

CI 000 322

1988/74

C194504
P350
200

000-11/CI

ISRA - FLEUVE
BIBLIOTHEQUE
DOC. N°

FERTILITE ET FERTILISATION DES
SOLS RE RIZIERES DANS LA VALLEE
DU FLEUVE SENEGAL

J. P. NDIAYE, Ph. D

1987

- S O M M A I R E -

Pages

AVANT-PROPOS	
INTRODUCTION	1
I - Le Milieu Naturel	3
1.1 - Le Climat	31
1.2 - Aspects géomorphologiques	31
1.3 - Pédogénèse	41
1.4 - Les sols et leur fertilité naturelle	6
1.4.1 - Types de sols de la vallée et du delta	6
1.4.2 - La fertilité naturelle des sols	11
1.4.2.1 - Sols peu évolués d'apport	11
1.4.2.2 - Vertisols et sols à caractères vertiques	12
1.4.2.3 - Sols hydromorphes	15
1.4.2.4 - Sols halomorphes	17
II - Fertilisation des sols	20
2.1 - Période 1947-1960	20
2.2 - Période 1961-1967	21
2.3 - Période 1968-1974	24
2.4 - Période 1975-1986	31
III - Conclusions	40
IV - Bibliographie	43

AVANT - PROPOS

Le présent document se propose de faire le point des connaissances actuelles sur la fertilité et la fertilisation des sols de rizières dans la **vallée** du fleuve Sénégal. Notre **souci** en redigeant ces quelques **lignes** est donc de faire un travail de **synthèse** pouvant servir aux chercheurs et aux agents du développement agricole du Sénégal.

De nombreux **essais** de fertilisation ont **été réalisés** dans la vallée du fleuve Sénégal depuis 1947. Cependant, le présent document n'est pas un **répertoire** complet des **études** de fertilisation qui ont été réalisées depuis cette date. Nous avons dû négliger les résultats de certains essais soit à cause du manque d'information sur les conditions dans lesquelles ces essais ont été réalisés (types de sols et leurs caractéristiques physico-chimiques, renseignements fondamentaux sur la variété utilisée, techniques culturales, etc...), soit à cause du manque de précision (CV très élevé).

FERTILITE ET FERTILISATION DES SOLS DE RIZIERES DANS LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL

INTRODUCTION

La vallée du Fleuve renferme de très grandes potentialités agricoles. Sa valeur paraît encore accrue du fait de sa situation entre deux zones semi-désertiques, la Mauritanie au Nord et le Plateau du Ferlo au Sud. On a toujours reconnu à la vallée du fleuve Sénégal des possibilités de mise en valeur agricole par l'eau. C'est ainsi qu'en 1937, c'est-à-dire deux ans après la création de la Mission d'Etude du Fleuve Sénégal, fut élaboré un programme d'aménagement du delta en casier rizicole dont la mise en oeuvre fut confiée en 1938 à la Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal (M.A.S.). Les nombreuses études qui ont été réalisées ont abouti, après 1945, date de la création du casier Expérimental de Richard-Tell, à l'aménagement de 5 000 ha environ dont la gestion fut confiée par la suite à la Société pour le Développement de la Riziculture au Sénégal (S.D.R.S.). Grâce à la collaboration entre des agents de la M.A.S., des chercheurs du Centre de Recherches Agronomiques (C.R.A.) de Bambey et de l'ORSTOM les prospections pédologiques, les analyses et les expérimentations qui ont été réalisées ont permis d'apporter des précisions sur la nature et la fertilité des sols de la vallée du fleuve Sénégal. A partir de 1961 les recherches dans la Vallée furent confiées à l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières (IRAT) qui a alors repris les études sur la fertilité et la fertilisation des sols d'une façon plus systématique jusqu'en 1974., date à partir de laquelle l'Etat sénégalais a chargé l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) de la recherche agricole dans la vallée du fleuve Sénégal.

Les orientations des recherches en matière de fertilité et de fertilisation des sols de la vallée du fleuve Sénégal ont presque toujours été les mêmes : amélioration et maintien de la fertilité des sols en relation avec la riziculture (types de fumures, doses, fractionnement, données économiques, amendements organiques). Les nombreuses études qui ont été réalisées depuis 1947 sur la fertilité et la fertilisation des sols ont abouti aujourd'hui à des propositions de fumures vulgarisables. Cependant la mise en eau des barrages de Diama et Manantali va créer de nouvelles conditions de culture (double, voire triple culture) qui requièrent une meilleure appréhension des problèmes de fertilité des sols et une meilleure

efficience de la fumure minérale compte tenu de sa cherté.

Quel est alors l'état des connaissances actuelles sur la fertilité et la fertilisation des sols de rizières dans la vallée du fleuve Sénégal ?

C'est à cette question que nous allons tenter de répondre dans les pages qui suivent.

II - LE MILIEU NATUREL

1.1 - Le climat

La vallée du fleuve Sénégal a un climat tropical sec caractérisé par deux saisons très marquées : saison humide ou hivernage et saison sèche. Ces deux saisons sont déterminantes des systèmes agricoles traditionnels : cultures pluviales d'hivernage sur Diéri, cultures de décrue de saison sèche dans les cuvettes. Le climat est subcanarien sur le littoral de Saint-Louis, plus ou moins maritime dans le Delta, et très continental en amont.

La pluviométrie est très irrégulière. Les pluies sont souvent violentes, courtes et localisées. Les variations des hauteurs de pluies sont à peu près les suivantes : 500-1000 mm dans la haute vallée ; 400-600 mm dans la moyenne vallée ; 300-400 mm dans la basse vallée ; 300-400 mm dans le Delta.

Les variations thermiques sont extrêmes : 12-45°C dans la haute vallée ; 14-43°C dans la moyenne vallée ; 15-39°C dans la basse vallée ; 15-32°C dans le Delta. L'évaporation mesurée au bac "class A" monte à 400 mm/an. L'humidité relative est généralement inférieure à 50 % de mars jusqu'aux premières pluies. L'insolation moyenne est d'environ 3000 heures/an.

1.2 - Aspects géomorphologiques

La vallée du fleuve Sénégal est un ensemble géomorphologique complexe formé au cours du Quaternaire (Michel, 1960). Le faciès actuel de cet ensemble géomorphologique dérive d'une histoire faite d'une succession de régressions et transgressions.

On distingue généralement trois zones à écologie différente :

- a) la basse vallée de Saint-Louis à Richard-Toll ;
- b) la moyenne vallée de Richard-Toll à Matam ;
- c) la haute vallée de Matam à Bakel.

Dans ces trois zones un certain nombre d'unités géomorphologiques se distinguent aisément par leur situation géographique, leur relief, leur composition minéralogique et leur végétation (S.E.D.A.G.R.I., 1973). Le faciès géomorphologique se caractérise par la coexistence de deux grandes formations nettement tranchées et d'âges différents :

- a) le modèle dunaire ("Diéri") ;
- b) la vallée alluviale ("Oualo").

La vallée alluviale correspond aux formations du lit majeur mises en place par alluvionnement du fleuve, ses affluents et défluent. La riziculture se pratique essentiellement dans la plaine alluviale et le delta. Dans la plaine alluviale et le delta on distingue :

1) Un système de levées fluviales qui regroupe :

- a) les hautes levées qui sont d'anciens bourrelets de berge bordant le fleuve, ses affluents et défluent et dont le matériel est constitué de sable fin et de limon bien compacts recouvrant souvent un support argileux salé ;
- b) les petites levées qui sont des formations situées entre les hautes levées et les cuvettes argileuses donc à matériau plus argileux que celui des hautes levées ;
- c) les levées actuelles et subactuelles correspondant aux derniers; bourrelets de berge les plus bas et édifiées par sédimentation essentiellement sableuse ;

2) Les deltas de rupture de levée. Ces formations accompagnent souvent les hautes levées. Leur ~~matériau~~ est sablo-limoneux hétérogène. Les dépôts de ces formations ont quelque peu contribué au fractionnement des parties basses du lit majeur en une multitude de cuvettes isolées les unes des autres ;

3) Les cuvettes de décantation argileuse. Ces formations correspondent, dans la vallée alluviale, à toutes les parties basses du lit majeur régulièrement inondées par la crue du fleuve Sénégal. Leur matériau argileux recouvre souvent directement les sables-blancs du Nouakchottien ou les dépôts fluviaux sablo-argileux.

Les formations du lit majeur subissent annuellement un régime d'inondation qui impose aux sols une évolution pédogénétique dominée essentiellement par l'hydromorphose (SONKO, 1974).

1.3 - Pédogénèse

Les sols de la vallée alluviale sont tous, plus ou moins jeunes (Michel et Durand, 1978).

La pédogénèse dépend étroitement du microrelief, de la nature du terrain et de la durée de la submersion par la crue. Dans certains cas la formation n'est jamais inondée, ou est inondée seulement au maximum des crues exceptionnelles.

L'hydromorphose jouant alors un rôle très réduit la pédogénèse a formé des sols peu évolués d'apport modal sur les parties élevées des hautes levées. Dans d'autres cas l'inondation de la formation ne se produit qu'aux crues moyennes et fortes et le sol se ressuie très vite après le retrait des eaux. L'hydromorphose n'affecte guère l'horizon supérieur du sol. Cependant, des phénomènes d'oxydo-réduction apparaissent dans l'horizon sous-jacent où l'eau séjourne plus longtemps. Il en résulte des sols peu évolués d'apport hydromorphes. Sur les deltas de rupture de levées apparaissent des sols peu évolués d'apport sur les parties hautes et des sols hydromorphes sur les parties plus basses où la submersion est annuelle. Du fait de la généralisation de l'hydromorphose des taches apparaissent dès la surface.

Certaines petites levées sont recouvertes par la crue pendant une durée plus ou moins longue. Dans ces conditions l'eau du sol est souvent difficilement évacuée et les phénomènes d'oxydo-réduction se manifestent pleinement. Il en résulte des ~~sols~~ hydromorphes à pseudogley, marqués par la présence de taches et concrétions ferrugineuses.

Dans certaines cuvettes de décantation bien drainées l'eau est évacuée assez rapidement. L'hydromorphose à laquelle sont soumis les sédiments fins de ces cuvettes est faible et se traduit par la présence éventuelle de petites taches grisâtres. Cette pédogénèse donne des vertisols topomorphes non grumosoliques. Cependant, dans les parties basses des cuvettes l'eau séjourne très longtemps. Dans ces conditions l'hydromorphose se manifeste au maximum et les phénomènes de réduction dominant à cause de la grande finesse des alluvions. Ainsi se forment des sols à gley de surface et d'ensemble.

Enfin dans la région du delta la pédogénèse est marquée essentiellement par la présence de sels d'origine marine. Du sel s'est sédimenté avec du sable fin et limon dans les levées deltaïques. Ces sels sont relativement riches en sulfates et des processus chimiques complexes les transforment en acide sulfurique qui peut abaisser le pH des sols jusqu'à 1,5 (SEDAGRI, 1973). Les sols du delta sont donc presque tous halomorphes. Cependant, des différences apparaissent en fonction du modèle et de la nature des eaux de submersion. Sur certaines levées deltaïques où le sel est surtout fossile se sont formés principalement des sols salins acidifiés. Cependant-il peut arriver que le terrain soit relativement bien drainé. Dans ce cas ces sols peuvent se transformer localement en sols peu évolués d'apport hydromorphes. Dans les cuvettes de décantation envahies par l'eau salée se sont formés des sols salins acidifiés à croûte saline de surface. Sur les cuvettes qui tendent à se dessaler grâce à l'eau douce de la crue apparaissent des sols hydromorphes à pseudogley ou à gley.

1.4 - Les sols et leur fertilité naturelle

1.4.i - Types de sols de la vallée et du delta

Un aperçu sur les sols est d'abord indispensable car les alluvions du fleuve Sénégal donnent naissance à des terrains variés. Les cultivateurs de la vallée ont une connaissance approfondie de leurs sols.

C'est ainsi qu'ils donnent aux terres des dénominations différentes :

- a) suivant leur situation ;
- b) suivant leur composition ou leur valeur agricole.

Les termes utilisés pour désigner les terrains sont d'origine Peulh.

Les principaux termes usités pour désigner les terrains d'après leur situation sont les suivantes :

- 1 - Falo : Ce sont les berges du fleuve ;
- 2 - Diacré : Zone succédant au Falo plus élevée que lui et se rencontrant surtout lorsque les berges sont basses ;
- 3 - Fondé : Sommet des berges comportant des terrains qui sont rarement inondés et d'autres qui ne le sont qu'exceptionnellement ;
- 4 - Dualo : Ensemble des terrains inondés régulièrement. Les parties cultivées du Dualo se divisent en Collaldé (singulier : collengal) comprenant un ensemble de champs et délimité d'une façon bien précise par un marigot, une terre inculte ou un accident quelconque de terrain ;
- 5 - Djedjogol : Zone intermédiaire entre le Dualo et le Diéri. Ses terres sont inondées irrégulièrement ;
- 6 - Diéri : Zone jamais atteinte par les inondations. Un ren-contre parfois des dunes de Diéri à l'intérieur même de la zone d'inondation.

Parfois les mêmes termes servent à désigner les terrains aussi bien d'après leur situation que leurs qualités. Les désignations qui servent à définir les terrains d'après leurs qualités sont les suivantes (trois classes principales) :

- 1. **Fondé** : Terres exceptionnelement inondées. Ces sols sont fluides lorsqu'ils sont humides, durcis lorsqu'ils sont secs, pulvérulents lorsqu'ils sont travaillés. On distingue différents types de terres Fondé :

- . Fondé ranéré
- . Fondé oualéré
- . Fondé ouaka
- . Fondé ouakdjidiou ;

2. Hollaldé : Ce sont les terres les plus basses du Oualo. Elles sont régulièrement inondées. Ces sols se fissurent profondément et se divisent en agrégats très nets. Différents types de terres Hollaldé existent :

- . Hollaldé balléré
- . Ouaka ~~Hollaldé~~
- . Hollaldé ouakdjidiou ;

3. Toguéré : Ces terres forment en général des îlots dans le Oualo.

Cette nomenclature des sols de la vallée alluviale est quelque peu similaire à celle élaborée par Maynard qui a étudié ces sols au cours des années 1953 à 1960. En effet Maynard (1960) distingue trois types de sol dans cette grande vallée alluviale :

- 1) les sols à taches et concrétions, principalement formés sur les limons sableux des hautes levées qui bordent le fleuve ou des bras morts. Ils se caractérisent par la présence de taches irrégulières et de petites concrétions surtout ferro-manganésiques. Leur durée de submersion varie entre 0 et 30 jours ;
- 2) les tirs qui se développent sur les terrains argileux des cuvettes, submergés de 30 à 120 jours. Ces sols de couleur foncée acquièrent une structure massive et sont fissurés en saison sèche par les fentes de dessiccation ;
- 3) les sols à gley, qui se situent en bordure des mares temporaires ou permanentes. Dans ces sols fortement marqués par la persistance de l'eau le fer se trouve réduit à l'état ferreux, donnant des teintes gris-bleutées au profil.

Dans la région du delta Maynard (1960) distingue des solontchaks vifs, lorsque les remontées de sel sont visibles en surface, et des crypto-solontchaks, sans efflorescences salines.

Un travail important de prospection et de cartographie des sols de la vallée du fleuve Sénégal a été réalisé depuis plusieurs années. Les données actuellement disponibles sont assez nombreuses : cartes pédologiques et géomorphologiques, cartes d'aptitudes culturales. Ces cartes appartiennent à l'ensemble plus vaste dressé pour la F.A.O par la SEDABRI (1973), et qui couvre l'ensemble de la vallée du fleuve. Par ailleurs l'on dispose de nombreuses données plus localisées grâce aux travaux des pédologues de la M.A.S, de l'IRAT, de la S.C.E.T, du projet FAO, de la SAED et de la C.S.S. La classification française des sols a été utilisée dans ces études.

Il convient de noter que dans les régions tropicales trois systèmes de classification des sols sont communément employés : la classification taxonomique des sols des Etats-Unis (Soil Survey Staff, 1975), le système de classification FAO/UNESCO et la classification française URSTOM. Pour les sols rizicultivables de la vallée et du delta du fleuve Sénégal une tentative de corrélation entre les trois systèmes de classification a été faite par Camara (1985).

Les différents groupes de sols sont présentés au tableau 1. Les sols rizicultivables forment donc de véritables paysages pédologiques dans la vallée et le delta du fleuve Sénégal où la topographie constitue un facteur primordial de différenciation des sols.

Tableau i : Groupe. de sols rizicultivables de la vallée et du delta du fleuve Sénégal et leur superficie relative (-Source : Camara, 1985)

Classification française (CPSS, 1967)	Soil Taxonomy (USDA, 1975)	FAU-UNESCO	Superficie (%)
1. SOLS PEU EVOLUES D'APPORT - <u>Modal</u> : se trouvent dans la partie haute des levées rarement inondées. Teneur en argile < 35 % et argile + limon > 50 % et bonne drainabilité. - hydromorphes : zone moyenne des levées périodiquement inondées. Texture moyenne, seule la présence de gley en profondeur les distingue du groupe précédent ; drainabilité moins bonne. - <u>Vertiques</u> : faiblement représentés dans les petites levées ; texture moyenne ; argile < 48 % en surface ; drainabilité faible.	USTIFLUVENTS HAPLUSTOLLS TORRIFLUVENTS	FLUVISUL EUTRIQUE	18.1
2. VERTISOLS TOPOMORPHES NON GRUMUSULIQUES A DRAINAGE EXTERNE NUL OU REDUIT Ce sont des sols des cuvettes de la vallée et des petites levées à texture fine : 55 % d'argile en moyenne sur plus de 1 m d'épaisseur, le plus souvent gonflante. Microrelief gilgai ; drainabilité à peu près nulle.	TURRERTS <u>"Palleustollic Torrerts</u> fine clayey"	VÉRTIQUE CHROMIQUE	18.9

Tableau 1 (suite)

Classification française (CPSS, 1967)	Soil Taxonomy (USDA, 1975)	FAO-UNESCO	Superficie (%)
3. SOLS HYDRUMORPHES Ce sont les sols des parties basses mal drainées à texture fine à très fine. L'hydromorphie se manifeste par des gley de surface et d'ensemble. Très faible drainabilité. On trouve un sous-groupe à gley salé dans le delta. Le sous-groupe à pseudogley à taches et à concrétion se trouve dans la plupart des unités géomorphologiques. La texture est moyenne et parfois grossière. Drainabilité suffisante.	TURRIORTHENTS <u>"Ustic torriorthents</u> clayey over sandy"	FLUVISOL EU-TRIQUE	5.2
	<u>"Ustertic Torriorthents</u> clayey over sandy"	FLUVISOL EUTRIQUE	0.7 3.5
4. SOLS HALOMORPHES Ils sont localisés dans le delta et dans la basse vallée jusqu'à Podor. On retrouve dans ce groupe : - sols salins à encroûtement salin superficiel dans les vasières et les cuvettes de décantation - sols salins à horizon superficiel friable dans presque toutes les unités géomorphologiques du delta - Salinité > 500 μhos/cm - sols salins acides - groupe le plus important présent dans toutes les unités deltaïques - sols halomorphes à structure dégradée (sols à alcalis).	TROPAQUEPTS HALAQUEPTS HAPLAQUEPTS "Sulfaquepts" "Sulfaquents"	GLEYSOL EUTRIQUE	0.1 1.1 20.1 0.4

1.4.2 - La fertilité naturelle des sols

La vallée du fleuve Sénégal se révèle très variée par la diversité des terrains et donc des sols. Pour la caractérisation de la fertilité naturelle des sols nous nous limiterons seulement aux groupes de sols présentés dans le tableau 1 en donnant les variations des caractéristiques physiques et physico-chimiques de quelques sols représentatifs.

L'étude des caractéristiques analytiques va porter sur la mesure du pH, de la granulométrie, de la matière organique, du complexe absorbant etc... Il convient de noter que les analyses de sol sont souvent sujettes à des variations importantes et à des erreurs non négligeables provenant de l'échantillonnage sur le terrain et des méthodes utilisées au laboratoire.

La fertilité d'un sol est étroitement liée à la matière organique qu'il contient. Dans les sols minéraux, la fertilité croît lorsque le taux de matière organique augmente, à condition toutefois que le rapport C/N (carbone azote) qui traduit son degré d'évolution, varie de 7 à 13.

L'étude du complexe absorbant permet de préciser la notion de fertilité. C'est ainsi que par analyse on mesure d'une part, la quantité de bases dans le sol et d'autre part, celle que le complexe peut fixer. L'idée de fertilité potentielle tient compte de la capacité totale d'échange, tandis que les bases présentes dans le sol participent à la définition de la fertilité actuelle. Le rapport entre ces deux valeurs permet d'augurer des possibilités d'amélioration des réserves et de la fertilité actuelle.

1.4.2.1 - Sols peu évolués d'apport

Ces sols sont caractérisés par l'absence d'horizon diagnostic. Il n'existe qu'un horizon A de surface structuré et contenant de la matière organique. On peut parfois observer dans les horizons sous-jacents la stratification sédimentaire originelle. La qualité du drainage interne dépend généralement de la nature granulométrique des couches et de leur agencement. On peut distinguer au moins deux groupes de sol :

- le groupe de sols peu évolués d'apports alluviaux bien drainés qui, selon Desautettes (1968) est représenté par la série "Fondé ranéré" ;

- le groupe de sols peu évolués d'apports alluviaux imparfaitement à mal drainés qui est représenté par la série "Fondé Oualéré". Quelques caractéristiques analytiques des sols Fondé ranéré et Fondé Oualéré sont consignées dans le tableau 2. L'examen du tableau 2 permet les commentaires suivants :

- . La texture de l'horizon de surface est assez variable, même à l'intérieur de chaque série : sablo-limoneux, limono-sableux, argilo-limoneux ;
- . Les teneurs en matière organique sont variables et relativement faibles. Elles varient de 0.28 à 0.86 % pour le Fondé ranéré et de 0.44 à 1.4 % pour le Fondé Oualéré. La capacité d'échange varie de 12 à 30 et de 15 à 40 me/100 g respectivement pour le fondé ranéré et le Fondé Oualéré. Les réserves en bases échangeables sont moyennes pour le Fondé ranéré et relativement bonnes pour le Fondé oualéré. La potasse et le phosphore sont des caractéristiques très variables ; de 0.1 à 1.10 me/100 g (Fondé ranéré), de 0.21-0.90 (Fondé oualéré) pour les chiffres de K échangeable, et de 135 à 250 ppm (Fondé ranéré) et de 125-285 ppm (Fondé oualéré) de phosphore total.

1.4.2.2 • Vertisols et sols à caractères vertiques

Ces sols se développent dans les dépressions sur un matériau très fin dont l'argile est du type montmorillonite. L'alternance de conditions d'engorgement et de dessiccation détermine un certain nombre de caractéristiques morphologiques. Leur taux élevé d'argile gonflante, leur structure très grossière associée à une faible perméabilité, leur forte retention en période sèche font de ces sols une classe dont les conséquences agricoles pratiques sont bien définies. Quelques caractéristiques analytiques des sols "Hollaldé balléré" et Ouaka Hollaldé sont présentées dans le tableau 3. Il ressort de l'examen de ce tableau que :

- . la texture de l'horizon de surface est argileuse mais le taux d'argile reste variable ;
- . le taux de matière organique, plus élevé dans le Hollaldé balléré que dans le Ouaka Hollaldé, est généralement inférieur à 1 % mais reste très variable ;
- . Ces sols sont pauvres en azote total (0.03 à 0.09 % pour Hollaldé balléré ; 0.02 à 0.05 % pour Ouaka Hollaldé).
- . les teneurs en phosphore total varient de 150 à 700 ppm pour le Hollaldé balléré et de 120 à 500 ppm pour le Ouaka Hollaldé. Le phosphore "assimilable" n'existe qu'à l'état de traces.
- . leur capacité d'échange cationique et les teneurs en bases échangeables sont assez élevées surtout pour le Hollaldé balléré. Le taux de saturation varie de 55 à 90 % pour le Hollaldé balléré et de 30 à 65 % pour le Ouaka Hollaldé.

Tableau 2 : Quelques caractéristiques analytiques des sols
Fondé ranéré et Fondé Oualéré

Sols Paramètres	Fondé ranéré		Fondé Oualéré	
	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes
Argile (%)	18	12 - 29	23	18 - 37
Limon (%)	40	10 - 58	50	40 - 61
Sables (%)	35	14 - 63	47	15 - 43
pH H ₂ O	6.0	5.8 - 7.0	5.9	5.60 - 6.60
pH KCl	5.7	5.3 - 6.5	5.6	5.00 - 6.30
Bases échangeables (me/100 g)				
Ca	2.56	0.86 - 5.00	14.00	3.50 - 6.00
Mg	2.31	0.24 - 6.00	5.24	2.50 - 8.00
K	0.42	0.10 - 1.10	0.56	0.21 - 0.90
Na	0.70	0.05 - 1.50	0.80	0.06 - 1.50
CEC (me/100 g)	24	12.00 - 30.00	28	15 - 40
V (%)	53	40 - 70.00	55	40 - 75
Eléments totaux				
N (%)	0.09	0.02 - 0.28	0.10	0.06 - 0.16
C (%)	0.20	0.16 - 0.50	0.40	0.25 - 0.84
P (ppm)	215	135 - 250	205	125 - 285

Tableau 3 : Quelques caractéristiques analytiques des sols Hollaldé balléré
et Ouaka Hollaldé.

Sols Paramètres	Hollaldé balléré		Ouaka Hollaldé	
	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes
Argile (%)	60	48 - 80	33	20 - 50
Limon (%)	24	18 - 33	25	15 - 30
Sables (%)	21	9 - 30	40	30 - 60
pH H ₂ O	6.0	5.5 - 6.4	5.8	5.4 - 6.0
pH Kcl	4.8	4.5 - 5.2	5.3	5.0 - 5.5
Bases échangeables				
(me/100 g)				
Ca	7.50	4.00 - 13.00	2.10	0.63 - 3.02
Mg	7.40	3.50 - 14.00	1.60	0.96 - 2.24
K	0.55	0.24 - 1.44	0.50	0.30 - 0.70
Na	1.20	0.10 - 1.50	0.10	0.06 - 0.14
CEC (meq/100 g)		25 - 40	18.0	12.0 - 24
V (%)	65	55 - 90	44	30 - 65
Eléments totaux				
N (%)	0.05	0.03 - 0.09	0.03	0.02 - 0.06
C (%)	0.45	0.34 - 0.70	0.40	0.20 - 0.60
P (ppm)	300	150 - 700	200	120 - 500

1.41.2.3 - Sols hydromorphes

Le caractère qui domine l'évolution des sols hydromorphes est par définition l'existence d'un engorgement temporaire du profil par l'eau de la nappe phréatique ou de l'inondation. L'hydromorphie se manifeste par des couleurs typiques variées (brun rougeâtre, brun jaunâtre) qui tranchent avec la couleur grisâtre de la matrice due aux conditions réductrices plus ou moins accentuées selon qu'on est en présence respectivement d'un gley ou d'un pseudogley (Reynard et al., 1971). On peut distinguer au moins deux groupes de sols :

- Sols hydromorphes peu humifères à gley salé de profondeur sur matériau limoneux à limono-argileux ou argilo-limoneux (e.g. Fondé Ouaka) ;
- Sols hydromorphes peu humifères à taches et concrétions sur matériau argilo-sableux ou sablo-argileux (e.g. Fondé Ouakdjidiou).

Quelques caractéristiques analytiques des sols Fondé Ouaka et Fondé Ouakdjidiou sont consignées dans le tableau 4. On note que :

- . la texture de l'horizon de surface est variable. La teneur en argile varie de 18 à 40 % pour le Fondé Ouaka et de 20 à 45 % pour le Fondé Ouakdjidiou.
- . les sols sont naturellement pauvres en matière organique. Les teneurs sont **généralement** inférieures à 1 % pour les deux types de sols.
- . les sols sont pauvres en azote total (0.02 à 0.06 % pour le Fondé Ouaka et 0.019 à 0.05 % pour le Fondé Ouakdjidiou).
- . les teneurs en phosphore total varient de 110 à 500 ppm et de 100 à 500 ppm, respectivement pour le Fondé Ouaka et le Fondé Ouakdjidiou.
- . les sols sont assez bien pourvus en bases échangeables ; le calcium et le magnésium sont de loin les bases dominantes.
- . la capacité d'échange cationique de ces sols est relativement élevée et varie de 19 à 22 me/100 g et de 16 à 24 me/100 g, respectivement pour le Fondé Ouaka et le Fondé Ouakdjidiou.

Tableau 4 : Quelques caractéristiques analytiques des sols Fondé Ouaka
et Fondé Ouakdjidiou.

Sols Paramètres		Fondé Ouaka		Fondé Ouakdjidiou	
		Valeur moyenne	Valeurs extrêmes	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes
Argile (%)		30	18 - 40	35	20 - 45
Limon (%)		22	16 - 30	25	15 - 30
Sables (%)		45	35 - 50	39	34 - 46
pH H ₂ O		5.9	5.3 - 6.6	6.0	5.2 - 6.8
pH KCl		4.5	4.3 - 4.8	4.3	3.9 - 4.8
Bases échangeables (me/100 g)					
	Ca	6.0	4.4 - 6.8	9.8	9.2 - 10.1
	Mg	6.3	3.8 - 9.3	7.1	6.8 - 7.4
	K	0.29	0.14 - 0.49	0.3	0.25 - 0.4
	Na	1.14	0.31 - 2.14	0.12	0.07 - 0.18
CEC (me/100 g)		121.0	19.0 - 22	21.0	16.0 - 24.0
V (%)		65	45 - 85	68	55 - 90
Eléments totaux					
	N (%)	0.044	0.024 - 0.06	0.033	0.019 - 0.05
	C (%)	11.45	0.27 - 0.63	0.26	0.15 - 0.50
	P (ppm)	250	110 - 500	250	100 - 500

1.4.2.4 - Sols halomorphes

L'évolution de ces sols est dominée par la présence d'un excès de sels solubles. Reynard et al., (1971) considèrent comme salé, tout sol qui présente dans les premiers 50 cm un horizon dont la conductivité électrique de l'extrait 1/5 est plus élevée que 1000 micromhos. Il semble que dans le delta les sols salins les plus fréquents appartiennent par ordre d'importance aux familles des sols sulfatés acides sulfatés, modaux et sulfatés réduits. Du point de vue morphologique ces sols se distinguent par des colorations jaunâtre ou rougeâtre surtout au niveau des fluctuations de la nappe phréatique salée. Les caractéristiques analytiques de deux types de sols halomorphes sont présentées dans le tableau 5. L'examen du tableau 5 montre que :

- . la texture de l'horizon de surface est rigoureusement la même que celle des autres groupes précédents et se caractérise par une assez grande variabilité.
- . les teneurs en matière organique sont faibles (généralement inférieures à 1 %) ; les teneurs en azote total sont faibles à très faibles.
- . les teneurs en phosphore total sont faibles et varient dans de larges proportions. Le phosphore "assimilable" est à l'état de traces.
- . les teneurs en bases échangeables sont très variables ; elles sont très élevées pour le sodium et atteignent souvent la toxicité.
- . le type cationique de la salure est sodique à sodico-magnésien, alors que la composition anionique est du type chloruré à chloruré sulfaté.

Il est à noter que la granulométrie des sols dits fondé est beaucoup plus variable que celle des sols Hollaldé et on observe des changements rapides sur de courtes distances tant sur le plan horizontal que vertical. Les études qui ont été réalisées (Maynard, 1957) montrent que les caractéristiques minéralogiques des argiles des sols Fondé et Hollaldk sont à peu près les suivantes :

Fondé : - Kaolinite 50 % environ
- hydromica (illite) avec montmorillonite interstratifiée
- Quartz

Tableau 5 : Quelques caractéristiques analytiques de sols halomorphes.

Paramètres	Sols	Sols halomorphes à structure non dégradée		Sol sulfaté acide	
		Valeur moyenne	Valeurs extrêmes	Valeur moyenne	Valeurs extrêmes
Argile (%)		50	25 - 70	40	28 - 60
Limon (%)		22	14 - 30	36	23 - 42
Sables (%)		27	10 - 30	23	8 - 30
pH H ₂ O		5.8	5.2 - 7.2	3.0	1.8 - 4.4
pH KCl		4.2	4.8 - 6.0		
Bases échangeables (me / 100 g)					
	Ca	3.0	2.0 - 8.0	0.45	0.08 - 1.20
	Mg	4.0	3.0 - 9.0	0.60	1.00 - 2.50
	K	0.5	0.3 - 1.0	0.4	0.05 - 0.80
	Na	2.4	1.0 - 4.0	2.0	1.5 - 4.0
CEC (me/100 g)		17.0	14 - 28	18.0	15 - 24
v (%)		60	50 - 80	40	30 - 60
Eléments totaux					
	N (%)	0.08	0.01 - 0.20	0.05	0.03 - 0.09
	C (%)	0.36	0.10 - 0.48	0.5	0.4 - 0.75
	P (ppm)	130	90 - 300	260	150 - 400
Extrait au 1/5 (me/l)					
	Ca	3.5	1.0 - 8.0	0.13	0.40 - 0.96
	Mg	4.0	1.5 - 8.0	4.0	1.10 - 8.00
	K	3.0	0.5 - 5.0	0.5	0.3 - 0.65
	Na	16.0	2.0 - 50	9.44	7.50 - 10.50
	Cl ⁻	30.0	1.5 - 60	12.0	9.50 - 15.0
	SO ₄ ⁼	9.0	3.5 - 22	2.5	0.32 - 5.0
	CO ₃ ⁼	-		-	
	HCO ₃ ⁻	0.5	0.10 - 1.10	0.2	0.1 - 0.3

Hollaldé : - Kaolinite 46 % environ
- hydromica (illite) avec montmorillonite interstratifiée
- goethite : 10 % environ.

Compte tenu de la grande variabilité des différentes caractéristiques analytiques les valeurs moyennes apportent très peu d'enseignements d'autant plus que l'on ne dispose pas d'informations sur la distribution statistique des valeurs de chaque paramètre. La mise en place d'essais de fertilisation devrait donc être précédée d'une caractérisation des propriétés physiques et chimiques de ces sols et de leur variabilité spatiale.

Par ailleurs la variabilité des teneurs en éléments minéraux (e.g. N, P, K) est suffisamment importante pour justifier des formules de fumure différentes.

II - FERTILISATION DES SOLS

2.1 - Période 1947-1960

Les premiers travaux de recherche visant à améliorer l'agriculture dans la vallée du fleuve Sénégal ont été entrepris en 1945 par les Services de l'Agriculture et plus précisément en ce qui concerne l'aménagement du fleuve par la Mission d'Aménagement du Sénégal (M.A.S) basée à Saint-Louis. Des essais d'engrais ont été entrepris dans le casier expérimental de Richard-Toll en 1947 par M. Martine, chef de la Subdivision d'Agriculture de la M.A.S et en 1948 par le Secteur Soudanais de Recherches Agronomiques en collaboration avec M. Martine. Les conclusions de ces deux années d'essais réalisés avec la variété Dissi sur sol Hollaldé étaient les suivantes (Martine et Bouyer, 1951) :

a) Seul le sulfate d'ammoniaque s'est révélé efficace ; la dose optima serait voisine de 200 kg/ha de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

b) Il n'y a aucun effet du phosphate apporté quelle que soit la forme d'apport (bicalcique, tricalcique ou phosphat).

c) Les engrais potassiques sont restés inefficaces.

Martine et Bouyer (1951) notaient déjà une incohérence entre la teneur des sols Hollaldé en P_{205} assimilable (réactif citrique) et la quantité de phosphore exporté par la culture. En 1954 et 1955 les essais furent repris et complétés avec la variété Sossouka (Bouyer, 1962). Des résultats obtenus il ressort que seul l'azote, a un effet significatif avec des apports de 35 à 40 kg N/ha et que l'addition de potasse a toujours un effet dépressif. Il convient de noter que les variétés Dissi et Sossouka sont sensibles à la verse. Il est donc apparu nécessaire de tester l'effet de l'azote sur des variétés résistantes à la verse. Diverses expérimentations comportant des doses croissantes d'azote ont été réalisées à partir de 1957 avec la variété RT 2015, variété à paille courte et rigide. Il ressort des résultats obtenus qu'on pouvait appliquer 60 à 80 kg N/ha sur cette variété. Dans les expérimentations précédentes l'azote était toujours apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque, mais à partir de 1955 on commença à étudier l'action de l'urée. Les résultats obtenus (Bouyer, 1962) ont mis en évidence l'équivalence des deux formes d'engrais azoté, si bien que la perle d'urée de prix de revient moins élevé, s'est substitué au sulfate d'ammoniaque dans les essais ultérieurs. Ainsi donc une première constatation s'impose : la série d'essais réalisés antérieurement à 1960 testait des doses de fumure assez fai-

bles et permettait de conclure à la seule rentabilité de l'azote ; les besoins optimum en azote sont différents suivants les variétés.

Il convient de noter qu'au cours des premières années d'expérimentation l'engrais azoté était apporté avant le semis. Cependant une telle technique n'est pas sans inconvénient, surtout dans le cas de semis direct lorsqu'il est nécessaire de mettre la rizière à sec pour faciliter la levée. Le lessivage des nitrates issus de la nitrification du sulfate d'ammoniaque peut être important dès la remise en eau. Il y a également un risque de réduction de ces nitrates en nitrites toxiques dans les horizons réducteurs du sous-sol. On a alors pensé à appliquer les engrais azotés en couverture après le semis. Les résultats des recherches qui ont été entreprises dans ce domaine ont montré qu'un épandage tardif procurait des augmentations substantielles de rendement. D'autre part, il est apparu que le fractionnement de la fumure azotée était plus efficace et plus rentable que l'application en une seule fois au moment du semis (Couey et al., 1965). Suivant que la variété de riz cultivée a un tallage élevé ou faible -- la fraction d'engrais apportée au stade physiologique du tallage était réduite ou non, le reste étant appliqué au stade montaison.

2.2 - Période 1961-1967

En 1961 la Station de Richard-Toll fut confiée à l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières (IRAT) qui s'est vu chargé de l'ensemble de la recherche et de l'expérimentation sur le Fleuve. A partir de 1962, l'IRAT considérant que le problème des fumures phosphatées et potassiques n'avait jamais reçu de solution définitive préconisa la reprise des expérimentations NPK. Des essais furent entrepris avec des variétés plus productives : Makalioka, H821-3 etc... (Blondel, 1968). Ces études reposaient sur un certain nombre de données analytiques (sol et plante) et d'hypothèses de travail définies à partir de ces données analytiques. En effet les études analytiques effectuées à Richard-Toll avaient permis de préciser les points suivants (Couey et al., 1965) :

a) Les sols Hollaldé sont argileux , relativement pauvres en matière organique et en azote, mais riches en bases échangeables ;

b) Ces sols sont pauvres en phosphore total (435 ppm de P_2O_5 par attaque nitrique et dosage par la méthode de Lorenz) ; leur pouvoir fixateur en phosphore est très élevé (814 ppm de P_2O_5) et le phosphore actuellement existant se trouve en majeure partie bloquée sous des formes minérales incluses dans des revêtements ferrugineux donc inaccessibles aux racines du riz. A titre d'exemple, voici la répartition des formes du phosphore (méthode Chang et Jackson)

<u>Formes du phosphore</u>	<u>Teneurs en P₂O₅ (ppm)</u>
Phosphate d'alumne	42.7
Phosphate de fer	92.4
Phosphate de calcium	50.6
Phosphate de fer inclus	267.7
Phosphate d'alumine inclus	49.4

c) Le niveau du phosphore assimilable du sol est très faible ; l'alimentation phosphatée était donc jugée déficitaire.

d) La teneur de la feuille paniculaire en phosphore est inférieure à l'optimum : 3.5 à 5.2 me de H_2PO_4 au lieu de 8 à 10 me de H_2PO_4 pour 100 g de matière sèche:

Les hypothèses définies à partir des données analytiques avaient, conduit aux idées suivantes sur la fertilisation phosphatée :

a) Pour assurer une nutrition phosphatée optimum de la plante, il est nécessaire que la teneur en P_{205} de la solution soit voisine de 0.5 mg P_{205}/l (Bouyer, 1966, cité par Blondel, 1968).

b) Le sol étant carencé en phosphore et possédant un fort pouvoir fixateur, il convient de saturer les sites de fixation du sol en phosphore par un apport massif de P_{205} (phosphatage de fond : amélioration foncière) puis d'apporter un supplément de phosphate annuel sous forme soluble (apport de supertriple) pour compenser les exportations. L'emploi de la chaux fut également envisagé pour abaisser le pouvoir fixateur des sols.

c) La formation de complexe phospho-humique équivaldrait à un stockage du phosphore sous forme assimilable.

Les résultats des différents essais qui ont été réalisés sur la base de ces idées directrices ont conduit aux conclusions suivantes :

1) L'effet de l'azote est très important. La réponse est encore souvent linéaire avec des doses de 150 à 200 kg N/ha, les rendements se situant entre 5000 et 6500 kg/ha de paddy sans fumure phosphatée.

2) Aucun effet de la fumure phosphatée est enregistré quelle que soit la forme sous laquelle elle est apportée (phosphate tricalcique de Taïba, Baylifos, phospal, Schlam, Super-triple, Phosphate d'ammoniaque), en particulier aux niveaux élevés d'azote.

3) Effet du phosphore à très fortes doses (1000 kg P_2O_5 /ha) est mis en évidence en absence ou aux faibles doses d'azote.

4) Certaines observations indiquent un effet très net de l'engrais phosphaté sur la végétation (feuilles plus larges et plus vertes en début de végétation, puis dessèchement et verse fréquente en fin de végétation).

Blonde1 (1968) a formulé un certain nombre de critiques contre les hypothèses de travail qui ont conduit aux concepts théoriques qui ont dirigé **les nombreux essais qui ont abouti aux conclusions précédentes. --

L'incohérence notée par Martine et Bouyer (1951) entre la teneur des sols Hollaldé en P_2O_5 assimilable (teneur de l'ordre de la précision de la mesure) et la quantité de P_2O_5 exportée par la culture laisse supposer que la teneur en phosphore assimilable perd toute signification à la suite de la submersion. Il en est de même d'ailleurs des caractéristiques telles que le phosphore fixé, et la carence en phosphore déterminée par la méthode en vase de végétation. Comme l'a fait remarquer Blonde1 (1968) le problème du phosphore n'a jamais été posé dans ses conditions vraies, qui sont des conditions de sols submergés à milieu réducteur. L'on sait en effet que le comportement du phosphore n'est pas le même selon que l'on se trouve en milieu inondé ou en milieu sec (exondé). De nombreuses études (Aoki, 1941 ; Beacher, 1955 ; Shapiro, 1958 ; IRR1, 1963 ; Camara, 1985) montrent un effet de solubilisation des phosphates insolubles dans les rizières submergées qu'on attribue à un potentiel d'oxydo-réduction (Eh) bas qui serait responsable notamment de la réduction des phosphates ferriques insolubles en phosphates ferreux solubles et il en résulte une augmentation des rendements. Cette différence dans le comportement du phosphore en sol inondé et sol exondé revêt donc une grande importance dans la nutrition phosphatée du riz et peut expliquer en partie l'absence de réponse du riz à l'application de phosphore souvent observée dans les rizières submergées.

Il est à noter aussi que les conclusions tirées des résultats du diagnostic foliaire doivent être considérées avec beaucoup de réserve. En effet comme l'a fait remarquer Blonde1 (1968) il serait peu probable que la nutrition phosphatée d'une culture produisant 6000 à 6500 kg/ha soit déficiente, d'autant plus que d'après la loi de Macy (1936) il existe une relation très générale entre teneur en un élément et rendement.

Le maintien de la concentration de la solution du sol au voisinage de 0.5 mg P_2O_5 /l pour assurer une nutrition phosphatée optimum au riz ne semble

pas être essentiel. En effet de nombreuses études montrent que pour une croissance normale du riz des concentrations de 0.1 ppm (Tanaka and Yoshida) et même de 0.02 mg P/l (Çamara, 1985) sont satisfaisantes. Enfin on peut se demander si chercher à accroître les réserves des sols Hollaldé en phosphore (phosphatage de fond) est un objectif essentiel compte tenu de leur fort pouvoir fixateur. L'entretien des réserves assimilables à leur niveau actuel et la recherche d'une méthode de fertilisation phosphatée procurant, dès l'année qui suit l'épandage, les rendements maximaux sont deux objectifs que l'agronome devrait chercher à atteindre dans la fertilisation de ces sols à fort pouvoir fixateur (Fardeaux et al., 1983).

2.3 - Période 1968-1974

Les insuffisances des expérimentations antérieures et notamment des concepts théoriques sur la base desquels de nombreux essais ont été réalisés ont conduit à partir de 1968 à la réorientation des activités de recherche en matière de fertilisation phosphatée des sols Hollaldé. Le programme de recherche élaboré par Blondel (1968) reposait sur les idées directrices suivantes :

- 1) La submersion s'accompagne de phénomènes de variations des caractéristiques physico-chimiques qui règlent la dynamique du phosphore.
- 2) L'absorption du phosphore par la racicelle peut s'envisager au niveau de la zone de contact sol-plante.
- 3) La plante donne une réponse sans ambiguïté sur l'assimilabilité du phosphore.
- 4) L'étude du pouvoir fixateur n'est pas suffisant ; il importe d'étudier l'assimilabilité du phosphore fixé.

Mais le principal problème à résoudre d'abord était la fertilisation azotée. Il était nécessaire d'établir la courbe de réponse à la fumure azotée en explorant jusqu'à des doses de 250 et même de 300 kg N/ha pour les variétés les plus productives. L'établissement de la fonction de production permettrait de déterminer le rendement marginal et le seuil de rentabilité. L'étude des modes d'apport de l'azote, de l'interaction densité x doses et enfin la détermination des exigences globales du riz en azote s'imposait également.

Une fois l'optimum de la fumure azotée trouvée, il fallait s'attaquer au second problème, celui de la fumure phosphatée. Les études devaient envisager les formes solubles (supertriple, phosphate d'ammoniaque) à petites doses qui

agiraient dans la première phase de végétation. Par ailleurs des essais N x P furent suggérés dans lesquels l'azote serait apporté à quatre doses encadrant l'optimum de N et le phosphore serait apporté à plusieurs doses sous forme de phosphate soluble. Enfin l'étude du micromilieu radicellaire (rhizoplan) et notamment de l'effet de l'excrétion d'oxygène par la racine qui conduirait à la formation d'oxydes interdisant la nutrition phosphatée était envisagée.

En effet selon certaines études la plante (le riz) se protège contre le milieu éventuellement trop réducteur par un film d'oxygène sur les racines. La présence de ce film d'oxygène pourrait se traduire par la formation de composés phosphatés ferriques insolubles.

Quels sont alors les principaux résultats de cette série d'expérimentations qui a été commencée à partir de 1968 ?

Blonde1 (1971) a étudié l'influence des apports d'engrais azoté et phosphaté sur la croissance du riz, en précisant les phases de développement au cours desquelles l'apport d'engrais la modifie. Les résultats de cette importante étude réalisée avec la variété IR8 sur sol Hollaldé de Richard-Toll ont permis de mettre en évidence :

a) Une déficience importante en phosphore au cours de la première phase du développement ; cependant la fourniture en phosphore du sol parvient ensuite à satisfaire la demande de la culture. Il semble donc que la submersion modifie dans un sens favorable la fourniture en phosphore du sol. Selon Blonde1 (1971) l'apport de phosphore devrait être envisagé comme une fumure starter nécessaire au développement du riz pendant le premier mois de végétation.

b) Des teneurs en potassium très élevées qui, selon l'auteur, traduisent une consommation de luxe importante.

c) Une perturbation, dans la croissance (arrêt brutal de la croissance-matière sèche huit jours après le début de la montaison et reprise à l'épiaison) sur les traitements à croissance maximum ayant reçu un fort apport d'azote (200 kg/ha) et dont les causes n'ont pas été précisées.

Le rôle primordial de l'azote qui reste le premier facteur limitant a été confirmé par cette étude. Il a été également établi que la fourniture en azote par le sol était de 7^e ordre de 30 kg/ha.

Il convient de noter que les études de fertilisation dans le delta du Fleuve Sénégal ont souvent été conduites dans les conditions aléatoires de cul-

tut-e du delta (Reynard et al., 1972) :

- levée sous pluie ;
- submersion du riz par la crue du fleuve arrivant souvent au stade tallage ;
- lame d'eau étale variant de 30 à 55 cm suivant les situations ;
- décrue rapide, la maturation du riz ayant débuté.

Les résultats de nombreux essais de fertilisation ont montré une très grande diversité: des réponses aux éléments N et P selon les cuvettes (Couey et al., 1968 ; Chabrolin et al., 1970). En effet, chaque cuvette diffère de l'autre et il ne saurait être question de chercher à définir une fertilisation standard pour tous les sols du delta, ni même de la vallée. En outre même pour chaque type de sol, il y a des degrés d'halomorphie et de fertilité potentielle, ce qui complique la recherche d'une fertilisation valable pour le type de sol envisagé.

Pour supprimer les facteurs aléatoires encourus avec les essais en plein champ des études de fertilisation ont été réalisées avec la variété IR8 en bacs de végétation sur trois principaux types de sol du delta (Reynard et al., 1972) :

- sol hydromorphe à pseudo-gley ,
- sol halomorphe sulfaté acide
- sol halomorphe à caractère vertique et sulfaté modal.

Ces études comprenaient pour chaque type de sol une courbe de réponse à l'azote, au potassium et deux courbes de réponse au phosphore apporté sous forme de supertriple et de phosphate d'ammoniaque. Les trois types de sol provenaient de Kassack Sud, Kassack Nord et Boundoum Nord.

Kassack Sud : Sol hydromorphe à pseudo-gley :

- argileux (54,8 % d'argile)
- peu salé (CE : 565 micromhos/cm à 25°C ; extrait 1/5)
- Na/S = 57 %

Boundoum Nord : Sol halomorphe à caractère vertique, sulfaté modal :

- très salé (CE : 2318 micromhos/cm à 25°C, extrait 1/5)
- pH : 5.0
- Ca/Mg < 1.0
- Na/S : 72%

Kassack Nord : Sol halomorphe sulfaté acide

- argileux
- salé (CE : 1412 micromhos/cm à 25°C, extrait 1/5)
- pH : 4.7
- Ca/Mg : 0.4
- Na/S : 64 %

Les courbes de réponse en bacs de végétation aux trois éléments N, P et K montrent (Reynard et al., 1972).

Sur sol de Kassack Sud

- Réponse linéaire à l'azote (urée) jusqu'à 160 kg N/ha

$$Y = 7959.60 + 16.004 x$$

- Réponse quadratique à la fumure phosphatée sous forme de phosphate d'ammoniaque.

$$Y = 8552.032 + 86.876 x - 0.732 x^2$$

- Absence de réponse au phosphore sous forme de supertriple
- Absence de réponse au potassium (KCl)

Sur sol de Boundoum Nord

- Réponse linéaire à l'azote

$$Y = 2760 + 30.3 x$$

- Réponse au phosphore sous forme de supertriple mais pas de différence significative entre les doses de P (50, 100, 150 et 200 kg P₂O₅/ha)

- Réponse à la potasse en dents de scie

- Les résultats de l'essai avec le phosphate d'ammoniaque n'étaient pas analysables à cause de la mortalité de beaucoup de plants par sulfato-réduction.

Sur sol de Kassack Nord

- Aucune indication possible sur ce type de sol, les essais étant ininterprétable à cause de la forte mortalité des plants de riz due à la sulfato-réduction.

Les résultats de ces essais en bacs de végétation paraissent très intéressants. Cependant on doit reconnaître les limites de la méthode d'étude de la fertilisation du riz en bacs de végétation et les difficultés d'extrapolation des résultats obtenus en bacs aux conditions de culture en plein champ. C'est qu'il y a toujours une incertitude quant à la possibilité de recréer les conditions d'anaérobiose qui se développent dans un sol de rizière du fait que l'épaisseur de la lame d'eau dans les bacs peut être très variable et peut souvent même aller jusqu'à l'assèchement. Blondel et Foy (1970) ont reconnu cette particularité de essais en bacs de végétation qui peut avoir une incidence certaine sur les résultats. En effet les résultats obtenus par Blondel et Foy (1970) dans un essai avec deux types de sols originaires de Richard-Toll et Boundoum et dans lequel trois sources de P (phosphate tricalcique - Taïba, phosphate monocalcique - super triple, phosphate mono-ammoniaque) étaient mises en comparaison n'ont pas permis de différencier les deux types de sol d'après la réaction du riz à la forme de l'engrais phosphaté. Cet essai était conduit en bacs (sacs en film de polyéthylène 50 x 50 x 35 cm) disposés dans des excavations creusées dans le sol. Le sol de Richard-Toll avait une teneur en phosphore total de 0.45 % P_2O_5 et une conductivité électrique de 150×10^{-6} mhos/cm (extrait 1/5) tandis que les valeurs correspondantes pour le sol de Boundoum étaient respectivement de 0.28 % et 1.150×10^{-6} mhos/cm.

Il est apparu nécessaire de connaître la valeur de la méthode d'étude de la fertilisation en bacs de végétation et notamment les possibilités d'extrapolation des résultats obtenus en bacs aux conditions de culture en plein champ. L'on pensait alors que la comparaison des résultats obtenus en plein champ et en bacs de végétation permettrait très rapidement de résoudre les problèmes de fertilisation du delta et de s'étendre hors du delta, à Dagana (Aubin, 1972). Pour ce faire les courbes de réponse à l'azote, au phosphore (phosphate d'ammoniaque) et au potassium étudiées en bacs furent implantées sur un sol hydromorphe à pseudogley. Ces études ont permis de noter une assez bonne concordance entre les résultats des essais en bacs de végétation et ceux des essais en plein surtout en ce qui concerne la réponse à la fumure azotée.

La courbe de réponse au phosphate d'ammoniaque a montré que la dose de 110 kg au semis était la plus économique, son action étant très localisée, son épandage dans la ligne s'est avéré plus rentable. Cette dose optimale fut testée par la SDRS sur 1800 hectares de saison sèche. Les rendements moyens obtenus avec la variété Taichung Native N 1 étaient de 4.5-5.0 t/ha avec des pointes à 8 t/ha et avec la variété D.52/37 de 3.5-4.0 t/ha avec des maxima à 6 t/ha de paddy.

Des essais multilocaux ont été également réalisés (Reynard et al., 1972) pour d'une part déterminer si, après une fumure de fond en phosphore à deux niveaux (100 et 200 kg P_{205}/ha), une fumure d'entretien s'avérait nécessaire, et d'autre part étudier l'arrière-effet d'une fumure phosphatée de redressement. Les résultats de ces deux types d'essais réalisés au Boundoum Nord et au Kassack Sud ont permis de montrer un effet hautement significatif de la fumure de fond. Cependant il n'y avait pas de différence significative entre les deux niveaux de phosphore (100 et 200 kg P_{205}/ha). La fumure d'entretien n'était pas significative non plus. Cependant Reynard et al., (1972) ont estimé qu'il était prudent d'apporter annuellement 30 kg P_{205}/ha . Au Boundoum Nord le niveau des rendements des traitements avec phosphore (soit en effet résiduel, soit en effet cumulé) était de 2188 à 3241 kg/ha de paddy alors que le témoin sans phosphore n'avait produit que 873 kg/ha. Au Kassack Sud le rendement du témoin sans phosphore était de 3065 kg/ha alors que ceux des traitements avec phosphore variaient entre 4075 et 4491 kg/ha de paddy.

L'étude approfondie de la fumure azotée avait permis de montrer (Anonyme, 1970) que, outre les doses, le mode de fractionnement était différent selon les variétés. Il semble que les variétés précoces à paille courte type IR8 ou Taichung Native N.1 utilisent beaucoup mieux l'azote lorsqu'il est apporté en début de végétation. Un seul épandage au tallage était donc préconisé pour ces variétés. Par contre, pour les variétés à paille haute un apport tardif semblait être préférable (un gros apport d'azote au tallage entraînait une verse importante) ; l'apport au milieu de végétation étant le plus bénéfique. Pour des variétés du type D52/37, il était proposé d'apporter 2/3 au milieu de végétation et 1/3 à la moisson.

Selon le type d'aménagement rizicole, la variété, la saison de culture et, bien entendu, la nature du sol, la fertilisation du riz était différente et celle-ci est résumée dans le tableau 6 (Aubin, 1973).

Un effort important de recherche a été réalisé entre 1968 et 1974. Les résultats obtenus durant cette période ont confirmé le rôle majeur de la fumure minérale dans l'accroissement de la productivité dans la vallée du fleuve Sénégal. Cependant, les mécanismes d'action de la fumure n'ont pas été précisés dans la plupart des études. L'expérimentation a été dans une large mesure très empirique. Dans beaucoup d'études le rendement a été le critère de l'efficacité de la fumure (doses et formes) sans qu'il y ait assez d'information sur les composantes du rendement ni d'autres observations sur les relations sol-plante (observations pédologiques, physiologiques).

Tableau 6 : Fertilisation du riz dans la Vallée du Fleuve Sénégal.

Type d'aménagement	Sans aucun contrôle de l'eau et planage inexistant	Avec contrôle de l'irrigation et, de la vidange	
		Planage déficient	Planage correct à ± 50 cm
Variété de riz	D-52/37, SR.26.B, D9.9, Gambiaka, etc...	D.52/37, L.5.26, H.18-104B, H.821-3 etc...	IR8, Taichung N1 I Kong Pao etc
<u>Azote</u>			
avant ou au semis	100 kg/ha urée (46 % N)		
au tallage		50 kg/ha urée (46 % N)	350 kg/ha urée désherbage chimique au Propanil
au milieu de la végétation		100 kg/ha urée (46 % N)	
<u>Phosphore</u>			
Types de sols			
Sols halomorphes sulfatés modaux (ex. Boundoum zone moyenne)			
avant semis	200 kg/ha de supertriple à enfouir légèrement la première fois que l'on apporte une fumure phosphatée. L'arrière-effet du phosphore amené sous forme de supertriple est importante en seconde année et il n'est pas nécessaire d'en apporter de nouveau		
Autres sols de rizières actuellement cultivés	125 kg/ha de phosphate d'ammoniaque (16-48-U) à apporter au semis et à enfouir légèrement pour éviter les pullulations d'algues.		
<u>Potasse</u>			
	Pas nécessaire pour l'instant		

Le devenir de la fumure minérale apportée au sol n'a pas reçu l'attention requise. La quantification des pertes d'azote par volatilisation et lessivage devrait pourtant permettre de mieux raisonner la fumure azotée du riz dans les conditions de sols de la vallée du fleuve Sénégal. Par ailleurs l'influence de la submersion sur la dynamique du potassium natif du sol et de celui apporté par la fumure constitue une information d'une importance majeure pour la détermination du nombre de campagnes de cultures nécessaire pour induire une baisse notable du stock potassique du sol.

Les études sur la fumure de redressement avec pour objectif "l'enrichissement" des sols ont également été poursuivies durant cette période à cause, semble-t-il, de l'existence des carences phosphoriques. Cependant, il semble que dans l'objectif d'un redressement le choix de la forme chimique est plus important que celui de la dose et que seuls les sols à pouvoir fixateur faible peuvent être améliorés de manière durable par cette pratique (Fardeaux et Jappe, 1980). En outre, Fardeaux et al., (19133) ont montré que des apports même au niveau de 125 kg P/ha ne modifient pas la fertilité des sols Fondé et Holla Idé à très fort pouvoir fixateur.

Il y a donc un certain nombre de considérations variées (processus physiques et chimiques) qui doivent constituer le postulat fondamental de toute véritable technique de fumure. Nous reviendrons plus tard sur ces processus physiques et chimiques. En attendant, il convient de noter qu'à la fin de la période 1968-1974 l'emploi de la fumure comme moyen pratique d'améliorer la nutrition minérale du riz dans les conditions pédoclimatiques de la vallée du fleuve laissait subsister un grand nombre de points d'interrogation.

2.4 - Période 1975-1986

⌘ Dans la recherche d'une fumure optimale et performante pour les principaux types de sols rizicultivables de la vallée du fleuve Sénégal, il est apparu nécessaire d'acquérir une bonne connaissance des propriétés physico-chimiques des sols afin de leur assurer une mise en culture et une évolution satisfaisante dans le cadre de l'aménagement des périmètres irrigués. Le besoin s'est également fait sentir de connaître comment la fumure apportée à la culture évolue dans le temps et l'espace. La fertilisation du riz a été axée sur l'étude des types de fumure, des doses, du fractionnement, des amendements organiques et des méthodes d'apport de la fumure azotée.

L'étude de la dynamique de l'azote sur sol nu et sol cultivé avec et sans apport d'azote a été menée dans les conditions même de rizières. (Camara, 1978). Le sol sur lequel l'étude a été menée appartient dans la classification française aux sols hydromorphes à taches et concrétions sur dépôt fluvio-deltaïques reposant sur sable Ouldjien. Sa texture est limono-sablo-argileuse avec un fort pourcentage de sable à travers tout le profil. Les résultats obtenus ont montré que l'apport d'engrais azoté modifiait grandement l'évolution de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ quelle que soit la saison. Il a été également montré, en présence de riz, qu'à une phase de minéralisation intense, 15 jours après épandage/repiquage, succède une baisse graduelle jusqu'à maturité ; ce phénomène étant plus marqué en hivernage qu'en contre-saison froide probablement à cause des hautes températures qui favorisent une plus grande activité microbienne (minéralisation). La baisse de l'accumulation de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ était plus accentuée en sol sous culture qu'en sol nu (absorption par la culture). Par ailleurs l'estimation du bilan de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ sur les 15 premiers centimètres après apport d'azote a montré des pertes importantes de l'ordre de 50 %. Ce bilan était obtenu en soustrayant le témoin absolu (0 kg N/ha) des différentes concentrations de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ après application d'azote. La valeur d'un tel bilan est cependant très limitée. En effet l'on peut se demander si les différences observées constituent réellement des pertes. Il se peut qu'il y ait eu réorganisation de l'azote. La détermination de l'azote total aurait donné une meilleure indication sur les pertes réelles d'azote.

L'intensité variable de la minéralisation selon l'époque de l'année peut entraîner une différence de réponse du riz à la fumure azotée. Les résultats des études sur la fertilisation azotée du riz de saison sèche froide et saison sèche chaude ont montré que quelle que soit la saison, la réponse aux doses croissantes d'azote était linéaire même jusqu'à une dose de 200 kg N/ha ; les plus hauts rendements étant obtenus pendant la contre-saison froide avec la variété Jaya (Camard, 1978). On a également observé que le pourcentage des éléments N, P et K (tableau 7) ainsi que les exportations de ces mêmes éléments à la récolte étaient croissantes avec les doses d'azote.

L'équilibre des exportations de N, P et K, quelles que soient les doses d'azote est de l'ordre de 1 - 0.3 - 1.6 pour une variété de cycle court telle que Jaya. La connaissance des exportations du riz en azote constitue une donnée importante pour la détermination des doses d'apport. Cependant, pour une meilleure efficacité de l'engrais azoté les apports doivent être synchronisés avec les besoins de

Tableau 7 : Rendement et teneurs de la paille et des grains de la variété Jaya en N, P et K (Source : Camara, 1978)

Dose (kg x ha ⁻¹)	Rendement (kg x ha ⁻¹)		Paille			Grain		
	Grain	Paille	N	P	K	N	P	K
0	3500	3328	0.86	0.197	1.94	0.67	0.255	0.37
50	4200	4400	0.89	0.214	2.031	0.67	0.269	0.44
100	5400	5650	0.89	0.215	2.121	0.69	0.279	0.42
150	6000	6200	1.09	0.216	2.121	0.71	0.279	0.40
200	7000	8000	1.13	0.195	2.331	0.83	0.277	0.401

la plante pour en partie réduire les pertes. C'est ainsi que le fractionnement de l'azote (avant repiquage, début tallage, initiation paniculaire) a été étudié sur sol hydromorphe peu humifère de texture limono-sablo-argileux (Camara, 1978). Les résultats de cette étude réalisée avec la variété Kong Pao ont montré que le meilleur rendement était obtenu quand 50 % de l'azote était apporté un jour avant le repiquage, 25 % au tallage maximum et 25 % à l'initiation paniculaire. Les plus faibles rendements étaient obtenus quand 75 % de l'azote était apporté au début du tallage et 25 % à l'initiation paniculaire. Cependant, il semble qu'à très forte dose (130 kg N/ha) le fractionnement n'est pas très critique (pas de différence significative entre les différents fractionnements). Il est, cependant, curieux que dans cette même étude le nombre de talles, le nombre de panicules et le nombre d'épillets n'ont pas été fortement influencés par la dose d'azote et le fractionnement. En effet selon Kayama et al., (1972) le rendement en paddy dépend de quatre composantes : le nombre de panicules, le nombre d'épillets par panicule, le pourcentage de grains mûrs et le poids de 1000 grains.

Il est généralement admis que les sols du delta et de la vallée du fleuve Sénégal sont dans l'ensemble bien pourvus en potassium. Par ailleurs, l'absence de réponse du riz à l'application de cet élément avait conduit à ne pas recommander la fumure potassique en riziculture dans certains périmètres. Y a-t-il un risque à long terme d'épuiser les réserves du sol en potassium avec l'introduction de variétés à haut rendement, donc exigeantes en potassium, et créer ainsi un déséquilibre minéral, d'autant plus Blondel (1970) a montré une consommation de luxe importante du riz en potassium (variété IR8) ? Très peu d'études ont été réalisées pour répondre à cette question. Sur la base de résultats d'essais multilocaux en milieu paysan Van Brandt et Hubert (1981) recommandent de

remplacer les épandages préventifs de phosphore et potassium dans les petites périmètres de Haïré-Lao par la mise en place de ce qu'ils appellent des "indicateurs de fertilité". Selon ces auteurs ces indicateurs de fertilité permettraient d'apporter au moment opportun les éléments fertilisants nécessaires. Il apparaît que seuls des essais de longue durée pourraient permettre de déterminer ces indicateurs de fertilité. Par ailleurs, il n'est peut-être pas nécessaire d'appliquer des engrais potassiques pour obtenir des rendements faibles, mais avec des variétés de riz à haut rendement l'apport de potassium peut s'avérer nécessaire dans certains cas pour stabiliser les rendements. Quant au phosphore, son rôle starter a été mis en évidence par Blonde1 (1970) mais dans des situations bien différentes (Richard-Toll). Par ailleurs Camara (1985) recommande de compenser les exportations de phosphore par la récolte par l'apport d'environ 60 kg/ha de P_2O_5 .

Il apparaît donc de ce qui précède que le thème de la nutrition minérale du riz et des moyens pratiques de l'améliorer grâce à la fumure exclut, sur le plan pratique, toute affirmation catégorique.

Un certain nombre d'études ont été réalisées pour comparer l'efficacité de différentes sources et méthodes d'application de l'azote en riziculture irriguée tant sur sol Fondé que sur sol Hottaldé (Camara, 1979-1980). Sur sol Fondé de bouffelet de berge de Fanaye la perlurée, le "sulfur coated urea" (SCU) et l'urée supergranule ont été mis en comparaison à quatre doses (0, 32, 65 et 130 kg N/ha) avec quatre techniques d'application (à la volée, en bande, application localisée, application fractionnée). Les résultats obtenus montrent que :

- a) les rendements les plus élevés en paddy sont obtenus avec l'application de 130 kg N/ha sous forme de SCU à la volée suivi du fractionnement à la même dose.
- b) aux doses faibles, le fractionnement de la perlurée semble supérieur.
- c) les applications de l'engrais sous forme localisée ou en bande donnent les rendements les plus faibles.

Il a été également mis en évidence que le SCU stimule une plus grande libération de NH_4^+ que la perlurée et que SCU tend à allonger le cycle du riz.

Sur sol Hollaldé de Fanaye avec la variété KH 998 tolérante aux basses températures de saison sèche froide des observations faites tout au long du cycle de la culture et l'analyse des composantes du rendement montrent que :

a) la dose de 130 kg N/ha favorise une végétation luxuriante avec comme corollaire un allongement du cycle de deux semaines quelles que soient la forme d'engrais et la méthode d'application.

b) les rendements en grains les plus élevés sont obtenus avec la dose de 130 kg N/ha :

- soit sous forme de SCU appliqué à la volée (5890 kg/ha de paddy) et en localisation dans la zone d'exploitation des racines (5647 kg/ha de paddy) ;
- soit sous forme de supergranule (5240 kg/ha de paddy).

Il semble donc, aussi bien sur sol Fondé que sur sol Hollaldé de Fanaye que l'application d'engrais azoté "retard" à la volée en une seule fois ou en localisation en une seule fois dans la zone d'exploitation des racines (10 cm) soit plus bénéfique que l'application de la perlurée en fractionnement (1/2, 1/4, 1/4, respectivement aux stades de préparation du sol, tallage et initiation paniculaire) et ce pour le riz irrigué de saison sèche froide (variété KH 998).

L'étude de la fumure phosphatée a été poursuivie au cours de cette nouvelle série d'expérimentations. L'efficacité agronomique des phosphates naturels produits au Sénégal (phosphate tricalcique de Taïba, phosphate d'alumine de Thiès) par rapport au phosphate d'ammoniaque et au supertriple a été testée dans un essai de longue durée avec la variété Jaya sur deux types de sols de la moyenne vallée (Diatla et Cissé, 1985) :

- sol hydromorphe peu humifère à gley salé de profondeur sur matériau limono-argileux (sol Fondé)
- vertisol à drainage externe nu, non grumosoloque, à caractère de salure en moyenne profondeur développé sur argile de décantation (sol Hollaldé).

Aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les doses de phosphore appliquées (0 - 250 kg/ha de P_2O_5) entre les sources de phosphore comparées. Sur la base de ces résultats et compte tenu du coût des engrais, ces auteurs recommandent des apports de phosphore pour compenser les

exportations des récoltes et le remplacement du phosphate d'ammoniaque vulgarisé à raison de 125 kg/ha par le tricalcique de Taïba ou le phosphate de Thiès. Pour des rendements de 5 à 6 t/ha de riz-paddy les doses à apporter seraient de 150 et 175 kg/ha, respectivement pour le tricalcique de Taïba et le phosphate de Thiès,

La valeur fertilisante du phosphate de Matam a été également testée à Fanaye sur sol Fondé (Cissé, 1986). Les résultats obtenus ont montré une absence ou une très faible réponse au phosphore.

L'influence de la fertilisation phosphatée sur le rendement du riz irrigué a été étudiée d'une manière systématique par Camara (1985) en vue de proposer des doses optimales pour chaque type de sol. Dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal en hivernage 1982 l'application de phosphore sous-forme de supertriple avait provoqué des augmentations de rendement substantielles (variété Kong Pao) dans les vertisols de Nianga (vertisol topomorphe à drainage externe nul) et de Fanaye (vertisol topomorphe à drainage externe nul, non grumosolique, à caractère de salure à moyenne profondeur sur argile décantation). Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des apports de 60 kg P_2O_5 /ha pour le premier sol et 180 kg P_2O_5 /ha pour le deuxième sol pour des accroissements par rapport au témoin de 1415 kg et 1800 kg respectivement. Par contre aucun effet notable n'a été enregistré sur un sol hydromorphe de Fanaye (sol hydromorphe peu humifère à gley salé en profondeur sur limon argileux) qui était relativement plus riche en phosphore total.

En 1983, il a été enregistré un effet sensible du phosphore sur le sol hydromorphe de Fanaye en hivernage et aucun effet en saison sèche chaude. Sur le vertisol de Fanaye une réponse au phosphore jusqu'à la dose de 60 kg P_2O_5 /ha a été enregistrée en hivernage et en saison sèche chaude.

Dans le delta sur un sol de Ndelle (sol hydromorphe peu humifère modal à texture très fine, parasulfaté acide à jarosite) l'action du phosphore a été dépressive en première année et faiblement positive en deuxième année pour un accroissement maximum de 900 kg de grain/ha après un apport de 120 kg de P_2O_5 /ha. Sur un sol halomorphe de Ndiol (sol sodique à structure moyennement dégradée sur matériaux fins à moyens) l'influence du phosphore sur le rendement a été positive en première année mais il n'a pas été observé de différence significative entre les doses de 60 et 180 kg P_2O_5 /ha. En deuxième année le phosphore n'avait pas marqué de façon significative.

Il ressort de ce qui précède que la fumure phosphatée ne donne pas lieu à une réponse systématique et nette. Il y a donc un danger à vouloir généraliser les résultats obtenus sur un type de sol donné. Compte tenu de la diversité des sols dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal il ne saurait être question de rechercher une fertilisation standard.

Très peu d'études ont été réalisées dans le delta et la vallée du fleuve Sénégal sur la réponse du riz irrigué à l'application d'oligoéléments. L'on sait, cependant, que certaines déficiences latentes peuvent provoquer de baisses de rendement très importantes.

Les résultats obtenus avec l'apport de différents oligoéléments (Camara, 1978) sur sol limono-sableux de la vallée du fleuve Sénégal ne se distinguaient pas sur le plan statistique.

Cependant l'application de manganèse et de cuivre avait entraîné une augmentation arithmétique de rendement de 17.9 % et 19.2 % respectivement alors que l'apport de soufre avait entraîné une baisse de rendement de la variété Jaya. L'utilisation de variétés à haut rendement, donc exigeantes en éléments minéraux (macro et oligoéléments) et la double culture permise par la mise en eau des barrages nécessitent que plus d'études soient réalisées pour déterminer la place des oligoéléments dans les formules de fumure.

L'enfouissement des résidus de récolte constitue à priori une des pratiques les plus intéressantes pour compenser à moindre coût les pertes en éléments minéraux subies par le sol. L'efficacité de cet enfouissement sur l'amélioration de l'alimentation minérale et sur l'augmentation de la productivité du riz est cependant sujette à controverse. De nombreuses expériences d'incorporation de paille de riz menées en conditions de submersion ont abouti en particulier à des résultats bien souvent contradictoires. Certains auteurs (Bèye, 1974 ; Touté, 1976) ont en effet trouvé une action bénéfique de l'enfouissement sur les rendements, sur l'économie de l'azote et du potassium. D'autres (Bèye, 1974 ; Gotoh et Onikura, 1971) par contre ont trouvé un effet défavorable de la paille soit par inhibition de la croissance, soit par une nutrition minérale déficiente en début de cycle due en partie à la réorganisation de l'azote. Les résultats des essais qui ont été réalisés dans la vallée du fleuve Sénégal (Camara, 1978) ont mis en évidence un effet dépressif de la paille sur le rendement. Par contre on a enregistré un effet bénéfique de la cendre de paille de riz sur les variétés KH-998 et Kong Pao. Charoy et al., (1985) citent des résultats d'essais réalisés sur vertisols pauvres en matière organique qui, semble-t-il, ont montré que la dose

d'azote pouvait être réduite de moitié avec l'utilisation du compost. Cinq tonnes de compost associé à 90 kg N/ha ou dix tonnes de compost et 60 kg N/ha ont donné dans ces essais des rendements sensiblement équivalents à ceux obtenus après apport de 150 ou 120 kg N/ha.

L'on sait depuis longtemps que la présence d'algues exerce deux fonctions opposées. D'une part, les algues constituent un facteur dangereux pour la végétation du riz, lorsqu'elles entrent en compétition avec la plante cultivée pour l'anhydride de carbone et les éléments nutritifs. Elles réduisent l'absorption de chaleur par l'eau, car elles réussissent à former, en se développant, un "feutre" sur la hauteur d'eau libre. ce qui empêche le développement de la plante. D'autre part, les algues ont des fonctions utiles telles que la libération d'oxygène, grâce aux processus photosynthétiques, la fixation d'azote atmosphérique, présent dans les composés organiques, la production de matière organique et la mobilisation des réserves en phosphore, dont elles augmentent en définitive la disponibilité. L'activité des cyanophycées peut donc constituer un instrument positif pour le bilan de la fertilité et l'accroissement des rendements en riziculture où peu d'éléments fertilisants sont employés. Les résultats des études qui ont été réalisées dans la vallée du fleuve Sénégal ont montré un effet hautement bénéfique de *Azolla* sur le rendement du riz. Il semble, cependant, qu'il y ait un certain nombre de problèmes liés à l'enfouissement de *Azolla*.

Des résultats intéressants ont été obtenus avec *Sesbania rostrata* comme engrais vert par Dreyfus et al., (1983) à la Station ORSTOM de Bel-Air. Leurs résultats montrent que l'utilisation de *Sesbania rostrata* comme engrais vert permet de doubler les rendements du riz. Les résultats des essais réalisés par l'ISRA semblent confirmer ceux obtenus par l'ORSTOM (Dreyfus et al., 1983).

Les études de fertilisation qui ont été réalisées depuis l'introduction de variétés de riz hautement productives (7 à 8 tonnes de paddy par hectare) ont abouti aujourd'hui à des propositions de fumures vulgarisables.

Les formules de fumure actuellement préconisées sont présentées au tableau 8 (OMVS, 1985).

La formule générale recommandée par la SAED est la suivante :

- 120 kg d'azote par ha
- 60 kg de P_2O_5 par ha
- 60 kg de K_2O par ha

Cependant selon Van Brandt et Hubert (1981) il est raisonnable d'augmenter les apports d'azote jusqu'à 160 kg N/ha pour le riz repiqué avec la variété Kong Pao non susceptible à la verse. Actuellement, sur les périmètres, le phosphore et le potassium sont recommandés par la SAED dans la moyenne vallée afin de restituer les quantités exportées par la double culture de riz. Par contre dans le Delta où une seule culture est pratiquée, seul le phosphore est apporté (Van Brandt et Hubert, 1981). Les engrais phosphatés et potassiques sont des engrais de fond et sont appliqués avant la mise en place de la culture en semis direct ou par repiquage. L'urée par contre est appliquée à différents stades du cycle végétatif de la culture. Généralement l'azote est apporté en deux ou trois fractionnements en fonction de la gestion de l'eau et d'autres facteurs inhérents aux périmètres (Van Brandt, 1984).

Tableau 8 : Formules de fumures préconisées

Type d'aménagement	Variétés préconisées	Formules de fumure préconisées		
		N	P_2O_5	K_2O
Aménagement tertiaire avec maîtrise complète de l'eau	IR8, IKP, Jaya, TN1, DJ6 840, DJ 346D	250 à 300 kg/ha de perl. /urée soit 115 à 138 kg N/ha	125 kg/ha de phosphate d'ammoniaque soit 60 kg P_2O_5 /ha	100 kg/ha de chlorure de potassium soit 60 kg K_2O /ha

Pour un fractionnement en trois fois :

- 50 % de la dose 7 à 10 jours après le repiquage ou le semis ;
- 25 % de la dose au début du tallage (20-25 jours après repiquage ou semis) ;
- 25 % de la dose à l'initiation paniculaire.

Pour un fractionnement en deux fois :

- 2/3 de la dose au début du tallage
- 1/3 de la dose à l'initiation paniculaire.

Ce fractionnement de l'azote semble tenir compte de l'existence, au cours du cycle du riz, au moins de deux moments critiques pour la nutrition azotée du riz à savoir le tallage, moment où l'importance des réserves d'azote dont dispose la plante détermine le nombre des épillets qui peuvent être formés, et la période qui va de l'épiaison à la fécondation, période au cours de laquelle l'abondance des réserves azotées peut se traduire par un plus grand nombre de fleurs fertiles. Par ailleurs, ce fractionnement permet, d'une part, de réduire les pertes par oxydation de l'azote ammoniacal suivie d'une dénitrification et, d'autre part, d'éviter la manifestation de déséquilibres nutritionnels. De même la fertilisation phosphatée doit tenir compte du fait que les phosphates, qui représentent la dotation naturelle du sol, voient augmenter considérablement leur solubilité qui atteint des valeurs maximales au bout de quelques jours après le début de la submersion, surtout à cause de la réduction des phosphates ferriques en phosphates ferreux, plus solubles et du déplacement des phosphates absorbés par les composés de fer et d'aluminium sous l'effet des anions organiques. Quant aux principaux cations (calcium, magnésium, potassium), ils voient augmenter leur solubilité à la suite de la submersion, l'augmentation s'expliquant par l'action solubilisante de l'anhydride carbonique et par diverses réactions d'échange cationique. Il peut en résulter une accentuation de la solubilité du potassium, phénomène qui doit être pris en considération dans l'étude de la fumure potassique du riz. A côté des processus liés plus directement à la nutrition minérale du riz, il faut rappeler enfin l'activité de réduction de différents composés de Fe et de Mn et, par conséquent, une plus grande solubilité de ces deux éléments.

III - CONCLUSIONS

Les études sur la fertilité et la fertilisation des sols de rizières dans la vallée du fleuve Sénégal ont connu plusieurs étapes. Des prospections pédologiques, des analyses et des expérimentations ont d'abord permis d'apporter beaucoup de précisions sur la nature et la fertilité des sols. Cet important travail a permis d'identifier et de classer les sols utilisables pour ainsi définir l'aire d'application des fumures mises au point pour chaque type de sol. Dans un premier stade l'accent a été mis sur la recherche des facteurs limitants de la production. Il a été montré que la carence en azote était constante (effet toujours positif de l'azote sur le rendement), que celle en phosphore était fréquente (mais rôle du phosphore pas bien défini) et que les sols

étaient relativement bien pourvus en potassium (absence de réponse à la fumure potassique). On a cherché à corriger la carence présumée des sols en phosphore mais sans beaucoup de succès (résultats des essais de phosphatage de fond assez décevants).

Dans un deuxième stade on a étudié les modalités optima d'application des engrais azotés. Pour ce faire des études sur la dynamique de l'azote en conditions de submersion se sont avérées nécessaires. On a montré que la perlurée était aussi efficace que le sulfate d'ammoniaque et que le fractionnement de la fumure azotée était plus efficace et plus rentable que l'application en une seule fois au moment du semis. On a admis que l'apport d'azote était toujours rentable même à des doses supérieures à 120 kg N/ha.

Enfin, malgré l'absence de réponse aux fumures phosphatée et potassique fréquemment observée, on s'est plus ou moins accordé pour reconnaître la nécessité d'apporter ces deux éléments pour compenser les exportations par les récoltes.

La part de la fertilisation minérale dans l'amélioration des rendements des nouvelles variétés de riz a été sans nul doute importante. Il est, cependant, à noter qu'il s'agisse de la fumure organique ou de la fumure minérale, la question de la fertilisation du riz dans la vallée du fleuve Sénégal constitue un chapitre riche en aspects importants pour la poursuite des recherches mais pauvre en conclusions pratiques susceptibles d'être appliquées sur une grande échelle compte tenu des possibilités qu'offre la mise en eau des barrages de Diama et Manantali. On peut donc toujours progresser dans le domaine de la fertilisation tant minérale qu'organique des sols de rizières dans la vallée du fleuve Sénégal :

- 1) en améliorant tout d'abord nos connaissances sur la dynamique des principaux éléments minéraux dans les différents types de sols rizicultivables en conditions de submersion en relation avec la croissance et le développement du riz ;
- 2) en améliorant nos méthodes d'évaluation et de suivi de l'évolution de la fertilité de ces sols sous culture intensive ;
- 3) en développant des modèles de prédiction des besoins du riz en éléments minéraux, pour mieux rationaliser la fertilisation minérale ;
- 4) en prenant en considération la variabilité dans le temps et dans l'espace, des propriétés physiques et chimiques de ces sols de rizières.

La fumure minérale et organique est sans doute un atout majeur dans l'augmentation de la productivité du riz dans la vallée du fleuve Sénégal, mais ses mécanismes d'action doivent en être préalablement connus. A l'expérimentation empirique doit être substituée une recherche plus orientative et explicative quant aux facteurs limitants dans les relations sol-plante-atmosphère. Toute autre approche serait aveugle, donc très aléatoire, il y a des limites à l'utilisation des engrais et un des objectifs des études sur la fertilisation est de définir les limites de leur emploi optimum.

IV - BIBLIOGRAPHIE

- Anonyme, 1970 - Rapport d'activités sur les recherches rizicoles à Richard-Toll en 1969-1970 -
Doc IRAT, Secteur IRAT/Fleuve.
- Aoki, M., 1941 - Studies on the behavior of the phosphoric acid under paddy field conditions. Part I.
J. Sci. Soil Manure 1.5 : 182-202.
- Aubin, J.P., 1972 - Programme de recherches d'accompagnement 1972-1973 pour la riziculture dans le delta du fleuve Sénégal.
Doc. mult. Station IRAT/Fleuve.
- Aubin, J.P., 1973 - Fertilisation minérale vulgarisable dans la vallée du fleuve Sénégal. Actes des journées d'études sur la recherche et la vulgarisation.
Rufisque 8-13 Janvier 1973.
- Beacher, R.L., 1955 - Fifth Meeting on the Working party on Fertilizers, Malaya, Food Agric. Organ., IRC cité par Patrick, W.H. and I.C. Mahapatra, 1968
Adv. Agron. 20 : 323-359.
- Bèye, G., 1974 - Etude comparative de l'action de la potasse et de la paille enfouie sur le développement et le rendement du riz sur sol argileux de basse Casamance. ---
Agron. Trop. 29 (8) : 803-811.
- Blondel, D., 1968 - Le phosphore dans le sol et la nutrition phosphatée du riz à Richard-Toll.
Doc. IRAT.
- Blondel, D., 1971 - Contribution à l'étude de la croissance - matière sèche et de la nutrition minérale du riz en sol argileux à Richard-Toll (Sénégal)
Agron. Trop. Vol 26 (6-7) : 697-706.

Blonde l, D., et M. Foy, 1970 - Contribution à l'étude de l'alimentation
phosphatée du riz en sol argileux - Influence de la forme de
l'engrais phosphaté
Doc. mult. IRAT.

Bouyer, S. 1962 - Les recherches rizicoles agropédologiques au Sénégal.
Bilan de recherches- Programme de travaux - Rapport de mission
du 3 Novembre au 12 Décembre 1962.

Camara, I., 1978 - Résultats des travaux de recherches de la première phase
du projet ~~juillet~~ 1976 - Juillet-8 -
Doc. ADRAO

Camara, I., 1979 - Projet de recherches rizicoles ADRAO/Fanaye - Synthèse
des résultats d'expérimentation - Campagne 1978
Doc. mult. ADRAO.

Camara I., 1980 - Projet de recherches rizicoles ADRAO/Fanaye - Synthèse
des résultats d'expérimentation 1979.
Doc. mult. ADRAO.

Camara I., 1985 - Contribution à l'étude du phosphore et de la fertilisation
phosphatée du riz irrigué dans les sols de rizières de la vallée du
fleuve Sénégal
Thèse Ph. D. Université Laval, Canada.

Chabrolin, R., A. Reynard, C., Poisson, J.F., Poulain 1970 - Recherches agro-
nomiques concernant la riziculture dans le delta du Sénégal
Campagne 1969-1970
Doc. IRAT.

Charoy, J., H. Didierlaurent, P. Granier, A. Lericollais, T. Ruf, et J.J.
Thomas, 1985 - Bilan - Diagnostic sur la recherche agronomique
dans la vallée du fleuve Sénégal
Ministère des relations extérieures - Coopération et Développement.

Cissé, I., 1986 - Programme "Valorisation agricole des ressources naturelles
du Sénégal" : Etude en conditions pluviale et irriguée de l'effi-
cacité agronomique du phosphate de Matam
Doc. ISRA.

- Couyer, M., S. Bouyer, R., Chabrolin et J. Dejardin, 1965 - Etudes récentes sur la fertilisation du riz dans le delta du Sénégal. Deuxième réunion sur la fertilité des sols et l'utilisation des engrais en Afrique de l'Ouest. Tome 2 : X99-310.
- Couyer, M., D. Bloc, A. Reynard., C. Poisson, 1968 - Recherches rizicoles en 1968 dans le cadre de l'aménagement du delta (SAED)
Doc. IRAT/Fleuve.
- Desaunettes, J.R., 1968 - Etude pédologique du casier pilote de Ormolde FAO/PNUD
Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal.
- Diatla, S., et L. Cissé, 1985 - Fertilisation phosphatée du riz irrigué dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal - Rapport de synthèse
Doc. ISRA.
- Dreyfus, B., G. Rinaudo et Y. Dommergues, 1983 - Utilisation de Sesbania rostrata comme engrais vert en riziculture
Doc. ORSTOM Dakar.
- Fardeaux, J.C., S. Diatta, J.P. Ndiaye et J. Jappe, 1980 - Choix de la fertilisation phosphorique dans quelques sols du Sénégal : Utilisation du phosphore 32.
Agron. Trop. 38 (2) : 103-109.
- Fardeaux, J.C. et J. Jappe, 1980 - Choix de la fertilisation phosphorique des sols tropicaux : Emploi du phosphore 32.
Agron. Trop. 35 (3) : 225-231.
- Gotoh, S., et Y. Onikura, 1971 - Organic acids in flooded soils receiving added rice straw and effect on the growth of rice.
Soil Sci. Plant Nutr. 17 (1) : 1-8.
- IRRI (International Rice Research Institute) 1983 - Annual Report, Los Baños, Philip/pines 335 p.
- Koyama, T., C. Chammek, N. Niamsrichand, 1972 - Soil-plant nutrition studies on tropical rice. V. Yield components as affected by the timing of top-dressing of nitrogen in the Bangkok paddy field.
Soil Sci. Plant Nutr. 18 (6) : 233-245.

- Macy, P., 1936 - The quantitative mineral nutrient requirements of plants
Plant Physiol. 11 : 749-764.
- Martine, M., et S. Bouyer, 1951 - La fumure des rizières à Richard-Toll.
Agron. Trop. 6 (7-8) : 370-383.
- Maynard, J., 1960 - Etudes pédologiques dans la vallée alluviale du Sénégal.
Arch. M.A.S. Bulletin n° 112, Saint-Louis 1960
- Maynard, J., 1957 - Etude expérimentale des facteurs naturels influant sur
les cultures de décrue. Archives de la M.A.S. Bulletin N° 110
- Miche 1, P., 1960 - L'évolution géomorphologique des bassins du Sénégal et de
la Haute Gambie
Revue de Géomorphologie Dynamique N° 5, 6, 11 et 12.
- Michel, P., et J.H. Durand, 1978 - La vallée alluviale du Sénégal (Afrique de
l'Ouest). Relations géomorphologie-sols-aptitudes culturelles et leur
cartographie au 1/50 000. Catena 5 : 213-225.
- OMVS, 1985 - Notes sur les perspectives de la recherche sous-régionale dans le
bassin du fleuve Sénégal. Direction du développement et de la coordination.
Dakar,, Septembre 1985.
- Reynard, A., J.P. Aubin, M. Nieul, P. Goarin, J. Le Cra z, J. Monnier, G. Bèye,
et P. Jan, 1972 - Recherches agronomiques concernant la riziculture
dans le delta du fleuve Sénégal.
Campagne 1971-1972
Doc. IRAT.
- Reynard, A., J.P. Aubin, M. Nieul, P. Goarin, M. Mutsaers, C. Charreau, D. Blondel
et R. Chabrolin, 1971 - Recherches agronomiques concernant la riziculture
dans le delta du Sénégal
Campagne 1970-1971
Doc. IRAT.
- S.E.D.A.G.R.I. 1973 - Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Etude
pédologique FAO AGI: Dp/RAF/65/061.

Shapiro, R.E., 1958 - Effect of flooding on availability of phosphorus and nitrogen.

Soil Sci. 85 : 190-197.

Soil Survey Staff. 1975 - Soil Taxonomy : A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS agric. Handbook 436, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Sonko, M., 1974 - Note sur les potentialités et aptitudes culturales de trois types de sols de la moyenne vallée du Sénégal
Doc. IRAT.

Tanaka, A., and Yoshida, 1970 - Nutritional disorders of the rice plant in Asia.
IRRI Tech. Bull. 10 51 p.

* Touré, M., 1976 - ~~Etude~~ et amélioration ~~des~~ sols de rizières submergées.
Rapport d'activité du service d'agropédologie
Station Rizicole de Djibélor.

Van Brandt, H., 1984 - Application des engrais
Doc. mult. ADRAO - Mai 1984.

Van Brandt, H., et J.P. Hubert, 1981 - Rapport sur la première campagne d'essais "Fert/ilisation" multilocaux en milieu paysan, dans les **périmètres** villageois du secteur d'Haéré-Lao
Doc. ADRAO.