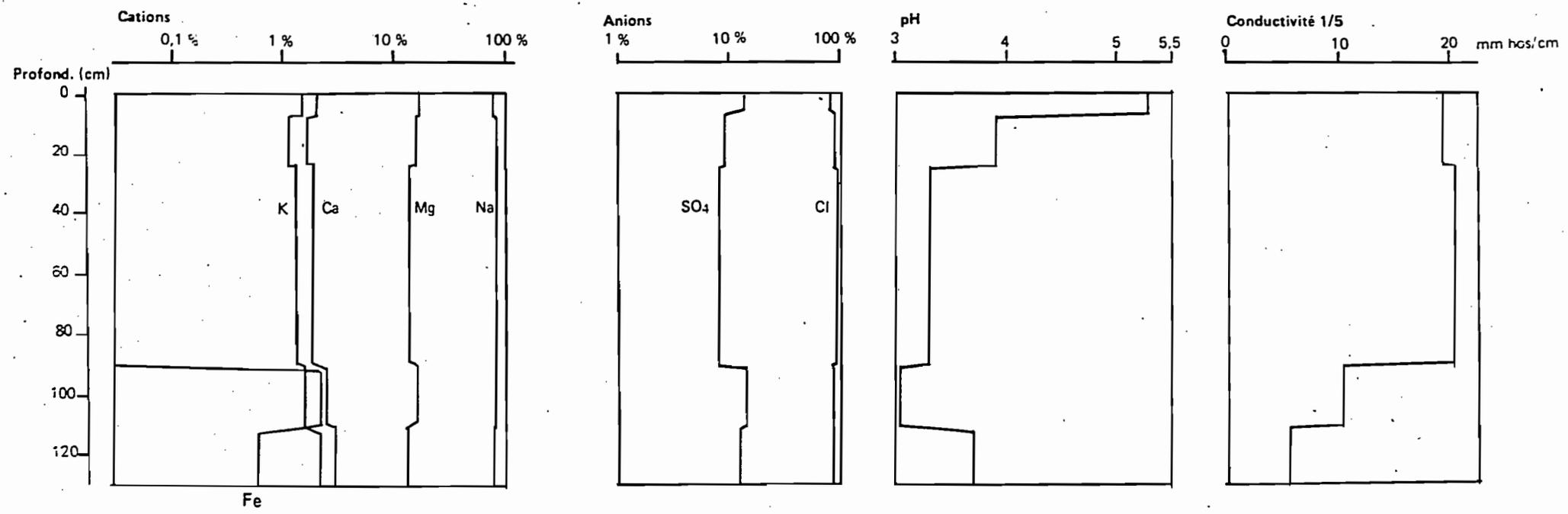


Figure 10 Profil K 60 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

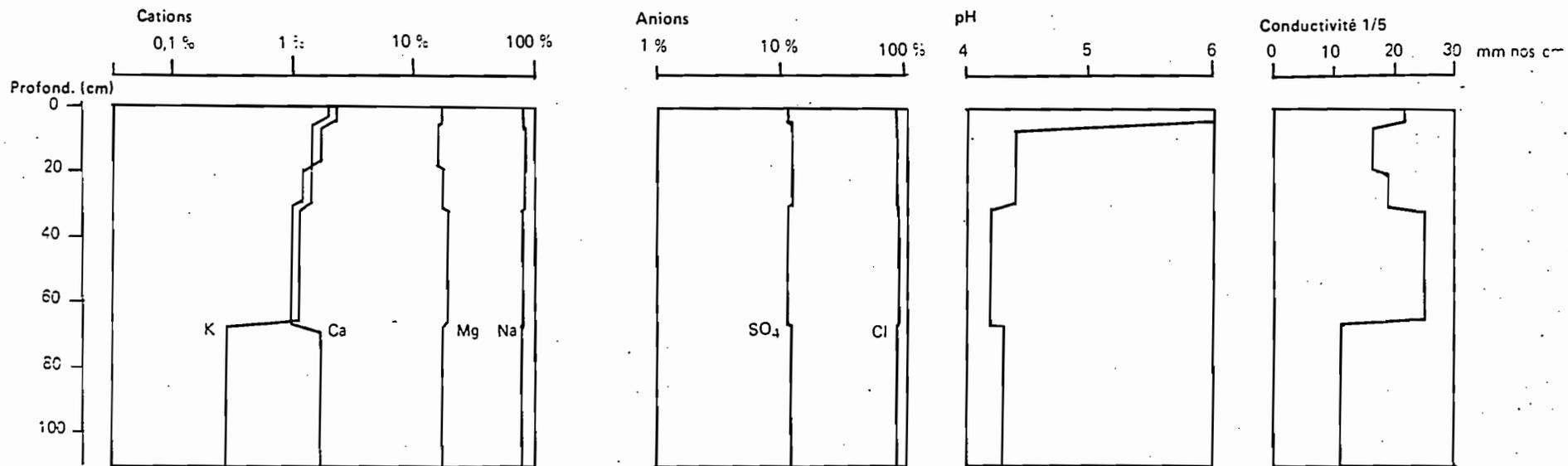


Figure 11 Profil K 61 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

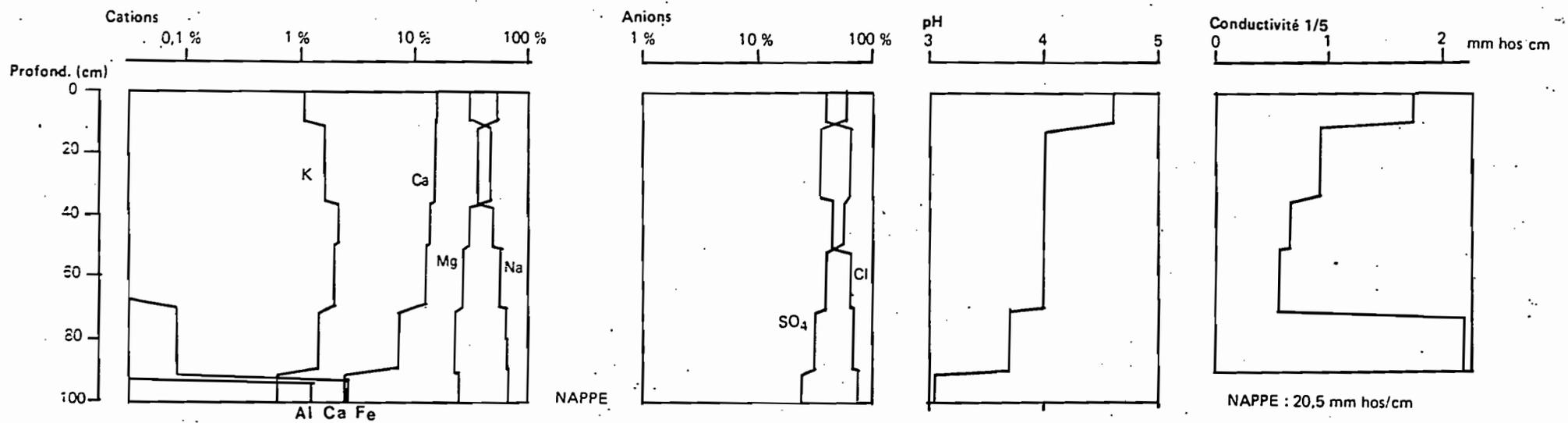


Figure 12 Profil K 35 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5 et dans la nappe

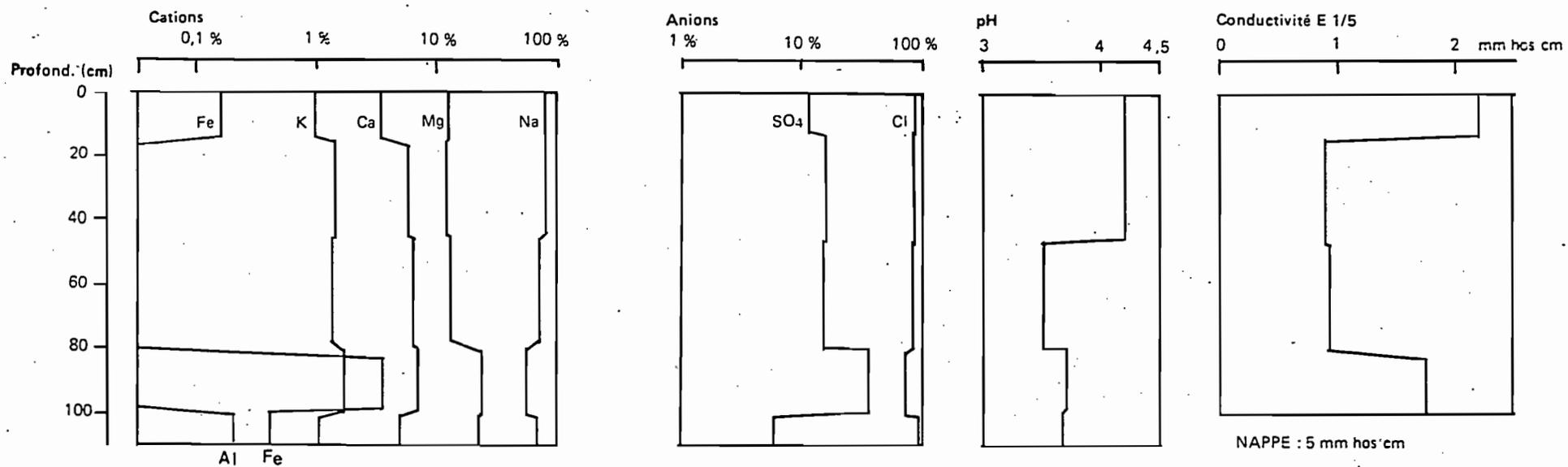


Figure 13 Profil K 8 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5 et dans la nappe

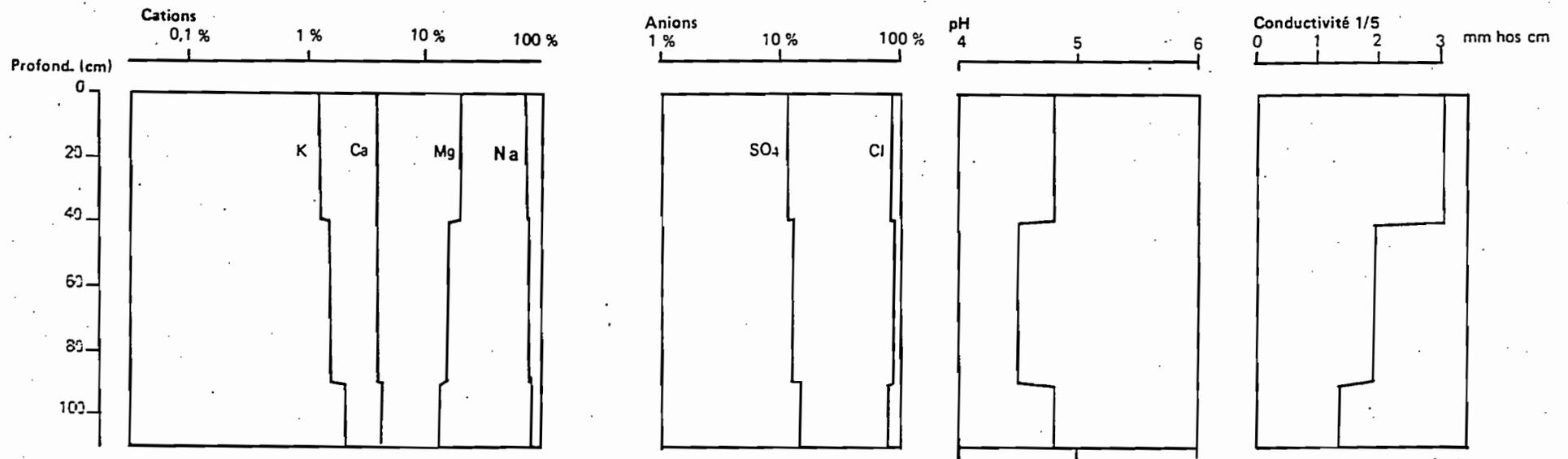


Figure 14 Profil K 62 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

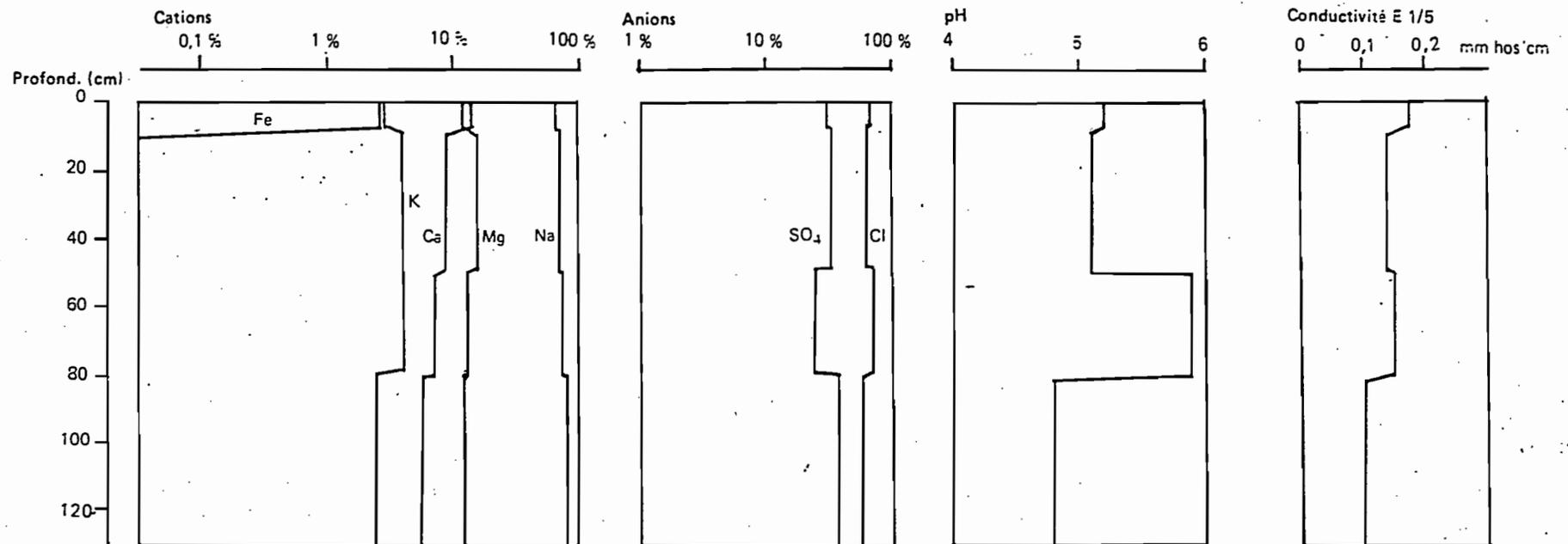


Figure 15 Profil K 63 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

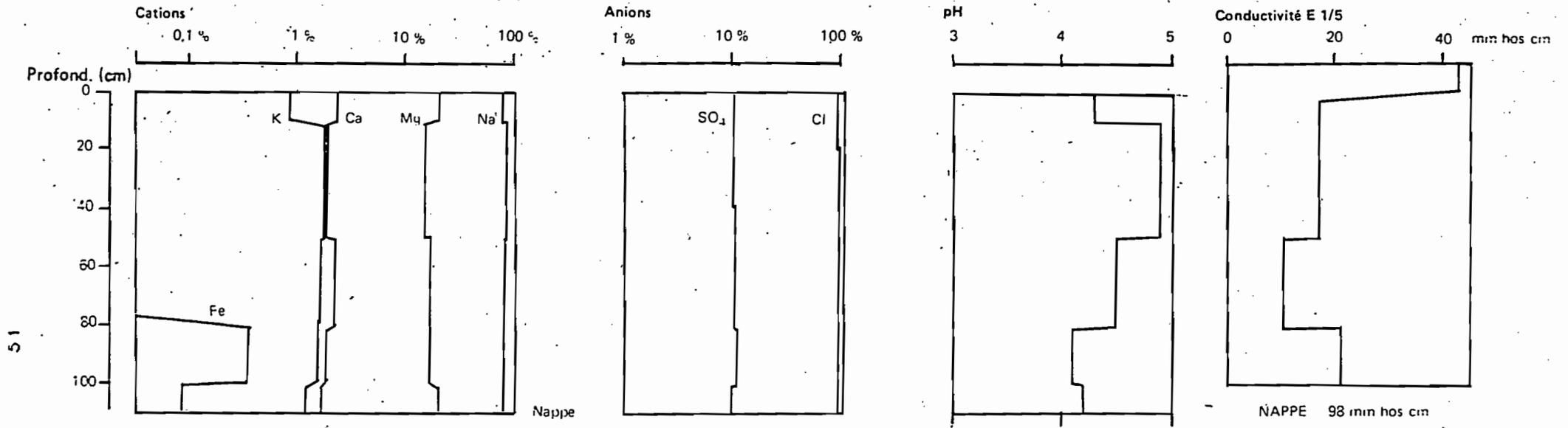


Figure 16 Profil K 34 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5 et dans la nappe

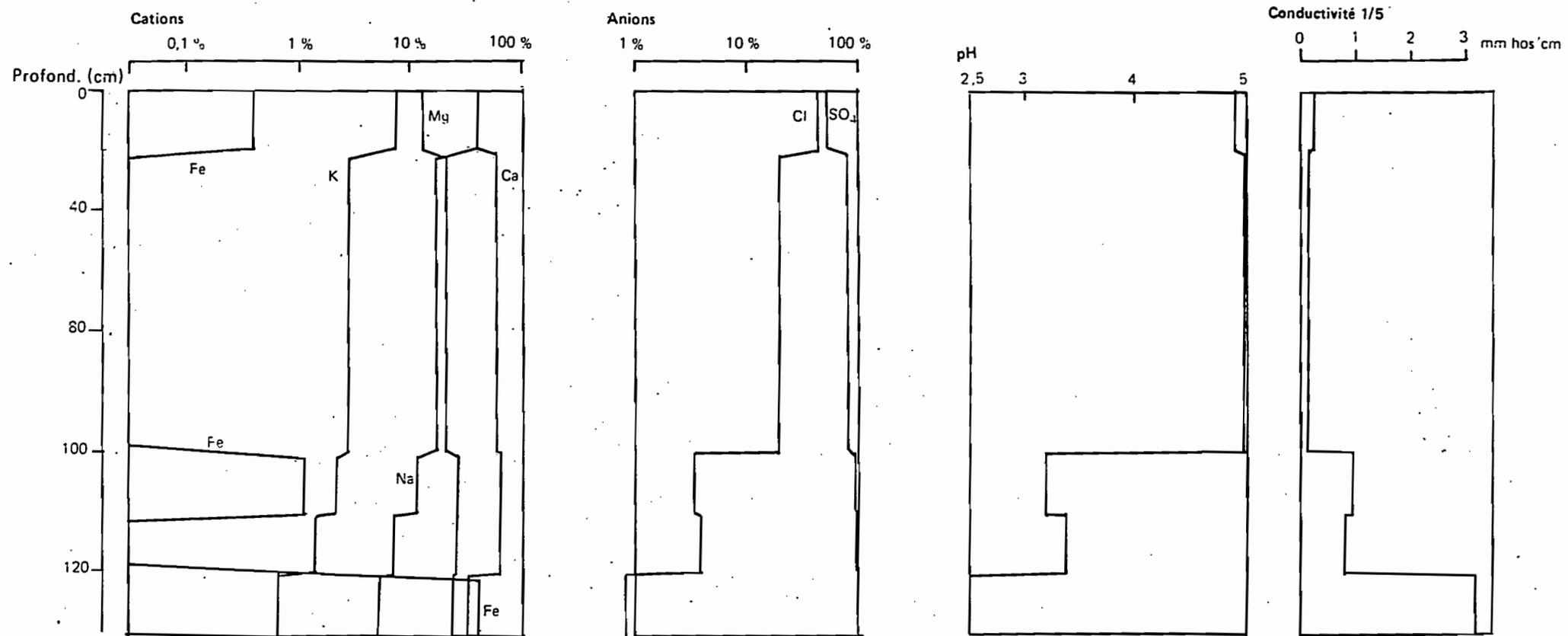


Figure 17 Profil K 22 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

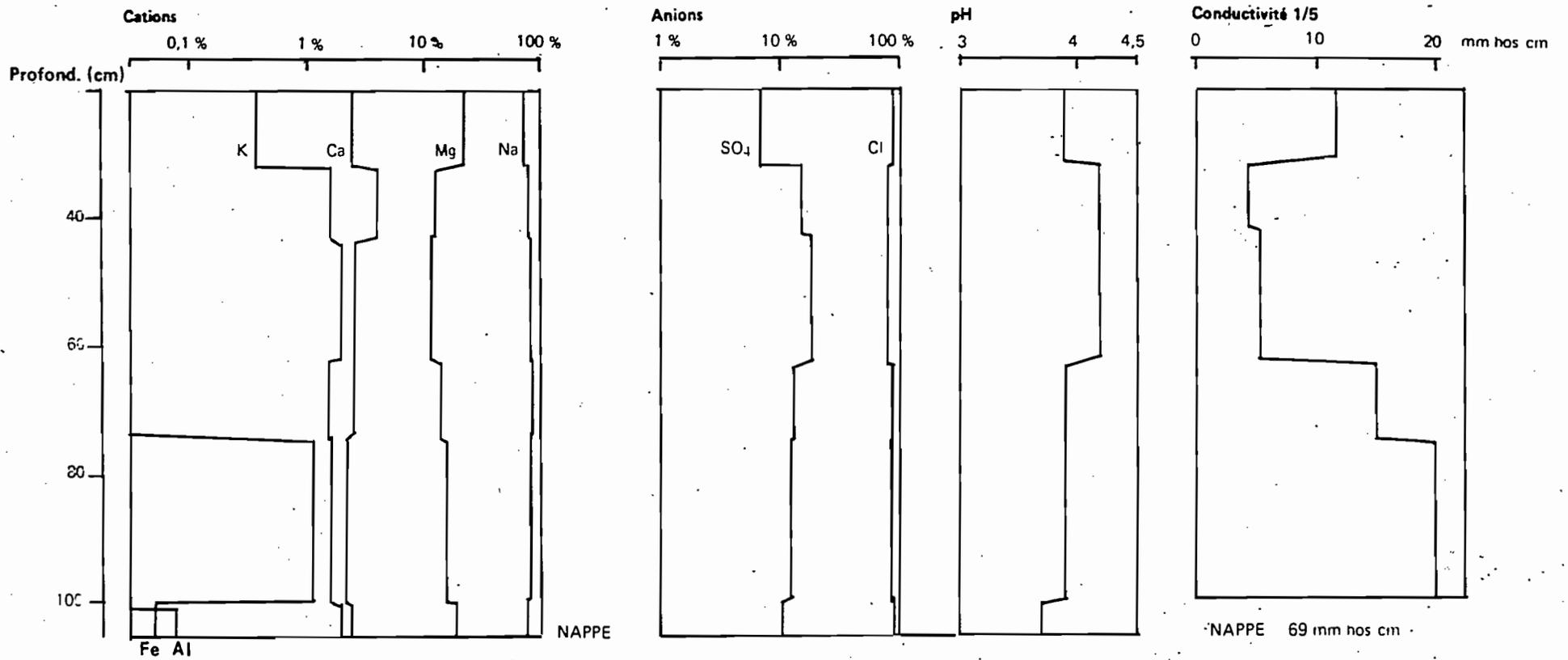


Figure 18 Profil K 12 Distribution des ions, pH et conductivité dans les extraits 1/5

DEUXIEME PARTIE :

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DU PH ET DE LA CONDUCTIVITÉ D'UN SOL DE TANNE

I - INTRODUCTION

La réalisation de la carte pédologique de la vallée de Koubalan nous a posé quelques problèmes lorsqu'il a fallu décider de limites - en conductivité ou pH - pour définir des unités.

Si nous avons essayé de fixer ces limites en fonction de seuils naturellement mis en valeur sur le terrain, un certain nombre de questions restaient posées.

- a) Dans quelle mesure, lorsque les bornes d'un intervalle de pH - ou de conductivité - sont très proches (cas d'une étude cartographique à grande échelle) - peut-on prétendre caractériser une unité vis-à-vis de ce paramètre, avec - bien souvent - au maximum trois profils dans une même unité.
- b) Dans quelle mesure la limite pédologique que l'on trace correspond-elle sur le terrain à une variation du paramètre mesuré. En d'autres termes, quelles distances séparent les courbes d'isovaleurs de ce paramètre au niveau de la limite, quand le tracé même de la limite implique une transition brutale pour l'utilisateur de la carte.
- c) La répartition dans l'espace des valeurs mesurées obéit-elle à une loi (variable structurée) ou bien est-elle aléatoire.

D'autre part, un programme de recherche lancé par l'équipe de Dakar sur l'évolution des sols salés sulfatés acides requièrait la caractérisation détaillée d'un tanne de la vallée de Koubalan, objet de l'étude.

Toutes ces raisons nous ont conduit à effectuer une étude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne du marigot de Koubalan afin de caractériser le comportement de ces paramètres à l'intérieur d'une unité pédologique de la carte, et à la transition entre deux unités pédologiques.

II - LIEU DE L'ETUDE - METHODE DE TRAVAIL - PARAMETRES MESURES

- a) Le site choisi est le tanne qui se trouve sur la rive ouest du marigot, immédiatement en amont de la route qui marque la limite inférieure de la zone cartographiée (piste de Koubalan). La parcelle d'étude est orientée E-W et fait 200 m x 150 m. (Plan : cf. Fig. 1b).
La limite externe de la carte pédologique traverse la parcelle du nord au sud en y = 134 m (Point n° 57).
La partie ouest de la parcelle correspond à une terrasse de l'unité n° 7. La partie est a été cartographiée en deux zones : unités n°s 20 et 21 qui correspondent toutes deux aux sols sulfatés acides à jarosite, la distinction se faisant sur les valeurs de conductivité.
La cartographie dans ce secteur se basait sur une séquence de 4 fosses : 2 sur la terrasse et une dans chaque unité du tanne.
Sur ces échantillons, ont été effectuées des mesures de pH et conductivité

sur extrait 1/5. La mesure du pH sur extrait 1/5 pose le problème de la réoxydation des échantillons au cours du séchage, et donc de la chute du pH.

Les échantillons ont donc tous été séchés et tamisés dans le même temps de façon à ne pas créer une hétérogénéité due au traitement de l'échantillon et non à sa nature.

b) Protocole de mesure du pH et de la conductivité

1/ Les échantillons sont tamisés à 2 mm - sacs pris au hasard - 40 g de sol sont mis en contact avec 200 ml d'eau - et agités par retournement sur agitateur rotatif pendant 1 h dans 2 flacons de 500 ml laissés au repos pendant \approx 4 h puis réagités à la main et laissés au repos dans la même pièce que le pH-mètre et le conductivimètre pendant \approx 14 h. Ces manipulations ont été faites par le même technicien 2 séries de 20 échantillons par jour.

2/ Les mesures de C.E. et de pH ont donc été effectuées le lendemain de la mise en contact, par le même technicien.

III - EXPLOITATION DES RESULTATS - LA THEORIE DES VARIABLES ALEATOIRES REGIONALISEES

Cette théorie développée par J. MATHERON, à l'Ecole des Mines de Paris s'adapte bien à l'étude de la plupart des paramètres du sol.

On appelle variable régionalisée, une variable caractérisant un phénomène se déplaçant dans l'espace (ou le temps...) et y manifestant une certaine structure.

1) La théorie des variables aléatoires régionalisée (V.A.R.)

On pourra consulter entre autres résumés de cette théorie les articles de J.P. DELHOMME (Application de la théorie des V.A.R. dans les Sciences de l'Eau, Bull. du BRGM, Section III, n° 4 - 1978, pp. 341-375) ou Ph. MEROT et C.GASCUEL-ODOUX (Etude du transfert de l'eau dans les sols : traçage isotopique et approche géostatistique - Colloque Franco-Polonais - Sept. 1983).

On considère la variable régionalisée comme une fonction aléatoire $Z(x)$. La fonction aléatoire étant une variable aléatoire à une infinité de composantes, correspondant chacune à un point de l'espace étudié.

On prend ensuite les hypothèses suivantes :

a) L'espérance mathématique est constante (stationnité d'ordre 1).

$$E (Z (x + h) - Z (x)) = 0 \text{ quel que soit } h.$$

b) L'accroissement $Z (x + h) - Z(x)$ a une variance indépendante de x

$$\text{VAR} (Z(x + h) - Z (x)) = 2 \gamma (h)$$

soit, dans le cas de stationnarité d'ordre 1 :

$$E ((Z(x + h) - Z(x))^2) = 2 \gamma (h)$$

Cette deuxième hypothèse est l'hypothèse intrinsèque. La fonction γ est appelée demi-variogramme, $2 \gamma (h)$ est l'accroissement quadratique moyen entre 2 points distants de h .

Ce variogramme permet dans un premier temps d'étudier certaine caractéristique de la variabilité spatiale.

2) Estimation du variogramme

L'estimation du variogramme se fait à partir de couples de points expérimentaux qui sont ordonnés par classes de distance (h).

On calcule le variogramme par la formule suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i+h) - Z(x_i))^2$$

N(h) nombre de couples de points distants de h

On trace ensuite le graphe de $\gamma(h)$

3) Analyse du graphe

Nous reprendrons ici J. DELHOMME :

- Le graphe de cette fonction présente normalement le comportement suivant :
- il passe par l'origine, les écarts étant évidemment nuls pour $h = 0 : \gamma(0) = 0$;
 - il croît ensuite, car les valeurs d'un phénomène diffèrent statistiquement de plus en plus (dans le cas général) à mesure qu'augmente la distance entre les points considérés.

Cette croissance, plus ou moins rapide, caractérise ainsi d'une manière statistique la façon dont se détériore l'information apportée par une mesure ponctuelle quand on s'éloigne de ce point connu.

L'examen du comportement du graphe de $\gamma(h)$ est donc particulièrement important ; car le variogramme donne une description synthétique de la structure du phénomène étudié et permet en outre la liaison entre cette structure et la précision avec laquelle pourront être résolus les différents problèmes d'interpolation et d'estimation posés. On étudie en particulier avec soin le comportement au voisinage de l'origine (c'est-à-dire aux faibles distances) et à l'infini (c'est-à-dire aux grandes distances).

Comportement à l'origine

Il traduit la continuité de la V.R. Par ordre de régularité décroissante, on distingue classiquement quatre types (fig. 2b) :

- i) Allure parabolique : caractérise une variable extrêmement régulière (dérivable en moyenne quadratique).
- ii) Allure linéaire : correspond à une variable moins régulière qu'en i) (continue en moyenne quadratique mais non dérivable).
- iii) Discontinuité à l'origine (effet de pépité) : signifie que la variable est très irrégulière (non continue en moyenne quadratique). Deux points distincts, mais très proches, présentent encore un écart, de variance au moins égale à l'effet de pépité C.

Le terme « effet de pépité » tire son origine des gisements d'or pépiti-ques, où la teneur en or varie considérablement selon que le point se trouve à l'intérieure ou à l'extérieure d'une pépité. Le terme a été conservé pour désigner cette discontinuité du variogramme qui peut être due :

- soit à une microrégionalisation d'échelle très inférieure à l'espacement des données,

- soit à des erreurs de mesure,

sans qu'il soit possible de discerner à priori la part respective de ces deux causes.

iv) Aspect plat (effet de pépite pur) : correspond au cas aléatoire pur. $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont sans corrélation quelle que soit leur distance h non nulle. Ceci est le cas limite de l'absence totale de structure, qui était précisément l'hypothèse faite sur les résidus dans la méthode des moindres carrés.

Outre cet examen du comportement du variogramme au voisinage de l'origine, on étudie également son comportement aux grandes distances.

Comportement à l'infini

Contrairement aux fonctions de covariance (ou de corrélation) qui demeurent nécessairement bornées, le variogramme peut, lui, continuer indéfiniment à croître. Mais il peut aussi se stabiliser autour d'une valeur limite, appelée «palier». La distance à laquelle ce palier est atteint est appelée «portée»; elle renseigne sur l'extension de la zone d'influence d'un point expérimental. Aux distances supérieures à la portée, les corrélations sont nulles.

On pourrait songer à pousser plus loin l'interprétation d'un variogramme tiré de données expérimentales, en essayant d'expliquer chacune des fluctuations apparentes du graphe. Si certains phénomènes présentent effectivement des périodicités, des structures-gigognes (superposition de variations d'échelles différentes), ou des effets de trou (existence de corrélations négatives dues à la présence de zones «riches» entourées de zones «pauvres»), la plupart du temps, ces fluctuations sont simplement dues à ce que les différentes valeurs de $\gamma(h)$ calculées ne sont en fait que des estimations, obtenues parfois avec un petit nombre de couples.

De-là la pratique courante d'ajuster aux variogrammes expérimentaux des modèles théoriques simples, qui seuls, d'ailleurs, garantissent la cohérence mathématique nécessaire pour les calculs ultérieurs.

4 - Déroutement des calculs

Dans un premier temps, nous calculons pour un paramètre donné, des variogrammes "directionnels" en ne prenant en compte que les couples de points orientés suivant la direction retenue.

La comparaison des différents variogrammes obtenus pour différentes directions, nous permet, dans le cas d'une dérive spatiale du paramètre (anisotropie du milieu), d'en identifier la direction (cf. Fig. 4b) : la courbe la plus parabolique indiquant la direction de plus forte dérive. Il y a alors lieu de calculer cette dérive ($m(x)$) de façon à travailler non plus sur les valeurs de la variable $Z(x)$ mais sur les résidus $Z(x) - m(x)$ afin de satisfaire à l'hypothèse a) (stationnarité d'ordre 1). Cette opération peut être réalisée par itérations successives.

On peut alors, une fois la dérive supprimée, calculer le variogramme sur l'ensemble des bipoints expérimentaux. A partir de ce variogramme brut, on ajuste ensuite une courbe théorique par régression.

Nous avons réalisé l'ensemble des programmes nécessaires à ces divers calculs sous forme de menu conversationnel, sur le GOUPIIL 3 version Flex 9 du Centre de DAKAR. Ces programmes sont accessibles à tout utilisateur et ne nécessitent aucune connaissance informatique. Ils peuvent donc être réemployés par tout utilisateur disposant d'un GOUPIIL ou d'un micro-ordinateur équipé d'un langage BASIC au format FLEX.

R E S U L T A T S

1 - LES VALEURS DE CONDUCTIVITE

La Fig. 5b donne le plan de la parcelle avec les valeurs de conductivités obtenues à 40 cm.

La Fig. 1b donne le plan de la parcelle avec les valeurs de conductivités à 70 cm.

1.1. Conductivité à 70 cm

La Fig. 3b donne un plan de la parcelle avec les moyennes et écarts-types des valeurs de conductivité, pour l'ensemble de la parcelle (au centre) et pour les parties Est et Ouest d'autre part. La limite en $y = 134$, correspond à la limite tanne/terrasse.

Il apparaît immédiatement aux vues des figures 1b et 3b que la limite pédologique est tout à fait confirmée par le résultat des mesures. Les valeurs passent brutalement de $E_c > 10$ mS à $E_c < 1$ mS en quelques mètres.

La Fig. 3b qui représente les valeurs de conductivité des points expérimentaux projetés sur l'axe y (Est-Ouest) illustre bien la brutalité de la transition. En revanche, on voit ici que la délimitation des unités 20 et 21 ne se justifie pas.

En second lieu, on peut observer que les écarts-types, sont très différents selon que l'on se trouve sur la terrasse (partie Est) ou sur le tanne.

- Terrasse : Ecart-type 0,19 soit 28 % de la moyenne.

- Tanne : Ecart-type 6,28 soit 66 % de la moyenne.

Le tanne apparaît d'emblée avoir une structure différente de celle de la terrasse, comportant une très forte hétérogénéité.

1.2. Conductivité à 40 cm - (Cf. Fig. 5b et 7b).

Les résultats des mesures conduisant aux mêmes conclusions qu'au paragraphe précédent, à ceci près que le partage du tanne en deux unités (20 et 21) se trouve ici davantage justifié, avec une transition non négligeable entre $E_c < 1$ mS et $E_c > 10$ mS (de $y = 65$ à $y = 88$).

1.3. Les variogrammes

Les variogrammes ont été tracés lorsque l'on disposait d'au moins 17 couples de distance par x pas de calcul, afin de s'assurer d'un minimum de précision des calculs.

1.3.1. Conductivité à 70 cm

La Fig. 4b représente les variogrammes obtenus selon les quatre axes :

- N - S (x)
- E - W (y)
- SE - NW (x-y)
- SW - NE (x+y)

et met en évidence une dérive de direction y.

La parcelle (Fig. 6b) étant nettement divisée en 2 lots différents, nous avons travaillé uniquement sur les prélèvements effectués dans le tanne (57 points).

Nous avons alors ajusté et filtré une dérive linéaire (Fig. 8b).

La Fig. 9b représente le variogramme brut des résidus selon les quatre directions: on peut constater que la dérive a bien été supprimée (les quatre variogrammes sont superposés).

Nous avons alors tracé le variogramme brut des résidus, toutes directions confondues, et une courbe ajustée (Fig. 10b).

Ce variogramme est d'aspect pépitique pur et correspond donc au cas aléatoire pur.

A 70 cm, en l'absence de dérive, on a donc une variable sans aucune structure, avec une variance à très faible distance (moins de 6 m) supérieure ou égale à 30.

1.3.2. Conductivité à 40 cm

Nous avons travaillé sur les 34 points de la partie Ouest du tanne, afin de se placer dans des conditions similaires au paragraphe précédent.

On obtient un variogramme des résidus similaire au précédent, (Cf. Fig. 11b) mais de variance moins élevée : environ 20. La courbe obtenue est moins significative, car tracée sur un trop petit nombre de points.

1.4. Conclusion

1.4.1. La conductivité sur extrait 1/5 mesurée dans le sol de tanne de Koubalan apparaît donc être une variable aléatoire pure, sans structure

La corrélation entre deux points de mesure n'augmente pas lorsque la direction entre ces points diminue, et ce, même pour des distances de quelques mètres.

A très faible distance (moins de 1 m), on peut cependant penser qu'apparaîtrait une corrélation entre les points de mesures (aspect sphérique du variogramme à l'origine).

L'hétérogénéité à faible distance correspond à un écart-type représentant plus de 50 % de la valeur moyenne.

Cette hétérogénéité peut être associée à une très grande hétérogénéité des humidités pondérales mesurées au cours de la même expérimentation.

Précisions qu'au cours des sondages, nous avons pu mettre en évidence une remarquable homogénéité morphologique des profils du tanne étudié (cf. profil K60, Première partie).

1.4.2. Les conséquences de ces faits sont, pour le pédologue, multiples et dépendent de l'objectif qu'il s'est fixé

- Au cours d'une cartographie, il apparaît qu'une seule mesure de conductivité ne saurait caractériser vis-à-vis de ce paramètre, une unité de sol de tanne, à moins d'adopter des bornes très larges.

En revanche, quelques mesures, même à faible distance (≈ 5 m) devraient permettre de caractériser plus précisément les bornes de variation de la variable aléatoire.

- Pour caractériser une parcelle, il y a lieu de réaliser également un certain nombre de mesures de façon à définir la variable aléatoire, puisque même à l'échelle d'une parcelle, les mesures ne sont pas plus corrélées que dans le cas précédent.
- Si les mesures de conductivité doivent permettre de caractériser une évolution relative du paramètre (par exemple dessalement au cours d'un hivernage) ou d'étalonner une électrode de mesure in situ, il convient de réaliser les prélèvements aussi près que possibles (1 m environ) les uns des autres, faute de quoi, l'interprétation des mesures sera totalement compromise par l'hétérogénéité des situations de départ.

De prochains calculs, réalisés non plus sur la conductivité de l'échantillon, mais sur la composition de la salure, devront permettre de caractériser cette dernière de manière qualitative dans l'espace.

Précisons enfin que les résultats obtenus ici ne concernent que le tanne de Koubalan. Des calculs sont actuellement effectués à partir d'échantillons provenant de tannes d'autres marigots de Basse-Casamance, ils permettront de savoir si la structure d'un sol de tanne (vis-à-vis de la conductivité) est-elle même hétérogène d'un tanne à l'autre...

2 - LES VALEURS DE pH

2.1. Résultats

Les Fig. 12 b et 14 b représentent les valeurs de pH mesuré à 40 cm et leurs moyennes et écarts-types.

Les Fig. 13b et 15 b correspondent aux pH mesurés à 70 cm.

On peut constater que la transition entre tanne et terrasse est peu nette.

Les valeurs de pH sont par ailleurs moyennement dispersées avec un écart-type d'environ 0,5 unité pH.

Les variogrammes nous renseignent sur le comportement spatial de cette hétérogénéité.

Les Fig. 16b et 17 b nous montrent les variogrammes bruts et leurs courbes ajustées. La parcelle ne présentait - aux vues des variogrammes - pas de dérive. Le calcul a donc pu être réalisé sur l'ensemble de la parcelle, tanne et terrasse confondus. Ce qui implique que, vis-à-vis du calcul des variogrammes, la séparation de la parcelle en deux unités de pH différent, ne s'impose pas.

L'aspect des variogrammes calculés à 70 cm et à 40 cm de profondeur est tout à fait identique. A l'origine, on note un effet de pépité correspondant à une variance de 0,2 soit un écart-type de $\approx 0,45$ unités pH. Et ce, pour des distances de moins de 1 m. L'écart-type calculé pour l'ensemble de la parcelle est donc presque conservé lorsque les distances entre les points ne sont que de 1 m.

Ensuite, le variogramme croît jusqu'à ≈ 75 m, indiquant une certaine structure du paramètre, puisque l'information apportée par un point de mesure se détériore lorsqu'on s'en éloigne.

A partir de ≈ 75 m environ, le variogramme est plat : la variable est devenue aléatoire.

2.2. Conclusion

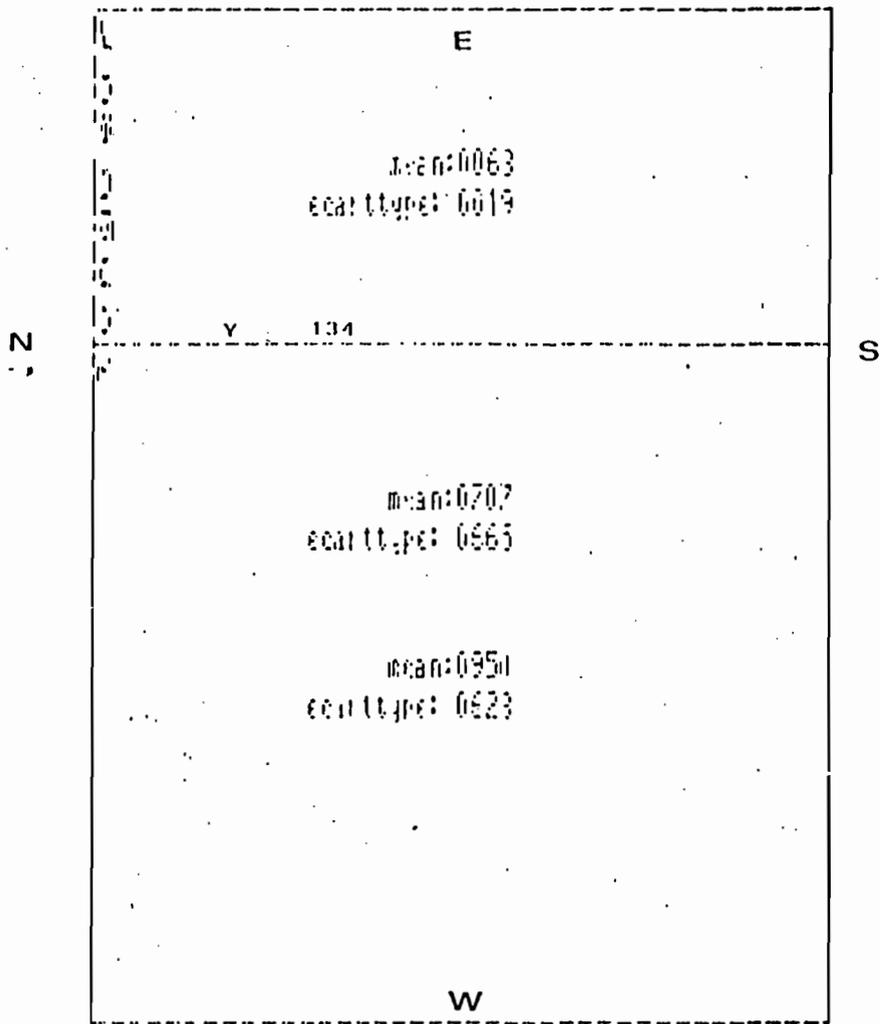
2.2.1. Dans le cas de l'étalonnage, d'une électrode in situ, ou d'un suivi d'évolution du paramètre au niveau d'un profil, pour être comparables (à moins de 0,5 unités pH près), des mesures de pH en un site donné, doivent être très rapprochées : moins de 1 m.

2.2.2. Pour caractériser une unité, il est préférable d'écartier les points d'observation d'environ 75 m, de façon à se placer dans le cas aléatoire pur, en deçà de cette limite, les points de mesure s'auto-influencent.

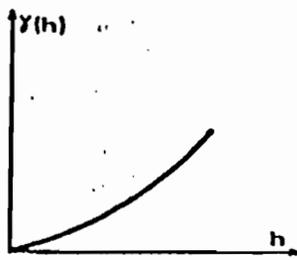
CONCLUSION

Au niveau de l'unité pédologique, on constate :

- que les paramètres n'ont pas la même structure selon la profondeur (cas des conductivités à 40 cm et 70 cm).
- que les variables pH et conductivité n'obéissent pas aux mêmes lois de répartition spatiale : il n'y a pas d'unité structurale entre ces deux paramètres.

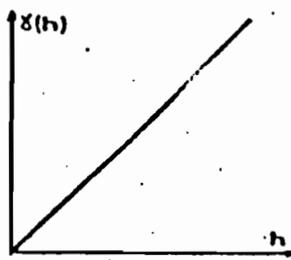


3b - Conductivité à 70 cm en mS/cm



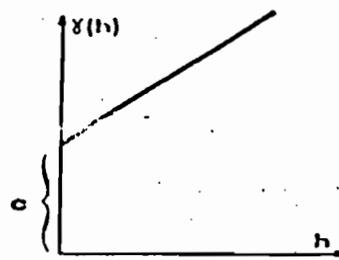
dérivable

i)



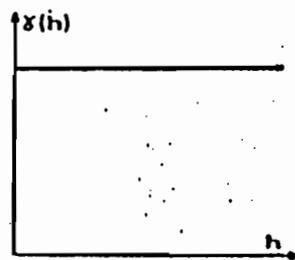
continu

ii)



effet de pépite

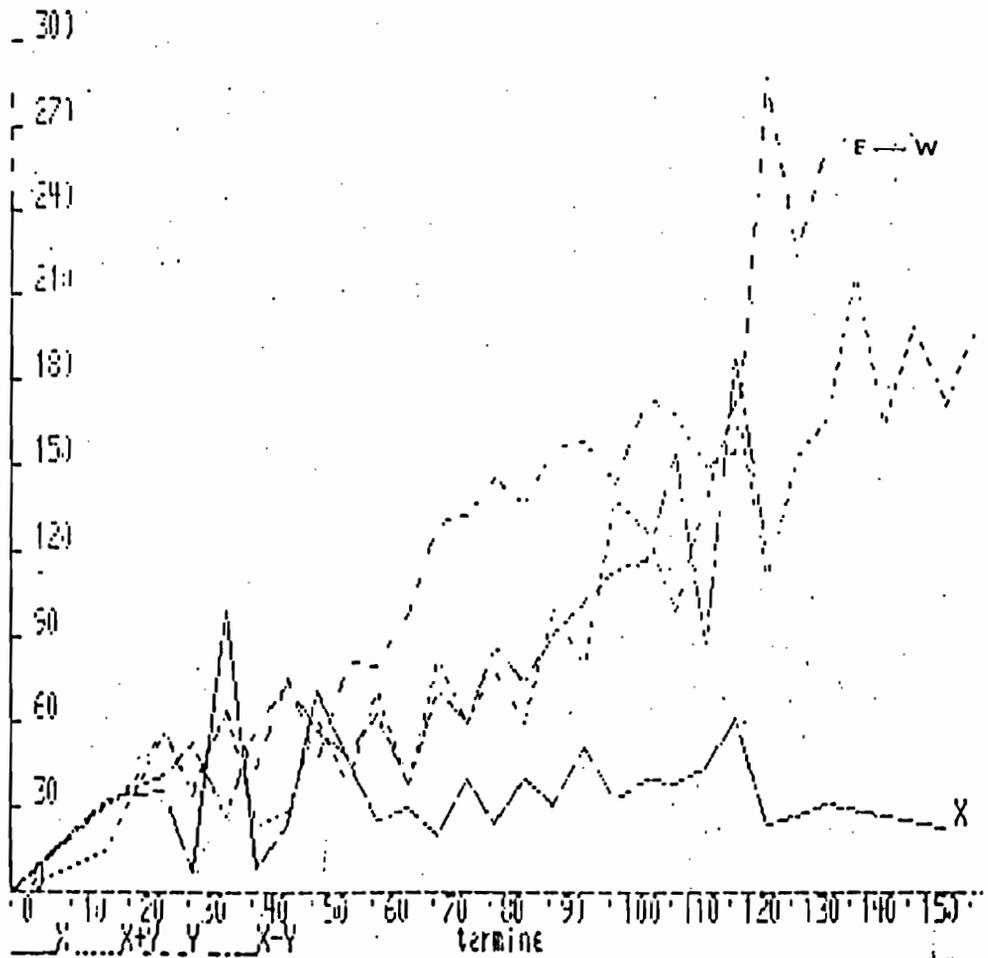
iii)



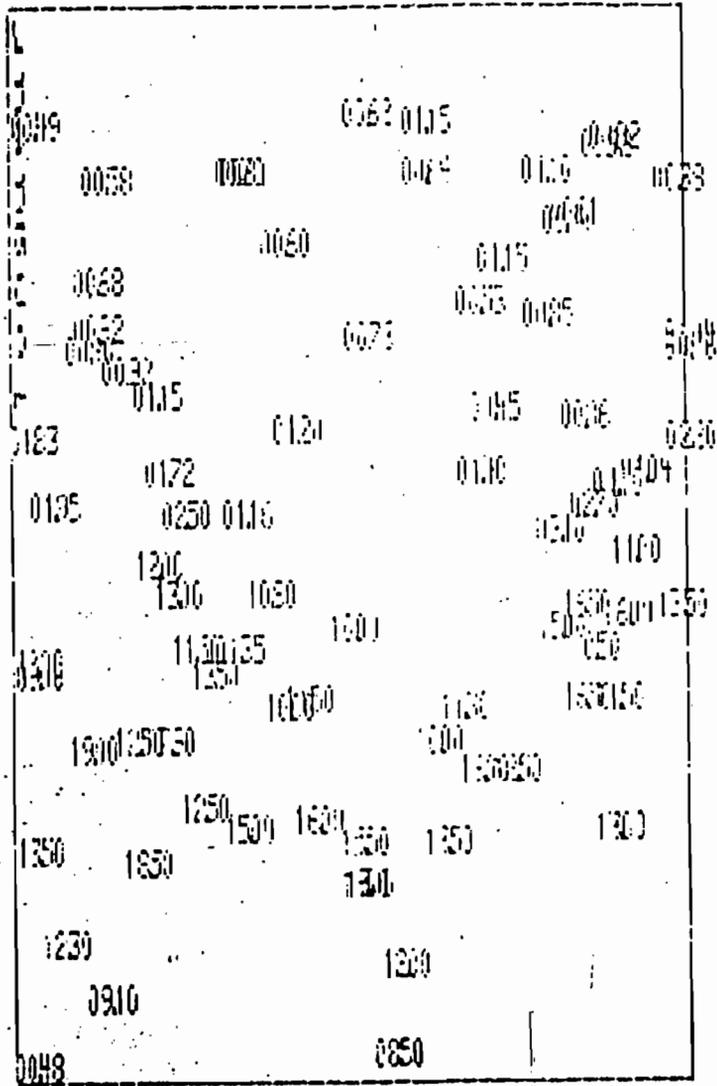
aléatoire pur

iv)

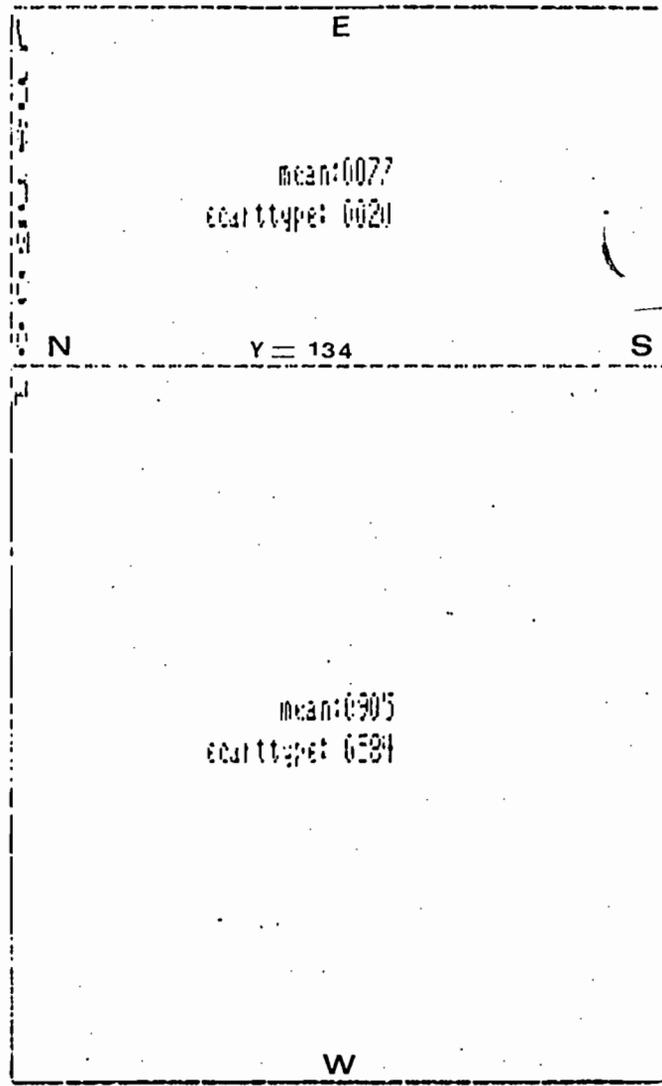
2 b — Comportement du variogramme à l'origine.



4b - Conductivité à 70 cm en mS/cm
Variogrammes bruts directionnels.

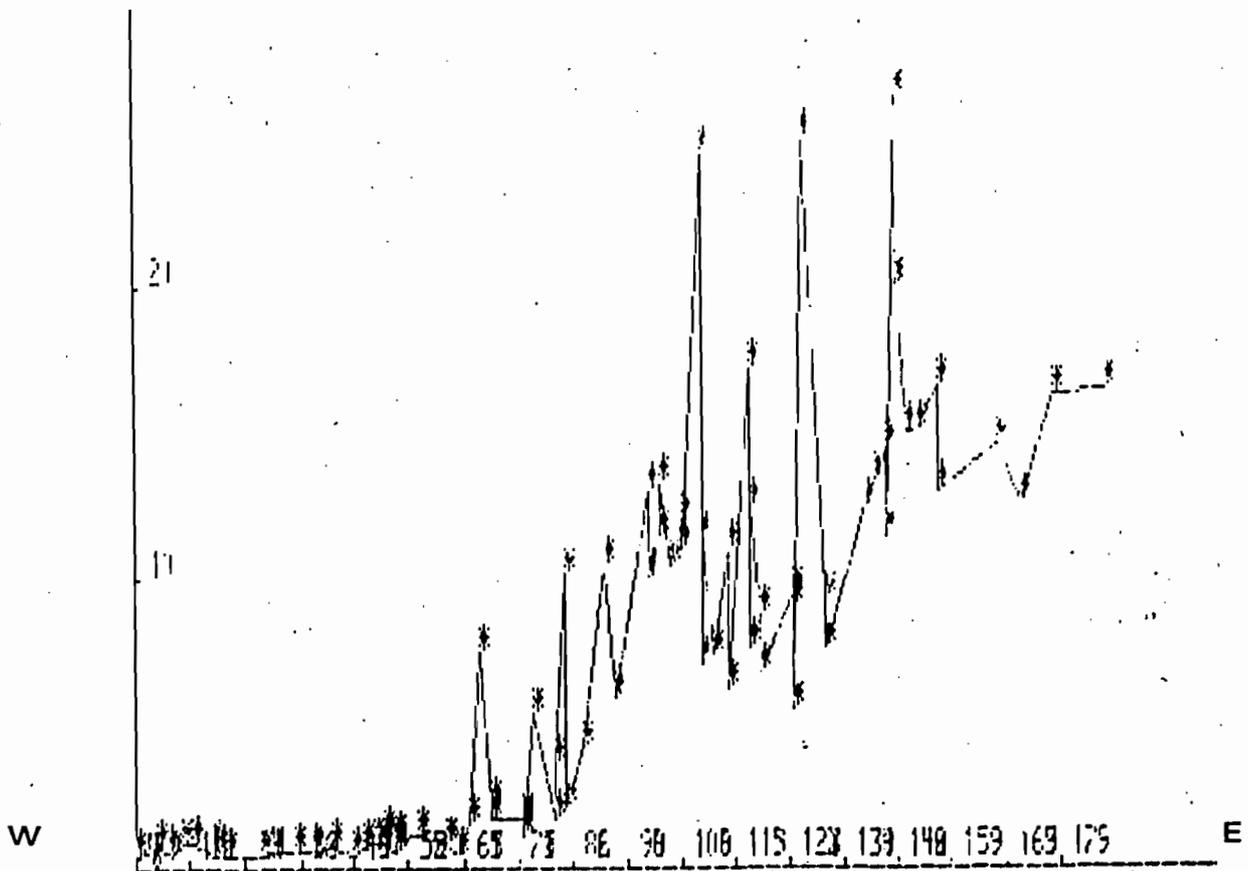


5b

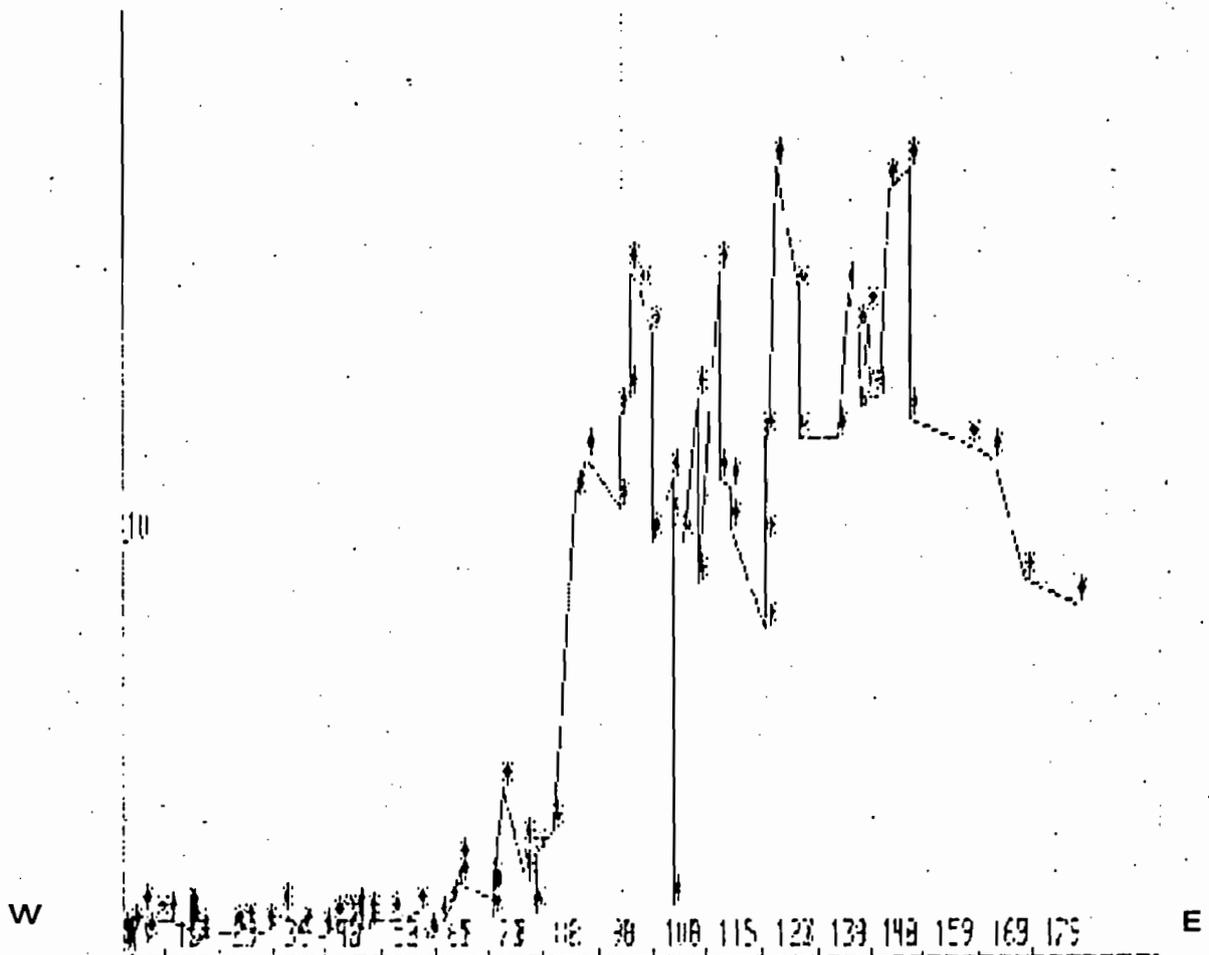


7b

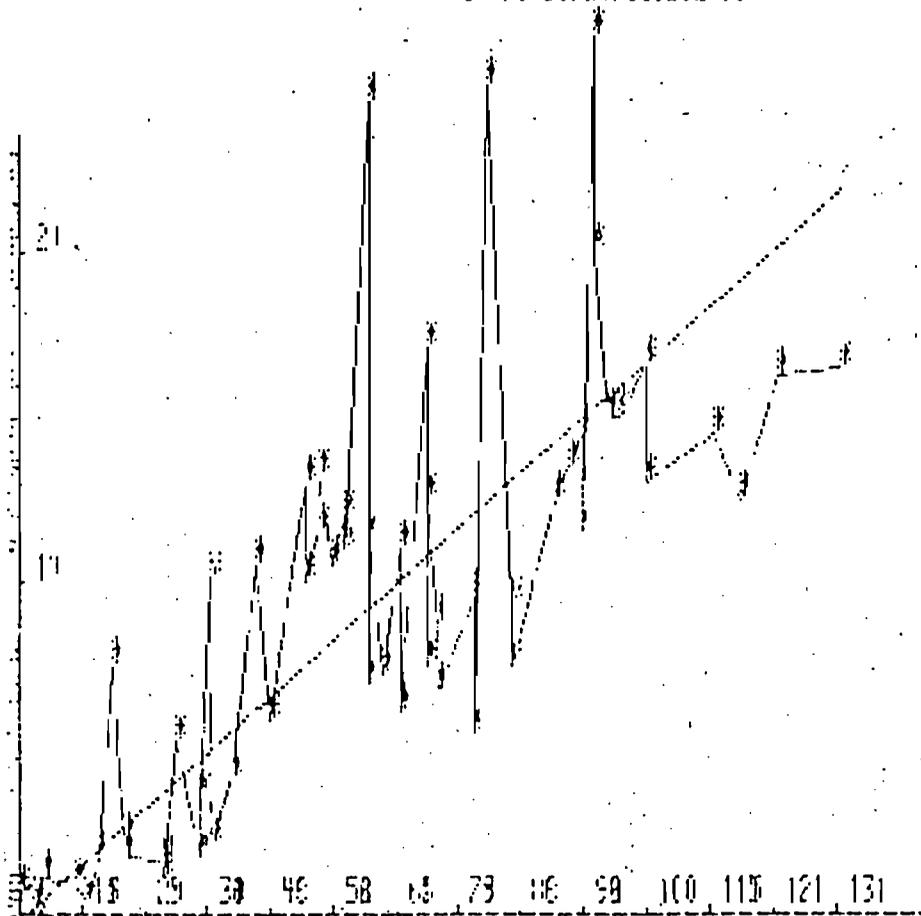
Conductivité à 40 cm en mS/cm



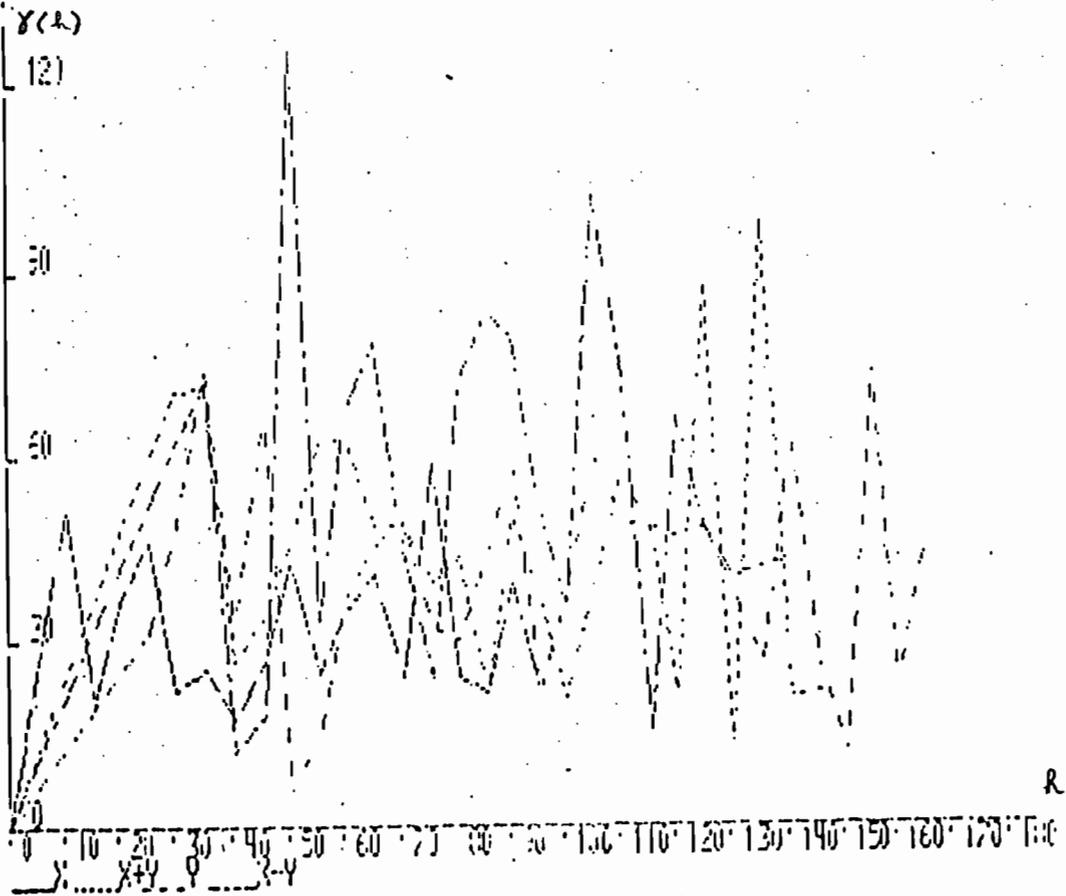
6b - Conductivité à 70 cm en mS/cm dérive W-E



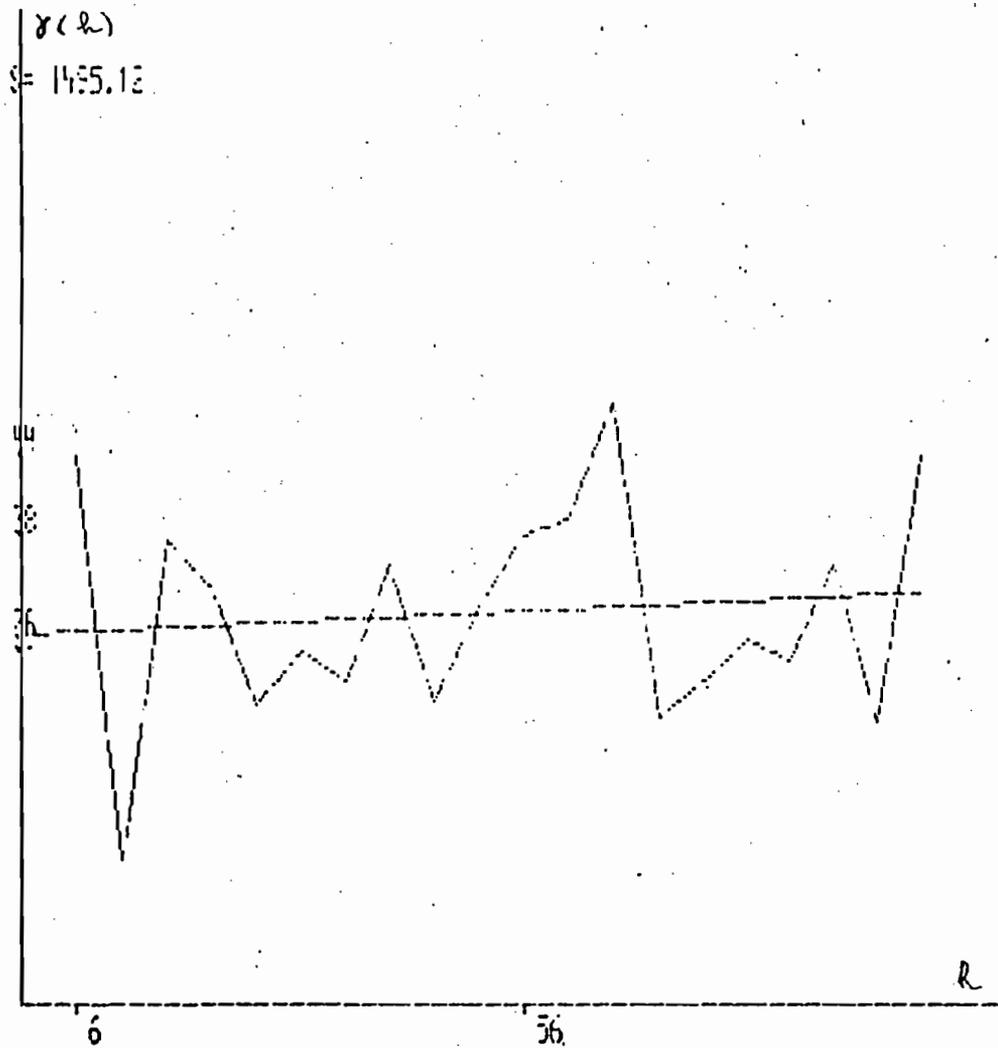
7b - Conductivité à 40 cm en mS/cm

$a = .1674028153699$ $b = -7.855751730825E-03$ 

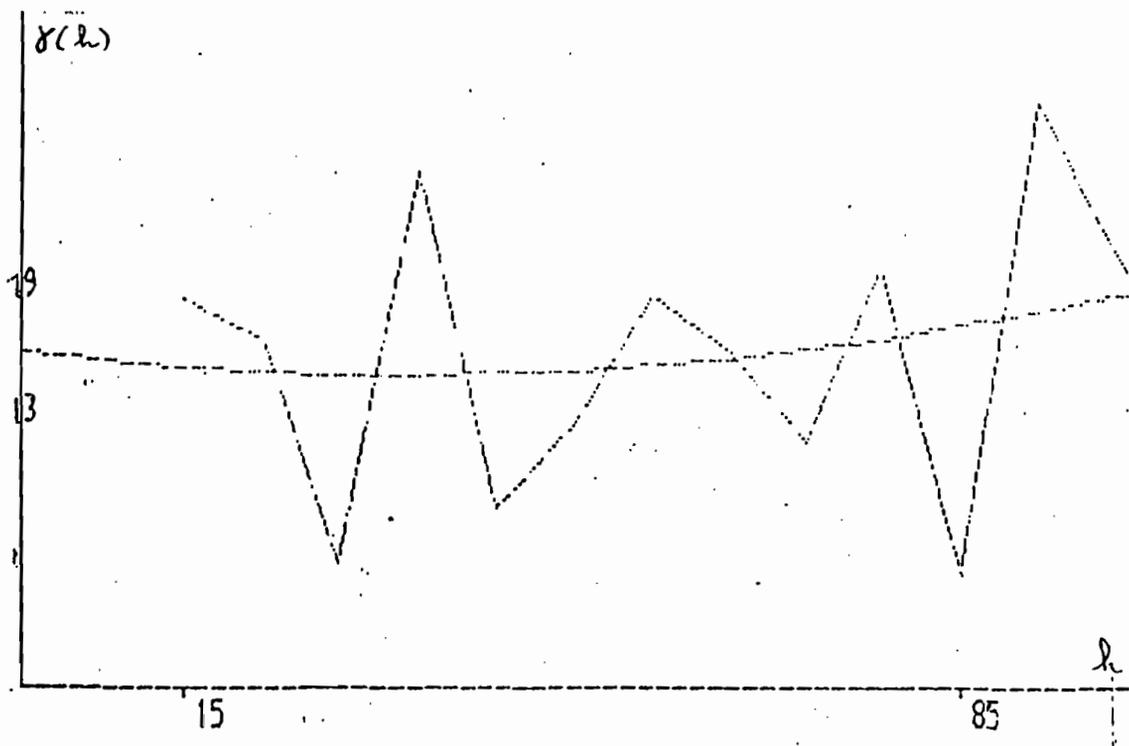
8b - Conductivité à 70 cm en mS/cm
Filtrage d'une dérive linéaire.



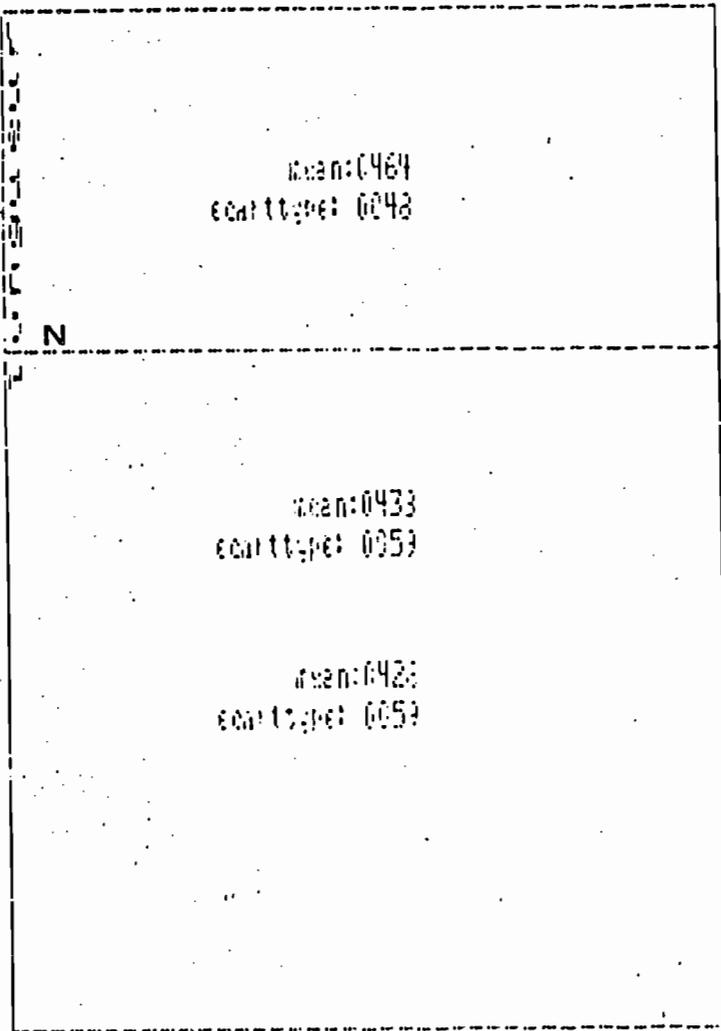
0 b - Conductivité à 70 cm en mS/cm - Variogrammes directionnels sur les résidus.



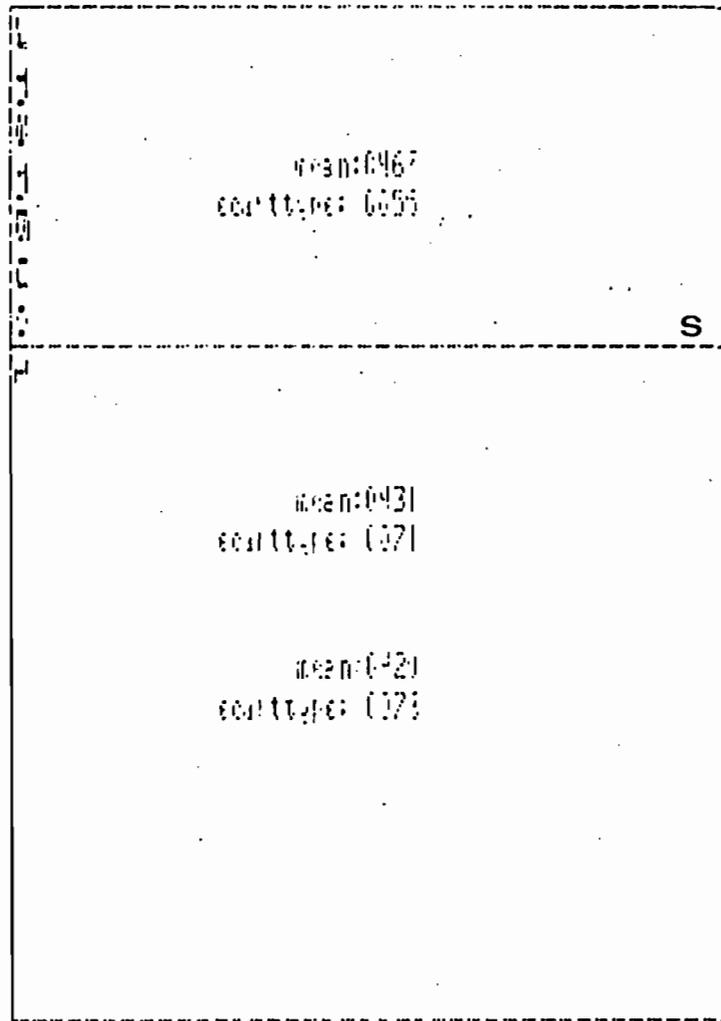
10b - Conductivité à 70 cm en mS/cm - Variogrammes des résidus.



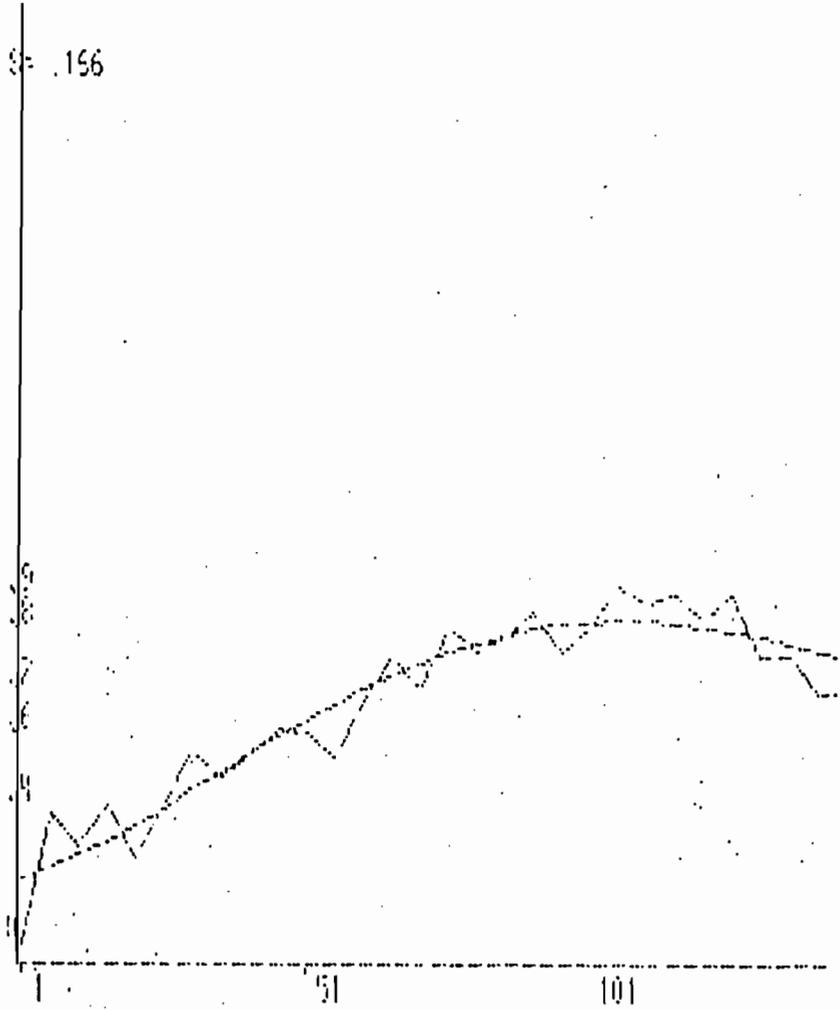
11b - Variogrammes des résidus - Toutes directions - Conductivité à 40 cm en mS/cm



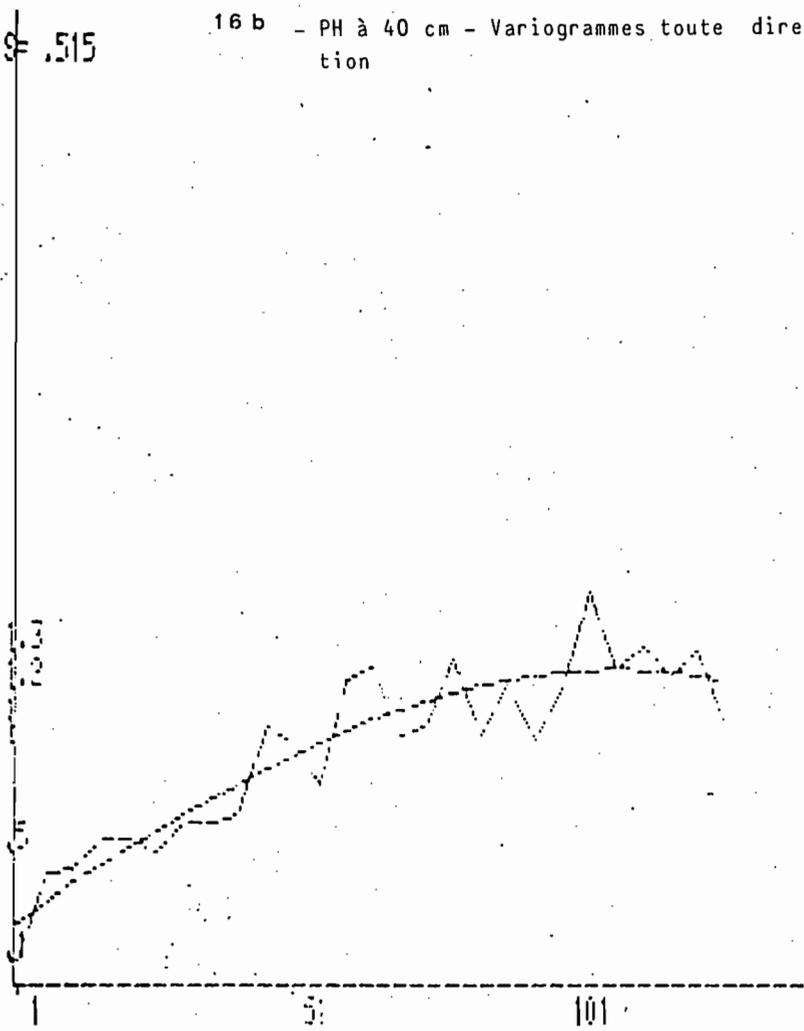
14 b PH — 40 cm



15 b PH — 70 cm



16 b - PH à 40 cm - Variogrammes toute direction



17 b - PH à 70 cm - Variogrammes toute direction

B I B L I O G R A P H I E

- DELIHOMME (J.P.) - 1978 - Application de la théorie des variables aléatoires régionalisées dans les sciences de l'eau.
Bull. du BRGM, section III, n° 4, pp. 341-375.
- GALLAIRE (R.) - 1980 - Etude hydrologique du marigot de Baïla.
ORSTOM, Dakar.
- LE BRUSQ (J.Y.), LOYER (J.Y.) - 1980 et 1981 - Evolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le delta du fleuve Sénégal.
- MARTUS (C.) - 1976 - Effets de la sécheresse sur l'évolution des sols de Mangrove.
ORSTOM, Dakar.
- MARTUS (C.) - 1979 - Les Mangroves du Sénégal. Ecologie - Pédologie - Utilisation.
ORSTOM, Dakar.
- MATHIERON (G.) - 1963 - Traité de géostatistique appliquée.
mém. Bull. rech. géol. minières, n° 14.
- MATHIERON (G.) - 1965 - Les variables régionalisées et leur estimation.
MASSON et Cie.
- MEROT (Ph.) et GASCUEL-ODOUX (C.) - 1983 - Etude du transfert de l'eau dans les sols : Traçage isotopique et approche géostatistique - Colloque Franco-Polonais.
- MICHEL (P.) - 1971 - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie - Etude géomorphologique.
Thèse Fac. Lettres Strasbourg, 1169 p. multigr.
- PELISSIER (P.) - 1966 - Les paysans du Sénégal.
Imprimerie FABREGNE, St Yrieux.
- VIEILLEFON (J.) - 1977 - Les sols des Mangroves et des Tannes de Basse-Casamance.
Mémoire ORSTOM.