

16. 200 Tou

: ISS

CHIMIE DES SOLS SUBMERGES
DANS LA ZONE FLUVIOMARINE DE CASAMANCE

POTENTIALITES ET CONTRAINTES
DES SOLS DU BIEF MOYEN

PAR
MOCTAR TOURE ET GABRIEL ARIAL

"CONFERENCE SUR LE RIZ EN AFRIQUE"

IBADAN - 7 au 11 MARS 1977.

16. 200 Tou

MT/GA/SG
REPUBLIQUE DU SENEGAL
P R I M A T U R E

DELEGATION GENERALE
A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE

FR

CHIMIE DES SOLS SUBMERGES
DANS LA ZONE FLUVIOMARINE DE CASAMANCE

Potentialités et Contraintes
des sols du Bief moyen

Par

Moctar TOURE et Gabriel ARIAL

"Conférence sur le Riz en Afrique"

IBADAN - 7 au 11 mars 1977

Station de Recherches Rizicoles
de Djibélor

INSTITUT SENEGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
(I. S. R. A.)

418

S O M M A I R E

- INTRODUCTION
- CHAPITRE I : LE MILIEU
 - 11. Sols anciens d'origine colluvio-alluviale ----- P. 2
 - 12. Sols formés sur sédiments récents ----- P. 3
- CHAPITRE II : METHODES D'ETUDES ----- P. 5
- CHAPITRE III : IMPACT DE LA SUBMERSION SUR LA TRANSFORMATION ELECTROCHIMIQUE ET CHIMIQUE DES MILIEUX ----- P. 7
 - 31. Cinétiques des Propriétés électrochimiques ----- P. 7
 - 32. Cinétiques des propriétés chimiques ----- P. 7
 - 321. Réduction et production de toxines ----- P. 14
 - 322. Evolution des éléments biogènes ----- P. 19
- CHAPITRE IV : BILAN ET INCIDENCES PRATIQUES DE LA SUBMERSION SUR LE DEVELOPPEMENT DU RIZ ----- P. 24
 - 41. Mécaniques généraux des réactions dans le temps et dans l'espace ----- P. 24
 - 42. Potentialités et contraintes des unités de sols du paysage ----- P. 26
 - 43. Développement et performances du Riz. ----- P. 29
- CONCLUSIONS GENERALES ----- P. 32

CHIMIE DES SOLS SUBMERGES
DANS LA ZONE FLUVIOMARINE DE CASAMANCE

Potentialités et contraintes
des sols du Bief moyen

Moctar TOURE* - Gabriel ARIAL**

RESUME

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la connaissance détaillée des sols du domaine fluviomarin de la Casamance, en vue de leur utilisation agricole.

Les sols de cette zone alluviale, suivant leur degré d'évolution et de différenciation, découpent dans le lit majeur des unités de paysage possédant à des degrés divers un potentiel économique certain.

Le suivi, sous submersion de l'évolution, des principaux paramètres électro-chimiques et chimiques, a permis d'extérioriser l'importance relative des contraintes et des potentialités dans le temps et dans l'espace au niveau de chacune des unités.

Les résultats indiquant, compte tenu des possibilités d'utilisation actuelles et potentielles de ces sols, trois situations possibles :

- La première concerne les zones n'offrant que des possibilités limitées à nulles de mise en valeur. C'est le cas des sols de mangrove qui sont salés, fortement réduits et potentiellement acides. La charge ionique dans ces sols est importante et composée surtout de fer soluble, de composés soufrés, de matières oxydables, de silice et de potassium.

- La seconde touche les sols du faciès tanne qui offrent, suivant leur taux de salure, des possibilités de mise en valeur à long, moyen ou court terme. Sur les sols de tanne déjà colonisés par une végétation d'halophytes, des techniques d'aménagement adéquates s'appuyant sur le seul apport de l'eau pluviale, peuvent aboutir à une mise en culture. L'essentiel étant d'éviter l'installation de conditions réductrices prolongées et d'accélérer le dessalement.

- La troisième situation intéresse tous les sols de terrasses plaquées sur le plateau et ayant une vocation rizicole naturelle. Abstraction faite de leur progression à la réduction, ces sols sont dépourvus de produits toxiques mais sont également pauvres en éléments minéraux nutritifs.

* Agropédologue

** Chimiste

I N T R O D U C T I O N

Le littoral de la Basse Casamance présente une physiologie de vaste étendue plate, parcourue par de nombreux chenaux de marées digités. Les rives sont généralement recouvertes par une végétation monospécifique dominée par les palétuviers et masquant des zones internes, d'altitudes diverses, qui sont successivement nues et sursalées, puis recouvertes de tapis d'halophytes et de graminées. Elles s'adosent à l'intérieur des terres, sur le plateau Continental Terminal (13, 22). Les sols de cette zone alluviale, bien que présentant entre eux une étroite filiation morphologique et lithologique, sont complexes et différenciés dans leur nature. Ils présentent un potentiel économique important, en particulier pour la riziculture, mais ne sont à l'heure actuelle l'objet que d'une faible exploitation, à cause de divers obstacles. Parmi ces derniers, il faut surtout noter le développement de la salure et de l'acidité lié à l'influence marine et à l'agressivité du climat. Les différentes tentatives de mise en valeur se sont soldées par de nombreux échecs occasionnés par une connaissance peu approfondie du milieu, et tout particulièrement des mécanismes de genèse et d'évolution des sols (1, 2, 3, 13, 22).

L'importance des facteurs "hydromorphie" et "halomorphie" dans la mise en place et dans l'évolution des sols, se manifeste aussi bien dans le temps que dans l'espace. Elle a récemment été soulignée par une série d'études fondamentales (1, 2, 3, 4, 13, 22). Elle prouve, dans le cadre de la présente région, que les techniques d'aménagement mises au point sous d'autres latitudes ne peuvent être transférées sans risques, d'une région tropicale à une autre - a fortiori d'une région tempérée à une région tropicale sans une maîtrise des contraintes de milieu. C'est pourquoi, l'essentiel des actions de recherches menées dans ce domaine s'oriente vers des études de base et détaillées sur la biologie et la chimie des sols d'influence fluviomarine.

Le propos du présent article s'inscrit dans cette optique de connaissance du milieu. Il s'intéresse plus particulièrement à la nature et aux mécanismes de transformation d'ordre chimique et physique, transformation qui intervient sous l'influence de la submersion dans les principales unités de sol cartographiées dans la plaine alluviale de la Casamance, suivant une toposéquence Plateau-cours d'eau.

CHAPITRE I : LE MILIEU

D'un point de vue strictement géomorphologique, (22) il est possible de répartir les sédiments marins adossés au Continental Terminal, en deux ensembles :

- en amont, on trouve les sédiments sableux des terrasses qui s'étagent entre deux et quatre mètres environ au-dessus du niveau moyen des marées, et dont les plus basses ne sont qu'exceptionnellement submergées ;

- et en aval, se succèdent les sédiments des vasières à mangroves et ceux des basses terrasses argileuses ou sableuses.

- . Les sols des premiers ont subi une évolution du type climatique, uniquement commandée par la percolation des eaux pluviales et l'action du climat chaud.

- . Les sols de vasières, par contre, sont marqués par l'influence fluviomarine, la végétation de palétuviers et surtout par le climat très contrasté qui y règne. Le point le plus remarquable, comme l'a souligné VIEILLEFON (21) est que l'évolution de ces sols est actuelle même si leur mise en place ne semble plus se faire présentement que de manière réduite. Cette évolution, qui est particulièrement rapide, aboutit à la formation de complexes de sols diversifiés et étroitement associés par les liens morpholithologiques et écologiques.

Ces sols organisés en association avec ceux des terrasses et du plateau découpent dans l'espace une unité de paysage caractéristique de la Basse Casamance et que la fig. 1 schématise. Sur cette séquence, sept points représentant les différents types de sols cartographiés dans la zone ont été retenus.

- Une première distinction, liée à la position topographique, au régime hydrologique et à la nature des matériaux, s'impose entre ces sols. Il s'agit d'une part des sols à drainage naturel satisfaisant, développés à partir de matériaux colluviaux anciens et d'autre part des sols engorgés en permanence ou temporairement et développés sur sédiments récents.

- La seconde différenciation notable est liée à un facteur d'ordre chronologique dans la mise en place des unités de sol. Une chronoséquence s'accouplant parfaitement à la toposéquence distribue les sols les plus récents et les moins évolués à contre courant de cette dernière. C'est ainsi que les sols étudiés présentement ont été regroupés en deux groupes suivant leurs matériaux d'origine et leur degré de maturité.

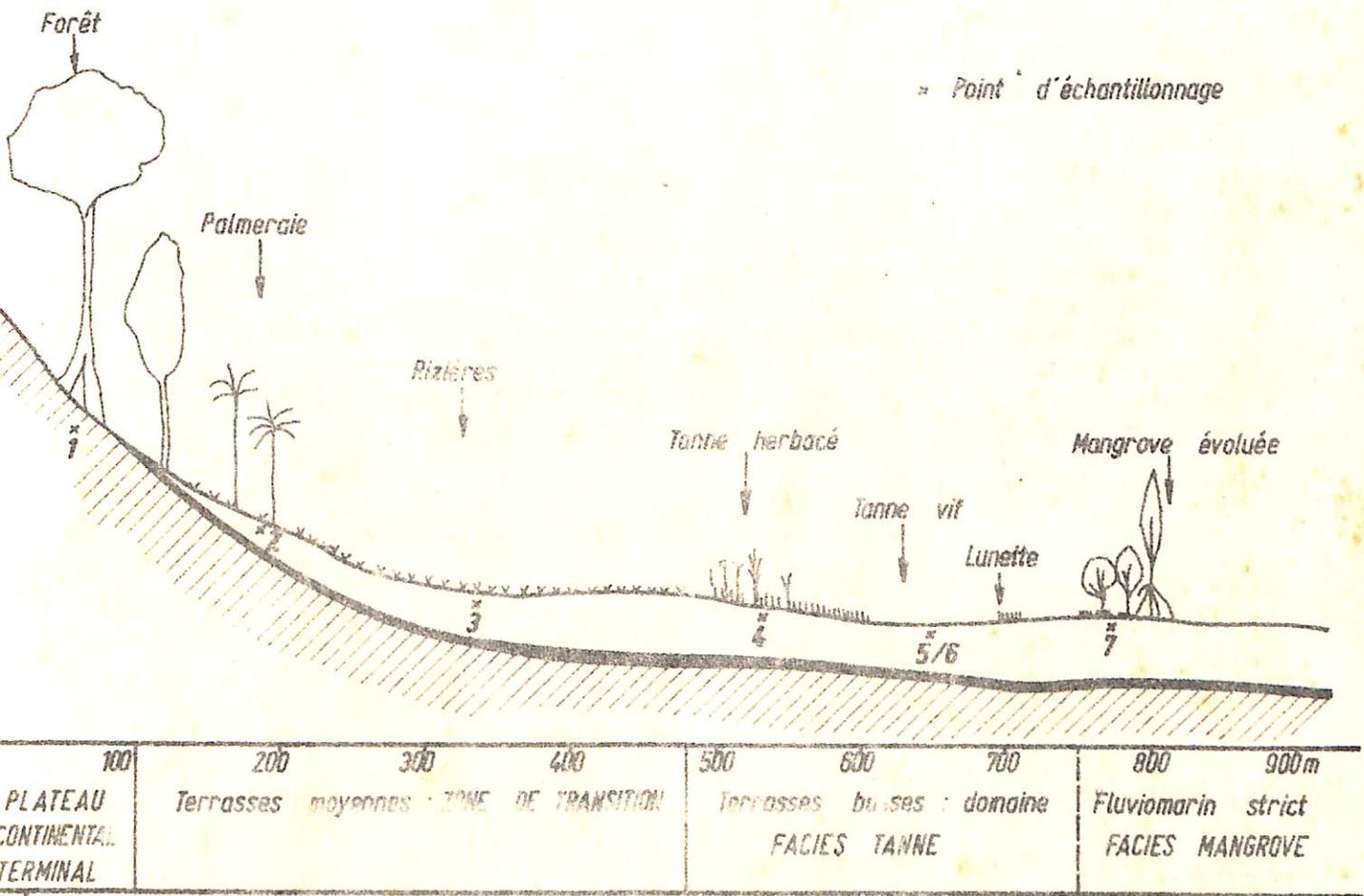
11. CAS DES SOLS ANCIENS D'ORIGINE COLLUVIO-ALLUVIALE

La proximité du plateau Continental Terminal a influencé à plus d'un titre la genèse et l'évolution des sols de cette partie méridionale de la séquence. Retenons pour cette zone :

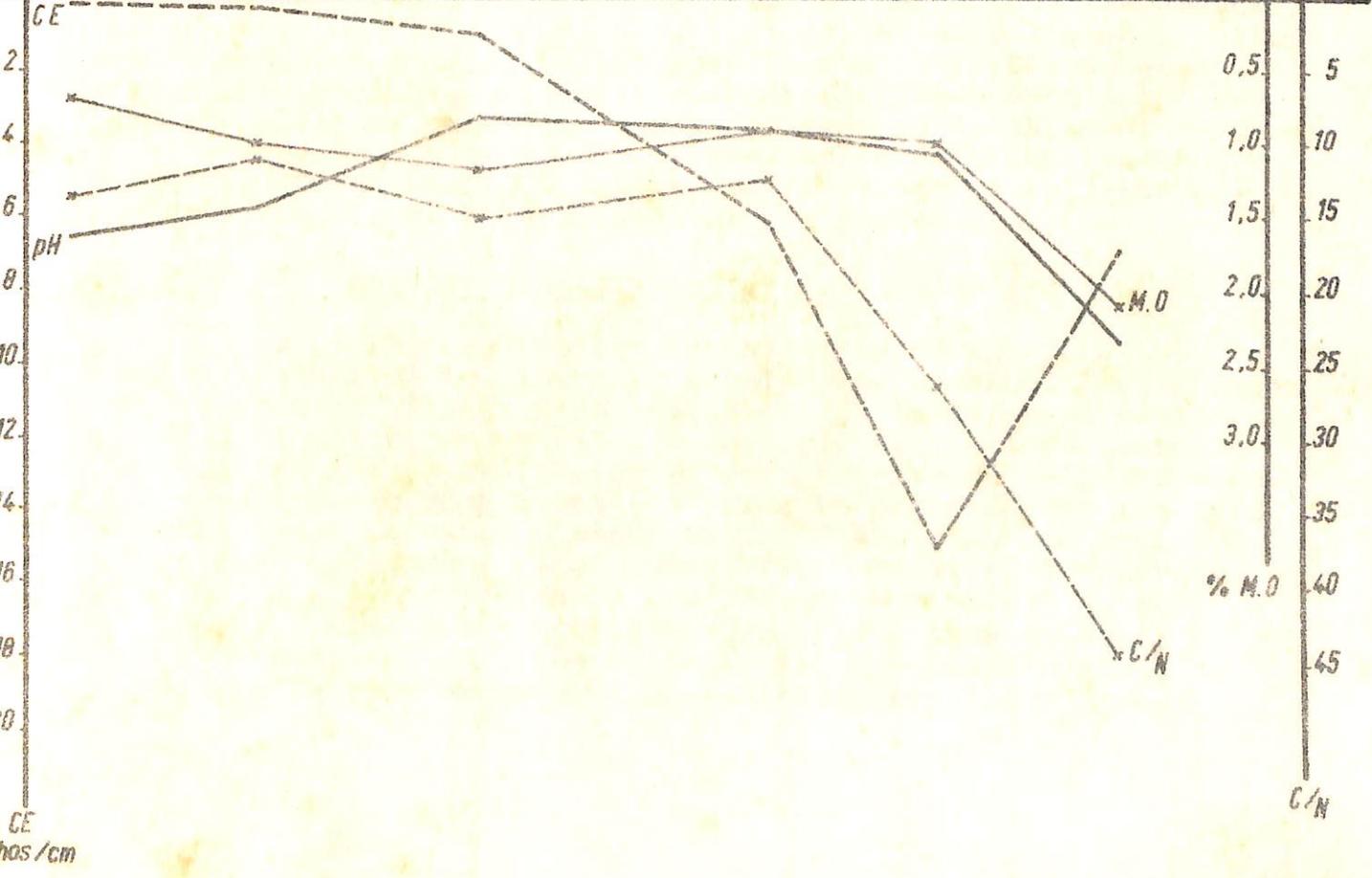
- l'importance du facteur hydrologique dans les transferts des matériaux déposés en aval et dans la mise en place de la carapace (alios) existant en profondeur ;

- l'existence d'un gradient d'acidité et de salinité croissant à mesure que l'on s'éloigne du plateau.

Fig : 1 . ORGANISATION ET CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE



100	200	300	400	500	600	700	800	900m
PLATEAU CONTINENTAL TERMINAL	Terrasses moyennes : ZONE DE TRANSITION			Terrasses basses : domaine FACIES TANNE			Fluviomarín strict FACIES MANGROVE	



111. DJ (1) - Ce point, situé sur le versant Sud du plateau, est étranger à la zone alluviale stricte. Il sert toutefois de borne supérieure à la toposéquence et de référence au domaine terrestre. Il s'agit d'un sol rouge, rangé dans la classe des sols ferrallitiques faiblement dessaturés. Sa composition granulométrique est grossière en surface, son acidité est modérée et sa teneur en matière organique moyennement développée est faible. Ces sols sont généralement argileux en profondeur et riches en pseudosable (tableau 1) ; ils ont en outre un complexe absorbant faible et très fortement dessaturé.

112. DJ (2) - Ce point, prélevé en zone de rupture du plateau, s'est développé sur alluvions anciens et colluvions et s'est enrichi en matière organique et argile. Il présente en outre des marques d'hydromorphie temporaire, matérialisée par la présence d'un horizon gleyifié et d'un alios à moins d'un mètre de profondeur. Il est rangé dans la classe des sols hydromorphes minéraux. Sa composition granulométrique est plus fine que celle du sol précédent et sa teneur en matière organique et celle de son complexe absorbant en cations plus élevés. La réaction y est acide, mais le sel absent.

12. CAS DES SOLS FORMES SUR ALLUVIONS RECENTS

Ils sont majoritaires dans la zone alluviale. Leur formation est essentiellement gouvernée par le mouvement des marées qui règle à la fois la mise en place des sédiments et leur régime hydrique. Associé aux effets du climat, il définit deux principales étapes dans le développement des sols, identifiables à leurs caractères d'acidité et de salinité.

a) Facès Tanne

Ce type de formation caractérisée par un degré de salinité élevé et par une forte acidité, est presque toujours associé à la mangrove qui la précède dans le temps et dans l'espace. Située généralement sur un microrelief supérieur à la limite du niveau moyen des marées, ces sols salins acidifiés présentent ici trois stades de développement liés aux conditions de dessalement superficiel et de colonisation par une végétation d'halophytes ou de graminées. C'est ainsi que, suivant un gradient de maturité décroissant, les trois sols ci-dessous ont été retenus :

121. Sol de Tanne rizicultivé - DJ (3)

Ce point, prélevé sur terrasses moyennes, constitue le terme de transition le plus marqué entre les domaines fluviomarins et terrestres. Il s'agit d'un ancien sol de Tanne, très évolué, stabilisé et actuellement aménagé en rizière. L'extrême acidité de ce sol (pH : 3,6) et les traces persistantes de salinité à dominance chlorurée, rappellent ses liens de parenté avec les sols marins et le situent comme stade ultime d'évolution du facès dans la chronoséquence. La granulométrie, grossière en surface, devient fine par alternance en profondeur. Son niveau de matière organique est plus élevé que celui des sols situés en amont à cause d'un degré d'évolution moindre. Sa capacité d'échange cationique et le taux de saturation sont également plus élevés.

122. Sol de Tanne herbacé - DJ (4)

Ce type de sol intermédiaire entre la forme évoluée et la forme "modèle" se différencie nettement de cette dernière (Tanne vif) par sa colonisation de cypéracées et de quelques graminées. Il n'en garde pas moins un caractère extrêmement salé, à dominance chlorurée et sulfatée. Il est également très acide, ce qui le classe parmi les sols sulfatés acides.

Il présente en surface une texture plus fine que celle des sols environnants. Par contre, sa teneur en matière organique subit un net fléchissement par suite d'une minéralisation rapide et d'une possible perte par déplacement des produits de décomposition. La capacité d'échange cationique et le taux de saturation y sont plus élevés.

123. Sols de "Tanne nu" -DJ (5) et DJ (6)

Pour jauger de l'impact des pluies sur le dessalement, deux prélèvements ont été effectués sur ce point. Le premier en fin de saison sèche et le second en fin de saison des pluies. Ces sols de Tanne vif développés sur famille de sable constituent les termes les moins évolués du faciès. L'acidité mesurée dans ces sols est en général la plus faible du faciès par suite de la présence de sols basiques, agissant en tampon. Ils sont surtout caractérisés par une salinité très élevée. Cette salure, la plus importante de la séquence, est provoquée par le développement de la condition d'aération et par une évaporation intense. Elle est à dominance chlorurée beaucoup plus que sulfatée. La matière organique reste à un niveau identique à celui Tanne herbacé, mais avec un degré d'évolution beaucoup plus faible (C/N = 25). La capacité d'échange et la somme des bases échangeable y sont du même niveau et seul le taux de salure différencie les deux prélèvements.

b) Faciès Mangrove

Dans ce faciès, c'est la phase la plus évoluée qui a été retenue. In situ, elle associe dans une strate arborée : *Rhizophora* et *Avicenia*, surplombant une strate herbacée à dominance de *Scirpus littoralis*. Elle est soumise aux mouvements quotidiens de la marée.

124. Sol de "mangrove évolué" - DJ (7)

Il s'agit d'un sol hydromorphe, humique à gley salé, très faiblement acidifié sur *Avicenia* "Secondaire". Prolongeant le tanne vif vers l'aval, il s'en différencie par un niveau de salinité et d'acidité plus faible. Sa texture est presque exclusivement répartie entre les sables fins et les sables grossiers. Sa teneur en matière organique est faible pour un sol de mangrove, mais elle se situe très nettement en dessus de celle des autres sols de la séquence et elle est très mal évoluée.

Il est à noter que l'assèchement pour les besoins de l'analyse de caractérisation de l'expérimentation a modifié le statut électrochimique et chimique de ce sol, dans le sens de l'acidification et de la salinisation.

CHAPITRE II : METHODES D'ETUDES

21. DISPOSITIF ET CONDUITE DE L'ESSAI

Cette étude de l'influence de la submersion sur la cinétique des index physico-chimiques et chimiques de la solution des sols submergés a été menée sous abri grillagé, dans un dispositif de pots en plastique. Ces pots dotés d'un tube de drainage permettent le prélèvement par gravité et l'analyse de la solution du sol dans des conditions de stricte absence d'air et atmosphère d'azote.

Des prises de 10 kg de chaque échantillon des sols horizon 0-20 cm décrits plus haut ont été placées dans les pots submergés à l'eau déminéralisée et repiqués avec des plants de riz âgés de 21 jours de la variété IR8. Les différents traitements ont été disposés en bloc de Fisher dans un bac rempli d'eau, afin de maintenir une température ambiante constante dans tous les sols. Une fumure de 100 ppm de N.P.K. sous forme respectivement d'urée, de supertriple et de chlorure de potasse a été appliquée avant repiquage et un complément d'azote de 30 ppm apporté, un mois après et à la montaison. - appliqué
- 42°
-
Kel?

22. METHODES D'ANALYSES

Elles reposent pour l'essentiel sur la mesure des variations d'ordre chimique et électrochimique intervenant dans la solution du sol. Cette dernière est considérée comme la phase la plus en équilibre des sols submergés (7, 8, 13), celle reflétant toutes les transformations intervenant dans le milieu.

221. Analyse des sols

Les analyses de caractérisation des sols ont été réalisées sur échantillons secs par les méthodes conventionnelles (5, 11).

222. Analyse de la solution du sol

a) Analyses électrochimiques

Les mesures de pH, Eh et celles de la conductivité électrique ont été simultanément effectuées dans une cellule électrométrique en milieu inerte, avec respectivement un pH-mètre PONSEL et un conductivimètre CENCO.

b) Analyses chimiques

. Le fer*, le manganèse* et le zinc* ont été déterminés dans la solution acidifiée à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique model PERKIN ELMEN 304.

. L'aluminium* a également été dosé dans la solution acidifiée, mais par voie colorimétrique (par la méthode de l'Eriochrome).

* avec le concours du Laboratoire d'analyse du CNRA de Bambej

. Les matières oxydables ou substances réductrices sont estimées par la méthode de "l'American Public Health Association" (mesure de la capacité de consommation des eaux d'égouts) modifié par PONNAMPERUMA (15).

. Les bicarbonates et acides organiques totaux ont été déterminés par voie alcalimétrique avec dosage en retour.

. Les sulfates et phosphates ont été dosés respectivement par turbidimétrie et colorimétrie en utilisant le spectrophotocolorimètre STAND de JOBIN et YVON.

. L'azote minéral total et l'azote ammoniacal par les méthodes de KEENEY et BREMMER.

. La silice* a été dosée par voie colorimétrique par des méthodes de l'Université d'HAWAII et de l'ORSTOM, modifiées par le laboratoire d'analyse du CNRA Bambej.

223. Analyses des plantes

Aux stades montaison et floraison 50 %, la feuille prépaniculaire a été prélevée et analysée pour le fer, le zinc*, l'azote, le phosphore, le potassium et la silice, selon les méthodes décrites dans "Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice" (23). A la récolte, les mêmes déterminations ont été effectuées sur paille et grains.

* avec le concours du Laboratoire d'analyse du CNRA de Bambej

IMPACT DE LA SUBMERSION SUR LES TRANSFORMATIONS
ELECTROCHIMIQUES ET CHIMIQUES DES MILIEUX

La submersion prolongée d'un sol induit une série de transformations radicales de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques (3, 4, 7, 8, 13). Elle aboutit à un milieu très spécifique. La complexité et l'imbrication des transformations sont telles qu'il est difficile, voire impossible, d'en définir avec exactitude la nature ou d'en discerner l'origine. C'est pourquoi l'investigation se limitera à l'étude des composantes de la solution du sol pouvant influencer le développement du riz dans ces milieux.

31. CINETIQUES DES PROPRIETES ELECTROCHIMIQUES

Il a été établi que les transformations que subissent les paramètres électrochimiques et en particulier le pH et le potentiel rédox conditionnent celles intervenant au niveau des caractéristiques chimiques. Elles règlent donc les conditions chimiques existant dans les différents milieux.

311. Cas du pH

In situ, les processus d'acidification observés dans la zone alluviale semblent être essentiellement sous la dépendance des alternances saisonnières d'engorgement et de dessiccation qui règlent également le potentiel rédox soit dans le sens de la réduction, soit dans celui de l'oxydation. Les transformations les plus radicales interviennent dans l'aire d'extension de la chronoséquence Mangrove-Tanne.

Dans cette zone d'alluvionnement récent, on observe un gradient d'acidité actuelle croissant, en allant des sols de Mangroves réduits (pH frais 6,7) aux sols de Tanne les plus évolués (pH 3,5). Et à l'inverse, on enregistre une capacité d'acidification potentielle décroissant toujours en direction de la tanne. Cette dernière est la résultante de l'oxydation des composés réduits et de la production corrélative d'acide sulfurique à partir de composés sulfurés en phase d'aération. In situ, la réaction est donc plus **acide** dans les sols de tanne, mais également plus stable. On retrouve cette stabilité de la réaction dans les sols proches du plateau, mais avec des causes différentes et des niveaux du pH plus élevés.

Sous l'action de la submersion, cette physionomie subit des transformations aussi bien dans le temps que dans l'espace. C'est ainsi qu'à l'examen des valeurs moyennes du pH, représentées sur la fig. 2, on note que :

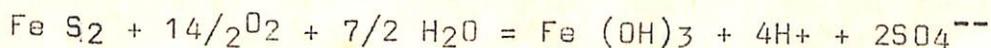
a) d'une manière générale, la submersion a pour effet d'augmenter les valeurs du pH dans le temps. Les amplitudes de cette variation sont sensiblement différentes selon la nature du pH. Il est ainsi possible, suivant l'importance du taux d'accroissement et de la durée de la phase, de regrouper les cinétiques en deux familles de courbe :

- la première, à faible amplitude de variation, est composée des sols apparentés au plateau (Dj 1 et Dj 2) et de ceux des tannes vifs (Dj 5 et Dj 6). Les faibles variations enregistrées, n'excédant pas 0,5 unité de pH, sont dues à l'absence d'agents acidifiants et à la présence en quantités appréciables de composés régulateurs du pH (bicarbonates, sels basiques...) qui jouent un rôle tampon ;

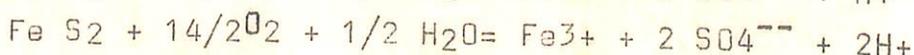
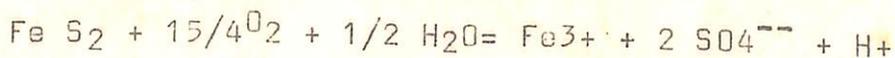
- la seconde, à fortes amplitudes de variation, est formée du sol de mangrove (Dj 7) et des sols de tannes évolués (Dj 4 et Dj 3). Les variations notées sont surtout fortes au départ, avec une augmentation moyenne de l'ordre de 1,5 unité de pH. Elles sont essentiellement gouvernées par la réduction, génératrice d'ions hydroxydes. Exception faite des sols de tannes vifs, il est remarquable de noter la convergence des valeurs en fin de submersion, et ce malgré des niveaux de départ très différents.

b) dans l'espace, on retrouve la tendance à l'acidification en direction de la mangrove, avec un pôle extrême situé cette fois-ci sous le tanne vif. Outre le potentiel rédox déjà évoqué, on peut imputer à la matière organique (en quantité et en qualité) mais surtout aux conditions d'acidités initiales les différenciations observées en cours d'évolution. Le niveau de ce dernier facteur, qui correspond à la réaction mesurée au moment de la submersion est variable selon l'origine et le degré de maturité des sols. On constate globalement qu'aux sols les plus récents, correspondent les valeurs les plus faibles du pH. C'est ainsi que, suivant une distribution spatiale superposée à la chronoséquence, on note les réactions suivantes :

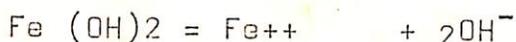
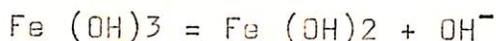
1. Le sol de Mangrove sous Avicennia, situé en amont de la chronoséquence est le plus acidifié au départ. Pour les besoins de l'expérimentation, ce sol sulfaté acide potentiel a été asséché et acidifié par le biais de l'oxydation par étapes des produits sulfureux selon la réaction générale (21-22) :



Mais la courte période d'assèchement à l'air (3 jours), la rapide réinstallation des conditions réductrices, et les fortes teneurs en fer ferreux mesurées après submersion laissent à penser que le terme final du processus d'acidification n'a pas été atteint. Tout se passe comme si le processus d'oxydation n'a mis en exergue que la phase de transformation des sulfures en soufre élémentaire. La seconde étape correspondant à la transformation en soufre élémentaire en sulfate, conjointe d'ailleurs à la production de fer ferrique et à l'acidification extrême, serait quant à elle à peine ébauchée, sous l'impulsion des micro-organismes sulfo-oxydants. Cette hypothèse d'oxydation partielle, accompagnée cependant d'une production d'acides élevée et de l'absence de composés caractéristiques des milieux oxydés (type Jarosite), concorderait fort bien aux deux premiers stades du processus d'acidification proposé par Van BREEMEN (21) :



Le rapide retour des valeurs du pH, proche des conditions initiales observées in situ, est donc aisé dès que la submersion intervient. Elle tient surtout à l'installation des conditions de réductions et à la production corrélative d'ions hydroxyles et de fer ferreux suivant la double réaction :



Il faut souligner également l'existence dans ce sol de concentrations élevées d'acides organiques faibles, produits de la décomposition microbienne en début de submersion et de bicarbonates en fin de submersion.

2. Dans le sol de Tanne qui lui fait suite, les conditions d'acidité initiale enregistrées sont les moins sévères de la séquence.

Par suite d'une installation naturelle, progressive, et plus complète des conditions oxydatives, couplée à la production de composés stabilisateurs du pH (Jarosite, sulfate d'alumine) ; l'acidification d'origine sulfurique et silicique a atteint dans ce sol un niveau élevé de stabilisation. Il s'y produit ainsi un équilibre entre les processus constants d'acidification (oxydation des produits réduits et hydrolyse de la kadinite) et les effets tampons des sols basiques et des bases échangeables produits par désaturation du complexe.

L'impact principal de l'hivernage dans ce type de sol semble avoir été l'élimination d'une faible partie des agents acidifiants, et une meilleure stabilisation du pH.

3. Par actions répétées du lessivage, les éléments régulateurs sont à leur tour éliminés du sol de tanne herbacé, situé en aval du sol de tanne vif, et les conditions d'acidité deviennent plus sévères. Mais la propension de ce sol à la réduction et sa capacité de production d'ions hydroxyles (riche en fer ferreux) le mettent à l'abri d'une acidification prolongée. La courbe d'évolution du pH est sensiblement parallèle à celle observée dans le sol de mangrove, bien que les mécanismes initiaux d'acidification y soient différents. Il faut noter également la présence tardive dans ce sol de quantités non négligeables d'acides organiques.

4. Un effet encore plus accentué de lessivage et de l'action exportatrice des plantes, semble avoir éliminé en quantité dans le sol de tanne le plus évolué : à la fois agents acidifiants et agents régulateurs du pH et de la réduction.

L'accroissement et la stabilisation du pH se trouve ainsi sous la dépendance essentielle du potentiel rédox et de ses produits de réduction. La physionomie de cette évolution proche de celle décrite par de nombreux auteurs (8, 9, 14) se situe à mi-distance entre celle développée pour les sols anciens et celles des sols récents.

5. Hormis son caractère légèrement plus acide (plus grande richesse en acides organiques), la réaction du sol de bordure de plateau (Dj 2) diffère peu de celle de plateau Dj (1). Le niveau relativement élevé du pH et sa stabilité sont dans ces sols sous l'influence de la production de bicarbonate et d'ions hydroxyles et de l'absence d'agents acidifiants.

312. Cas du potentiel Rédox

La distribution in situ de ce paramètre traduit en fait une indication ponctuelle sur l'état d'oxydation ou de réduction des sols. Elle y définit, compte tenu du régime hydrique, deux situations possibles : d'une part celle des sols réduits en permanence à cause de l'engorgement quotidien par les marées, c'est le cas des zones de mangrove ; et d'autre part celle des sols soumis à un engorgement épisodique par les précipitations ou par les marées et présentant une alternance d'états réduits et oxydés. L'importance relative de ces états dans le temps et dans l'espace est fonction de leur position topographique, c'est ainsi que les états réduits diminuent d'importance à mesure que l'on s'éloigne du tanne vif.

Les résultats de la cinétique du Eh, représenté à la figure 3, soulignent une nette tendance à la réduction dans les sols de la séquence sous l'effet de la submersion.

L'intensité et la vitesse d'installation de cette réduction varient cependant sensiblement d'un sol à un autre, ce qui permet de les regrouper suivant deux classes de réaction :

3121. La première correspond à celle des sols à faible niveau de réduction. Elle regroupe uniquement les sols de tannes vifs qui, sur le plan de l'allure des courbes, réagissent comme dans le cas du pH. Les valeurs varient peu et se maintiennent durant toute la submersion entre +300 et +400 mvolts.

3122. La seconde correspond à celle des sols à niveau de réduction élevé. Les valeurs du potentiel rédox dans ce groupe constitué par les autres sols de la séquence, descendent en dessous de +200 mvolts en cours de submersion. Ce seuil +200 mvolts est plus ou moins rapidement atteint selon la capacité réductrice de chaque sol.

Il s'introduit donc une notion de vitesse de réduction permettant de subdiviser cette classe en deux groupes :

a) Celui des sols à vitesse de réduction rapide qui comprend : les sols de transitions Dj 2 et Dj 3. Dans ces sols, les valeurs minimales sont atteintes au bout de 15 jours d'inondation, avec une amplitude de baisse supérieure à +150 mvolts. Cette chute brutale est suivie d'une légère remontée et d'une stabilisation des valeurs : à +160 mvolts pour le sol hydromorphe de rebord de plateau (Dj 2) et à +190 mvolts pour l'ancien sol de tanne (Dj 3).

b) Dans le groupe formé par les sols Dj 1, Dj 4 et Dj 7, l'installation des conditions réductrices se fait plus progressive. Dans les deux premiers sols, le seuil des +200 mvolts n'est franchi qu'au bout de 8 semaines ; les niveaux ne s'éloignant d'ailleurs que de très peu de cette valeur. Par contre, dans les sols de mangrove, l'installation de la réduction se fait par à-coup et la valeur minimale de +170 mvolts n'est atteinte qu'au bout de 12 semaines après submersion.

A quoi peuvent être imputées ces différences observées, tant dans l'intensité que dans le mode de réduction? Outre l'action éphémère de l'oxygène présent dans l'horizon superficiel oxydé ou dissous dans l'eau d'irrigation, il semble qu'il faille surtout voir par le biais de la microflore réductrice, l'intervention des différents couples rédox présent dans les sols (26). Cependant, au vu des valeurs relativement élevées du Eh, il semble que le couple $Fe^{3+} - Fe^{2+}$, très électro-actif, soit le seul à jouer un rôle important. Il peut cependant, dans certains cas, être associé aux systèmes manganique ou nitrique en début de submersion. Il faut souligner en outre que les niveaux du potentiel mesurés in situ sont en général en retrait de plusieurs centaines de millivolts par rapport à ceux enregistrés dans la solution du sol. Cela tient au fait que dans le sol on mesure surtout l'état d'oxydo-réduction de microzones souvent influencés par le métabolisme microbien. Donc ponctuellement, il peut exister des poches de réductions prononcées, entraînant la mise en action d'autres systèmes apparemment inopérants.

Dans les sols de Tannes colonisés par la végétation et dans celui de Mangroves générateurs de quantités importantes de fer ferreux et de matières oxydables, il semble que le contrôle du potentiel rédox soit sous la dépendance du système fer et de la matière organique. Le manganèse présent en faible quantité, n'aurait qu'un rôle limité dans les sols aérés Dj 5 et Dj 6 et dans le sol Dj 4 en début de submersion. Dans les deux sols de Tanne vif, le bénéfice de l'aération et de l'oxydation initiale est maintenu grâce à l'action d'agents oxydants, présents sous forme de sols basiques et au rôle de la microflore sulfo-oxydant très active aux pH développés dans ces milieux.

Il faut noter également dans ces sols, le développement de fortes quantités de matières oxydables issues de la décomposition de la matière organique, et qui semblent n'avoir aucune incidence notable sur la cinétique du potentiel rédox.

La matière organique et ses produits de décomposition régularisent les variations du potentiel rédox dans les sols situés à proximité du plateau. Aucun produits de réduction, issus des systèmes rédox sollicités, n'a en effet été enregistré en quantités notables dans ces sols. Les analyses de fréquences (tableau 3) font apparaître l'existence de relations d'interdépendance marquées entre le potentiel rédox et la réaction des sols. Seul le sol de Tanne vif Dj 6 fait exception à cette observation, en présentant une corrélation inverse pH-Eh non significative. Cela est imputable à l'incidence du facteur pluviométrie sur la mobilité de certains agents acido-basiques qui règlent la cinétique des deux paramètres.

Les diagrammes des variations simultannées du pH et du Eh (fig. 4) mettent en relief par le biais de leur aire d'extension les caractéristiques du degré d'évolution des sols dans chacune des unités écologiques.

Ils font apparaître dans les sols formés sur alluvions récents, un déplacement des domaines de variation, des sols réduits et moyennement acides vers les sols oxydés et acides. C'est ainsi que les dispersions les moins étalées et les corrélations les moins élevées ($T = -0,67$) ont été enregistrées dans le sol de Tanne vif (Dj 5). Tandis que les amplitudes de variations et le degré de liaison les plus forts ($T = 0,96$) sont enregistrés dans le sol de Tanne très évolué (Dj 3). Les fortes dispersions notées dans le cas du sol de mangrove sont dûes, rappelons-le, au développement de l'acidité potentielle lors de l'aération initiale avant submersion.

Il est certain, comme le souligne VIELLEFON (22), que le passage d'un degré à l'autre suppose que la transformation de certains constituants du sol soit réalisée. Ces transformations ont abouti à un très haut niveau de stabilité dans les sols situés à proximité du plateau. Des degrés de liaison y sont moins intenses, et seule l'amplitude de variation du Eh est importante.

313. Cas de la conductivité électrique

On constate tout d'abord dans le cas de ce paramètre qui donne une estimation sur le degré de charge ionique des solutions de sol, l'existence d'une similitude entre les observations faites in situ et celles enregistrées en serre. Des résultats de la cinétique consignés dans le tableau (2) découlent la série de remarques suivantes :

a) l'existence du même gradient croissant de salinité, observé in situ le long de la toposéquence, en direction de la mangrove. Comme dans le cas de la réaction, le rôle de salinité extrême se situe sous tanne vif prélevé en fin de saison sèche. Le sol de rizière sur terrasse (Dj 3) qui est la forme la plus évoluée du faciès tanne, constitue le point de jonction entre les sols salés d'origine fluviomarine et ceux non salés, apparentés au plateau. Il faut souligner en outre que les teneurs de sols mesurés sont dans l'ensemble plus élevés que ceux observés in situ, à cause d'une plus grande concentration saline due au dispositif expérimental. ✓

b) dans tous les sols, on note une baisse de la concentration saline dans le temps. Elle intervient par suite des réactions diverses et simultanées de fixation sur le complexe, de précipitation, et des pertes par drainage lors des analyses.

d) deux familles de courbe existent compte tenu de la cinétique de la conductivité :

- la première est marquée par une baisse graduelle des concentrations. On la trouve dans les sols non salés (Dj 1 et Dj 2) ou peu salés (Dj 3). Dans ces sols, il semble que les phénomènes d'absorption et d'appauvrissement ont prévalu tout au long de la

submersion, sur ceux qui règlent la solubilisation ou la désorption des ions du complexe absorbant vers la solution du sol. La teneur en sels solubles bien que faible n'a permis une installation normale des plantes que dans les sols Dj 1 et Dj 2. Dans le sol de tanne évolué, la persistance des ions Na^+ , Cl^- et l'importance des ions Fe ont constitués une gêne pour le riz ;

- la seconde diffère de la précédente par une charge ionique plus élevée et par l'existence d'un pic d'enrichissement situé un mois après submersion. Une alternance de réaction physico-chimiques et chimiques, axées sur les phénomènes d'absorption et de désorption sur le complexe absorbant ou de recombinaisons des sels sous des états insolubles pourraient être à l'origine de cette évolution en dents de scie. Sulfate, chlorure, sodium, magnésium constituent les ions dominants communs à tous les sols. Le fer s'ajoute à cette liste pour les Dj 4 et Dj 7 et le manganèse pour les Dj 4 et Dj 5. Dans ces sols salés, en plus du facteur quantitatif, il se posera lors de leur éventuel aménagement un problème qualitatif dans la composition ionique de la solution du sol, et qui aura une incidence certaine dans la définition des conditions de culture pour le riz.

d) Une étroite interdépendance lie l'évolution de ce paramètre à celle du potentiel rédox, et dans une moindre mesure à celle du pH.

- Une corrélation positive existe entre la conductivité et le Eh dans tous les sols (excepté le sol de Tanne vif lessivé). Le degré de signification de cette corrélation ne semble pas être en relation avec le niveau de réduction atteint dans les sols. Toutefois, il est à remarquer que le coefficient le plus fort est obtenu dans le sol de tanne vif, celui qui est le plus oxydé et produisant les plus faibles quantités de composés réduits solubles.

- Il existe par ailleurs une corrélation inverse entre la conductivité et le pH. Elle est surtout très marquée dans le domaine des sols formés sur alluvions récents, où l'on note également qu'aux sols les plus acidifiés correspondent les plus faibles degrés de liaisons.

314. Conclusion

L'évolution sous submersion des paramètres physico-chimiques des sols de la séquence, outre la confirmation de la stabilité dans l'organisation du paysage, a mis surtout en évidence la particularité de chaque unité de sol par d'importantes différenciations dans l'allure des cinétiques.

La disposition spatiale des sols, faite suivant une séquence chronologique, a surtout été précisée par la distribution des valeurs de la conductivité électrique. C'est ainsi que, deux milieux très nettement différenciés par leurs matériaux parentaux et leurs mécanismes de formation ont été mis en évidence. Il s'agit respectivement des milieux fluviomarins, salés, et ceux terrestres non salés. Sur le plan agronomique, cette approche "morphologique" permet de délimiter l'aire actuelle d'extension de la riziculture au vu des niveaux de sels et de la capacité de dessalement des sols.

Les variations dans le temps du potentiel rédox et de la réaction des sols, illustrés en partie par l'importance des diagrammes pH-Eh, ont surtout mis en relief les mécaniques propres à chaque sol. Hormis le sol de tanne vif qui se situe à la limite de l'aire d'extension potentielle pour l'aménagement du milieu, on observe partout une tendance à la neutralisation et à la réduction dans le temps. Le cas du sol de mangrove constitue une particularité du fait de sa perturbation par l'expérimentation. Sur le plan pratique, la limite de la zone de mise en valeur fixée par le paysan se situe au niveau de tanne herbacé et colonisé par les graminés. Ce choix empirique mais très rationnel tient au fait que dans ces milieux les problèmes liés aux dessalements et à l'acidification sont en retrait et se situent au-delà des seuils léthaux. Le seul écueil proviendrait du développement de la réduction et de la production de toxines.

32. REDUCTION ET PRODUCTION DE TOXINES

La restriction du mouvement de l'oxygène dans les sols submergés a pour effet principal la prolifération d'une microflore anaérobie stricte ou facultive qui utilise les nombreux systèmes d'oxydo-réduction existant, comme intermédiaires respiratoires. La conséquence en est la substitution des composés oxydés tel que Fe^{3+} , Mn^{4+} , NO_3^- , SO_4^{--} par des contreparties réduites et la production d'acides organiques et de gaz typiques de la décomposition anaérobie de la matière organique. Ces produits, suivant leur niveau et leur mode de production, peuvent constituer un obstacle pour le développement des plantes.

321. Production de matières oxydables

La présence de ces composés réducteur est éphémère dans les sols (tableau 4). L'essentielle de la production se situe durant les deux premiers mois qui suivent la submersion. Ces substances en majorité volatiles sont issues de la décomposition microbienne. Elles sont variables dans leur concentration et leur stabilité en fonction de la nature des sols et surtout du niveau et du degré d'évolution de la matière organique. C'est pourquoi l'on note un enrichissement croissant des teneurs en direction de la mangrove.

Sur ces sols marins (les plus récents, et les plus riches en matière organique) marqués par un C/N élevé (Dj 5, Dj 6 et Dj 7), la baisse constatée des teneurs est précédée par une période de production de matières oxydables d'autant plus étalée que le sol est jeune.

Par ailleurs, l'action de l'hivernage sur l'élimination d'une partie du stock de ces composés sous tanne vif, témoigne de la mobilité de ces éléments. Il faut également souligner l'apparente contradiction existant dans ce faciès tanne, entre le niveau relativement élevé en matières oxydables et l'état d'oxydation marqué.

Dans les sols de tanne colonisés, la tendance est à l'abaissement des concentrations. La vitesse modérée pour la Dj 4 et rapide pour la Dj 3, semble être en rapport avec le degré de colonisation par la végétation.

Sur sol colluvial ou colluivio-alluvial, les niveaux et amplitudes de variation vont s'amenuisant en direction du plateau. Il semble donc que la production de ces composés, capables de concurrencer les plantes pour l'oxygène transporté par les racines, soit réglée uniquement par l'activité microbienne, en relation avec le niveau et la qualité de la matière organique.

322. Production d'acides organiques totaux

Présentées le plus souvent sous forme d'acides aminés, d'acides humiques, d'acides carboxyliques faibles, ces substances sont issues des processus de fermentation de la matière organique à laquelle elles sont liées par le niveau et le degré d'évolution. Elles n'atteignent, en aucun moment, des niveaux très importants et ne jouent donc qu'un rôle limité dans l'acidification des sols.

Les processus de fermentation ne sont d'ailleurs actifs que dans la zone fluviomarine à l'exclusion du sol de tanne vif (tableau 5). Dans le sol de tanne rizicultivé (Dj 3) et dans le sol de mangrove évolué (Dj 7), l'essentielle de la production d'acides intervient durant les quatre premières semaines qui suivent la submersion. Elle se fait plus tardive et plus acidifiante dans le tanne herbacé. Dans ce sol, la reconversion de ces acides en produits gazeux paraît être bloquée par une suractivation de la microflore. On y observe en effet le maintien des teneurs à un niveau élevé. Dans les autres sols, malgré une cinétique en dents de scie alternant des phases de fermentation et de reconversion, les niveaux demeurent faibles.

323. Evolution des sulfates

Elle est proche de celle de la conductivité électrique dont elle est une des composantes dominantes dans certains cas. Les sulfates ne sont en effet présents en quantités appréciables que dans la partie avale de la toposéquence, avec comme point de départ le sol de tanne évolué situé sur terrasse moyenne (Dj 3). Les niveaux élevés en sulfate mesurés tout au long de la submersion tendent à prouver que dans la plupart des sols, l'état de réduction n'a pas été suffisant pour entraîner une transformation radicale des sulfates en sulfure. Cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par les faibles degrés de liaison établie par le calcul statistique entre le Eh et les sulfates.

Dans cette zone formée sur sédiments récents, et riche en produits soufrés d'origine marine, les concentrations en sulfates les plus élevées ont été mesurées sous tanne vif, ce qui est conforme à sa situation de sol oxydé. Les maxima atteints dans ce milieu ont été près du double de ceux enregistrés sous sol de mangrove et du triple de ceux sous sol de tanne herbacé. Ces teneurs nettement en retrait, comme d'ailleurs celles enregistrées sous tanne vif prélevé en fin de saison de pluie confirment la grande mobilité de cet élément déjà observé in situ sous l'action du lessivage (4, 13, 22). Les courbes d'évolution (fig 5) présentent partout dans ces sols la même physionomie. Elle est décomposée successivement dans le temps en :

- une phase initiale d'augmentation des concentrations. De courte durée, elle est consécutive à la désorption des ions sulfatés des sites d'échange ioniques, et à la mise en solution des sols solubles. Les niveaux des pics atteints concordent avec les fortes charges ioniques mesurées par la conductivité électrique et mettent en évidence la particularité des sols salins acidifiés des zones tropicales sèches. La réaction identique enregistrée durant cette période dans le sol de mangrove évolué tient à sa transformation temporaire en sol sulfaté acide anthropique par voie d'assèchement artificiel.

- une phase de baisse progressive des valeurs qui est liée à l'exportation par les plantes, aux réactions de précipitation et d'absorption ; ou alors à une phase primaire de transformation en produits sulfureux pour les sols les plus réduits. C'est le cas du sol de mangrove où l'on note la présence d'un horizon réduit noirâtre et d'émanations de H_2S . On observe, parallèlement à cette baisse, une augmentation des bicarbonates par suite de la réaction d'une partie des sulfates sur la matière organique selon la réaction (22) $SO_4^{--} + 2 CH_2O = H_2S + 2H CO_3$. Un faible degré de liaison entre ce paramètre et la réaction du sol a été établi seulement pour les sols de tanne ou mangrove évolués.

- La forte pression osmotique occasionnée par la présence des sulfates en grandes quantités constitue à tout moment un handicap pour les plantes dans ces sols.

324. Réduction du fer et du manganèse

3241. Deux facteurs principaux paraissent être à l'origine des variations observées dans la cinétique du fer soluble, dans les sols de la séquence. Il s'agit d'une part de l'état du potentiel rédox sous inondation et d'autre part de la nature et de l'importance avant submersion des composés ferriques.

Compte tenu de l'influence relative de ces deux facteurs, les courbes d'évolution du fer ferreux (fig. 6) se répartissent en deux classes suivant leur morphologie et leur niveau de production. On observe en effet :

a) une évolution du type exponentielle au cours de laquelle le fer est libéré progressivement dans le temps, mais à des niveaux toujours faibles. C'est le cas des sols de tanne vif, en permanence oxydé (il semble d'ailleurs dans ces sols, à Eh minimal + 350 mvolts, que l'on soit à la limite des conditions de solubilisation du fer ferreux). Le fer est dans ces sols soit lié aux sulfates dans des combinaisons du type Jarosite, soit alors piégé dans des revêtements d'oxydes sur le quartz ou sur des particules d'argile.

C'est également le cas des sols situés à proximité du plateau qui sont pauvres en fer libre. Le niveau de production en Fe^{2+} y est très faible malgré un état de réduction prononcé. L'identification des formes d'après le diagramme pH-Eh des aires de stabilité du fer (7) montre une prédominance de l'hydroxyde ferrique dans les sols les plus oxydés durant toute la submersion.

b) dans les autres sols, la cinétique est décomposable en deux branches : la première ascendante du type logarithmique et la seconde descendante.

- La phase ascendante, de courte durée (2 à 4 semaines) correspond à l'installation des conditions réductrices. Elle est la conséquence de la prolifération des bactéries anaérobies qui, par l'intermédiaire du système $\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Fe}^{2+}$, règlent la production de fer soluble.

Elle est particulièrement importante dans les sols encadrant le tanne vif. Les maxima atteints sont de l'ordre de 1 000, 800 et 500 ppm respectivement pour les sols de tanne herbacé, tanne cultivé et mangrove évolué. L'hydroxyde ferrosos-ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ est identifiable dans ces sols au bout de trois semaines, mais à un niveau nettement plus faible semble-t-il que ceux du Fe^{2+} et du $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

- La baisse consécutive très marquée dans les sols (Dj 3 et Dj 7) est vraisemblablement causée par une précipitation importante de Fe^{2+} en $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Cette dernière forme est identifiable à partir de ce moment dans tous les sols. PONNAMPERUMA (14, 15) a d'ailleurs suggéré la participation simultanée durant cette phase des systèmes $\text{Fe}^{2+} = \text{Fe}(\text{OH})_3$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Fe}(\text{OH})_2$ et ce après le pic de Fe^{2+} . Dans ces sols également riches en bicarbonates, le fer est susceptible de précipiter sous forme de FeCO_3 . Dans le sol de mangrove Dj 7, générateur de produits sulfureux, il est probable que des composés du type pyrite puissent se former avec la baisse du Eh.

Le maintien des concentrations à un haut niveau, constaté dans le sol de tanne herbacé après le pic de Fe^{2+} , se justifie par la prééminence du système $\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Fe}^{2+}$ comme le montre le diagramme. Il peut également être causé par l'absence d'immobilisations sous forme de bicarbonate et de pyrite.

La distribution spatiale des valeurs moyennes se fait suivant un gradient de richesse croissant à partir des sols situés en amont de la toposéquence. Les valeurs maximales sont enregistrées sous le tanne herbacé. Dans cette zone, l'évolution du fer soluble est intimement liée à celle du potentiel rédox, sous des corrélations inverses et des coefficients hautement significatifs (tableau 3). La participation du pH à la cinétique du fer soluble y est également importante (exception faite du sol de pente) mais à une intensité moins forte. Dans la partie aval, on note à la fois une forte diminution des concentrations en fer soluble et une absence totale de relation d'interdépendance entre ce paramètre avec le Eh et le pH dans les sols de tanne vif, et ce à cause de la prééminence de l'état oxydé. Dans le sol de mangrove, niveau et degré de liaison (Fer - Eh) reprennent une position intermédiaire.

3242. Abstraction faite du faciès tanne, la présence de manganèse soluble est curieusement nulle dans les sols de la toposéquence (tableau 6). Même dans ce dernier faciès, les niveaux demeurent très modestes, comparativement à ceux mesurés dans le cas du fer. Ils n'y dépassent guère 20 ppm et tendent d'ailleurs à décroître dans le temps. Les concentrations initiales les plus

élevées sont enregistrées sous le tanne herbacé. Malgré tout, elles disparaissent virtuellement au bout de 6 semaines de submersion. Dans les sols de tanne vif par contre, le manganèse soluble est présent à tout moment. Dans ces milieux acides en permanence, il semble que l'action du pH soit plus importante dans le mécanisme de libération de Mn^{2+} que celles du Eh et de la microflore. Mais comme le souligne fort bien certains auteurs (17), la nature complexe des interactions chimiques, et des processus biologiques intervenant sur la disponibilité de manganèse dans les sols, est difficilement explicable en simples termes de systèmes chimiques.

325. Conclusion

Les résultats de la cinétique de ces composés réduits ou réductibles confirment la subdivision de la séquence en deux entités superposées et soulignent, par ailleurs, l'existence d'une certaine homogénéité de réaction dans chacune des unités écologiques.

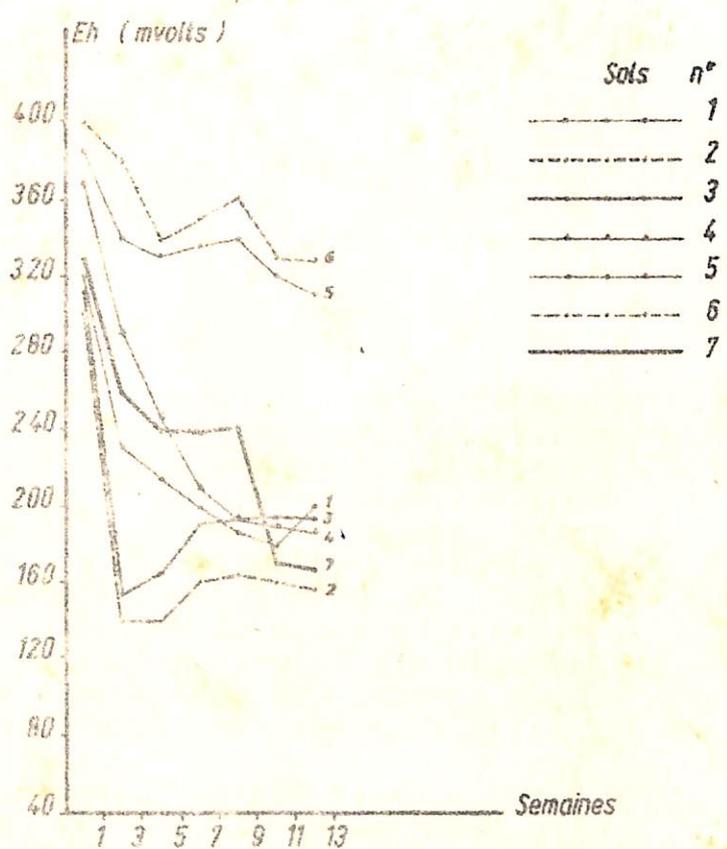
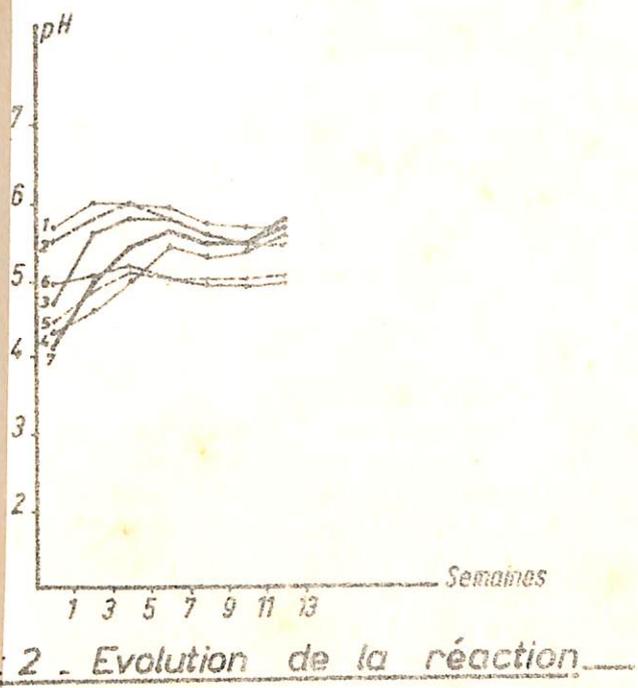
- Dans la partie située en amont de la toposéquence et correspondant au domaine terrestre, on note surtout l'apparente contradiction existant entre le mode et le niveau de production des composés réduits et le facteur Eh qui règle leur évolution. On observe, en effet, qu'aux sols les plus réduits, correspondent une faible libération de composés réduits. Cela tient, semble-t-il, à l'importance initiale des contreparties oxydées et à la qualité du substrat organique dont se sert la microflore pour son métabolisme.

- Dans la partie aval correspondant au domaine fluviomarin, les liens entre les sols sont très marqués. La capacité de production en composés réduits de ces sols est fonction de leur degré de maturité, en liaison essentiellement avec le potentiel d'oxydo-réduction et dans une moindre mesure, l'état de la réaction et la qualité du substrat organique. avec

On note qu'aux sols les plus oxydés correspondent les plus faibles niveaux de fer soluble, d'acides organiques et les concentrations les plus élevées de sulfates. On observe par ailleurs, suivant la séquence chronologique (Mangrove-Tanne évolué), un appauvrissement en matières oxydables en relation avec le niveau de C/N.

Sur le plan pratique, on peut considérer que la solution des sols de la partie amont de la toposéquence est saine, car elle est ioniquement peu chargée et totalement dépourvue en composés stressants pour les racines. Par contre, dans le domaine fluviomarin, toutes les solutions sont non seulement fortement chargées, mais riches en produits concurrents des racines pour l'oxygène. Les plus insalubres sont dans l'ordre décroissant d'importance : le sol de mangrove, le sol de tanne évolué et le sol de tanne herbacé.

Si l'on fait abstraction de leur état de salinité et d'acidité endémiques, les sols de tanne vifs présenteraient les meilleures conditions pour l'aménagement, car ils ne sont riches qu'en composés très mobiles.



Sels	n°
-----	1
-----	2
-----	3
-----	4
-----	5
-----	6
-----	7

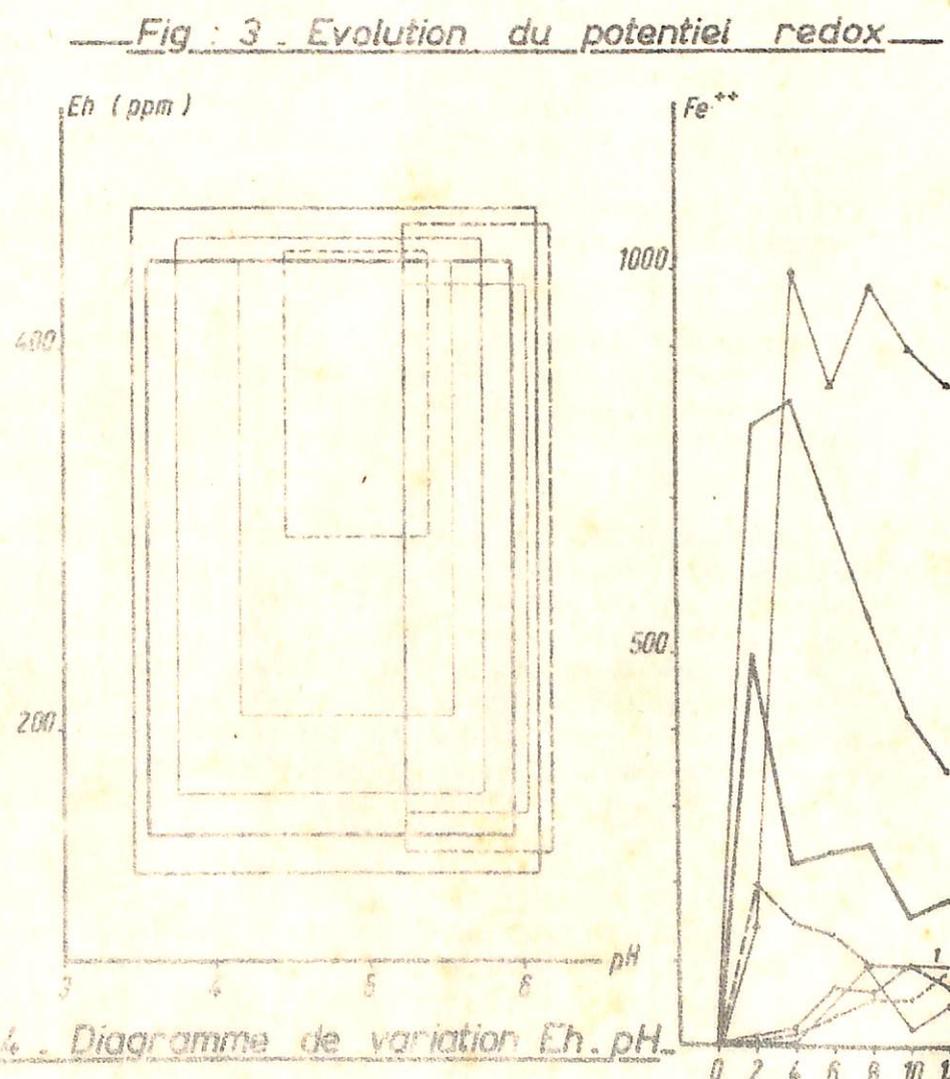
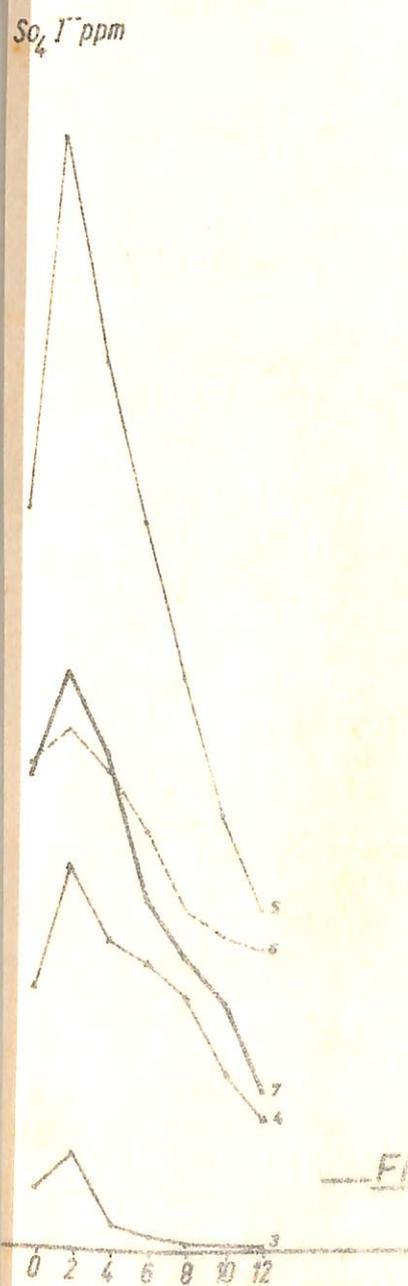


Fig 5. Evolution des sulfates.

33. EVOLUTION DES ELEMENTS BIOGENES

Ces éléments, qui règlent en fait la qualité de la vie dans les sols et le niveau de production des plantes, subissent sous submersion des changements notablement différents de ceux observés en sol exondé. Ces transformations sont sous l'interdépendance de l'évolution physico-chimique, chimique et biologique des milieux.

331. Transformation de l'azote minéral

Sous submersion et en l'absence de l'oxygène nécessaire pour porter la minéralisation à son terme final, les transformations de l'azote du sol s'estompent au stade ammonium. Cette réorientation de la minéralisation, qui prend un caractère lent et incomplet, met en relief l'importance que peut prendre pour la nutrition minérale des plantes, la cinétique de libération de l'azote dans le sol, a fortiori dans la solution du sol. Combiné à l'aspect niveau de production, il permet de déterminer la capacité de chaque sol à satisfaire les besoins azotés des plantes. Compte tenu des particularités de chaque sol, on discerne sur la séquence deux modes d'évolution de l'azote minéral total.

3311. Le premier met surtout en relief le rôle actif de l'activité microbienne dans les milieux les moins salés. D'importantes réactions de minéralisation et d'immobilisation interviennent simultanément, et en direction opposées dans les sols encadrant le tanne vif. La résultante en est une courbe d'évolution décomposée excessivement : en une phase primaire d'enrichissement et en une phase secondaire de perte en azote.

L'intensité et la durée de ces deux périodes permettent de différencier deux cas, en liaison d'ailleurs avec la rizicultivabilité des sols (fig. 7) :

3311.1 Sur sols rizicultivés situés en amont de la toposéquence (Dj 1, Dj 2, Dj 3), les variations les plus remarquables interviennent dans la première partie des courbes. C'est ainsi qu'au cours des 4 à 6 premières semaines qui suivent l'inondation, se succèdent :

- une courte période d'accroissement durant laquelle les concentrations initiales sont plus que doublées. Cette intense minéralisation qui consacre la prédominance des réactions de mobilisation sur celles d'immobilisation est sous la dépendance de la biodégradation de la matière organique, et des phénomènes de désorption. Elle est également en relation avec la faible demande azotée des microorganismes anaérobiques et celle des jeunes plants. L'enrichissement le plus important (de l'ordre de 270 ppm) intervient dans le sol humeux, de bordure de plateau, riche en matière organique et à bas C/N;

- une période rapide de baisse, d'intensité équivalente dans le sol de plateau et à pente plus modérée dans les deux autres. Cet appauvrissement trop rapide ne trouve pas une explication satisfaisante que dans les seules exportations par les plantes et la microflore et les pertes cumulées par drainage. Il semble qu'il faille admettre des pertes par volatilisation et dénitrification.

- une seconde phase de baisse plus progressive ramène les concentrations à leur niveau de départ.

3311.2 Sur les sols non rizicultivés de ce groupe (Dj 4 et Dj 7), les amplitudes de variations sont plus faibles (maximum 200 ppm) et les périodes plus étalées. Ce retrait de la minéralisation est dû au métabolisme microbien plus réduit, par suite de la sévérité des conditions du milieu (acidité et salinité initiales élevées, C/N élevé.....). L'absence de l'effet pompe par des plantes atténue l'amplitude de la baisse et maintient les concentrations à un niveau encore élevé de l'ordre de 130 ppm après 12 semaines de submersion.

3312. Dans le second mode d'évolution, la cinétique est progressivement ascendante. Les concentrations commencent par augmenter rapidement à la suite d'une minéralisation aérobie rapide ; puis elles se stabilisent au bout d'un mois, pour accroître de nouveau rapidement à la 10^e semaine et se stabiliser ensuite. Cet enrichissement par à-coup est liée à la variation et à la viabilité des conditions du milieu. Il faut d'abord souligner la sélectivité du milieu vis-à-vis de la microflore à cause principalement de sa forte acidité. Par ailleurs, on note qu'aux périodes de production élevée en sels solubles, correspondent les phases de stabilisation dans la minéralisation, et, inversement, aux périodes de baisse, coïncide un enrichissement du milieu en azote. Cette observation rejoint celles faites par de nombreux auteurs (20) qui imputent en particulier au sodium un rôle de frein dans la minéralisation du stock organique.

D'une manière générale, on constate, comme dans le cas de la réaction des sols, que les teneurs moyennes de l'azote minéral se dispersent le long de la séquence, suivant un gradient décroissant du plateau vers la mangrove avec un minima sous la tanne vif. Cette distribution paraît être sous la dépendance des index électrochimiques, de l'action biologique et de la teneur en matière organique.

322. Evolution du phosphore soluble

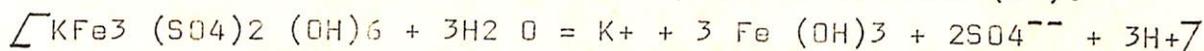
Le très faible niveau et surtout la tendance générale à la baisse de cet élément dans le temps, confirment en partie sa déficience dans le milieu, déjà démontrée par l'expérimentation au champ. Les seules différences notables dans les résultats, se situent dans les niveaux de départ. Ils sont élevés dans les sols les moins salés et ce d'autant plus qu'ils sont cultivés. La vitesse d'appauvrissement dans ces derniers est cependant très rapide à cause probablement de l'exportation importante par les plantes (tableau 7).

Seul le sol de mangrove fait exception à cet état d'appauvrissement, en maintenant des teneurs généralisées relativement élevées en phosphore soluble durant toute la submersion. Cette particularité peut être attribuée à la lente biodégradation du stock de matière organique dans ce milieu.

333. Evolution du potassium soluble

La cinétique dégressive de cet élément tient essentiellement à sa grande mobilité dans ces milieux à texture sableuse et à faible capacité de fixation cationique. Elle est proche de celle de la conductivité électrique, sur le plan de la dispersion spatiale le long de la séquence et sur celui de l'allure des courbes (fig. 8).

a) Sur le plan de la dispersion spatiale des teneurs moyennes, on note un gradient croissant de richesse en K^+ , en allant du sol de plateau vers celui de mangrove évolué, avec un pôle de concentration maximum situé sous le tanne vif. Cette situation est liée à la présence dans ces sols de composés riches en potassium, et à l'existence de conditions de dissolution favorables. Dans les sols des faciès mangrove et tanne, cet enrichissement est en rapport avec l'hydrolyse des sols basiques, du type Jarosite suivant la réaction décrite par Van BREEMEN (21).



Cette hydrolyse, couplée d'ailleurs avec celle de la kaolonite, est particulièrement importante dans le sol sulfaté acide modal représenté par le sol de tanne vif.

b) On note une baisse régulière des niveaux dans le temps, avec une pente d'autant plus forte que l'on s'éloigne du plateau. En l'absence d'une capacité d'échange cationique élevée, cette baisse ne peut être attribuée qu'aux pertes par lessivage, ou à des réactions de recombinaison et de néoformation d'argile, auxquelles s'ajoutent les exportations par les plantes.

c) Sur le plan agronomique, compte tenu de l'origine des sols et de leur degré de maturité, on assiste à une délimitation très nette du paysage en: un domaine rizicultivé pauvre en potassium et un domaine non rizicultivé, riche en potassium échangeable.

334. Evolution de la Silice

Deux remarques préalables s'imposent à l'examen des cinétiques d'évolution (fig. 9) de cet élément, tenu pour déficient dans les sols de la plaine alluviale.

- Tout d'abord la persistance d'un gradient croissant de richesse en direction de la mangrove. Les sols les plus pauvres en silice se situent en amont de la toposéquence et les plus dotés en aval, avec cette particularité dans cette zone que le sol de tanne herbacé est plus riche que celui des tannes vifs.

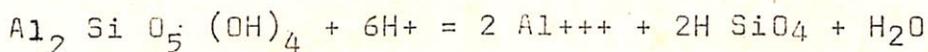
- Ensuite la ségrégation existant entre sols rizicultivés et sols non rizicultivés, tant dans les niveaux de production que dans l'allure des courbes de libération de la silice.

. C'est ainsi que dans le groupe de sols rizicultivés (Dj 1, Dj 2, Dj 3), on enregistre une baisse régulière des concentrations en silice par suite des exportations importantes et par des réactions de précipitations sous formes de silice amorphe. Les différences de niveau observées entre sols tiennent des

conditions d'acidité initiale et de l'hydrolyse de la kaolinite, génératrice de silice.

. Dans le groupe de sols non rizicultivés, formés tous sur matériaux récents, les niveaux de silice sont élevés par suite de l'hydrolyse concomitante du quartz (très active dans les sols de mangrove) et de la kaolinite et également par l'absence d'exportation par les plantes. Les différences observées entre sols tiennent à l'action régulatrice du pH sur la solubilisation de la silice et de la charge ionique des solutions.

On constate en effet qu'aux sols les plus salés dans ce groupe, correspondent les niveaux de silice les plus bas. Dans les sols salins acidifiés, certains auteurs (20, 21) pensent que l'hydrolyse de la kaolinite serait prédominante et interviendrait selon la réaction :



Cela serait le cas du sol de tanne vif où après l'hydrolyse initiale totale de cette argile, les niveaux restent par la suite inchangés par défaut d'hydrolyse du quartz et par action régulatrice du pH.

335. Evolution du zinc soluble

Elle se particularise par une dispersion assez hétéroclite des valeurs dans le temps, matérialisée par une succession de phases d'immobilisation et de solubilisation. La résultante de ces variations se traduit dans le tableau (8) par une baisse des niveaux dans le temps et par une convergence des concentrations en-dessous de 1 ppm à partir de la 6e semaine de submersion. Les seules différences notables entre sols se situent donc en début de submersion. Sur le plan de la distribution spatiale, on retrouve durant cette phase l'enrichissement graduel en zinc, comme celui déjà constaté pour les autres éléments minéraux, en direction de la mangrove. L'origine de ces différenciations doit être rattachée à la nature des matériaux de base et au degré de maturité des sols. A terme, il semblerait sur le plan pratique qu'une déficience puisse s'installer sous l'effet d'une prolongation de la submersion.

336. Conclusion

L'appréciation de la capacité des sols de la séquence à satisfaire les besoins nutritionnels des plantes est délicate à cause des modifications actuelles des cinétiques d'évolution des éléments minéraux nutritifs sous sols non cultivés, et potentielles pour les besoins de l'assainissement et de la mise en valeur.

Les différences observées présentement entre sols tiennent à la fois aux conditions des activités biologiques et des réactions de certains éléments, dans chacun des milieux. Ces conditions de milieux sont fortement influencées par l'état des caractéristiques physico-chimiques et par celle de la matière organique.

De tous les éléments étudiés, l'azote minéral issu de la décomposition de la matière organique semble être le plus dépendant de l'activité microbienne. Cette dernière est elle-même fortement influencée par les conditions d'acidité et de salinité de chaque sol.

Sur la séquence, la production d'azote est d'autant plus forte et brève que le sol est peu salé, faiblement acide et rizicultivé. La présence de potassium et de silice dans la solution du sol est fonction du niveau d'acidité, en relation avec l'origine et le degré de maturité de chaque sol. D'une manière générale, on note que les sols les plus pauvres correspondent aux sols les plus évolués et les plus rizicultivés.

L'absence quasi générale de phosphore semble être endémique, liée à la pauvreté originelle des matériaux de formation en cet élément. La présence hétéroclite du zinc soluble ne semble être attachée à aucun des facteurs étudiés.

D'une manière générale, on peut retenir que ces sols de zone alluviale ont un niveau de fertilité relativement bas surtout comparé à celui des sols de bas-fond ; en plus ils ont une grande susceptibilité à l'appauvrissement sous l'influence des cultures et probablement du lessivage.

g : 7. Evolution Azote
minéral total

N. (ppm)



Fig : 9 . Evolution Silice

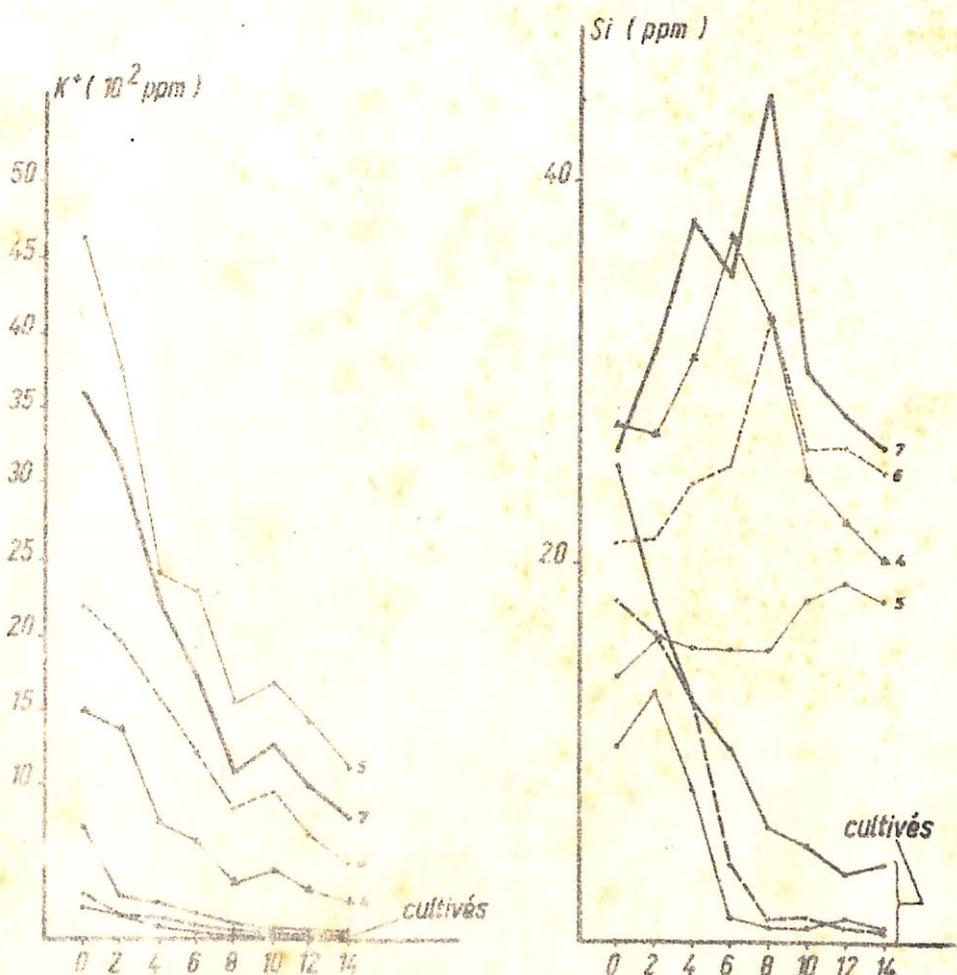


Fig : 8 . Evolution Potassium
soluble

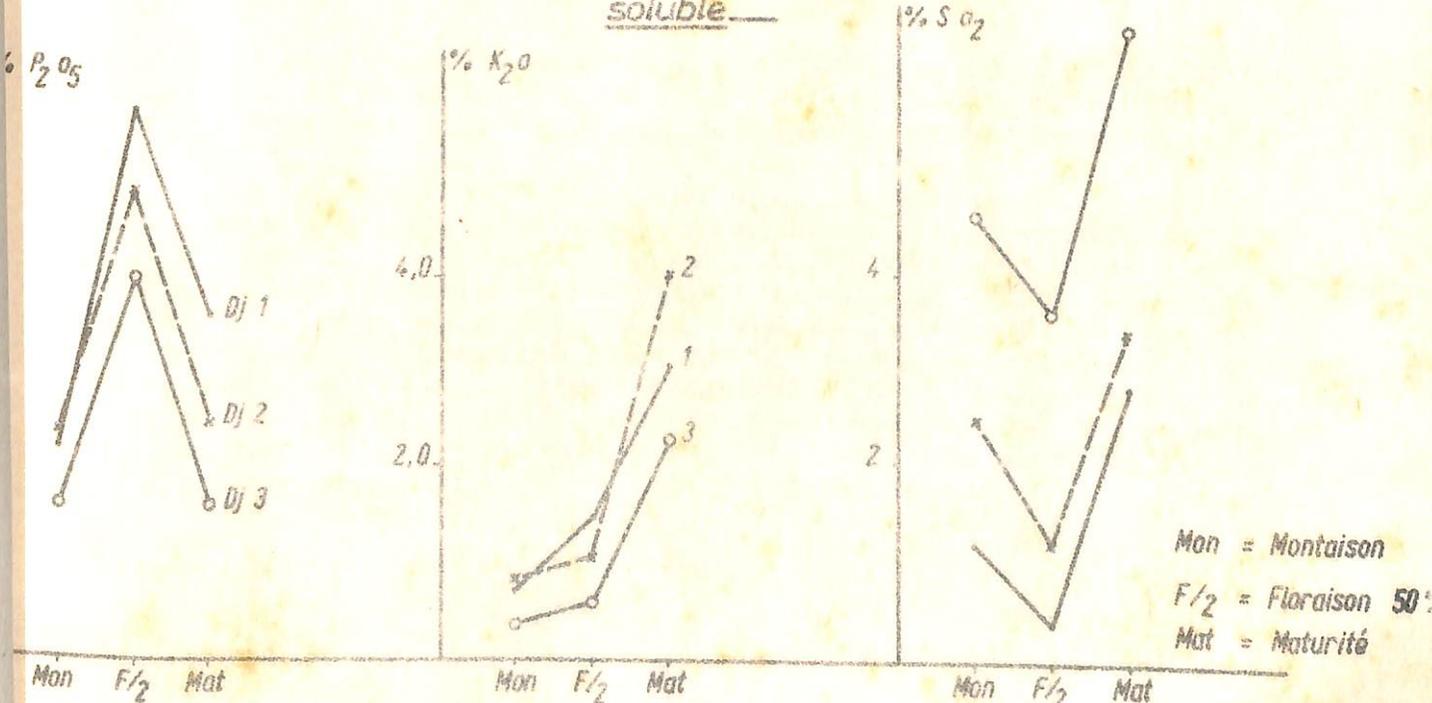


Fig : 10 . Composition chimique des feuilles

CHAPITRE IV

BILAN ET INCIDENCES PRATIQUES DE LA SUBMERSION SUR LE DEVELOPPEMENT DU RIZ

41. MECANISMES GENERAUX DES REACTIONS DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE

L'établissement d'un bilan complet de la submersion est mal aisé en l'absence d'une appréciation globale de l'ensemble des transformations qui interviennent dans les différents compartiments du milieu. La composante biologique, non entièrement appréhendée ici, y revêt un caractère particulièrement important dans le diagnostic des mécanismes des divers changements intervenant après inondation.

Les résultats acquis sont, cependant, suffisamment importants pour compléter la connaissance statique que l'on avait de ces sols ; et pour préciser des moyens plus judicieux de leur exploitation.

La nature des matériaux mis en jeu et leur dynamique constituent le principal facteur originel de différenciation entre les sols. Ils délimitent dès le départ, en relation avec les effets du climat, deux entités écologiques, passablement tranchées et articulées au niveau du sol le plus évolué du domaine floviomarin.

La cinétique des principales caractéristiques, physico-chimiques et chimiques de ces deux domaines suit globalement les principes généraux propres à la chimie des milieux inondés. Elle est cependant modulée au niveau de chaque type de sol par : les conditions initiales d'acidité et de salinité et par le niveau et la qualité de la matière organique et des composés oxydes "primaires".

411.a Concernant la cinétique des index électrochimiques, on note :

- en fonction du temps, une tendance générale à la neutralisation, au dessalement et à la réduction. Somme toute, une évolution très positive pour les deux premiers paramètres.

- en fonction du type de sol, la situation de chacun de ces index s'apprécie mieux par rapport à celle existant dans le sol de tanne vif. Ce sol jeune, situé à la limite des zones engorgées en permanence et des zones exondées, est de toute la séquence : le plus acide, le plus salé et le moins réduit. De part et d'autre, les autres sols sont à des degrés divers : moins acides, moins salés et surtout beaucoup plus réduits. Les sols situés en amont, plus mûrs, ont cet avantage sur le sol de mangrove, c'est qu'ils sont moins salés et ont une acidité plus stable et une propension à la réduction moins forte.

- les paramètres électrochimiques conditionnent et régularisent, à des degrés divers, l'activité biologique et l'expression de certaines réactions chimiques. Concernant ces dernières, on note une certaine analogie, soit dans le mode d'évolution soit dans la dispersion spatiale des valeurs entre :

. la conductivité électrique et les ions sulfatés, potassium, manganèse, silice ; en relation d'ailleurs avec l'état de la réaction des sols et des matières oxydables ;

. le potentiel d'oxydoréduction, le fer soluble et l'azote minéral.

412.B Au sujet des index chimiques mesurés, on constate :

a) Avec le temps : une diminution générale de la charge ionique des solutions de sol. Cette baisse, rappelons-le, tient soit aux pertes par exportations et par drainage, soit à des mécanismes d'immobilisation par précipitation ou recombinaison minérale.

1. Un mode d'évolution des index variables, suivant l'élément considéré et surtout dépendant de la nature du sol

2. qu'abstraction faite du sol de tanne qui réagit le plus souvent de façon spécifique, les mêmes lois régissent les mécanismes cinétiques d'évolution des index.

Les concentrations en phosphore et potassium déclinent régulièrement dans le temps pour tous les sols. Cette évolution régressive est également observée pour la silice dans les sols rizicultivés avec certainement pour cause l'intervention des plantes.

L'évolution des taux de fer soluble, de sulfate, d'azote, et de silice dans le cas des sols cultivés, se décompose en deux phases bien tranchées : la première d'augmentation et la seconde de baisse des concentrations. Cette cinétique est conforme à l'existence d'une intense période d'activité chimique et biologique, dans les premières semaines qui suivent la submersion. L'importance relative et la durée de chacune de ces phases sont liées au degré de maturité de chaque sol. C'est ainsi qu'il faut souligner que le métabolisme microbien est d'autant plus faible que le sol est jeune et insalubre ; par contre les réaction chimique du type hydrolyse y sont plus aisées.

3. Dans le sol de tanne vif, les conditions initiales d'aération, d'acidité et de salinité induisent, par le biais d'une activité microbiologique limitée, une évolution spéciale du fer soluble, de l'azote, de l'aluminium et de la silice. Le taux de ces index croît plus ou moins rapidement dans le temps.

b) Sur le plan de la distribution spatiale des teneurs moyennes en ces éléments :

1. Un enrichissement croissant le long de la topographie, en direction de la mangrove, les différences les plus marquées se localisant au niveau du tanne vif.

2. La dispersion des taux de matières oxydables est la plus régulière, le maximum étant enregistré sous le sol de mangrove et le minimum sous le sol de pente du plateau.

3. La distribution des sulfates, du potassium et du manganèse soluble se différencie de la précédente par la position des valeurs maximales situées sous le tanne vif. La dispersion est similaire dans le cas de la silice soluble, sauf que l'on note une dépression des teneurs localisées sous le tanne vif.

4. Pour le phosphore et l'azote, cette disposition séquentielle est légèrement modifiée. Les concentrations maximales et minérales sont respectivement enregistrées, sous mangrove évoluée et sous tanne vif. Abstraction faite de cette dépression des niveaux sous tanne vif, on retrouve l'enrichissement ionique décroissant en direction du plateau.

5. Dans le cas du fer et des acides organiques totaux, on note que la position du pôle des concentrations minimales se situe toujours sous le tanne vif, tandis que celui des concentrations maximales se déplace sous le tanne herbacé.

42. POTENTIALITES ET CONTRAINTES DES UNITES DE SOL DU PAYSAGE

Une analyse synthétique des informations recueillies in situ (2, 13, 22) et de celles observées présentement au cours des douze semaines de submersion, permet d'établir une dynamique des sols et de préciser les potentialités et contraintes existant dans chacune des unités de paysage. Elle permet également de fixer les limites de l'extension de la riziculture aquatique à moyen, court et long terme dans la plaine alluviale de la Casamance.

C'est ainsi qu'à contre courant des sols de la toposéquence on trouve les situations physico-chimiques et chimiques suivantes sous submersion.

421. Sol de mangrove évolué

De tous les sols, il possède le capital de contraintes actuelles et potentielles le plus élevé. Sa réaction est au départ voisine de la neutralité, mais elle peut développer son acidité potentielle très rapidement, sous l'action d'une oxydation brève et amener les valeurs du pH à un très bas niveau. Le phénomène a été constaté présentement avant submersion. Cette susceptibilité à l'oxydation se retrouve au niveau du potentiel rédox induit, outre la production d'acides sulfuriques, celle de divers sols solubles parmi lesquels des composés sulfatés et des acides organiques.

- Sous l'effet d'une submersion prolongée à l'eau douce, le pH tend donc vers la neutralité. La salinité décroît tout en demeurant à des niveaux élevés. La réduction s'accroît et provoque la libération en grandes quantités de matières oxydables et de fer ferreux.

Les éléments minéraux nutritifs N, K, Si sont présents en quantités appréciables, et seuls le phosphore et le zinc sont à des niveaux faibles.

- La mise en valeur "éventuelle" de ce type de sol suppose une maîtrise absolue du facteur hydrique qui conditionne à la fois : la lutte contre la salure et l'acidification.

422. Sol de tanne vif

Par suite de l'intervention d'une importante aération et d'un assèchement, les conditions d'acidité, de salinité et d'oxydation ont été exacerbées :

• sous l'action de la submersion, ces caractéristiques ont peu varié dans le temps. L'acidité et le potentiel d'oxydo-réduction après 12 semaines de submersion fluctuent respectivement autour de $pH=5,0$ et de $Eh=350$ mvolts. La charge ionique tend à baisser dans le temps, mais demeure toujours à des seuils extrêmement élevés ;

• la production de toxines dans ce sol n'est importante que pour les composés sulfatés et les matières oxydables. Le niveau de ces deux éléments diminue notablement dans le temps, mais se situent encore à des taux stressants pour les plantes. La fourniture en fer soluble et acides organiques est à tout moment faible ;

• il en est d'ailleurs de même pour l'azote et le phosphore dans le cas des éléments biogènes. Seuls les taux de silice et de potassium peuvent être tenus pour suffisants dans l'alimentation des plantes.

Ce profil physico-chimique et chimique est cependant susceptible de transformation radicale, dans le cadre de l'assainissement de ces sols pour leur mise en valeur à long terme. Le facteur hydrique constitue encore l'élément fondamental. Son rôle se situe davantage au niveau du dessalement qu'à celui de la préservation contre l'acidification. Bien au contraire, l'action du lessivage, en éliminant l'excès des sols solubles, diminue également le niveau des agents acidifiants, de même que celui de certains éléments minéraux nutritifs déjà faibles au départ.

Les difficultés d'ordre pratique rencontrées lors des tentatives de mise en valeur de ces sols résident dans les besoins considérables d'eau douce pour le dessalement (l'action des eaux de pluies est faible) et d'amendement calcique pour relever le niveau de la réaction.

Une action fertilisante soutenue à base d'amendements organiques évolués et de fumure minérale équilibrée s'avérera indispensable.

c) Sol de tanne herbacé

In situ, les conditions sont encore sévères dans ces sols pour les plantes à cause d'une acidité et d'une salinité excessives.

La submersion atténue quelque peu cette situation, en augmentant les valeurs du pH et en diminuant le taux de salinité qui demeure encore élevé. La réduction qui s'installe dans ces sols sous inondation est à la fois progressive et importante. Elle entraîne la libération d'importantes quantités de fer soluble et de matières oxydables. Les sulfates sont encore présents à un taux très élevé.

A l'exception du phosphore, les autres éléments nutritifs sont présents à des niveaux satisfaisants pour l'alimentation des plantes. La mise en valeur de ces sols nécessiterait également une élimination des composés toxiques en excès, par lessivage, drainage et chaulage. Cette élimination intéressera en priorité le fer, les sulfates et les matières oxydables, mais elle entraînerait également la perte en quantités élevées de potassium, azote et silice.

Comme dans le cas du sol de tanne vif, il s'avèrera donc indispensable de compenser ces pertes en éléments minéraux par des amendements organiques évolués et par une fumure minérale appropriée. L'expérimentation agronomique déterminera les conditions de cette fertilisation qui sera moins importante que dans le cas du sol de tanne vif. Ces sols pourront être rizicultivés à moyen terme, si des techniques culturales, tendant à augmenter leur stock hydrique, sont mis au point.

d) Sol de tanne herbacé évolué

Il se différencie du précédent par les points suivants :

- charge ionique plus faible, aboutissant à un dessalement quasiment total sous submersion prolongée ;
- tendance plus nettement marquée à la neutralisation de la réaction du sol, et à la réduction ;
- rizicultivabilité à court terme.

La mise en place très rapide d'un milieu réduit favorise la production de fer soluble en quantités excessives, gênant notablement le développement des plantes. Cet élément demeure (avec les sulfates) la contrainte majeure de ce sol.

Le niveau et la cinétique des éléments minéraux nutritifs dans la solution de ce sol sont proches de ceux observés dans les sols non salés. Ils sont le plus souvent présents en faibles quantités et baissent rapidement dans le temps.

L'expérimentation agronomique a montré qu'un redressement conséquent de la fertilité de ces sols doit être basé sur un apport d'amendements organiques évolués et sur une fumure minérale équilibrée.

- Une submersion prolongée de ces sols doit être également évitée pour empêcher la surproduction de certains composés réduits.

- L'acquis du dessalement obtenu par l'action cumulative des pluies doit être préservé par des techniques culturales tendant à limiter l'évaporation (paillage, travail superficiel du sol...).

e) Sol hydromorphe de bordure de plateau

Ce sol non salé possède les potentialités les plus importantes de la zone alluviale, pour la riziculture. Sa fertilité naturelle est uniquement entravée par une susceptibilité à la réduction rapide et intense. Cependant, compte tenu du niveau et de la qualité de ses composés oxydés et de sa matière organique, la production de toxines est faible à nulle. Les teneurs en phosphore, potassium, silice et zinc sont également faibles. Seul, l'azote se situe à des taux satisfaisants, mais sa pérennité est courte.

Une fertilisation à base d'amendements organiques évolués à peu évolués, associés à une fumure minérale d'entretien légère, devrait assurer un développement optimal des cultures.

f) Sol ferrugineux tropical sur pente

Le profil chimique de ce sol ressemble en tout point à celui du sol de bordure de plateau qui le précède. Il s'en différencie cependant par une moins forte capacité réductrice et par une plus grande pauvreté en éléments minéraux nutritifs. Ces derniers font défaut à tous les niveaux, l'azote étant d'ailleurs le mieux représenté. C'est pourquoi le redressement de la fertilité doit s'appuyer sur un amendement organique très évolué et sur une fumure minérale équilibrée en N, P, K, et Si. Ces sols ont une vocation de riziculture pluviale marquée.

43. DEVELOPPEMENT ET PERFORMANCES DU RIZ

La réaction des plantes face aux contraintes dans ces différentes unités de sol situe avec précision les limites actuelles de la riziculture dans la zone alluviale. Elles semblent dépendre principalement du niveau de salinité existant avant submersion, limitant ainsi la zone d'extension de la culture au niveau du sol de tanne évolué et dessalé.

431. Caractéristiques de la croissance

Les différences de comportement des plantes observées dans les trois sols tiennent à la qualité des milieux de supports. Cette qualité étant la résultante de l'équilibre entre contraintes et éléments de fertilité.

a) La croissance a été quasiment normale à tous ces stades dans le sol rouge de pente. Cependant, des signes de sénescence précoces ont été observés, de même que des signes d'épuisement en éléments minéraux (azote et potassium).

b) Dans le sol de bordure de plateau, la végétation a eu un bien meilleur aspect que celui du sol de pente. Le tallage a été cependant plus faible et la maturité plus tardive.

c) Les plants ont éprouvé beaucoup de difficultés dans leur phase d'installation à cause de l'acidité et de la salinité initiale encore élevées. D'ailleurs des symptômes d'excès de sels marqués par une décoloration médiane et terminale des feuilles ont apparu au stade plantule. Ils ont été vite résorbés et remplacés par de légers signes de Bronzing. Le bon tallage enregistré témoigne de la fugacité des phénomènes.

432. Rendements et composants

Les caractéristiques du rendement de l'IR8 dans ces sols sont transcrites dans le tableau ci-après :

	Nombre de talles	Panicules par talles	% panicules par talles	Poids moyens panicul (g)	Poids grains pleins (g)	Poids grains vides (g)	Poids paille (g)
rouge de de pla-	21	19	90	2,74	48,0	1,8	25,5
de bordure plateau	17	15	88	2,66	43,7	1,0	22,0
de tanne évolué dessalé	24	23	95	1,77	38,4	1,6	22,8

- Ces résultats indiquent l'existence d'un certain parallélisme entre la croissance et la productivité.

- Les meilleures performances sont obtenues sur le sol de pente grâce à un bon tallage, une bonne fructification et un meilleur remplissage des grains. Dans le sol dépourvu de contraintes, la production en grains serait améliorée par une meilleure nutrition et par une baisse de taux d'avortement des épisets.

- Dans le sol hydromorphe de bordure de plateau, les résultats sont plus faibles à cause d'un tallage et d'un taux de fructification réduits. Les rendements en paille et grains sont plus faibles que ceux du sol de pente mais le taux d'avortement est moins élevé.

- Seuls le poids paniculaire moyen et le rendement en grains sont fortement en retrait dans le sol de tanne évolué. Les produits toxiques présents en quantité encore appréciables dans ce sol interviendraient au niveau de la fructification.

433. Composition chimique

- Les résultats de l'analyse chimique foliaire, aux stades de tallage maximum, de la mi-floraison et de la maturité, montrent à la figure 10 que les exportations par les plants ne suivent pas toujours les indications fournies par la cinétique des éléments minéraux dans la solution des sols.

- On note que les éléments minéraux dans les feuilles sont faibles à tous les stades (fig. 10).

- Ces éléments suivent les mêmes mécanismes d'absorption par les plantes quelque soit le sol. Cependant l'allure de cette absorption est variable suivant l'élément considéré et le niveau est également variable suivant le sol.

- Les teneurs en phosphore dans les feuilles, décroissant à mesure que l'on s'éloigne des sols du plateau et des concentrations maximales, sont enregistrées au stade mi-floraison. L'absorption de la silice est à tout point symétrique à celle du phosphore.

- Les taux en potassium croissent dans le temps et l'augmentation est particulièrement importante après la mi-floraison. Cette alimentation potassique semble être assurée dans les sols situés à proximité du plateau.

- Les différences dans l'alimentation azotée, mesurées aux stades mi-floraison et maturité, sont très faibles.

434. Conclusion :

- L'équilibre, résultant de la production sous submersion de produits toxiques et d'éléments biogènes, détermine la survie et le comportement des plants dans les différents milieux. Il faut également souligner la prééminence des produits toxiques qui agissent négativement sur la croissance des doses même faibles.

- Les meilleures performances sont enregistrées en direction du plateau, plus à cause de l'absence de contraintes que de la présence d'éléments minéraux nutritifs. Cependant, on note une certaine relation entre le taux en phosphore des feuilles et la productivité en matières sèches.

CONCLUSIONS GENERALES

Le degré d'évolution et de différenciation des sols de la plaine alluviale de Basse Casamance entraîne des variations zonales qui se répercutent à la fois sur l'organisation du paysage et sur son utilisation agronomique.

Les effets conjugués du climat et de la végétation découpent, dans ce milieu, trois unités écologiques, identifiables par leurs caractères d'halomorphie et d'acidité ou par leur régime hydrique. Ces unités qui sont successivement (par degré de maturité croissante) : la mangrove, les tannes et les terrasses, évoluent différemment en condition de submersion prolongée à l'eau douce.

1/ Evolution des propriétés électrochimiques

Dans le temps, on observe que les valeurs tendent à augmenter et à se stabiliser autour de pH.6. La charge ionique de la solution des sols, c'est-à-dire le taux de salinité, quant à elle, décroît sensiblement ; mais les concentrations demeurent encore élevées sur les sols formés sur sédiments récents. Les niveaux du potentiel rédox décroissent également dans le temps mais elles n'atteignent jamais des valeurs négatives.

La distribution spatiale du niveau moyen de ces paramètres met en relief le caractère spécifique du sol de tanne vif, le moins influencé par la submersion. Il reste à tout moment : le plus acide, le plus salé et le plus oxydé. Abstraction faite de ce sol relativement stable, on note un gradient croissant de salinité en direction de la mangrove. Les sols les plus susceptibles à la réduction sont immédiatement situés de part et d'autre du tanne vif.

2/ Evolution des paramètres chimiques

Le niveau et la vitesse de libération de ces composés dans la solution du sol règlent les conditions de nutrition des plantes. Ils dépendent en général de la nature des matériaux de genèse, de leur degré de maturité et de l'état de la matière organique. Globalement, on note un appauvrissement du stock ionique en direction du plateau.

- La production de composés réduits toxiques est surtout forte dans la zone d'alluvionnement récent. Les concentrations de fer soluble, de sulfates et de matières oxydables, bien que décroissantes dans le temps, y sont à des niveaux letaux pour les plantes, tout au long de la submersion. Le sol de tanne vif se particularise encore par des taux de fer, et d'acides organiques relativement bas.

- la richesse en éléments minéraux nutritifs est décroissante en direction de la mangrove, avec une cassure très nette au niveau du sol de tanne évolué. Les concentrations sont particulièrement faibles dans les sols cultivés à cause de l'in-

tensité des exportations par les plantes. Cette pauvreté est surtout aiguë dans le cas du phosphore, du potassium et de la silice. Le niveau de tous ces éléments baisse dans le temps.

3/ Répartition et utilisation des sols :

Les indications fournies par les études pédologiques, chimiques et agronomiques permettent très schématiquement de regrouper les unités de sols de la plaine alluviale en quatre ensembles, compte tenu des possibilités de culture.

- Les sols de mangrove, soumis à l'influence quotidienne de la marée, n'offrent que des possibilités très faibles, voire nulles d'utilisation sans aménagements importants. A leur charge, notons : l'importance de leurs contraintes actuelles et potentielles, liée à leur manque de maturité et les difficultés techniques d'aménagement (proximité de l'eau du fleuve salée et polluante). Ces sols doivent être temporairement exclus des projets de mise en valeur en l'absence d'une maîtrise absolue du régime hydrique et d'une meilleure connaissance de leurs mécanismes d'évolution.

- Les sols de tanne vif qui couvrent une importante superficie sont susceptibles d'être aménagés. Ces sols halomorphes et à caractères acides sont actuellement inutilisés à cause de la présence en excès de sels solubles et de divers produits toxiques. La présence d'une source d'eau douce importante permettrait à long terme un dessalement. L'utilisation de ces sols nécessiterait alors un redressement conséquent de la fertilité par des amendements minéraux et organiques.

- Les sols de tanne herbacé et évolué :

Ces sols offrent des possibilités culturales à moyen et court terme, suivant leur degré de dessalement actuel (la flore pouvant être une bonne indicatrice - cypéracés et graminées - de l'état de maturité des sols). Les objectifs seront également dans ces sols : l'élimination des produits toxiques, le rabaissement du taux de salinité et le redressement de la fertilité. Les techniques d'endiguement, d'alternance de submersion et de dessiccation, de chaulage sont des moyens utilisables pour une rapide mise en valeur.

- Les sols de terrasses :

Bordant le plateau, ils ont de tout temps été cultivés. L'intensification de la riziculture passe par le redressement de la fertilité et l'atténuation de la production des composés toxiques à la réduction (présubmersion, aération des sols.....).

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

- 1 - BEYE G. 1971 - Amélioration des sols sulfatés acides pour la riziculture - Saturday Seminary. 56 p- IRRI Los Baños Philippines
- 2 - BEYE G. 1972 - Acidification des sols de mangrove de Basse Casamance, après leur mise en polder. Effet du type d'aménagement. Internat. Symp. on Acid Sulfate Soils - 13.20 August 1972 - Wageningen- 18 (2) - pp 359-371- I.R.L.I. publications
- 3 - BEYE G. - TOURE M. - ARIAL G.- 1975 - Etude de la Chimie des principaux sols submergés de Basse Casamance, en relation avec le développement et la nutrition du Riz - Station Recherches Rizicoles Djibélor (I.S.R.A.)
- 4 - BEYE G. - TOURE M. - ARIAL G.- 1975 - Acide Sulfaté Soils of West Africa Problems of their management for Agriculture use Internation Rice Research Conference - April 21-24-1975 Los Baños Philippines
- 5 - BLACK. C.A. and al- 1975- Methods of soils analysis- Agronomy n°9 - Edition Madison-- Wisconsin U.S.A.
- 6 - DOMMERMUES Y. - MANGENOT F.- 1970 - Ecologie microbienne des sols - Edition Masson - 196 p. Paris
- 7 - GARREL R.M. - CHRIST C.L.- 1965 - Solutions - Minerals and Equilibria - Edit. Hasper - Row 437 p. New-York U.S.A.
- 8 - INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE.- 1964 Annual Report 1963 - pp 63-88 - IRRI Los Baños Philippines
- 9 - INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE.- 1965 Annual Report 1964 -pp IRRI Los Baños Philippines
- 0 - INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE.- 1971 Annual Report 1970- 38-39p IRRI Los Baños Philippines
- 1 - INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE.- 1973 Annual Report 1972-94-105p IRRI Los Baños Philippines
- 2 - JACKSON M.L.- 1958 - Soil Chemical Analysis - G4T. Print : 1970 - 489 p - U.S.A.
- 3 - MARIUS C.- 1976 - Effet de la sécheresse sur l'évolution des sols de Mangrove - Casamance et Gambie - ORSTOM DAKAR 62 p.
- 4 - PONNAMPERUMA F.N.- 1955 - The Chemistry of Submerged Soils, in relation to growth and yield rice
- Ph. D. Thesis - CORNELL UNIVERSITY 208 ITHACA

- 15 - PONNAMPERUMA F.N.- 1966 - Ionic Strengths of the solution of flooded soils and other natural aqueous solutions from specific conductance. Soil Science - 102 (2)- pp 408-413.
- 16 - PONNAMPERUMA F.N.- and al. 1969 - Redox equilibria in flooded soils - The manganese oxide systems - Soil Science 108 (1) - pp : 48-57
- 17 - REDMAN F.N. - PATRICK Jr. W.H.- 1965 - Effect of submergence on several biological and chemical soils properties - Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College - Bulletin n° 592
- 18 - ROBINSON I.H.- 1972 - The effect of extreme acidity on the nutrient uptake and physiological plant - Internat. Symp. On Acid Sulphate Soils - 13-20 August 1972 Wageningen
- 19 - TANAKA A. YOSHIDA A.- 1970 - Nutritional disorders of the rice plant in ASIA - IRRI Tech. Bull. n°10 - 51p. IRRI Los Baños Philippines
- 20 - TUSNEEM M.E. - PATRICK Jr. W.H.- 1971 - Nitrogen transformation in waterlogged soils - Louisiana States University and Agricultural and Mechanical College - Bulletin n° 657 - 75 p.
- 21 - VAN BREEMEN - 1976 - Genesis and Soil chemistry of Acide sulfate Soils in THAILAND - "Pudoc" - C.A.P.D. Wageningen - 263 p.
- 22 - VIEILLEFON J.- 1974 - Contribution à l'étude de la pédogénèse dans le domaine fluviomarin en milieu tropical de l'Afrique de l'Ouest - These de Doctorat d'état - Université PARIS VI.
- 23 - YOSHIDA S. and al.- 1971 - Laboratory manual for physiological studies of rice - IRRI - Los Baños - Philippines.

	pH	C.E. mmos/ cm	Mat. org. %	C‰	N‰	C/N	Granulométrie %					Sels solubles %				
							A	L	STF	SF	SG	SO ₄	Cl	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ H
- Dj 1	5,4	0,12	0,70	3,99	0,28	14,2	9,15	4,45	7,12	46,5	32,78	0,06	0,56	0,52	0,02	0,24
- Dj 2	4,9	0,14	0,96	5,59	0,98	6,4	19,74	21,43	6,49	25,5	26,84	0,06	0,25	0,56	0,02	0,12
- Dj 3	3,6	1,21	1,17	6,78	0,45	14,9	11,06	8,30	19,27	42,45	17,41	0,06	2,25	4,56	0,02	0,24
- Dj 4	3,9	6,00	0,90	5,23	0,42	12,5	23,44	7,03	6,00	33,31	30,21	0,75	9,91	26,95	0,25	0,30
- Dj 5	4,6	12,80	0,96	5,59	0,21	26,6	12,06	8,29	13,92	27,05	38,68	0,40	25,80	60,0	0,78	0,24
- Dj 7	3,2	15,0	2,10	12,17	0,28	43,5	9,63	2,68	0,72	41,42	45,55	5,24	10,75	28,69	0,11	0,25

Tableau : n° 1 Caractéristiques analytiques des sols.

Date	Temps (jours)								
	0	14	28	42	56	70	84	96	
Dj 1	4,60 5,10 3,50	1,91 2,08 1,93	3,40 3,40 3,30	2,81 2,70 2,82	2,01 1,45 1,65	1,62 1,84 1,75	1,46 1,55 1,45	1,13 1,23 1,23	
Dj 2	4,90 4,90 2,45	2,05 2,01 1,84	3,40 3,60 2,70	2,00 2,27 1,92	1,38 1,48 1,14	1,05 1,25 1,13	0,85 1,05 0,90	0,70 0,65 0,59	
Dj 3	46,00 26,60 35,00	19,0 22,4 20,1	14,80 16,10 14,10	13,30 14,60 12,50	11,50 11,50 11,50	8,70 10,10 8,80	8,20 8,90 8,00	5,50 6,70 7,00	
Dj 4	65,00 83,00 85,00	61,0 66,0 68,0	45,00 45,00 47,00	58,00 59,00 63,00	50,00 50,00 55,00	35,00 39,00 43,00	35,00 35,00 37,00	25,90 29,00 15,50	
Dj 5	136,0 123,0 120,0	91,0 90,0 91,0	60,00 64,00 63,00	10,50 12,10 12,20	10,00 11,00 11,10	77,0 90,0 90,0	65,0 76,00 80,00	60,00 65,00 65,00	
Dj 6	82,00 83,00 94,00	71,0 71,0 73,0	50,00 49,00 49,00	74,00 69,00 68,00	72,00 64,00 67,00	50,0 47,0 48,0	44,00 41,00 40,00	39,00 40,00 29,50	
Dj 7	105,0 113,0 120,0	83,0 81,0 80,0	67,00 55,00 56,00	87,00 65,0 90,0	87,00 70,00 81,00	63,0 60,0 58,0	57,00 44,00 55,00	51,00 43,00 55,00	

Tableau n° 2 : Evolution de la conductivité (mmhos/cm à 25°)

		Eh	CE	SO ₄	Fe	Corrélation multiple
j 1	pH	<u>-0,7337**</u>	-0,4040	-	+0,1919	+ 0,6890
	Eh	-	<u>+0,8320**</u>	-	-0,6887**	
	CE	-	-	-	-0,6842**	
	SO ₄	-	-	-	-	
j 2	pH	<u>-0,6830**</u>	+0,0011	-0,3191	+0,6502**	+ 0,6895
	Eh	-	<u>+0,5893**</u>	+0,7566**	-0,8017**	
	CE	-	-	+0,7440**	-0,3035	
	SO ₄	-	-	-	+0,4496*	
j 3	pH	<u>-0,9678**</u>	-0,8465**	-0,4560*	+0,7581**	+ 0,8249
	Eh	-	<u>+0,8294**</u>	+0,3614	-0,7806**	
	CE	-	-	+0,6580**	-0,4174	
	SO ₄	-	-	-	+0,0434	
j 4	pH	<u>-0,9083**</u>	-0,6676**	-0,5080*	*0,6949**	+ 0,6890
	Eh	-	<u>+0,7976**</u>	+0,4262	-0,8084**	
	CE	-	-	+0,6290**	-0,7523**	
	SO ₄	-	-	-	-0,4239	
j 5	pH	<u>-0,6758**</u>	+0,4796*	-0,4235	+0,3085	+ 0,2670
	Eh	-	<u>+0,4478</u>	+0,2122	-0,0885	
	CE	-	-	+0,1656	-0,2521	
	SO ₄	-	-	-	-0,4578*	
j 6	pH	<u>-0,4063</u>	+0,1285	-0,2133	-0,0847	+ 0,7297
	Eh	-	-0,3201	+0,2964	-0,3452	
	CE	-	-	+0,6148*	-0,6205**	
	SO ₄	-	-	-	-0,8401**	
j 7	pH	<u>-0,8426**</u>	-0,7096**	-0,6133	+0,3450	-0,5921
	Eh	-	<u>+0,6741**</u>	+0,4946*	-0,4405*	
	CE	-	-	+0,5226*	-0,2030	
	SO ₄	-	-	-	-0,2959	

F 0,01 = 0,5490
F 0,05 = 0,4330

** Corrélations hautement significatives
* Corrélations significatives

Tableau n° 3 : Coefficients de corrélation entre paramètres principaux.

Temps jours	0	14	28	42	56	70	84	98
Traitements								
Dj 1	0,84 0,90 0,70	0,98 1,02 0,90	1,00 1,30 0,94	0,68 0,72 0,58	0,52 0,66 0,48	0,68 0,88 0,76	0,46 0,50 0,46	0,42 0,58 0,44
Dj 2	4,1 4,0 3,5	4,1 3,5 3,4	4,3 4,1 4,5	3,5 3,1 3,3	1,95 2,05 1,95	2,50 2,60 2,95	1,40 1,85 2,05	1,35 1,45 1,45
Dj 3	10,2 13,5 10,2	5,0 5,8 5,4	6,0 6,4 5,0	2,1 2,3 2,6	0,9 1,4 1,3	2,25 1,85 1,80	1,75 0,80 1,00	1,65 1,50 1,45
Dj 4	5,4 9,4 8,6	7,8 9,4 10,0	6,2 7,0 6,8	3,6 3,4 4,4	3,4 3,4 3,6	3,7 4,2 4,1	2,40 2,90 3,10	2,90 3,20 3,40
Dj 5	6,4 4,8 4,7	18,5 17,5 17,5	12,5 14,5 20,5	4,8 6,8 6,6	3,3 3,4 3,6	3,1 4,1 4,2	1,05 1,50 1,65	2,15 2,45 2,50
Dj 6	7,8 9,0 8,2	9,8 10,0 16,5	8,2 6,8 8,0	4,2 3,6 3,3	2,6 2,5 2,6	2,5 2,7 2,6	1,75 1,60 1,45	1,35 1,45 1,45
Dj 7	9,6 12,5 13,0	17,5 15,0 16,0	18,5 18,0 12,5	17,0 18,0 19,5	5,8 6,4 5,2	4,7 3,7 4,2	3,10 2,10 3,20	3,10 2,20 2,90

Tableau : N° 4

Evolution des matières oxydables en
(me/l)

Temps jours	0	14	28	42	56	70	84	98
Traitements								
Dj 1	3,50 3,25 1,75	2,25 2,50 2,50	1,50 2,00 1,75	5,50 6,00 5,75	4,00 3,50 3,00	3,00 3,25 3,25	3,50 3,00 4,00	3,50 3,50 3,00
Dj 2	2,50 3,50 2,25	5,75 5,00 4,75	4,25 3,00 3,00	2,00 2,25 2,25	3,50 4,75 4,00	2,75 2,75 2,75	2,00 3,00 2,50	2,50 3,50 2,50
Dj 3	2,25 2,25 2,25	9,50 12,25 11,25	7,25 7,00 7,25	5,00 6,50 6,25	6,50 5,00 5,50	5,75 5,50 5,75	5,00 4,00 5,00	4,50 4,50 4,00
Dj 4	2,50 2,50 2,25	6,00 6,50 6,25	7,00 7,25 8,00	7,50 7,75 7,50	11,50 13,00 12,50	9,50 9,75 9,50	8,00 8,00 8,50	7,50 7,00 6,50
Dj 5	2,75 2,50 2,00	1,75 1,75 1,75	3,00 3,25 3,75	3,25 3,00 3,25	2,50 2,00 1,75	1,75 1,50 1,50	5,00 4,00 3,50	4,00 2,00 1,50
Dj 6	2,00 2,75 2,50	2,75 2,50 2,50	2,25 3,75 3,00	2,00 2,00 2,25	2,50 2,50 3,25	3,25 3,50 3,50	4,00 4,00 4,00	4,00 4,50 4,00
Dj 7	3,00 2,50 3,00	9,00 9,50 9,50	10,25 9,00 8,75	3,75 3,75 4,00	5,75 6,00 6,25	5,00 4,75 5,00	4,50 4,50 4,50	4,00 4,00 4,00

bleau : N° 5 Evolution des acides organiques totaux (meq/l)

Temps jours		0	14	28	42	56	70	84	98
Traitements									
Dj 1		0,6	0,2	0,5	0,2	9,0	7,0	1,0	
		0,6	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	6,5	
		0,6	0,2	0,5	0,2	6,0	0,5	7,0	
Dj 2		0,3	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	
		0,6	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	
		0,3	0,2	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	
Dj 3		0,3	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	1,0	
		0,3	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	
		0,3	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	
Dj 4		0,3	8,0	8,0	0,5	0,5	0,5	0,5	
		16,5	9,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
		10,0	10,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Dj 5		7,5	7,0	6,5	2,5	5,0	4,0	0,5	
		6,0	7,0	7,0	1,0	5,0	4,5	1,0	
		0,3	6,5	2,0	1,0	4,5	4,5	4,0	
Dj 6		5,0	6,0	0,5	0,5	4,5	0,5	0,5	
		4,0	5,0	6,0	0,5	4,0	4,0	0,5	
		5,0	6,0	0,5	0,5	4,0	0,5	0,5	
Dj 7		0,3	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	
		0,3	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
		0,3	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	

bleau N° 6 : Evolution de Mn (ppm)

Temps jours		0	14	28	42	56	70	84	98
Traitements									
Dj 1		15,00	13,5	0,6	0,1	0,10	0,06	0,17	0,21
		26,48	3,5	0,7	0,4	0,16	0,12	0,25	0,29
		23,00	3,5	2,2	1,4	0,10	0,06	0,25	0,21
Dj 2		31,00	-	2,2	0,1	0,16	0,06	0,09	0,20
		31,00	-	-	0,1	0,10	0,06	0,09	0,25
		5,00	6,0	-	0,1	0,10	0,06	0,09	0,21
Dj 3		32,00	-	0,3	0,06	0,16	0,12	0,17	0,12
		24,00	-	0,3	2,00	0,10	0,12	0,09	0,17
		20,48	13,0	-	2,87	0,16	0,12	0,09	0,12
Dj 4		2,24	9,0	0,3	7,5	0,16	0,12	0,33	0,17
		10,00	-	0,3	4,4	0,74	0,12	0,33	0,33
		14,00	--	-	0,6	1,00	0,12	0,17	0,33
Dj 5		5,48	12,0	2,8	1,0	0,62	0,24	0,17	0,25
		2,92	5,5	1,0	0,4	0,10	0,50	0,17	0,12
		5,00	3,5	1,0	0,7	0,50	0,26	0,09	0,17
Dj 6		23,40	2,7	0,7	1,00	0,16	0,06	0,25	0,24
		25,00	3,5	0,7	0,25	0,10	0,06	0,17	0,17
		14,00	5,5	1,0	0,87	0,62	0,74	0,25	0,55
Dj 7		21,00	9,5	12,2	11,5	8,5	13,0	5,16	3,41
		4,48	12,0	18,7	14,5	8,5	16,0	6,06	4,49
		28,00	4,0	19,2	14,5	2,4	10,5	4,33	4,49

Tableau N° 7 : Evolution de P2⁰⁵(mg/l)

Temps jours		0	14	28	42	56	70	84	98
Traitements									
Dj 1		1,02	0,15	1,71	0,30	Tr.	0,17	1,02	Tr.
		1,18	0,04	0,75	0,02	0,12	0,43	0,25	0,02
		0,24	Tr.	0,15	Tr.	0,07	Tr.	0,71	Tr.
Dj 2		0,48	0,17	1,48	0,80	0,08	0,85	0,58	Tr.
		0,46	1,94	0,66	0,52	0,34	0,43	0,49	0,08
		0,16	0,21	1,63	2,28	0,40	0,29	0,05	Tr.
Dj 3		1,77	0,47	1,16	Tr.	0,17	Tr.	1,09	0,04
		3,75	0,83	1,61	0,38	0,27	Tr.	0,22	0,08
		1,21	0,38	0,55	Tr.	0,22	0,33	0,32	0,02
Dj 4		1,51	2,06	0,64	0,12	0,52	0,38	0,15	0,04
		1,85	1,42	1,84	0,77	0,73	0,47	1,83	0,16
		1,88	1,98	1,89	0,11	0,51	0,34	0,25	0,12
Dj 5		1,90	1,75	1,68	0,57	0,61	0,43	0,43	0,26
		1,24	2,83	2,26	1,08	0,84	0,43	0,52	0,48
		1,30	2,25	1,66	1,0	1,21	0,37	0,32	0,11
Dj 6		1,39	1,82	1,86	0,80	0,23	0,45	0,68	0,32
		1,62	6,11	1,23	0,58	0,42	0,17	0,25	0,12
		1,78	1,84	1,70	0,67	0,14	0,32	0,20	0,18
Dj 7		1,54	1,63	0,66	1,16	0,06	0,35	0,02	Tr.
		1,68	0,86	1,32	0,06	0,38	0,01	0,19	0,12
		2,40	2,10	0,50	Tr.	0,24	Tr.	0,07	Tr.

Tableau N° 8 : Evolution du zinc soluble (ppm)

