

UNIVERSITE DE MONTPELLIER

FACULTE DES SCIENCES

...

FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE
DANS TROIS TYPES DE SOLS DE RIZIERES
DE COTE D'IVOIRE

THESE

présentée à la Faculté des Sciences de Montpellier

pour obtenir le grade de

Docteur-Ingénieur

par

RINAUDO Gérard

Ingénieur I.N.S.A.

Soutenue le 18 Décembre 1970 devant la Commission d'Examen

JURY :

Mr Ch. SAUVAGE,	Professeur	Président
Mme N. PARIS,	Maître de Conférence	} Assesseurs
Mr P. LOSSAINT,	Directeur de Recherches au C.N.R.S.	
Mme T. ROUQUEROL,	Chargée de Recherches à l'I.N.R.A.	
Mr Y. DOMMERGUES,	Directeur de Recherches au C.N.R.S.	

E R R A T A

- Avant-propos, 2ème page : lire "PERRAUD" au lieu de "PERROT".
- Page 4, ligne 14 : lire "alluvions fines" au lieu de "alluvions fins".
- Page 7, ligne 7 : lire "déséquilibre entre Ca et Mg".
- Page 11, dernière ligne de l'avant dernier paragraphe : lire "adventices" au lieu de "advantices".
- Page 15-16, figure 2 : sur l'axe des ordonnées, lire "pF" au lieu de "pH".
- Page 20, ligne 6 : lire " $E_o = - \frac{RT}{nF} \ln K$ ".
- Page 23, ligne 6 : lire "SCHAEFFER" au lieu de "SCHEFFER".
- Page 23, ligne 7 : lire "sensu lato" au lieu de "sensus lato".
- Page 36, lignes 6 et 7 : lire "peuvent être résumés ainsi".
- Page 37, ligne 3 : lire "3, 4, 5" au lieu de "2, 3, 4".
- Pages 40-41, figures 7, 8, et 9 : Activité déshydrogénasique : lire sur l'axe des ordonnées "1000, 2000, 3000". $\mu\text{H/g C}$, au lieu de "100, 200, 300.." $\mu\text{H/g C}$.
- Page 42, ligne 6 : lire "MAKRINOFF, 1933, cité par ~~pochon~~ et DE BARJAC, 1958".
- Page 66, tableau 5, 2ème colonne : lire "teneur initiale en azote" au lieu de "teneur en azote".
- Pages 70-71, fig. 21 : lire "N-NH₄ ajouté" au lieu de "N-NH₄".
- Pages 73-74, fig. 22 : idem
- Page 84, ligne 2 : lire "sous forme de kystes ou de spores".

Doyen : M. P. DUMONTET

Assesseurs : MM. Ch. SAUVAGE
M. MAURIN

Doyen honoraire : M. P. MATHIAS

Professeurs honoraires : MM. R. JACQUES - M. CASTERAS - E. CARRIERE -
E. TURRIERE - G. CAUQUIL - J. SOULAS - G. DENISOT - J. GRANIER - Ch. BOUHET.

Secrétaire Général : M. E. SIAU

Professeurs titulaires

M.	M. MOUSSERON	Chimie organique
M.	J.P. ROIG	Physique
M.	P. CHATELAIN	Minéralogie et Cristallographie
Mlle	O. TUZET	Zoologie
M.	G. COUCHET	Mécanique Supérieure
M.	J. SALVINIEN	Chimie-Physique
Mlle	A.M. VERGNOUX	Physique
M.	J. AVIAS	Géologie
M.	P. VIELES	Chimie
M.	J. RABINOVITCH	Physique (C.S.U.P.)
M.	E. KAHANE	Chimie Biologique
M.	J.J. MOREAU	Mécanique rationnelle
M.	B. CHARLES	Mathématiques Pures
M.	J. MOTTE	Biologie Végétale
M.	R. JOUTY	Physique
M.	P. DUMONTET	Physique
M.	R. LEGENDRE	Zoologie
M.	I. ASSENMACHER	Physiologie Animale
M.	A. CASADEVALL	Chimie Organique

M.	B. PISTOULET	Physique
M.	Ch. ROUMIEU	Analyse Supérieure
M.	J. ROBIN	Physique
M.	A. POTIER	Laboratoire des Acides Minéraux
M.	R. LAFONT	Physique
M.	R. JACQUIER	Chimie
M.	J. FALGUEIRETTES	Minéralogie
M.	J. REGNIER	Chimie
Mme	J. CHARLES	Mathématiques
M.	P. CAILLON	Physique
M.	J. ROUZAUD	Chimie
M.	Ch. SAUVAGE	Botanique
M.	H. CHRISTOL	Chimie (E.N.S.I.)
Mme	G. VERNET	Biologie Animale
M.	L. CECCHI	Physique
M.	H. ANDRILLAT	Astronomie
M.	M. SAVELLI	Physique
M.	M. MATTAUER	Géologie
M.	L. EUZET	Zoologie
M.	C. DELOUPY	Physique
M.	L. GRAMBAST	Botanique
M.	A. BONNET	Botanique
M.	G. LAMATY	Chimie
M.	R. MARTY	Psychophysiologie

Professeurs sans chaire :

Mme	M.L. DE POUQUES	Botanique (C.S.U.P.)
M.	P. MURACOUR	Géophysique Appliquée
M.	G. TOURNE	Chimie
M.	J. REMY	Géologie
M.	P. DEMANGEON	Géologie
Mme	S. ROBIN	Physique
Mme	Ch. DUBOUL-RAZAVET	Géologie (C.S.U.P.)

M.	E.	GROUBERT	Physique
Mme	H.	GUASTALLA	Biologie Physico-chimique
M.	F.	PROUST	Géologie
Mlle	A.	BAILLETTE	Mathématiques (C.S.U.P.)
M.	A.	BASSOMPIERRE	Physique
M.	M.	MAURIN	Chimie
M.	N.	ROBY	Mathématiques
Mme	N.	PARIS	Physiologie végétale
M.	J.	PARIS	Zoologie
M.	R.	GAUFRES	Chimie
M.	J.	SOULIER	Chimie (C.S.U.P.)
M.	G.	BOUGNOT	Physique
M.	R.	LENEL	Biologie Animale

Professeurs associés :

M.	E.	AKUTOWICZ	Mathématiques
M.	C.	VAGO	Biologie Animale
M.	K.	KOHLER	Biochimie

Maîtres de Conférences :

M.	P.	MOLINO	Mathématiques
M.	Y.	GUITTON	Physiologie Végétale (C.S.U.P.)
M.	G.	BOMBRE	Physique (C.S.U.P.)
M.	C.	PUISSEGUR	Biologie Animale (C.S.U.P.)
M.	P.	VIALLET	Chimie (C.S.U.P.)
M.	J.M.	MORETTI	Chimie
M.	L.	THALER	Géologie
M.	J.	LEGRAND	Physiologie Animale
M.	M.	ROUZEYRE	Physique
M.	P.	SABATIER	Mathématiques
M.	Ch.	CASTAING	Mathématiques
M.	J.D.	BAYLE	Physiologie Animale

Mme	M. HAKIM	Mathématiques
M.	R. HAKIM	Mathématiques
M.	M. BAUSSET	Mathématiques(C.S.U.P.)
M.	G. LOUPIAS	Mathématiques
M.	G. MASCHERPA	Chimie
M.	C. GOUT	Physique
M.	R. JONARD	Botanique
M.	F. LAPSCHER	Physique
M.	C. COMBES	Zoologie (C.S.U.P.)
M.	B. BRUN	Chimie Physique
M.	M. DENIZOT	Biologie Végétale
M.	L. KAISER	Physique (C.S.U.P.)
M.	L. GIRAL	Chimie
M.	A. COMMEYRAS	Chimie
M.	M. AMANIEU	Sciences et Techniques de l'eau (Hydrobiologie et Mariculture)
M.	J. CROUZET	Sciences et Techniques de l'Alimentation

Maître de Conférences associé :

M.	Y. CORMARY	Géologie
----	------------	----------

Chargés d'enseignement :

M.	M. LEFRANC	Mathématiques
M.	R. MARTY	Mathématiques
M.	PIETRASANTA	Chimie

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE

Professeur titulaire :

M.	R. CORRIU	Chimie
----	-----------	--------

Maître de Conférences :

M.	CANO	..	Physique
M.	FILLARD		Physique
M.	GARCIA		Métallurgie - Génie Mécanique
M.	J.P. TRILLES		Bio ogie
M.	G. BORDURE		Physique
M.	L. LASSABATERE		Electricité - Electronique
M.	G. LECOY		Génie Electrique

Maître de Conférences associé :

M.	JOUANNA		Génie Civil
----	---------	-------	-------------

Chargé d'Enseignement :

M.	ESCOUFIER		Mathématiques
----	-----------	-------	---------------

AVANT-PROPOS

Nous avons trouvé au Centre O.R.S.T.O.M. d'ADIOPODOUME, puis au Centre de Pédologie biologique du C.N.R.S. à Nancy, des conditions de travail très favorables. Nous tenons à exprimer notre respectueuse reconnaissance à la Direction de l'O.R.S.T.O.M., à Monsieur LUC, Inspecteur Général de Recherches à l'O.R.S.T.O.M. et à Monsieur le Professeur DUCHAUFOUR, qui nous ont permis de mener à bien nos recherches.

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre profonde gratitude à Monsieur le Professeur SAUVAGE, Directeur de l'Institut de Botanique, auquel nous sommes reconnaissant d'avoir bien voulu présider le jury de cette thèse.

Madame PARIS, Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier et Monsieur LOSSAINT, Directeur de Recherches au C.N.R.S., nous ont fait l'honneur de faire partie de notre jury. Nous leur exprimons notre déférente reconnaissance.

Madame ROUQUEROL, Chargée de Recherches à l'I.N.R.A., a bien voulu nous accueillir dans son laboratoire, en 1965, et nous faire participer à ses travaux. Nous lui devons l'essentiel de notre initiation dans le domaine de la Biologie des Sols de rizières. Nous lui garderons toujours un profond sentiment de reconnaissance.

Nous tenons à remercier aussi tout particulièrement Monsieur MOURARET, Maître de Recherches Principal à l'O.R.S.T.O.M., qui a dirigé nos recherches et nous a toujours aidé de ses précieux conseils.

Monsieur DOMMERGUES, Directeur de Recherches au C.N.R.S., nous a accueilli dans son laboratoire. Il a été l'inspirateur d'une partie importante de nos travaux et a bien voulu se charger de la tâche de rapporteur. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour les encouragements et les conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer avec une extrême bienveillance.

Nous ne saurions oublier de citer l'aide précieuse que nous ont apportée Monsieur PERROT, Maître de Recherches à l'O.R.S.T.O.M., et notre ami BALANDREAU, Ingénieur au Centre de Pédologie biologique de Nancy.

Nos remerciements vont également à tous nos collègues et tous les membres des laboratoires dans lesquels nous avons travaillé, auprès desquels nous avons toujours trouvé aide efficace, et plus particulièrement Madame WEINHARD, Madame VILLEMINE, Bernard OULIE, Vincent JACQ, Marie-Claude JEANMAIRE, Roland DROSS.

Enfin, nous n'aurons garde d'oublier le personnel technique africain du Centre O.R.S.T.O.M. d'ADIPODOUME, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée tout au long de notre séjour en Côte d'Ivoire, et plus particulièrement Alphonse AKPO AYEKOU, et Jérémie DJE KOUASSI.

SOMMAIRE

	Pages
<u>INTRODUCTION</u>	
OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE	1
<u>Chapitre I.</u>	
<u>DESCRIPTION DES STATIONS</u>	3
A. SITUATION DE LA RIZICULTURE IRRIGUEE EN COTE D'IVOIRE	
B. CHOIX DES STATIONS	
1 - Rizière de Dabou	4
2 - Rizières de Yamoussokro et Abengourou	
C. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES STATIONS	5
1 - Dabou	
2 - Abengourou	7
3 - Yamoussokro	9
D. PRATIQUES CULTURALES	11
1 - Préparation du terrain	
2 - Variétés de riz	12
3 - Préparation des pépinières et repiquage	
4 - Fumure	
5 - Entretien	13
6 - Conduite de l'eau	
7 - Traitements insecticides	14
8 - Récolte	
<u>Chapitre II.</u>	
<u>ETUDE IN SITU</u>	16
A. TECHNIQUE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS	
1 - Mode opératoire	
2 - Justification statistique	17

	Pages
B. METHODES D'ANALYSES	19
1 - Mesure du pH et du potentiel d'oxydo-réduction	
2 - Mesure de l'activité respiratoire	23
3 - Mesure de l'azote total. Détermination du potentiel de fixation	24
4 - Mesure de l'azote minéral et de l'azote minéralisable	28
5 - Numération des diverses microflores du cycle de l'azote	30
C. VARIATIONS SAISONNIERES DES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES	34
1- pH et potentiel d'oxydo-réduction	
2 - Activité respiratoire	39
3 - Cycle de l'azote	42
D. CONCLUSIONS D'ENSEMBLE	56

Chapitre III.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FIXATION NETTE D'AZOTE DANS DES SOLS OU DES MODELES SANS PLANTE

A. METHODES D'ETUDE	
1 - Fixation d'azote par des sols placés dans des conditions écologiques déterminées	60
2 - Fixation d'azote par des suspensions de sol ..	63
B. RESULTATS. APPRECIATION DU ROLE DE CERTAINS FACTEURS ECOLOGIQUES SUR LA FIXATION D'AZOTE	63
1 - Submersion lumière	65
2 - Hygropériodisme	68
3 - Apports de substrats énergétiques et d'azote ammoniacal	
C. CONCLUSIONS	74

Chapitre IV.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FIXATION BRUTE D'AZOTE

<u>METHODE DE REDUCTION DE L'ACETYLENE</u>	78
A. RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS	
B. MATERIEL ET METHODE D'ANALYSE	80
1 - Matériel	
2 - Méthode d'analyse	
C. FIXATION D'AZOTE PAR DES SOLS	82
1 - Sols enrichis en glucose	
2 - Sols enrichis en pailles ou racines	88
3 - Sols soumis à l'effet de la lumière	89
D. FIXATION D'AZOTE RHIZOSPHERIQUE	92
1 - Matériel expérimental et méthodes d'analyses..	93
2 - Fixation d'azote rhizosphérique en fonction de l'âge de la plante	99
3 - Effet de la coupe sur la fixation d'azote rhizosphérique	107
E. CONCLUSIONS	
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	110
<u>REFERENCES</u>	114

INTRODUCTION

OBJECTIFS DE LA PRESENTE ETUDE

Céréale la plus cultivée dans le monde après le blé, le riz constitue la base alimentaire des populations de toute l'Asie des moussons, et sa consommation s'étend constamment.

Si, pour certaines variétés de riz dites pluviales, la submersion n'est pas obligatoire, cette culture a traditionnellement lieu dans les sols submergés. Les raisons originelles de cette pratique sont obscures, mais on sait, de façon incontestable, que le riz pousse mieux et donne de meilleurs rendements dans les sols submergés. Dans de telles conditions, la fertilité des sols peut se maintenir très longtemps à un niveau remarquablement élevé sans addition d'engrais azotés.

Comme les exportations d'azote par les récoltes sont importantes, on peut supposer qu'elles sont compensées par une fixation de l'azote atmosphérique du même ordre de grandeur.

L'étude de la fixation biologique de l'azote dans ces écosystèmes est donc d'un grand intérêt.

Les sols de rizières sont essentiellement caractérisés par des alternances de submersion et de ressuyage apparaissant sous l'effet des pratiques culturales.

Cette hydromorphie temporaire induit de profondes modifications des propriétés physiques et chimiques du sol qui retentissent sur son équilibre biologique.

Nous nous sommes donc proposés, avant d'entreprendre l'étude de la fixation d'azote proprement dite, d'étudier in situ quelques aspects essentiels du cycle de l'azote dans les sols de rizières, en relation avec les caractères physico-chimiques du milieu.

Cette première étape nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de facteurs ayant une influence directe sur l'activité fixatrice. Nous avons par la suite étudié, sur des sols au laboratoire, les effets de ces différents facteurs sur la fixation d'azote.

Nous avons, pour cela, utilisé la technique classique du dosage de l'azote par la méthode de Kjeldahl, et la technique récente de réduction de l'acétylène.

Chapitre I

DESCRIPTION DES STATIONS

A. SITUATION DE LA RIZICULTURE IRRIGUEE EN COTE D'IVOIRE

La riziculture irriguée mettant en oeuvre des aménagements, a débuté en Côte d'Ivoire, en 1955, essentiellement dans la zone de FERKESSEDOUGOU et KORHOGO.

L'installation de missions d'assistance technique, ainsi que la réalisation de microaménagements de démonstration par les encadreurs de la S.A.T.M.A.C.I. (Société d'Aménagement du Territoire et de Machinisme Agricole en Côte d'Ivoire) ont sensibilisé les paysans aux possibilités de ce mode de culture, et la riziculture irriguée se développe maintenant sur l'ensemble du pays.

On distingue deux zones principales d'implantation :

- la zone à une culture annuelle qui comprend le département du Nord, la quasi totalité du département du Centre, et tout le nord du département de l'Est.. Elle englobe toutes les régions dans lesquelles les conditions hydrologiques ne permettent pas de disposer d'eau d'irrigation pour plus d'un cycle de culture du riz.
- la zone à plusieurs cultures annuelles, qui comprend à peu près l'ensemble de la zone forestière.

B. CHOIX DES STATIONS

La zone traditionnellement rizicole de Côte d'Ivoire est située dans le Nord du pays (région de KORHOGO). Toutefois, les autorités Ivoiriennes s'efforcent actuellement d'étendre ce type de culture à l'ensemble du pays et l'on voit des fermes pilotes se multiplier dans toute la moitié Sud du pays (dite "le Domaine Guinéen"). Ajoutons que l'édification sur le Bandama du barrage de Kossou (les travaux sont actuellement en cours), devrait permettre l'aménagement en rizières de très vastes régions.

Ces raisons, ainsi que la situation en Basse Côte d'Ivoire, de laboratoire d'Adiopo-Doumé, nous ont conduits à choisir nos stations sur le Domaine Guinéen. (fig. 1).

1.- La rizière de DABOU se situe en Basse Côte d'Ivoire.

- Le climat de cette zone est caractérisé par une pluviométrie de 2 000 mm environ, avec deux saisons des pluies et deux saisons sèches, dont la plus longue a un déficit hydrique cumulé inférieur à 250 mm sur trois mois.
- La végétation de ce secteur ombrophile est dense, humide, et sempervirente.
- Les sols sont du type ferrallitique fortement désaturé.

Les bas-fonds, d'origine colluviale sont étroits (50 à 100 m), sableux, généralement inaptes à la riziculture irriguée. Par contre, les vallées alluviales sont particulièrement propices à ce type de culture (alluvions fins).

. Les petites vallées sont le plus souvent occupées par des bananeraies

. Les vallées plus grandes (Bandama, Comoé), se prêteraient particulièrement bien à la culture du riz, mais les autorités Ivoiriennes ont jusqu'ici hésité à entreprendre leur aménagement en raison surtout des problèmes soulevés par le déboisement.

La rizière de DABOU située à proximité de l'Agneby, constitue jusqu'ici une exception, mais est assez bien représentative des rizières qui pourraient être aménagées sur ce type de sol.

2.- Les rizières de YAMOUSSOKRO et ABENGOUROU se situent en moyenne Côte d'Ivoire

- Le climat de cette zone est caractérisé par une pluviométrie de 1400 mm environ, avec deux saisons des pluies et deux saisons sèches dont la plus longue a un déficit hydrique cumulé de 400 mm environ sur 5 mois.
- La végétation de ce secteur mésophile est dense, humide et semi-décidue.

- Les sols sont du type ferrallitique moyennement désaturé. Les bas-fonds sont plus larges que dans le secteur ombrophile (100 à 300 m), leur texture est moins sableuse (origine colluvio-alluviale). Ils sont beaucoup plus aptes à la riziculture irriguée.

a) sur schistes, l'utilisation de l'eau est bonne, mais il y a peu de cours d'eau permanents. Les possibilités d'irrigation sont donc limitées. C'est le cas de la rizière d'ABENGOUROU.

b) sur granites, la texture est plus grossière, surtout en profondeur (sables grossiers), mais les réserves en eau sont bonnes et les bas-fonds nombreux. De plus, la submersion entraîne une amélioration de la texture. La rizière de YAMOUSSOKRO est caractéristique de ces types de sols.

C. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES STATIONS

Les analyses dont les résultats sont présentés dans les tableaux 1, 2 et 3, ont été réalisées par le service d'Analyse des Sols du centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopo-Doumé.

1.- DABOU

. Propriétés physiques :

La texture est argileuse dès la surface (60 à 80 % d'argile).

La perméabilité est moyenne à médiocre dans les 20 premiers cm en raison de la forte teneur en matière organique, puis devient très faible en profondeur.

La structure est médiocre en surface, compacte en profondeur.

. Matière organique :

La teneur en matière organique est très élevée en surface (7 à 8 %). Celle-ci est assez bien évoluée (C/N : 15 à 17) et son taux d'humification élevé, avec dominance très nette des acides humiques sur les acides fulviques (AF/AH voisin de 0,2).

Tableau 1 : CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL DE DABOU

		Horizons analysés			
		1 (0-5cm)	2 (5-20cm)	3 (20-40cm)	4 (40-60cm)
Granulométrie en 10 ⁻²	Refus	0	0	0	0
	Argile	63,0	69,7	79,0	72,6
	L. fin (2-20 μ)	29,9	23,2	18,2	17,6
	L. gros (20-50 μ)	2,0	tr.	0,5	9,0
	S. fin (50-200 μ)	1,0	2,5	3,0	2,5
	S. grossier	0,5	0,5	tr.	tr.
Matières organiques en 10 ⁻³	Carbone	46,96	42,44	21,33	4,83
	Azote	2,86	2,54	1,38	0,44
	Ac. Hum.	16,33	16,52	8,70	0,33
	Ac. Fulv.	2,47	3,38	0,85	0,04
Acidité	pH - eau(1/2,5)	4,1	4,1	4,7	5,9
Cap. échangeables en m.éq	Ca ⁺⁺	4,65	3,24	4,24	3,24
	Mg ⁺⁺	6,64	7,10	10,04	9,91
	K ⁺	0,43	0,28	0,30	0,11
	Na ⁺	0,40	1,11	2,06	2,47
	Cap. d'éch.	28,86	30,79	25,13	14,59
Ac. phosphorique en 10 ⁻³	Ph. total	1,00	0,92	0,37	0,24
	Ph. Ass. Olsen	0,09	0,08	0,02	0,04
Elem. totaux en mé.q	Ca ⁺⁺	5,70	4,10	5,10	3,81
	Mg ⁺⁺	13,90	10,08	11,18	10,66
	K ⁺	6,82	5,55	3,55	4,30
	Na ⁺	1,78	1,95	2,81	3,01
	Inst. struct.	2,20	3,44	15,79	21,03
	Perméab.	3,54	1,82	0,15	0,17
	S. bases éch.	12,12	11,73	16,64	15,73
	T. sat. %	42	38,1	66,2	>100
	Mat. organ.(10 ⁻³)	80,96	73,17	36,77	8,32
	C/N	16,4	16,7	15,4	11,0
	Taux C. hum. %	40,0	46,9	44,8	7,7

. Complexe absorbant :

Le sol est assez bien pourvu en bases échangeables (S voisin de 12 m.équ. %) mais on note un déséquilibre en Fe, Ca et Mg léger en surface, important en profondeur.

L'acidité est forte en surface malgré un taux de saturation de 40 %.

. Conclusions :

La texture de ce sol est très argileuse, mais grâce à une forte teneur en matière organique, structure et perméabilité sont assez bonnes en surface. Les teneurs en N, P, K sont bonnes, mais le pH est très acide.

2.- ABENGOUROU

. Propriétés physiques :

La texture est équilibrée : argilo-limono-sableuse en surface, limono-sableuse en profondeur.

La perméabilité est moyenne en surface, puis faible et très faible en profondeur.

La structure est moyenne pour les 20 premiers cm, puis mauvaise.

. Matière organique :

Assez élevée jusqu'à 20 cm, la teneur en matière organique diminue ensuite régulièrement. Le C/N est voisin de 14-16, mais le taux d'humification est médiocre avec dominance des acides humiques (AF/AH voisin de 0,5).

. Complexe absorbant :

La somme des bases échangeables est médiocre (4 m.équ % jusqu'à 20cm)

On observe un bon équilibre Ca/Mg, mais une carence en K.

Le taux de saturation est voisin de 35 %.

Le pH est très acide.

. Conclusions :

La texture est équilibrée et les caractéristiques physiques assez bonnes. Malgré une bonne teneur en matière organique, la teneur en bases

Tableau 2 : CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL D'ABENGOUROU

		Horizons analysés				
		1 (0-5cm)	2 (5-20cm)	3 (20-40cm)	4 (40-60cm)	5 (60-80cm)
Granulométrie en 10^{-2}	Refus	0	0	4,1	4,8	43,9
	Argile	28,8	27,5	20,0	19,5	
	L. fin (2-20 μ)	23,2	23,5	23,0	23,0	
	L. gros. (20-50 μ)	15,0	15,5	25,0	24,5	
	S. fin (50-200 μ)	17,5	15,5	13,0	11,0	
	S. gros.	10,5	13,0	18,0	19,0	
Matières organiques en 10^{-3}	Carbone	31,74	28,13	18,28	14,59	9,32
	Azote	2,30	2,05	1,11	0,99	0,56
	Ac. Hum.	4,08	3,81	2,69	1,76	1,07
	Ac. Fulv.	2,01	1,88	0,91	0,55	0,34
Acidité	pH eau (1/2,5)	4,2	4,2	3,9	3,8	3,8
Cap. échangeable en m.équ	Ca ⁺⁺	3,28	3,09	1,78	1,26	0,79
	Mg ⁺⁺	0,70	0,83	0,82	0,70	0,53
	K ⁺	0,08	0,04	0,04	0,06	0,09
	Na ⁺	0,06	0,05	0,07	0,09	0,04
	Cap. d'éch.	12,07	10,85	7,89	5,50	3,42
Ac. phosphorique en 10^{-3}	Ph. total	0,70	0,44	0,12	0,11	0,07
	Ph. ass. Olsen	0,17	0,06	0,01	0,01	0,01
Elem. totaux en m.équ	Ca ⁺⁺	3,20	3,47	2,40	1,30	1,03
	Mg ⁺⁺	2,04	1,30	1,74	0,98	0,88
	K ⁺	1,95	1,01	0,82	0,94	0,66
	Na ⁺	0,40	0,25	0,23	0,31	0,25
	Inst. struct.	1,09	1,65	4,79	3,22	4,82
	Perméab.	3,44	1,72	1,08	0,74	0,36
	S. bases éch.	4,12	4,01	2,71	2,11	1,45
	T. sat. %	34,1	37,0	24,3	38,4	42,3
	Mat. organ. (10^{-3})	54,72	48,50	31,52	25,15	16,07
	C/N	13,8	13,7	16,5	14,7	16,6
	Taux C. hum. %	19,2	20,2	19,7	15,8	15,1

échangeables est médiocre.

Les teneurs en N et P sont moyennes. Ce sol est carencé en K.

3. - YAMOUSSOKRO

. Propriétés physiques :

La texture argilo-limono-sableuse sur les 5 premiers cm devient sablo-argileuse à argilo-sableuse de 20 à 60 cm, puis sablo-argileuse à sable grossier en profondeur.

La perméabilité est forte en surface.

La structure, moyenne en surface, devient médiocre en profondeur.

. Matière organique :

La teneur en matière organique est médiocre à faible.

Le C/N est voisin de 11-12. La matière organique est donc bien évoluée, mais avec un taux d'humification faible avec dominance d'acides humiques.

. Complexe absorbant :

La somme des bases échangeables est élevée (70 à 80 %) avec un pH faiblement acide.

La teneur en K est bonne.

. Conclusions :

Les propriétés physiques sont bonnes en surface, mais la perméabilité est peut-être trop forte en profondeur pour une rizière.

Les teneurs en matière organique et N sont médiocres à faibles.

La teneur chimique est bonne ; le pH et la somme des bases échangeables élevés.

Remarques : Les mesures de pH ont été faites sur des échantillons préalablement séchés à l'air. Nous verrons plus loin (fig. 3, 4 et 5), que le pH mesuré in situ peut être très variable suivant l'humidité du sol.

Tableau 3 : CARACTERISTIQUES PHISICO-CHIMIQUES DU SOL DE YAMOUSSOKRO

		Horizons analysés					
		1 (0-5cm)	2 (5-20cm)	3 (20-40cm)	4 (40-60cm)	5 (60-80cm)	6 (80-100cm)
Granulométrie en 10^{-2}	Refus	0	0	0	0	0	0
	Argile	26,7	26,2	43,3	39,8	33,6	27,0
	L. fin(2-20 μ)	13,1	12,0	16,0	14,2	12,8	7,7
	L. gros.(20-50 μ)	14,5	8,5	6,0	5,0	6,0	6,0
	S. fin(50-200 μ)	28,5	27,0	21,0	19,5	29,0	23,0
	S. gros.	15,5	23,5	14,0	23,5	20,5	38,0
Matières organiques en 10^{-3}	Carbone	17,80	16,99	14,56	8,96	5,86	3,22
	Azote	1,51	1,33	1,28	0,94	0,71	0,46
	Ac. Hum.	1,79	1,86	1,38	0,71	0,41	0,28
	Ac. Fulv.	0,84	0,87	0,90	0,61	0,54	0,34
Acidité	pH eau (1/2,5)	5,8	6,4	6,8	6,5	6,2	6,2
Cap. échangeable en m.éq	Ca ⁺⁺	5,37	6,64	9,80	6,07	4,65	3,47
	Mg ⁺⁺	2,42	2,77	3,98	3,50	2,85	2,25
	K ⁺	0,42	0,43	0,81	0,71	0,49	0,31
	Na ⁺	0,14	0,21	0,22	0,16	0,12	0,09
	Cap. d'éch.	11,64	12,31	13,78	11,87	9,87	7,42
Ac. phosphorique en 10^{-3}	Ph. total	1,13	0,88	1,15	0,95	0,83	0,55
	Ph. ASS. Olsen	0,09	0,10	0,12	0,11	0,11	0,06
Elem. totaux en m.éq	Ca ⁺⁺	6,99	7,61	9,63	6,23	5,01	3,89
	Mg ⁺⁺	8,04	7,94	9,44	8,40	7,04	6,34
	K ⁺	2,49	2,57	3,89	3,66	2,95	2,18
	Na ⁺	0,49	0,59	0,67	0,59	0,55	0,53
	Inst. struct.	1,28	1,31	3,11	3,86	3,55	4,41
	Perméab.	10,71	11,24	4,46	3,13	4,23	5,71
	S. bases éch.	8,35	10,05	14,84	10,44	8,11	6,12
	T. sat. %	71,7	81,6	>100	87,9	82,1	82,4
	Mat. organ.(10^{-3})	3,17	2,92	2,51	1,54	1,01	0,55
	C/N	11,8	11,3	11,4	9,5	8,3	7,0
	Taux C. hum. %	14,8	16,1	15,7	14,7	16,2	19,3

Par ailleurs, il était indispensable d'établir pour chaque sol, la courbe d'humidité en fonction du pF (fig. 2), afin de déterminer l'humidité correspondant à la saturation (pF 0) ou à la capacité au champ (sol de Dabou : pF 3,0, sol d'Abengourou : pF 2,8, sol de Yamoussokro : pF 2,5).

Ces valeurs caractéristiques nous permettront :

- 1 - de schématiser sous forme graphique le régime hydrique des sols au cours de la période correspondant à l'étude des variations saisonnières des différents paramètres analysés (fig. 6).
- 2 - de faire des études expérimentales de fixation d'azote en portant des échantillons de sol à des humidités correspondant à la capacité au champ ou à la submersion.

Ces humidités, exprimées en g d'eau pour 100 g de sol sec, sont respectivement, pour les sols de Dabou, Abengourou et Yamoussokro :

Capacité au champ :	44,5	-	28,6	-	16,8
Saturation	:	88,5	-	71,0	- 41,5

D. PRATIQUES CULTURALES

1. Préparation du terrain

a) Labour

Sur les rizières qui ne sont pas laissées au repos, et c'est ici le cas, le labour intervient sur sol très humide. Il est effectué le plus rapidement possible après la récolte précédente et précède de peu le repiquage suivant.

Ce travail peut être effectué à l'aide de motoculteurs spécialement adaptés au travail dans la boue (matériel AGRIMA).

Le problème essentiel est celui des pailles. Il importe en effet d'enfouir le maximum de matière organique dans ces sols qui portent plusieurs récoltes annuelles. Cette pratique offre de plus l'avantage de limiter le développement des plantes adventices.

b) Planage

Il est réalisé après la mise en eau, à l'aide d'une large planche à planer, tirée par deux hommes et poussée par un troisième.

2. Variétés de riz

La variété IR 8 sélectionnée par l'I.R.R.I. (Institut International de Recherches Rizicoles) aux Philippines, par la fondation ROCKFELLER, a été introduite en 1967 en Côte d'Ivoire. Elle y a confirmé ses remarquables possibilités avec des rendements atteignant 80 quintaux à l'hectare, en culture paysanne. C'est cette variété qui est utilisée dans les stations étudiées ici. Elle est caractérisée par un cycle moyen (110 jours) des pailles courtes (80cm), des grains longs, et une forte consommation d'engrais.

On trouve aussi dans le département du Nord, des variétés Africaines et malgaches, qui sont des variétés à cycle moyen (110-130 jours) et à grains longs. Elles donnent satisfaction dans cette région, mais on leur reproche une hauteur de pailles excessive.

3. Préparation des pépinières et repiquage

La surface de la pépinière est égale au 1/20ème de celle de la rizière à repiquer. Le semis est fait à la volée (12 kg de semences à l'are). L'arrachage se fait à l'apparition de la troisième feuille (15 à 17 jours après le semis).

Le repiquage se fait par touffes de 4 à 5 brins espacés de 25 cm.

4. Fumure

La politique actuelle de la S.A.T.M.A.C.I. tend à uniformiser les méthodes. On préconise ainsi un engrais complet (11-22-16) épandu avant le repiquage à la dose de 200 kg/ha, puis du sulfate d'ammoniac utilisé au tallage en un apport de 100 kg/ha.

Notre choix s'étant porté sur des rizières pilotes, les fumures correspondantes étaient adaptées à chaque type de sol :

- DABOU :

Un premier épandage constitué par de l'urée, se situe 15 jours après le repiquage. 20 jours plus tard, un engrais complet (12-15-18) est épandu à raison de 150 kg/ha. Enfin, 12 jours après le second épandage, de l'urée est apportée en application foliaire.

- ABENGOUROU :

Deux épandage d'engrais complet (12-15-18) sont faits 14 et 23 jours après le repiquage, à raison de 150 kg/ha.

- YAMOUSSOKRO :

La fumure consiste en un premier épandage d'engrais complet (12-15-18) 15 jours après le repiquage, à raison de 150 kg/ha, puis 13 jours plus tard, en un apport d'engrais mixte NP (20-20) à raison de 120 kg/ha.

5. Entretien

La lutte contre les adventices peut nécessiter l'emploi de sar-
cleuses. Toutefois, la technique consistant à enfouir les adventices à la
main dans la boue, est relativement rapide et efficace.

6. Conduite de l'eau

La pépinière est maintenue constamment humide pendant la levée du
riz. Elle est recouverte ensuite d'une couche d'eau d'épaisseur croissante
dès la fin de la première semaine.

La rizière est mise en eau dans les jours qui suivent la levée,
avec 2 à 3 cm d'eau jusqu'à la fin du tallage. Toutefois, chaque sarclage
et apport d'engrais nécessite un assèchement de 2 à 3 jours.

Le drainage intervient 8 à 10 jours avant la récolte.

Remarque : En pratique, la maîtrise de l'eau n'est pas toujours assurée, soit que les possibilités d'irrigation sont limitées (rizière d'Abengourou), soit que des inondations intempestives (en saison des pluies en particulier) ne permettent pas une exondation correcte.

7. Traitements insecticides

La culture irriguée est un terrain favorable à la prolifération des parasites du riz, surtout quand il y a culture permanente.

Les essais réalisés par le Service de la Protection des Végétaux ont mis en valeur l'intérêt d'un insecticide systématique : la Bazudine. Le traitement consiste en deux épandages de 25 kg/ha réalisés 8 jours après le repiquage, puis 1 mois plus tard.

8. Récolte

Les paysans ont tendance à récolter le riz avant maturité complète. Il en résulte un paddy contenant une forte proportion de grains non remplis ou verts, peu intéressant à l'usinage. Les encadreurs de la S.A.T.M.A.C.I. ont donc poussé les riziculteurs à attendre le stade où les 3/4 de la panicule sont mûrs pour récolter.

La récolte se fait à la faucille.

Le battage peut être réalisé sur le casier, à l'aide d'une batteuse facilement transportable (type AGRIMA à pédale). Cette batteuse est utilisée à DABOU et ABENGOUROU.

Au niveau des aménagements importants (YAMOOUSSOKRO), on utilise une batteuse mécanique à plus fort débit (1 t/heure).

Le type de riziculture irriguée que l'on pratique actuellement en Côte d'Ivoire ne nécessite donc pas des moyens mécaniques importants, mais une main-d'oeuvre nombreuse et bien encadrée. En effet, depuis la préparation du terrain jusqu'à la récolte, les diverses opérations nécessaires à l'obtention de bons rendements doivent être menées avec un soin constant.

Parmi cet ensemble complexe d'opérations, nous prêterons plus particulièrement attention aux trois points suivants :

1.- Après le battage des grains, les pailles retournent au sol et elles y sont enfouies. Les exportations sont donc limitées. De plus, l'incorporation des pailles peut constituer un apport énergétique favorable à la fixation biologique de l'azote.

2.- Chaque sarclage ou apport d'engrais nécessite un assèchement du sol de 2 à 3 jours. La rizière est donc soumise au cours d'un cycle de végétation, à des périodes de submersion suivies de brèves périodes d'assèchement. Ces variations brutales du régime hydrique perturbent sans doute profondément l'équilibre biologique de ces sols.

3.- Enfin, les quantités d'engrais azotés apportées au sol sous forme de sulfate d'ammoniaque ou d'urée, sont importantes. On peut se demander si ces apports massifs ne vont pas à l'encontre des possibilités naturelles de ces sols de compenser les pertes d'azote dues à la croissance de la plante, par leur activité fixatrice d'azote.

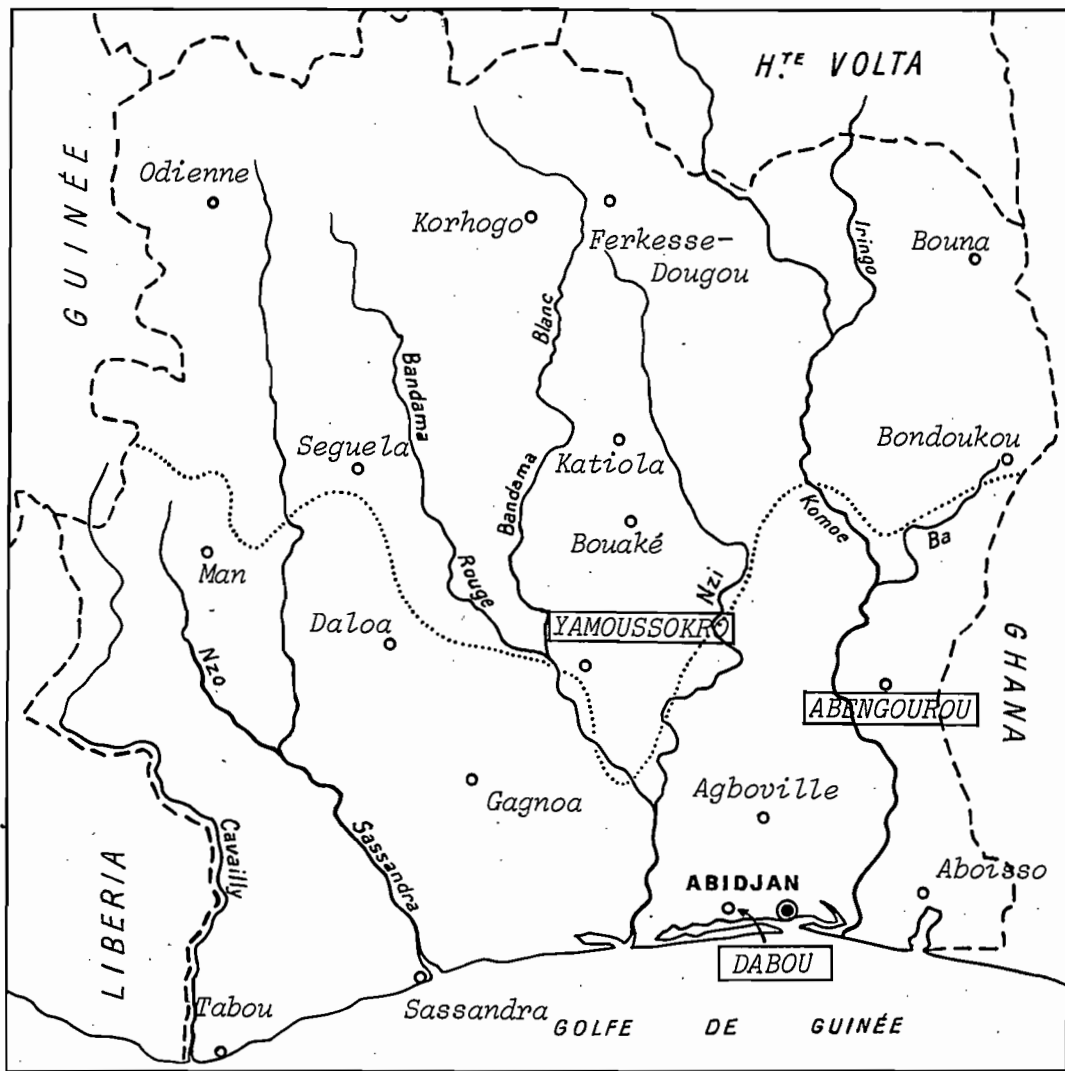


Fig. 1 - Situation des rizières étudiées

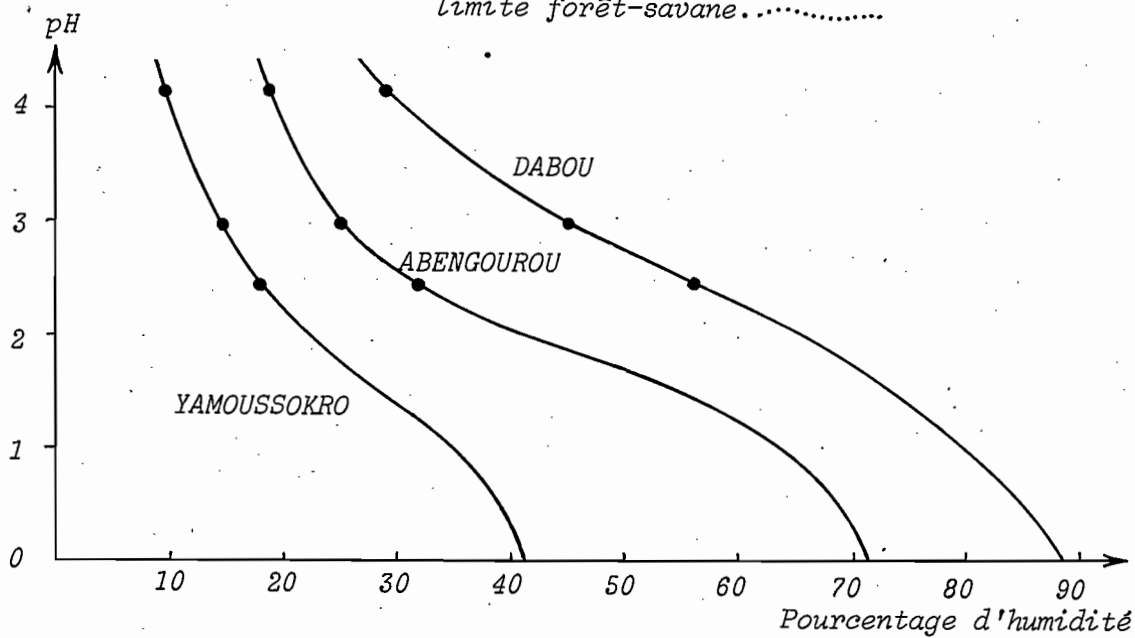


Fig. 2 - Courbes d'humidité en fonction du pF.

Chapitre II

ETUDE IN SITU

Le but de cette étude préalable est de définir quelques aspects essentiels du cycle de l'azote dans les sols choisis en relation avec les conditions du milieu.

Pour cela, nous avons mesuré au cours d'un cycle complet de végétation les variations saisonnières d'un certain nombre de paramètres dans l'épaisseur de sol explorée par les racines du riz.

La fréquence des prélèvements a été de 3 à 4 semaines.

Toutes les analyses ont été faites sur le sol frais dans les quelques heures qui ont suivi le prélèvement, et ont donné lieu à trois répétitions.

A - TECHNIQUE DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

1) Mode opératoire

Les prélèvements ont été faits dans trois horizons successifs :

- un horizon de surface de 5 cm (horizon 1)
- puis deux horizons plus profonds compris entre 5 et 20 cm (horizon 2), 20 et 40 cm (horizon 3).

Le but assigné étant l'étude de variations saisonnières, il importait d'utiliser une technique de prélèvement aussi peu sensible que possible à l'hétérogénéité spaciale. C'est pourquoi, nous avons choisi de prélever tous nos échantillons sur une aire de prélèvement de surface réduite (4 m² environ) et suffisamment éloignée des bords de la parcelle pour éviter l'effet de bordure (10 m environ).

Dans chaque horizon ont été effectués 4 prélèvements.

Toutes les analyses ont été faites sur chacun des échantillons moyens constitués par les 4 prélèvements.

L'étude statistique qui suit a pour but de justifier cette technique de prélèvement.

2) Justification statistique

12 échantillons moyens ont été constitués, d'une part, sur l'aire de prélèvement choisie, d'autre part en 12 points pris au hasard sur l'ensemble de la parcelle.

L'activité déshydrogénasique exprimée en μl d'hydrogène par gramme de sol sec a été mesurée sur chaque échantillon (voir plus loin 2 a) les détails de la technique utilisée).

Les résultats de ces analyses sont mentionnés dans le tableau 4.

Nous avons calculé l'intervalle de confiance des moyennes déterminées à partir des échantillons A et des échantillons B, puis nous avons comparé ces deux moyennes.

Les méthodes utilisées sont celles préconisées par LAMOTTE (1967) dans le cas des petits échantillons (inférieurs à 30) avec un coefficient de sécurité de 95 %.

- Intervalle de confiance des moyennes :

. Echantillons A

Sol de Dabou	:	$36,59 \pm 0,97$
Sol d'Abengourou	:	$31,74 \pm 1,12$
Sol de Yamoussokro	:	$148,87 \pm 4,69$

. Echantillons B

Sol de Dabou	:	$39,05 \pm 3,56$
Sol d'Abengourou	:	$30,13 \pm 3,81$
Sol de Yamoussokro	:	$155,38 \pm 14,48$

L'intervalle de confiance est environ 4 fois plus petit dans le cas des échantillons A.

Autrement dit, les risques d'erreurs sur l'estimation de la moyenne sont moindres quand les analyses sont faites sur des échantillons provenant d'une aire de prélèvement réduite.

Tableau 4 - ACTIVITE DESHYDROGENASIQUE DE 12 ECHANTILLONS MOYENS PROVENANT DE L'AIRE DE PRELEVEMENTS (ECHANTILLONS A) et de 12 ECHANTILLONS MOYENS PRELEVES EN 12 POINTS DE LA PARCELLE PRIS AU HASARD (ECHANTILLONS B)

Activité déshydrogénasique ($\mu\text{l.H/g sol}$)					
Sol de DABOU		Sol d'ABENGOUROU		Sol de YAMOUSSOKRO	
A	B	A	B	A	B
39,6	42,3	32,2	36,4	148,7	161,8
34,5	34,4	28,8	27,1	144,2	148,2
37,0	39,6	34,3	30,8	153,7	158,5
35,8	46,2	32,0	22,2	149,2	125,8
34,2	41,8	31,6	23,3	139,2	145,6
35,8	38,7	32,3	39,6	137,8	183,3
36,7	30,5	31,5	33,6	151,0	143,5
35,6	39,7	31,2	22,9	156,9	208,2
36,5	34,5	34,7	33,4	162,2	132,2
39,6	48,2	28,8	24,1	151,1	144,2
36,2	30,9	32,3	35,3	148,5	168,3
37,6	41,8	31,2	32,8	140,9	144,9

- Comparaison des moyennes A et B

Le seuil T_v correspondant pour une sécurité de 95 % au nombre de degrés de liberté $v = 22$ est $T_{22} = 2,08$.

Les valeurs expérimentales pour chacun des sols sont les suivantes :

Sol de Dabou	:	$t = 1,47$
Sol d'Agengourou	:	$t = 0,89$
Sol de Yamoussokro	:	$t = 0,94$

Dans les trois cas, les valeurs expérimentales sont inférieures à la valeur limite 2,08.

La différence entre les deux moyennes n'est donc pas significative. Autrement dit, les échantillons prélevés sur une aire de prélèvement réduite, peuvent être considérés comme représentatifs de l'ensemble de la parcelle.

Les pratiques culturales expliquent ces résultats. En effet, les sols de rizières choisis supportent trois cultures annuelles.

Ils sont donc labourés trois fois par an et présentent une homogénéité plus grande que d'autres types de sols.

B - METHODES D'ANALYSES

1 - Mesure du pH et du potentiel d'oxydo-réduction

a) Rappels théoriques

La notion de pH est trop classique pour qu'il soit nécessaire de s'y attarder. Notons simplement que la connaissance du pH d'un milieu est essentielle dans la mesure où ce paramètre conditionne directement toutes les activités biologiques qui s'y déroulent, et où il est susceptible de variations importantes comme c'est le cas dans les sols de rizières soumis à de brutales variations d'humidité.

Par contre, le choix que nous avons fait d'exprimer le potentiel d'oxydo-réduction non pas en mV comme c'est le plus souvent le cas, mais en unités rH, mérite quelques explications.

Le potentiel d'un système redox s'exprime par la formule de NERNST :

$$E_h = - \frac{RT}{nF} \ln K + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Ox)}{(Red)}$$

avec $R = 8,317$ Joules

$T =$ température absolue

$F = 96\,501$ coulombs

En posant $E_o = - \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Ox)}{(Red)}$, il vient

$$E_h = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Ox)}{(Red)}$$

expression dans laquelle E_h est le potentiel redox correspondant à l'électrode normale à hydrogène prise comme zéro, et E_o le potentiel redox du système quand les concentrations en oxydant et réducteur sont égales.

E_o est appelé potentiel normal d'oxydo-réduction.

Si l'on passe des logarithmes népériens aux logarithmes décimaux, vers 30°C , $\frac{RT}{F} \log e \approx 0,060$ volts.

On écrit alors :

$$E_h = E_o + \frac{0,06}{n} \log \frac{(ox)}{(red)} \text{ volts}$$

L'équilibre d'un système est maximum quand l'oxydant et le réducteur sont présents à concentrations égales.

Cet équilibre est d'autant plus stable que la concentration totale en oxydant et réducteur est plus élevée.

Ainsi, l'équilibre des sols bien aérés est mauvais en raison de l'absence d'un système réversible en concentration suffisante, alors qu'il est bien meilleur dans les sols riches en composés réduits.

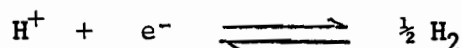
Les concentrations en oxydant et réducteur, dépendent de facteurs tels que la formation de complexes ioniques et le pH. Le pH en particulier, affecte le degré d'ionisation entraînant ainsi des modifications de potentiel d'oxydo réduction. (l'accroissement du potentiel est de l'ordre de 60 mV quand le pH chute d'une unité).

Notion de rH

En créant la notion de rH, CLARK essaya de caractériser par une notion calquée sur celle du pH, une région définie de l'intensité d'oxydo-réduction :

le rH d'une solution est le cologarithme décimal de la pression d'équilibre d'hydrogène sur la solution. (le pH étant le cologarithme décimal de la concentration en ions H^+ de la solution).

A tout équilibre d'oxydo-réduction en milieux aqueux dilué, on peut faire correspondre un équilibre entre les ions H^+ et l'hydrogène gazeux :



La formule de NERNST appliquée à l'électrode à hydrogène donne :

$$E_h = - \frac{RT}{F} \ln \frac{\sqrt{P}}{(H^+)}$$

$$\text{Il vient : } E_h = \frac{RT}{F} \ln (H^+) - \frac{RT}{2F} \ln P$$

Si on pose $rH = - \log P$

$$E_h = \frac{2,302 RT}{2F} rH - \frac{2,302 RT}{F} pH$$

Soit à 30°

$rH = \frac{E_h}{0,03} + 2 pH$

Dans une étude sur la détermination directe du rH dans les milieux naturels, RIVIERE (1959) montra que le rH est une grandeur proportionnelle à la d.d.p. entre deux électrodes de platine poli dont l'une serait placée dans le milieu à étudier, l'autre dans un milieu identique saturé d'hydrogène sous pression atmosphérique ($rH = 0$), ces deux milieux étant distincts et reliés par un pont de conductibilité.

L'auteur conclut : "il y a donc une possibilité de mesure directe du rH. En effet, l'électrode de verre présente avec le liquide dans lequel elle est plongée, une d.d.p. qui varie à une constante près comme celle de l'électrode à hydrogène. Il est donc possible de construire des appareils donnant le rH par lecture directe à partir de la d.d.p. existant entre l'électrode de platine et l'électrode de verre".

L'intérêt de la mesure du rH est évident.

En effet, la détermination du potentiel redox ne définit l'état d'oxydo-réduction du système étudié que si l'on précise le pH et la température du milieu (il augmente de 60 mV quand le pH chute d'une unité).

Par contre, le rH qui ne dépend que des activités des formes oxydée et réduite, suffit à lui seul à caractériser l'état d'oxydo-réduction du milieu.

b) Mesures du pH et du rH in situ

Le matériel utilisé est un potentiomètre PONSELLE sur lequel peuvent être branchées 3 électrodes-cannes longues de 1,10 m solidarisées à la même hauteur et enfoncées simultanément dans le sol.

Les graduations portées sur les cannes permettent de situer le point de mesure en hauteur. Les données recueillies ainsi au même niveau sont relevées sur les cadrans de lecture.

- mesure du pH :

Le pH est mesuré entre une électrode de verre et une électrode de référence au chlorure d'argent (d'un potentiel pratiquement constant, $A = 202$ mV).

- mesure du rH :

Le potentiomètre donne le rH par lecture directe à partir de la d.d.p. existant entre l'électrode de verre, et une électrode de platine.

2 - Mesure de l'activité respiratoire

Nous avons évalué l'activité respiratoire des sols par la mesure de leur activité déshydrogénasique et la détermination du coefficient de minéralisation du carbone.

a) Activité déshydrogénasique en fonction du carbone

Selon SCHEFFER (1963), l'activité déshydrogénasique traduit des phénomènes oxydatifs sensus lato et caractérise essentiellement les processus métaboliques du cycle du carbone.

Il y a transfert de l'hydrogène venant de l'oxydation des composés carbonés, sur un accepteur d'hydrogène, le chlorure de triphényl tétrazolium (TTC). La réduction du TTC ne dépendrait que de l'activité enzymatique normale des microorganismes (elle est nulle dans un sol traité au méthanol, au chloroforme ou au toluène).

La technique utilisée est celle de CASIDA et coll. (1954) :

- A 6g de sol placés dans un tube à essais de 20 x 200, on ajoute 60 mg de carbonate de calcium, 1 ml d'une solution de TTC à 3 % et une quantité juste suffisante d'eau distillée pour qu'une mince couche d'eau surnage à la surface du sol.

- Après avoir mélangé avec une baquette de verre, et bouché hermétiquement, on porte 24 h à l'étuve à 30° C.

- Le triphényl formazan (TPF) résultant de la réduction du TTC est extrait par 40 ml d'alcool méthylique par agitation, puis centrifugation (10' à 5 000 t/mm).

- Le surnageant est porté à 50 ml avec de l'alcool méthylique.

- On mesure alors l'intensité de la coloration au spectrophotomètre à 485 mμ.

Les résultats sont exprimés en μl d'hydrogène par gramme de carbone (μlH/g C). Pour cela, on se réfère à une courbe étalon établie avec du T.P.F., en sachant que la formation de 1 mg de TPF exige 150,35 μl d'hydrogène et que les poids moléculaires du TPF et du TTC sont respectivement 300,36 g et 334,80 g.

Remarque : Les dosages de carbone ont été faits suivant la méthode de TIURIN (1951) citée par VANLANDE (1955).

b) Coefficient de minéralisation du carbone

Le dégagement de gaz carbonique d'un sol étant dû aux activités biologiques qui s'y déroulent, sa mesure est susceptible de nous renseigner sur son activité biologique globale.

Le coefficient de minéralisation du carbone est défini comme étant le pourcentage de carbone minéralisé sous forme de CO_2 . La technique utilisée est celle décrite par DOMERGUES (1960) :

100 g de sol frais sont placés dans un bocal à conserve de 1 litre à fermeture canette au centre duquel se trouve un bécher contenant 20 ml d'une solution de soude N/5 .

Le bocal est fermé et porté une semaine à l'étuve à 30° C en même temps qu'un bocal témoin.

La soude est dosée par de l'acide chlorhydrique N/10 après addition de 5 gouttes de thymolphtaléine.

3 - Mesure de l'azote total. Détermination du potentiel de fixation (technique ROUQUEROL)

Au cours de ses études sur le phénomène de fixation d'azote dans les rizières de Camargue, Madame ROUQUEROL (1964) fut amenée à mettre au point une technique de mesure de capacité potentielle de fixation.

Cette technique consiste à réaliser une dispersion de sol dans de l'eau faiblement minéralisée dans les quelques heures qui suivent le prélèvement, et à mesurer l'enrichissement (ou l'appauvrissement) en azote du milieu, après une période constante d'une semaine.

Les dosages d'azote sont faits par microKjeldahl et déplacement à la soude dans l'appareil de Parnas-Wagner.

En raison de l'importance de ces dosages dans notre étude, nous en ferons une description détaillée.

Remarque préalable :

La mesure de l'azote par la technique de Kjeldahl permet de doser à la fois l'azote organique (qui représente la majeure partie de l'azote du sol) et l'azote ammoniacal.

Nous verrons plus loin que la teneur en azote ammoniacal est de l'ordre de 60 à 100 ppm suivant le type de sol, alors que la teneur moyenne en azote nitrique est de 3 ppm. On peut donc considérer que par cette technique, nous mesurons la totalité de l'azote du sol (99,8 à 99,9 %).

- Réalisation de la suspension de sol

- . 5 g de sol frais sont amenés à un volume de 200 ml avec de l'eau distillée et dispersés sous agitation magnétique pendant 15 mn environ.
- . 5 ml de cette suspension sont prélevés à l'aide d'une pipette de précision et portés dans un matras en vue du dosage par la méthode de Kjeldahl.

Le même prélèvement effectué après une semaine permettra de mesurer la variation de la teneur en azote dans le milieu, exprimée en % de la teneur en azote ($\frac{DN}{N} \times 100$).

- Minéralisation

- . On ajoute dans le matras 1 ml d'acide sulfurique concentré pur et on porte à ébullition (débit maximum des éléments brûleurs de la rampe de minéralisation).
- . Le contenu du matras devient noir et d'épaisses vapeurs blanches sont émises.
- . Quand l'émission de vapeurs cesse, on arrête le chauffage.
- . Après refroidissement, quelques gouttes d'eau oxygénée à 110 volumes "type électro" (10 à 15 gouttes suivant la richesse en azote du sol) sont ajoutées au matras et on porte à nouveau à ébullition.

Des vapeurs blanches se dégagent. On arrête le chauffage quand cette émission cesse.

- . Si le contenu du matras n'est pas parfaitement blanc, on recommence cette dernière opération.
- . Après refroidissement, on ajoute quelques ml d'eau distillée (10 ml environ).

Remarques :

- 1°) Il est essentiel que pour chaque sol, ces diverses opérations soient réalisées de la même façon. En particulier, on testera chaque sol, afin de déterminer le nombre de gouttes d'eau oxygénée nécessaire à l'obtention d'une bonne minéralisation.
- 2°) La durée d'une minéralisation est de 20 mn environ. Avec une rampe de minéralisation munie de 6 brûleurs, on peut, dans ces conditions, réaliser 15 à 20 minéralisations par heure.

- Distillation et dosage

La distillation est réalisée dans un appareil de Parnas-Wagner avec déplacement par 5 ml environ de lessive de soude.

Le distillat est recueilli dans un bécher contenant 20 ml d'eau distillée et 5 gouttes de réactif de Tashiro, et dans lequel on aura placé un barreau d'agitation.

Afin d'éviter les pertes d'ammoniac, l'extrémité du réfrigérant plonge dans l'eau contenue dans le bécher.

Le dosage s'effectue au cours de la distillation à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique N/70 apportée à l'aide d'une microburette permettant d'apprécier le 1/100 de ml (microburette METHROM, d'une capacité de 10 ml).

On ajoute de l'acide chlorhydrique jusqu'à l'obtention d'une coloration gris-bleu stable, identique à la coloration initiale.

La distillation est alors terminée.

Remarques :

1°) La coloration provoquée par le réactif de Tashiro est verte en milieu alcalin, mauve en milieu acide.

La sensibilité est telle qu'au voisinage de la neutralité, 1/100 de ml d'acide N/70 suffit à modifier la coloration de façon appréciable.

2°) La composition du réactif de Tashiro est la suivante :

1 volume de bleu de méthylène à 0,70 % dans l'alcool à 95° pour 5 volumes de rouge de méthyle à 0,15 % dans l'alcool à 95°.

3°) La durée moyenne d'une distillation est de 3 mn environ.

On peut ainsi réaliser 15 à 20 distillations par heure.

- Détermination de la teneur en azote d'un sol

. 5 ml d'une suspension de 5 g de sol frais dans 200 ml, correspondent à 0,125 g de sol frais. La connaissance de l'humidité permet de déterminer le poids de sol sec correspondant.

. Le poids atomique de l'azote étant de 14, à 1 ml de solution HCl N/70, correspond 0,2 mg d'azote.

Un calcul simple permet alors de déterminer la teneur en azote que l'on exprimera en mg par gramme de sol (mg N/g sol).

- Exemple d'analyse statistique

Un dosage d'azote sur le sol d'Abengourou a été réalisé avec 12 répétitions. Les volumes d'acide chlorhydrique N/70 nécessaires à la neutralisation de l'azote distillé ont été les suivants (en ml) :

1,65 - 1,62 - 1,64 - 1,64 - 1,65 - 1,62

1,63 - 1,62 - 1,66 - 1,63 - 1,62 - 1,64

Nous avons calculé l'intervalle de confiance de la moyenne avec un coefficient de sécurité de 95 % :

1,635 $\pm$ 0,01085 soit 1,635 $\pm$ 0,011

La suspension de sol était réalisée avec un poids de sol humide correspondant à 5 g de sol sec dans 200 ml d'eau distillée (soit 0,125 g de sol/5 ml).

Le contenu en azote de chaque matras est donc

$$(1,635 \pm 0,011) \times 0,2 = 0,3270 \pm 0,0022 \text{ mg N}$$

soit par gramme de sol sec :

$$\frac{0,3270 \pm 0,0022}{0,125} = 2,615 \pm 0,0176 \text{ mg N}$$

L'erreur expérimentale est donc de 0,6 % dans le cas présent. On peut admettre qu'elle oscille en général autour de 1,0 %.

4 - Mesure de l'azote minéral et de l'azote minéralisable

a) Azote minéral

L'azote ammoniacal échangeable et l'azote nitrique ont été dosés suivant les techniques colorimétriques proposées par JACKSON (1964);

- Azote nitrique

Dans un erlen de 500 ml sont placés 30 g de sol frais et 200 ml de la solution d'extraction (200 ml CuSO_4 1 N et 1 litre Ag_2SO_4 0,6 % dilués à 10 l avec de l'eau distillée).

On agite 10 mn sur agitateur magnétique, on ajoute 0,4 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et on reporte sur l'agitateur magnétique. Après 5 mn d'agitation, on ajoute 1 g Mg CO_3 . (ces deux réactifs précipitent l'excès de Cu et Ag).

On centrifuge 10 mn à 5 000 t/mn.

Le surnageant est porté à 250 ml exactement.

On évapore à sec 50 ml de surnageant dans un erlen de 100 ml.

Après refroidissement, on ajoute rapidement 5 ml d'acide phénol disulfonique et on agite.

Après 10 mn, on ajoute 15 ml environ d'eau distillée, et on agite avec une baguette de verre.

Après refroidissement, on ajoute lentement une solution de NH_4OH 6 N jusqu'à coloration jaune, puis à nouveau 3 ml.

On dilue à 100 ml avec de l'eau distillée, et on fait la lecture au spectrophotomètre à 420 m μ .

Les résultats sont exprimés en ppm en référence à une courbe étalon établie à partir d'une solution standard de KNO_3 à 0,7221 g de KNO_3 par litre (soit 100 ppm).

- Azote ammoniacal échangeable

Dans un erlen de 300 ml sont placés 30 g de sol frais et 90 ml d'une solution de chlorure de sodium 10 N, acidifiée à pH 2,5 par de l'acide chlorhydrique N.

Après 30 mn d'agitation, on centrifuge 10 mn à 5 000 t/mn.

Le surnageant est recueilli et ajusté à 100 ml.

On prélève alors 10 ml que l'on place dans un erlen de 100 ml et on ajoute 2 ml de tartrate de sodium à 10 %, 83 ml d'eau distillée, 5 ml de réactif de Nessler et une pincée de gomme arabique (volume total 100 ml)

L'erlen est bouché et agité.

La lecture se fait après 25 mn, au spectrophotomètre à 410 m μ .

Les résultats sont exprimés en ppm en référence à une courbe étalon établie à partir d'une solution standard de chlorure d'ammonium.

b) Azote minéralisable

Il est très facile de se faire une idée de la quantité d'azote minéral (essentiellement ammoniacal) pouvant être mis à la disposition de la plante dans les conditions écologiques. Il suffit pour cela, de placer une petite quantité de sol dans de l'eau et de doser l'azote ammoniacal après un certain temps d'incubation.

En 1940, déjà, au Japon, SHIOIRI et AOMINE mesuraient ainsi un indice de fertilité potentielle des sols de rizières.

La méthode que nous avons utilisée a été décrite par WARING et BREMNER (1964) :

Dans un tube à essais de 18 x 180 sont placés 5 g de sol frais et 15 ml d'eau distillée.

Après 15 jours d'incubation à 30°, on dose l'azote ammoniacal par la technique décrite ci-dessus.

Les résultats exprimés en ppm, représentent la somme de l'azote ammoniacal échangeable (dosé par ailleurs) et de l'azote minéralisé pendant l'incubation sous forme ammoniacale.

5 - Numération des diverses microflores du cycle de l'azote

Les numérations d'Azotobacter et Beijerinckia ont été faites sur boîtes de silico-gel suivant un procédé mis au point par MOURARET (1968).

Pour les autres microflores, nous avons utilisé la technique classique des suspensions-dilutions de sol préconisée et décrite par POCHON et TARDIEUX (1962).

Les résultats ont été exprimés en logarithmes décimaux.

a) Microflore fixatrice d'azote

α - Azotobacter et Beijerinckia

. Préparation du silico-sol

400 ml de silicate de soude technique ($d = 1,33$) portés à 2 l avec de l'eau distillée, sont passés sur une colonne d'Amberlite IR 120 (diamètre 5,5 cm, hauteur 60 cm).

On laisse écouler les 300 premiers ml, puis on recueille le silico sol. Les 300 ml d'eau initiale sont passés ensuite.

. Préparation des boîtes pour la numération d'Azotobacter

Composition du milieu :

Glucose	40 g
Carbonate de calcium	40 g
Solution de Winogradsky	200 ml
Citrate de sodium	5,7 g

On mélange 250 ml de ce milieu à 600 ml de silico sol et 150ml d'eau distillée et on répartit en boîtes de Petri, à raison de 30 ml par boîte.

Quelques heures après la prise en masse, on égoutte les boîtes.

L'ensemencement se fait par 1 ml de suspension de sol.

L'inoculum est raparti uniformément à la surface de la boîte, et on laisse sécher jusqu'à ce que la surface soit mate. Les boîtes sont alors portées à l'étuve à 30°.

Les colonies commencent à apparaître après 24 h d'incubation. Leur comptage peut être fait au 3ème ou 4ème jour.

. Préparation des boîtes pour la numération de Beijerinckia

Composition du milieu :

Glucose	40 g
Phosphate monopotassique	16 g
Solution de Winogradsky	200 ml
Acide citrique	1,5 g

Ce milieu est ajusté à pH 6 avec une solution de potasse N et amené à 1 litre.

On mélange 250 ml de ce milieu à 550 ml de silico-sol et 200 ml d'eau.

La suite des opérations est identique à celle des boîtes pour Azotobacter.

Les colonies commencent à apparaître après 8 à 10 jours. Leur comptage peut être fait au 20ème jour.

β - Clostridium (cf. POCHON et TARDIEUX, 1962)

Composition du milieu :

Solution saline standard de Winogradsky ..	50 ml
Phosphate monopotassique	0,75 ml
Soude décinormale	33 ml

Glucose	10 g
Solution d'oligo-éléments	1 ml
eau distillée q.s.p.	1 000 ml

γ - Cyanophycées fixatrices d'azote

Nous avons utilisé la solution nutritive de CHU, de concentration triple.

Composition du milieu (solution mère) :

Chlorure de calcium	1,08 g
Phosphate dipotassique	0,3 g
Sulfate de magnésium	0,75 g
Carbonate de sodium	0,6 g
Silicate de sodium	0,75 g
Citrate de fer	0,09 g
Acide citrique	0,09 g
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

Ce milieu est dilué 10 fois et réparti en tubes à essais de 20 x 200, à raison de 10 ml par tube.

Une fois ensemencés, les tubes sont incubés à 30° avec un éclaircissement de 3 000 lux.

Les lectures sont faites après 21 jours d'incubation.

b) Autres microflores du cycle de l'azote (cf. POCHON et TARDIEUX, 1962)

α - Ammonificateurs

Composition du milieu :

Solution saline standard	50 ml
Asparagine	0,2 g
Solution d'oligo-éléments	1 ml
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

β - Bactéries nitreuses

Composition du milieu :

Solution saline standard	50 ml
Sulfate d'ammonium	0,5 g
Carbonate de calcium	1 g
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

γ - Dénitrificateurs

Composition du milieu :

Solution saline standard	50 ml
Nitrate de potassium	2 g
Glucose	10 g
Carbonate de calcium	5 g
Solution d'oligo-éléments	1 ml
Eau distillée q.s.p.	1 000 ml

Remarques

1. Les boîtes pour la numération d'Azotobacter et de Beijerinckia ne sont pas stériles.

Les milieux utilisés sont très électifs et le support siliceux parfaitement inerte (ne contient pas d'azote même à l'état de traces comme c'est le cas avec la gélose). Il n'y a donc pas de contamination.

2. Tous les milieux liquides ont été répartis en tubes à essais bouchés au coton et stérilisés à l'autoclave 20 mm. à 110° C.

C. VARIATIONS SAISONNIERES DES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES

Dans ce paragraphe seront exposés les résultats des mesures de pH et de rH faites dans le sol en place, ainsi que les résultats des analyses chimiques et biologiques effectuées sur des échantillons prélevés au cours d'un cycle complet de culture.

En raison d'une défectuosité momentanée des appareils de mesure, il n'a pas été possible de faire coïncider les mesures de pH et de rH avec les autres analyses.

Nous pensons toutefois que ce décalage dans le temps n'aura pas eu d'incidence sur l'interprétation des résultats obtenus.

1 - pH et potentiel d'oxydo-réduction

a) Rappel sommaire des travaux antérieurs

α - Evolution du pH dans les sols de rizières

La submersion provoque des variations de pH dont l'ampleur est variable suivant le pH initial, la quantité de matière organique et la durée de la submersion.

Elle entraîne une chute du pH des sols alcalins et une élévation du pH des sols acides.

L'élévation du pH fut attribuée à l'accumulation de l'azote ammoniacal (SUBRAHMANYAN, 1927), à la réduction du manganèse (SCHOLLENBERGER, 1927) ou du fer (DENNETT, 1932).

ROMANOFF (1945) associa l'augmentation du pH des sols acides à la réduction des sulfates, et la chute du pH des sols alcalins, au déplacement du carbonate par les ions calcium et magnésium.

Citons enfin PONNAMPERUMA et coll. (1966), qui firent une étude très détaillée concernant l'effet du potentiel redox et de la pression partielle en CO_2 sur l'évolution du pH des sols soumis à la submersion.

β - Evolution du potentiel d'oxydo-réduction dans les sols de rizières

Sous l'effet de la submersion, le profil des sols de rizières se différencie en horizons oxydés et réduits, la tension d'oxygène diminue, la concentration en gaz carbonique augmente, on observe la présence de fortes quantités de fer et de manganèse réduits, l'absence virtuelle de nitrates et de sulfates, l'accumulation d'ammonium et la présence des produits de la décomposition anaérobie des matières organiques.

Le potentiel d'oxydo-réduction consitute le critère physico-chimique qui permet le mieux de différencier les sols submergés et les sols normalement aérés.

Un des effets immédiats de la submersion d'un sol, est la consommation rapide de l'oxygène et la chute du potentiel redox (TAKAI et coll., 1956; KOYAMA, 1964).

QUISPEL (1947) montra sur des échantillons de sols mis en suspension dans de l'eau, que le départ de l'oxygène provoqué par un courant d'azote peut conduire à des potentiels fortement électro-négatifs, l'effet d'une faible déficience de l'aération étant d'autant plus prononcé que le pourcentage de substances réductrices est élevé. Toutefois, oxygène et potentiel redox ne sont pas associés par une loi simple (MORTIMER, 1942 ; SCOTT et EVANS, 1955). Autrement dit, d'autres facteurs que l'oxygène ont un rôle majeur dans l'évolution du potentiel d'oxydo-réduction.

BRADFIELD et coll. (1934), GOTOH et YAMASHITA (1966) en particulier, furent amenés à conclure que le facteur essentiel qui conditionne le potentiel redox est le système $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$. Ces auteurs remarquèrent que le potentiel des sols submergés est voisin de ceux du système $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$. De même, l'influence de la matière organique des sols a été observée par de nombreux chercheurs.

PEECH et BOYNTON (1937) en particulier, ont remarqué que la submersion n'entraînait une chute de potentiel importante que si le sol contenait de la matière organique rapidement minéralisable, l'intensité de réduction étant en relation étroite avec le C/N.

Selon AOMINE (1962), les effets de la submersion, de l'apport d'engrais et du drainage sur le potentiel redox des sols de rizières, peut être résumé ainsi :

- le potentiel de l'horizon de surface atteint une valeur minimale quelques semaines après la submersion, puis s'élève progressivement.
- le drainage entraîne une élévation de potentiel rapide
- un apport de matériaux organiques provoque une chute de potentiel rapide,
- l'effet du drainage sur l'élévation de potentiel dépend de la structure du sol.

L'oxydation d'un sol de structure massive est beaucoup plus lente que pour un sol dont la structure est grumeleuse.

Au niveau de la rhizosphère du riz, SHIOIRI et AOMINE (1938-40) ont observé des valeurs de Eh légèrement supérieures à celles trouvées dans le sol environnant. C'est que les racines du riz sont protégées par un film d'oxygène que la plante leur fournit et qui leur permet de fonctionner dans les conditions réductrices de la rizière (MITSUI, 1949 ; JACQ, 1970).

Il est probable, toutefois, que ce phénomène se limite à la rhizosphère proche du riz. Les racines du riz, en effet, excrètent une quantité appréciable de produits organiques contribuant ainsi à l'établissement d'un milieu très réducteur. DE GEE, en particulier (1950) fit des mesures de potentiel très précises dans les rizières de Java, montrant une chute de potentiel redox très forte aux profondeurs correspondant à un enracinement intense.

b) Résultats et discussion

Les mesures de pH et de rH ont été portées sur les figures 2,3,4, de même que les schémas des régimes hydriques correspondants.

α - Variations du pH et du rH au cours du cycle de culture

De l'observation des résultats obtenus, il ressort clairement une relation étroite entre le régime hydrique d'une part, l'évolution du pH et du rH d'autre part :

- la submersion provoque une élévation du pH et une chute du rH,
- l'exondation entraîne les effets inverses.

On notera aussi l'amplitude des variations. Pour les mesures de surface par exemple, les valeurs extrêmes mesurées sont les suivantes :

	pH		rH	
	exondation	submersion	exondation	submersion
DABOU	4,50	6,20	29,0	13,5
ABENGOUROU	5,60	6,60	29,0	18,0
YAMOUSSOKRO	6,20	7,00	22,5	17,0

soit, en moyenne, des variations de l'ordre de 1 unité pH et de 10 unités rH.

Ces variations sont beaucoup plus marquées dans l'horizon de surface, horizon plus riche en matière organique, biologiquement plus actif, et exposé à de brusques changements des conditions écologiques.

Dans les horizons plus profonds, l'amplitude des variations est moindre.

Evolution du régime hydrique

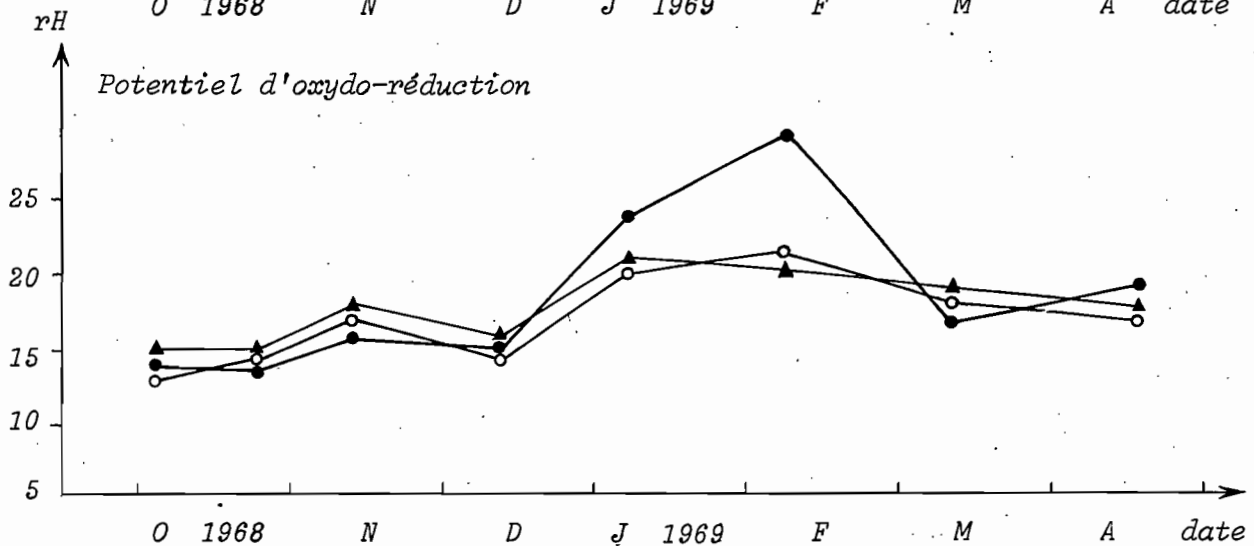
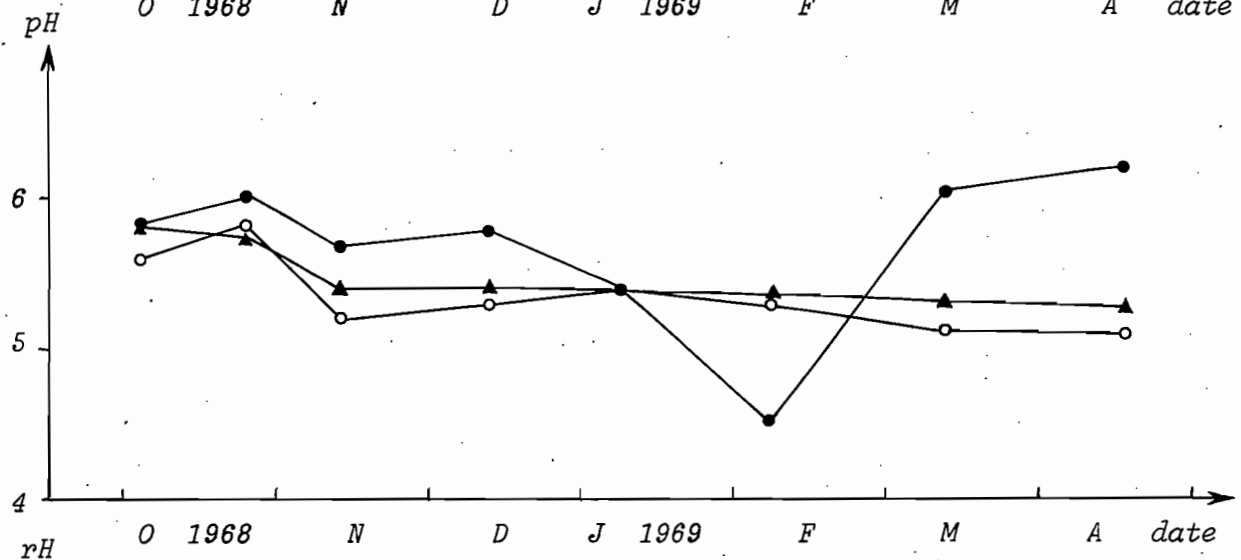
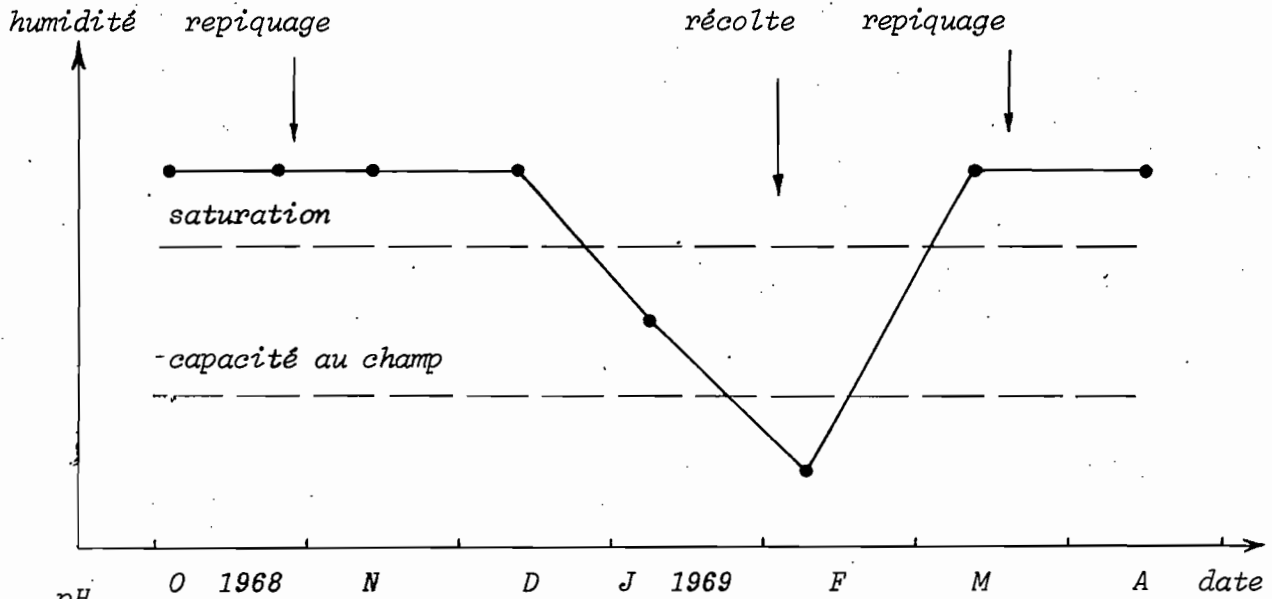


Fig. 3 - Mesures physico-chimiques in situ.

Profondeur : ●—● surface
○—○ 20 cm
▲—▲ 40 cm

Evolution du régime hydrique

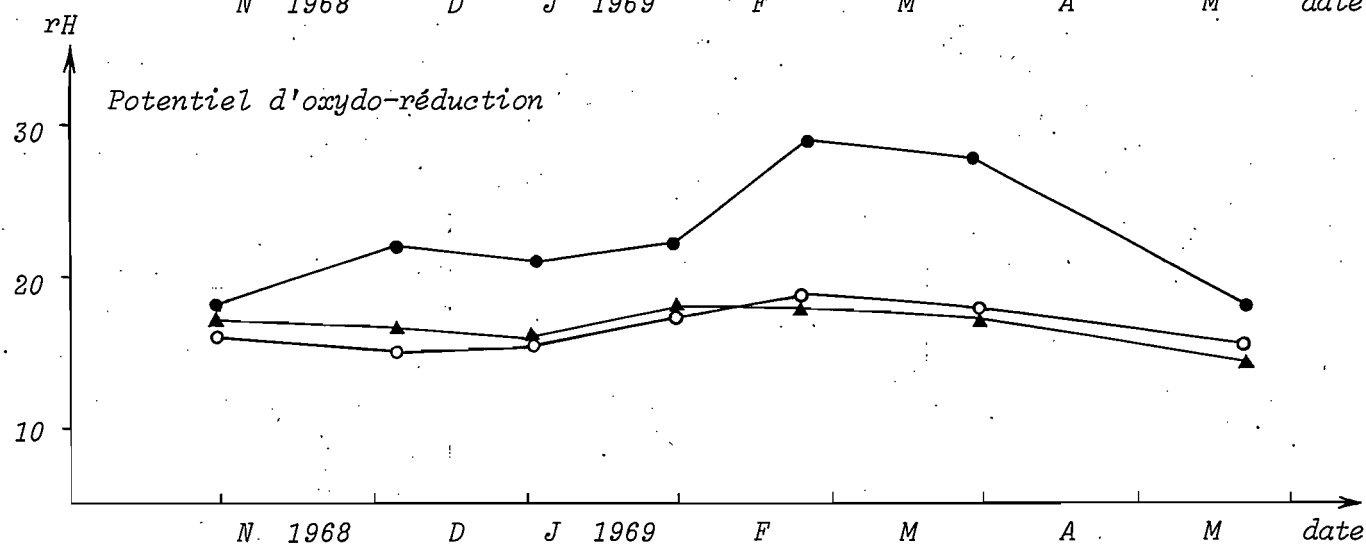
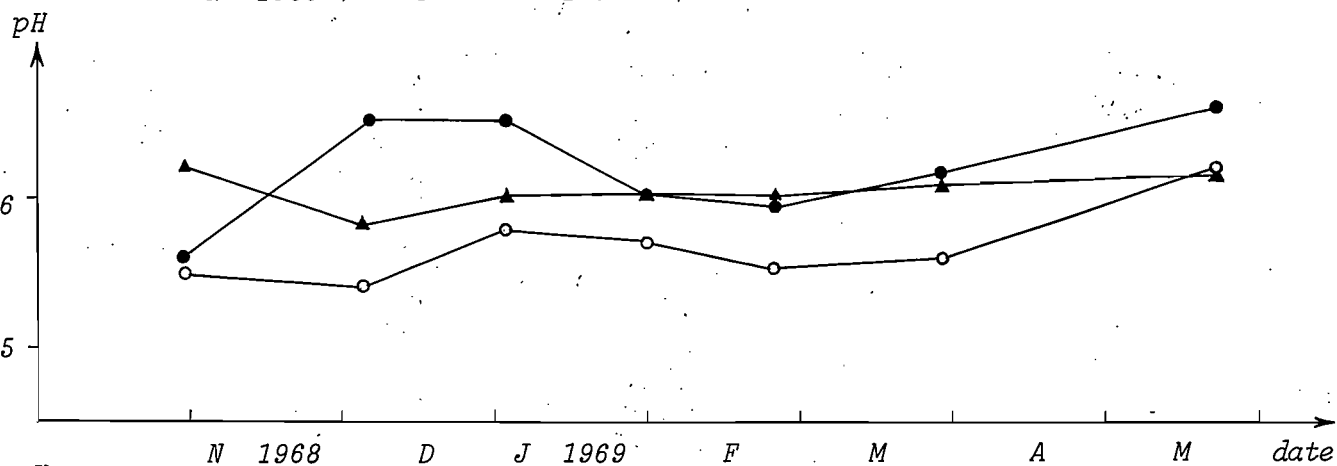
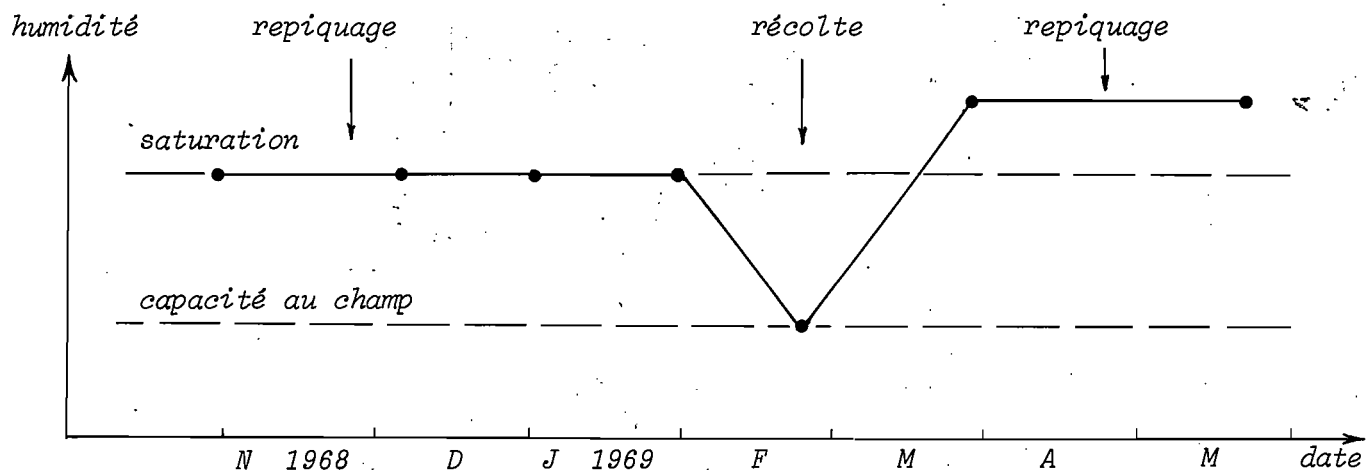


Fig. 4 - Mesures physico-chimiques in situ.

Profondeur :
 ○—○ surface
 ○—○ 20 cm
 ▲—▲ 40 cm

SOL DE YAMOUSSOKRO.

Evolution du régime hydrique

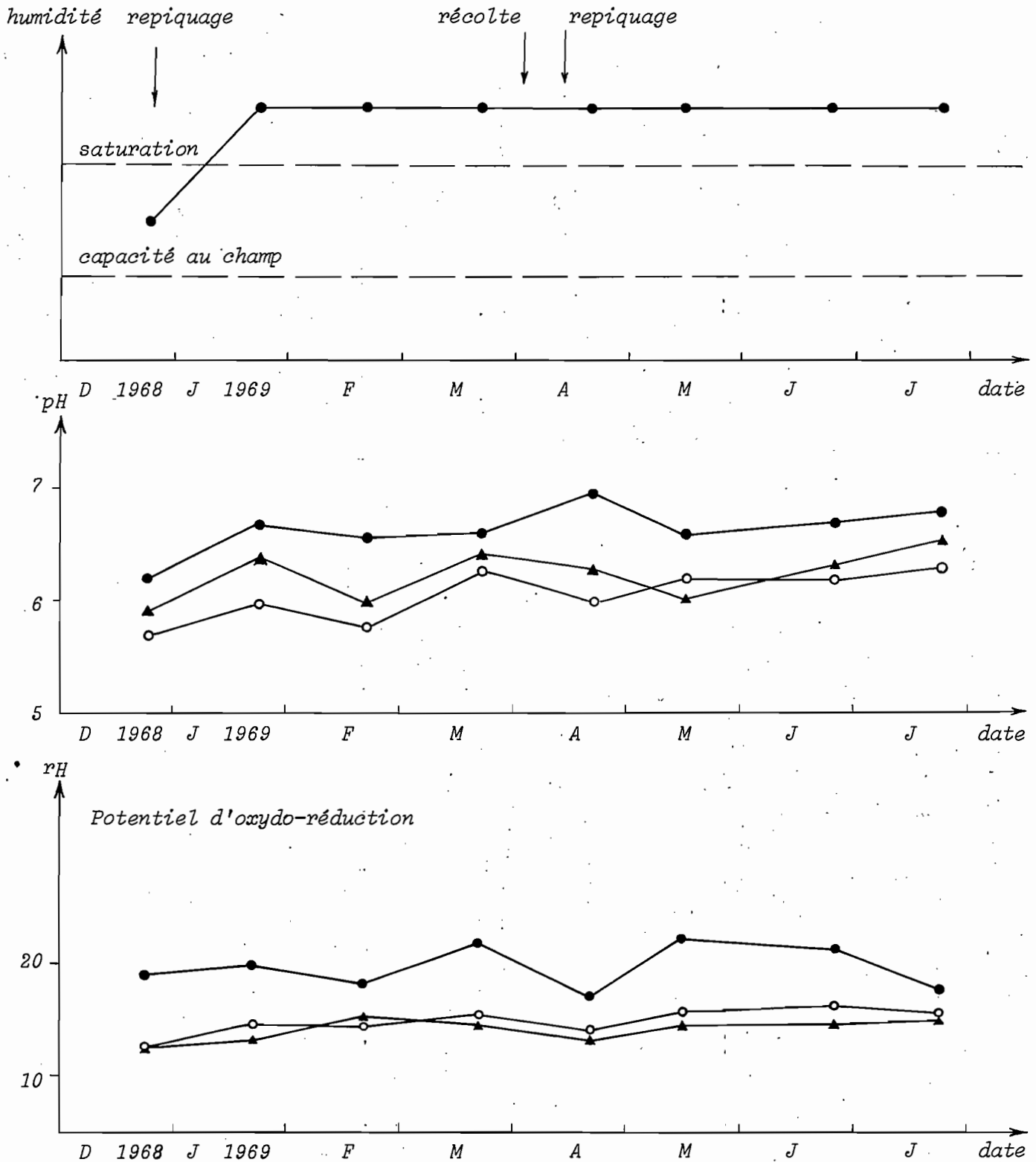


Fig. 5 - Mesures physico chimiques in situ.

β - Variations du pH et du rH avec la profondeur

1. On observe le plus souvent une baisse du pH à la profondeur de 20 cm, suivie d'une élévation sensible à 40 cm. Par exemple, en mars-avril 1968, à Dabou, le pH qui est de 6,1 environ en surface, baisse à 5,1 à 20 cm puis s'élève à 5,3 à 40 cm.

Ce phénomène pourrait être dû à une concentration en azote ammoniacal plus faible au niveau de la rhizosphère que dans le sol environnant, en raison de l'épuisement relatif de cet élément par les racines.

2. Pour ce qui concerne le rH, nos observations sont en accord avec celles de DE GEE, pour les sols d'Abengourou et Yamoussokro : en période de submersion, le potentiel d'oxydo-réduction de ces sols est nettement plus bas à 20 et 40 cm qu'en surface en raison probablement de l'excrétion par les racines d'une quantité appréciable de produits organiques contribuant à l'établissement d'un milieu très réducteur (cf. aussi WOLDENDORP, 1963). A Dabou, par contre, en période de submersion, il n'y a pas de différence nette entre le potentiel d'oxydo-réduction en surface et dans les horizons plus profonds, en raison sans doute de la configuration du profil de ce sol. En effet, au-delà de 20 cm de profondeur, la texture devient très lourde (79 % d'argile et 18 % de limons fins dans l'horizon compris entre 20 et 40 cm). Le drainage vertical est pratiquement nul, et l'enracinement est peu profond : la majeure partie des racines se situe entre 5 et 20 cm. Dans ces conditions, l'effet réducteur des excréments racinaires s'exerce seulement dans les 20 cm supérieurs.

c) Conclusions

Le pH des trois sols étudiés ici est acide quand ceux-ci sont normalement aérés. La submersion a pour effet de porter ce pH à des valeurs relativement proches de la neutralité, ce qui favorise indiscutablement la fixation biologique de l'azote (OKUDA et YAMAGUCHI, 1956)

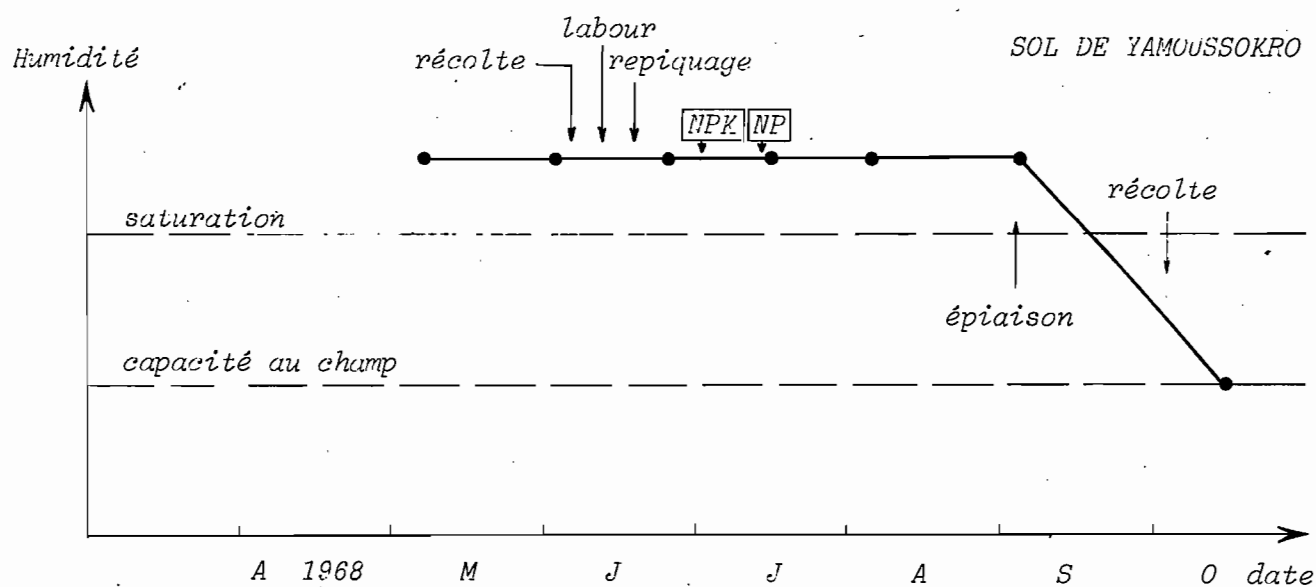
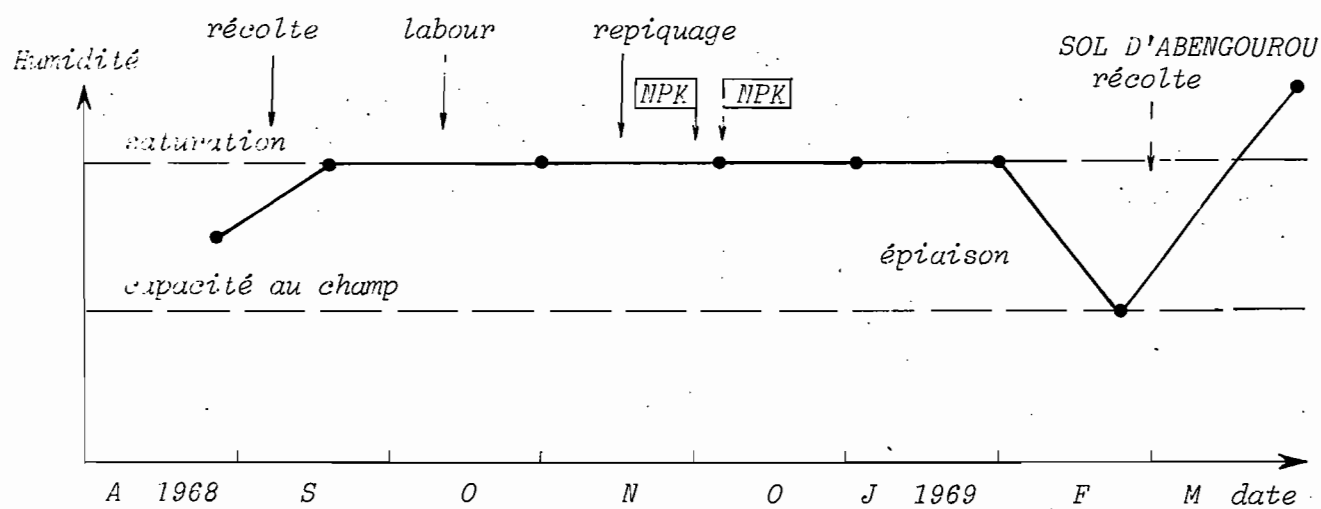
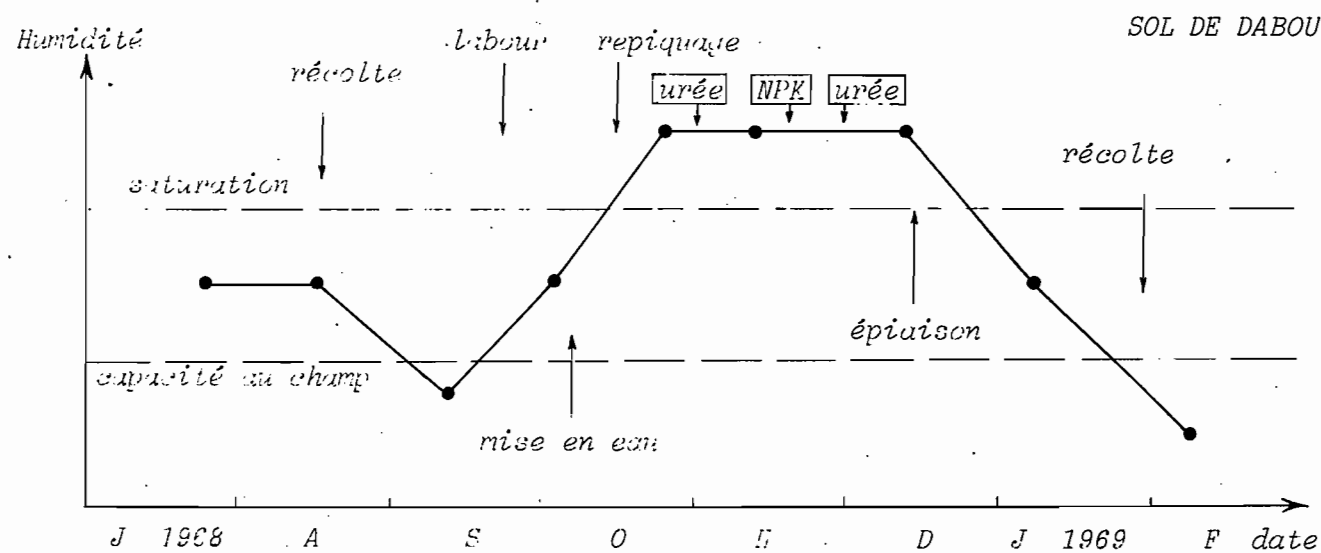


Fig. 6 - Evolution du régime hydrique au cours de la période correspondant aux mesures biologiques.

Il est probable, d'autre part, que l'établissement de conditions semi-anaérobies soit propice à ce processus qui, du point de vue biochimique est strictement anaérobie (JENSEN; 1950, PARKER, 1953, STEWART, 1966).

2 - Activité respiratoire

La méthode d'évaluation de l'activité déshydrogénasique n'est pas une méthode enzymatique sensu stricto (puisque l'on n'opère pas en l'absence de toute activité microbienne). Il s'agit en fait d'une méthode de mesure globale de l'activité respiratoire tout à fait comparable, donc, à la mesure du dégagement de gaz carbonique (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970). Ces mesures sont essentiellement le reflet de la teneur du sol en substrats carbonés facilement métabolisables.

La source principale de la matière organique présente dans le sol, se trouve dans les débris végétaux qui lui sont apportés et qui y subissent des transformations progressives. Parmi les substances qui apparaissent au cours de la dégradation des débris végétaux, les glucides jouent sans doute un rôle important car ils sont pour la plupart facilement utilisables par les microorganismes, ce qui a pour effet de déclencher une stimulation des activités biologiques.

a) Résultats et discussion

L'analyse des résultats obtenus (fig. 7, 8, et 9) laisse apparaître de grandes variations dans le temps, ce qui montre que l'activité biologique est susceptible de variations importantes. Citons à ce propos les travaux de SALEH RASTINE (1968) mettant en évidence des variations très marquées de la teneur en glucides libres de sols de rizières au cours du cycle annuel.

α - Activité déshydrogénasique par rapport au carbone

- Variations au cours du cycle de culture :

Il apparaît un effet très net des pratiques culturales

(cf. fig. 6) sur l'activité déshydrogénasique, surtout au niveau de l'horizon de surface. Ainsi, à Dabou et Abengourou, on constate après le labour une augmentation rapide de l'activité respiratoire, suivie d'une chute plus lente de cette activité.

Il en serait de même à Yamoussokro, s'il n'y avait eu aux prélèvements de juillet 1968, une chute d'activité brutale difficilement explicable (peut-être ce phénomène est-il associé à un lessivage des glucides solubles rendu possible par la perméabilité un peu forte de ce sol).

Quoi qu'il en soit, il semble possible d'associer l'évolution de l'activité déshydrogénasique à la libération de substrats énergétiques à partir des pailles incorporées au sol au moment du labour.

Les observations de SALEH RASTINE vont dans le même sens : les concentrations en glucides libres totaux ainsi qu'en sucres réducteurs augmentent au début de la période de mise en eau avec la décomposition rapide des débris végétaux en présence de l'eau, puis diminuent. De plus, cette libération de substrats énergétiques est certainement facilitée par le fait que la submersion est entrecoupée de brèves périodes d'assèchement au moment de l'épandage des engrais et du sarclage (cf. BERCH, 1958).

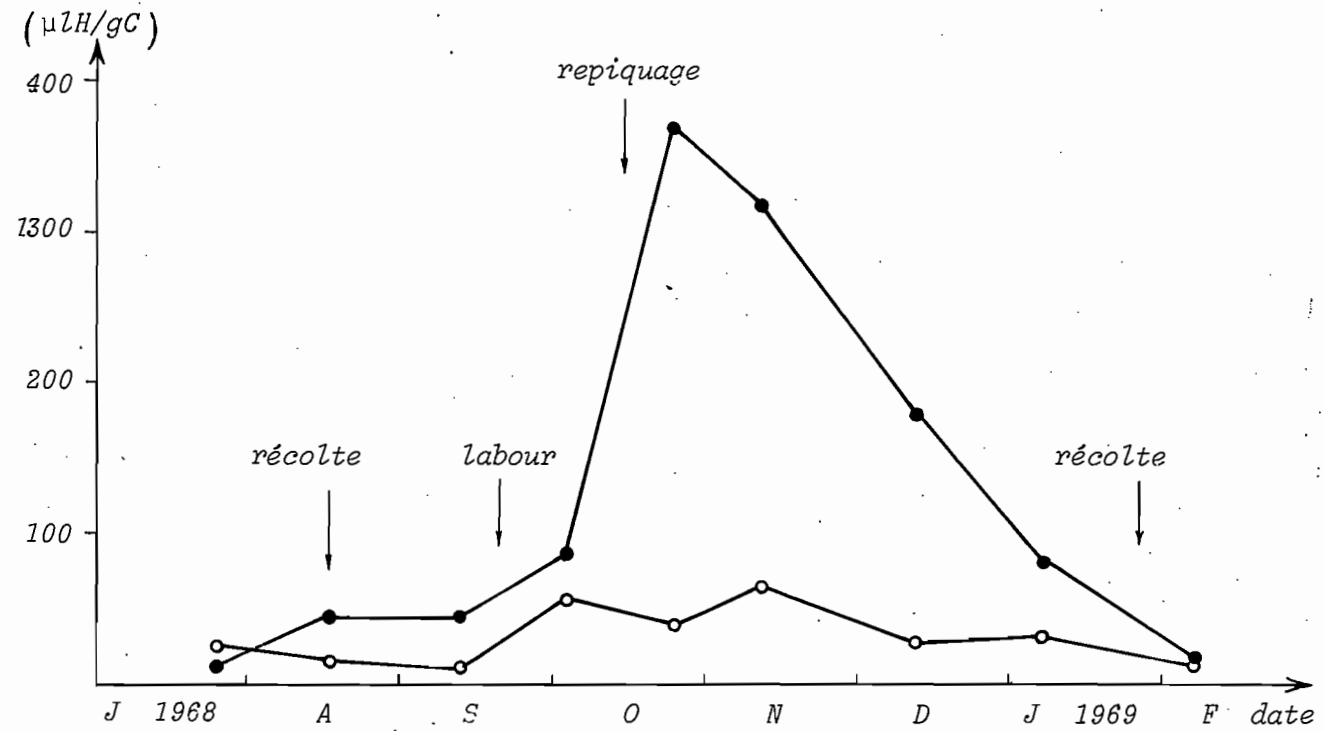
Les valeurs moyennes obtenues dans l'horizon de surface pendant la submersion sont particulièrement élevées (3 000 μH par g de carbone à Dabou et Abengourou, plus de 10 000 μH par g de carbone à Yamoussokro).

Dans les horizons de surface des sols forestiers de l'Est de la France, les valeurs optimales sont obtenues avec des mulls calciques de rendzines et de sols bruns calcaires : 2 210 μH par g de carbone (BAUZON et coll., 1968).

Les sols de rizières donnent donc des chiffres beaucoup plus élevés, probablement liés à des activités cellulolytiques intenses.

SOL DE DABOU.

Activité déshydrogenasique



Coefficient de minéralisation du carbone

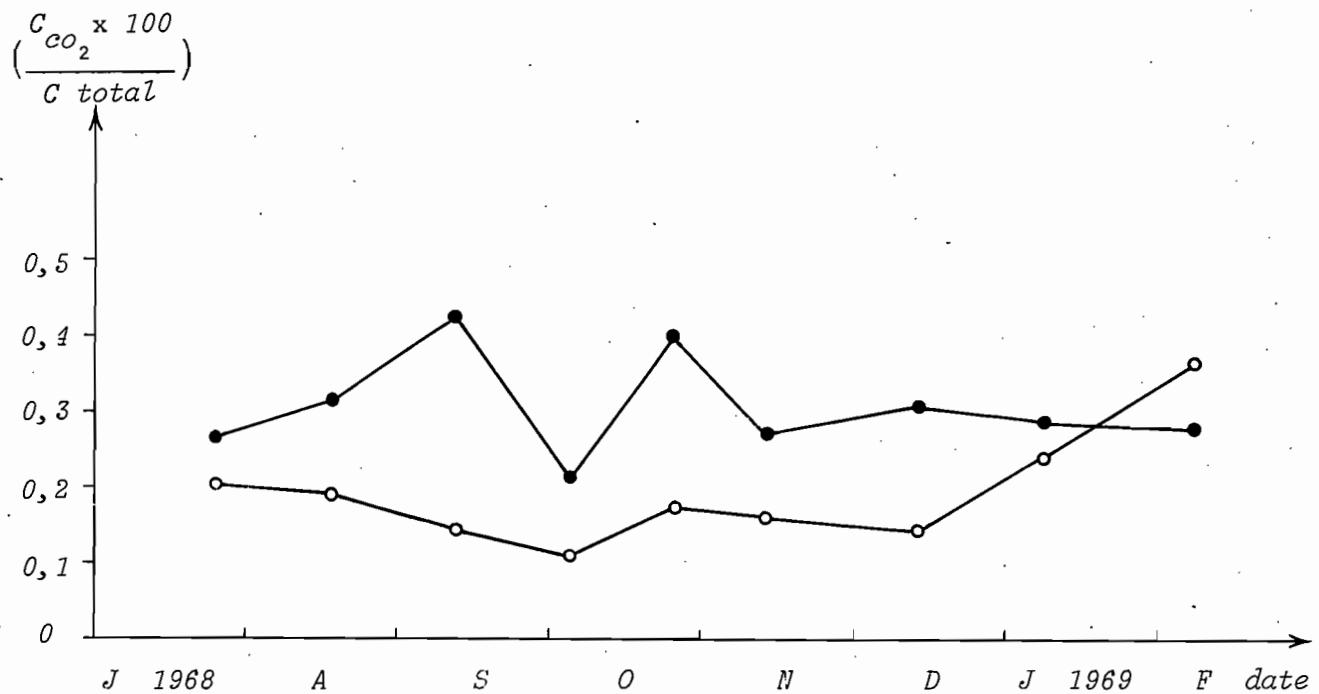
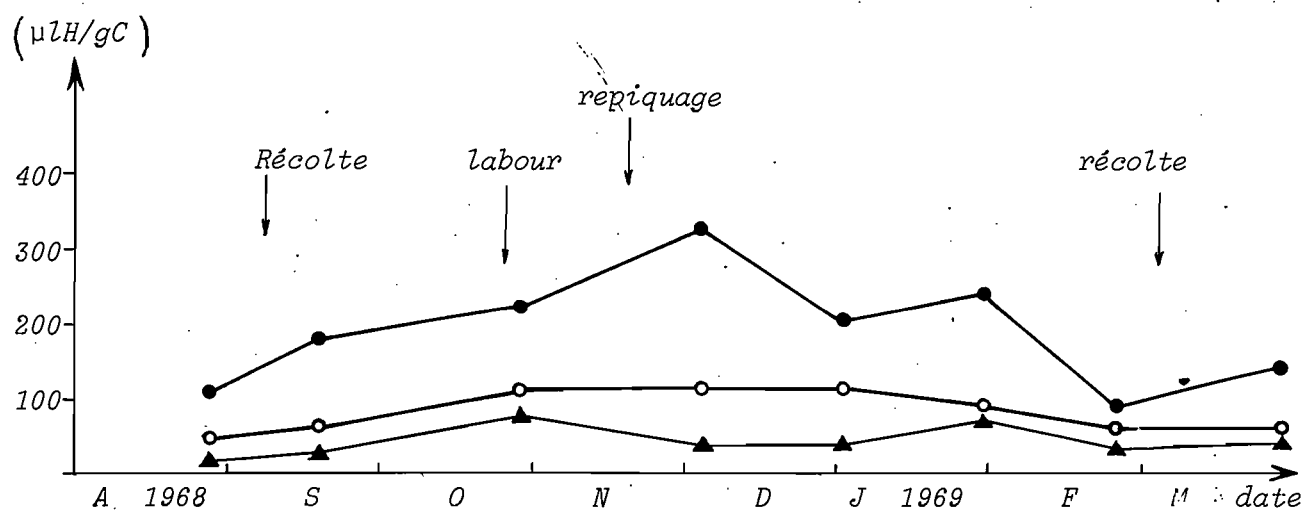


Fig. 7 - Variations saisonnières de l'activité respiratoire (exprimée par rapport au carbone).

●—● horizon 1 (0- 5 cm)
○—○ horizon 2 (5-20 cm)

Activité déshydrogénasique



Coefficient de minéralisation du carbone

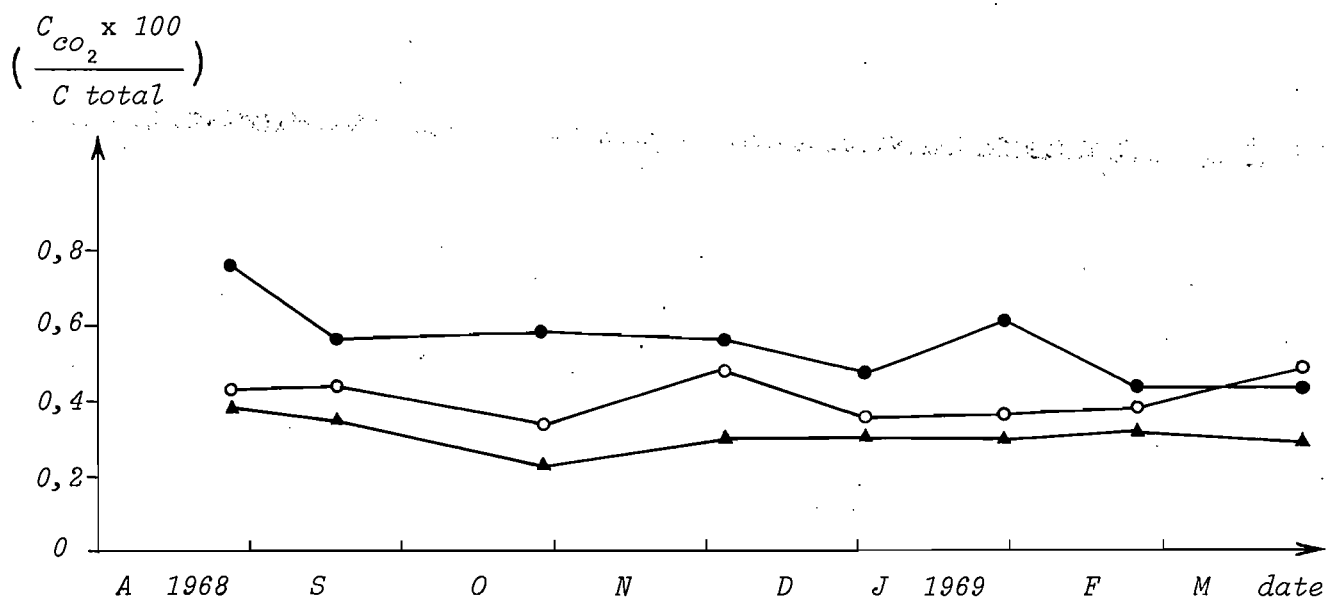
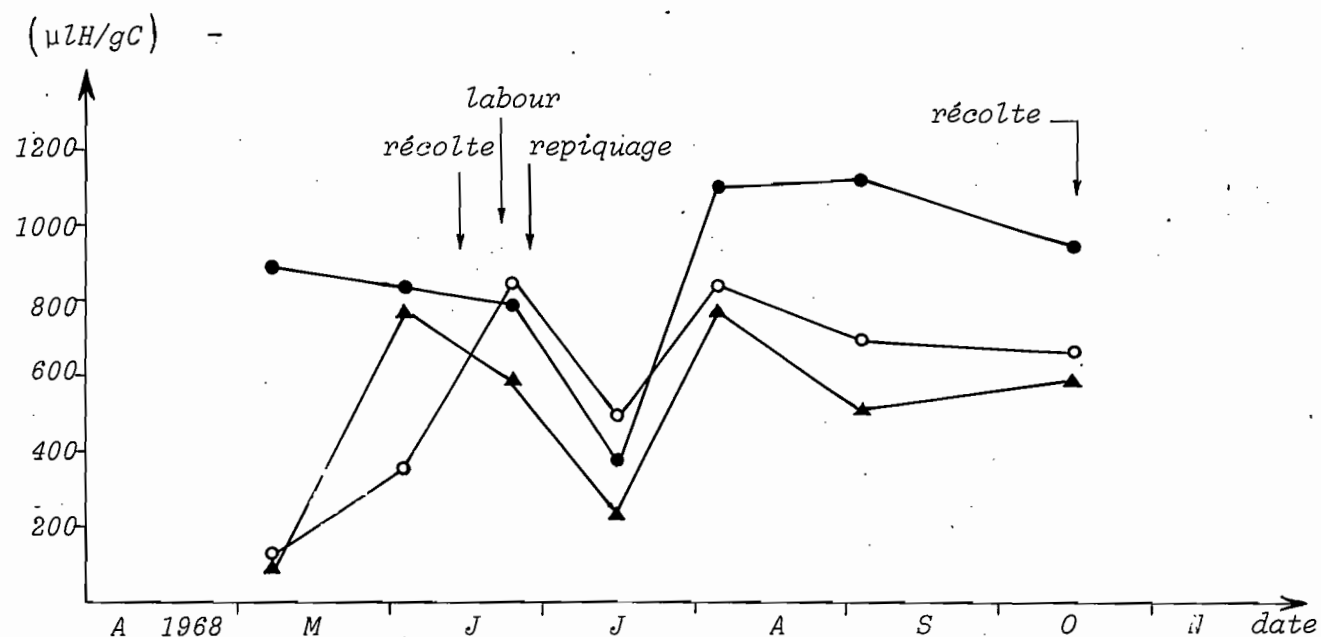


Fig. 8 - Variations saisonnières de l'activité respiratoire (exprimée par rapport au carbone).

- horizon 1 (0- 5 cm)
- horizon 2 (5-20 cm)
- ▲—▲ horizon 3 (20-40 cm)

SOL DE YAMOOUSSOKRO.

Activité déshydrogenasique



Coefficient de minéralisation du carbone

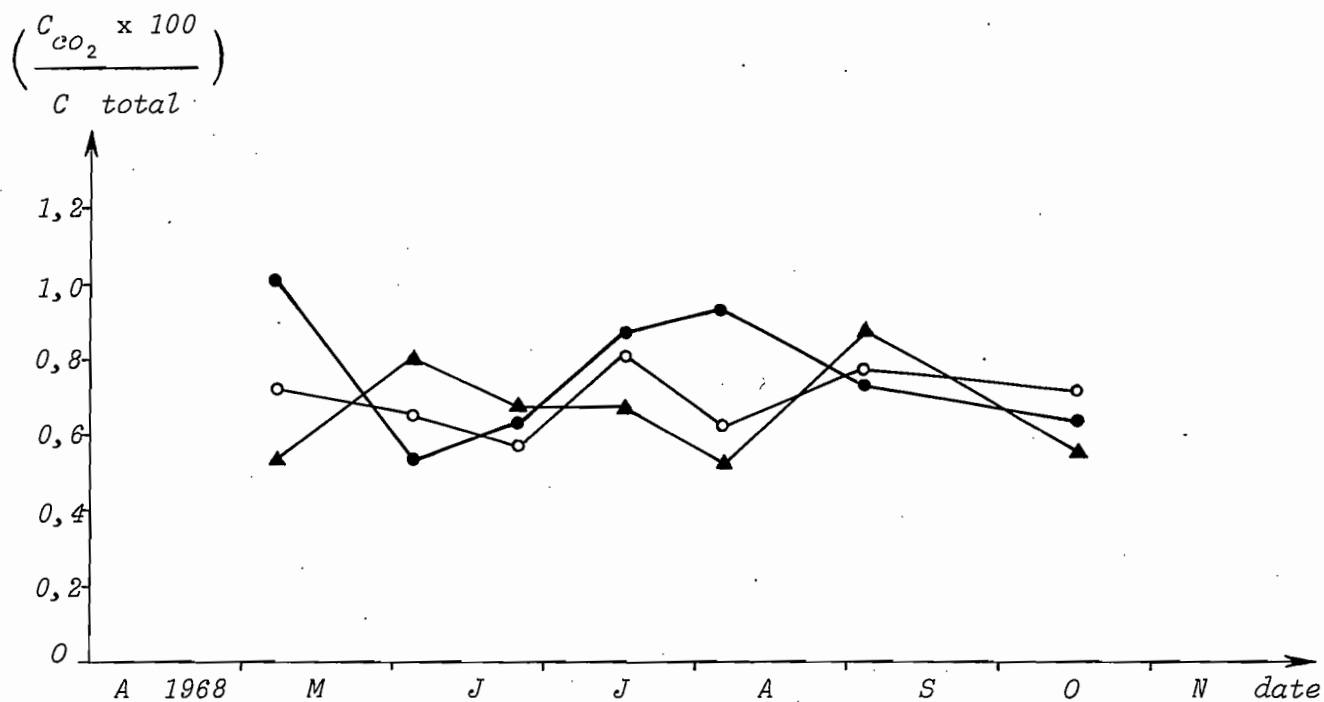


Fig. 9 - Variations saisonnières de l'activité respiratoire (exprimée par rapport au carbone).

- horizon 1 (0- 5 cm)
- horizon 2 (5-20 cm)
- ▲—▲ horizon 3 (20-40 cm)

β - Variations avec la profondeur :

Le plus souvent, les chiffres obtenus en surface sont nettement plus forts que ceux des horizons plus profonds.

Les brusques changements de conditions écologiques auxquels cet horizon est exposé, induisent donc une meilleure activité biologique. En outre, les apports organiques par les algues ne doivent pas être négligés.

- Coefficient de minéralisation du carbone

Les chiffres obtenus sont plus difficiles à exploiter pour ce qui concerne l'évolution au cours du cycle de culture. Ils sont trop peu nombreux pour qu'il soit possible de faire des tests de corrélation, mais il est peu probable s'ils l'avaient permis, que l'on eût observé une corrélation positive entre le dégagement de CO_2 et l'activité déshydrogénasique.

Cette absence pratiquement certaine de corrélation entre les deux tests pourrait s'expliquer comme suit : si dans les deux cas, on évalue une activité respiratoire, on mesure avec l'activité déshydrogénasique une activité après une période d'incubation courte (24 h) et dans des conditions de submersion, alors qu'avec le coefficient de minéralisation du carbone, on mesure la quantité de CO_2 qui s'accumule pendant 7 jours, à partir d'échantillons de sols dont l'humidité est inférieure à la saturation.

La mesure de l'activité déshydrogénasique se faisant dans des conditions d'incubation simulant dans une certaine mesure les conditions hydriques de la rizière, nous estimons qu'elle reflète assez fidèlement l'activité microbienne globale de ces sols.

b) Conclusions

La mesure de l'activité déshydrogénasique permet de mettre en évidence l'effet favorable des pratiques culturales sur le niveau de l'activité biologique des sols de rizières. L'enfouissement des pailles

dans le sol suivi de la mise en eau, favorise la libération de substrats énergétiques par la microflore cellulolytique.

Il est probable que la fertilité élevée généralement observée dans les sols de rizière soit due en partie à l'efficacité de l'association entre cellulolytiques et fixateurs d'azote, les premiers fournissant aux seconds des glucides nécessaires à leur croissance (MAKRINOFF, 1933 ; POCHON et TCHAN, 1946 ; ROUQUEROL, 1964 ; TAHA et coll., 1967). De plus, cette technique permet le classement des trois sols par activité biologique croissante :

- La rizière de Yamoussokro dont le pH est le plus favorable à une bonne activité biologique donne les chiffres les plus élevés ($> 10\ 000\ \mu\text{H/g C}$ après la mise en eau).
- Les chiffres obtenus dans les sols de Dabou et Abengourou, se situent en période de submersion entre 1 000 et 3 000 $\mu\text{l d'hydrogène par g de carbone}$.

3 - Cycle de l'azote

a) Rappel sommaire des travaux antérieurs

Les études traitant du cycle de l'azote dans les sols sont trop nombreuses pour qu'il soit possible de donner un aperçu même succinct de tous les aspects qui ont été abordés. Nous nous limiterons à ne citer que quelques travaux qui nous ont paru présenter un intérêt particulier dans le cadre de notre étude.

α - Fixation non symbiotique de l'azote atmosphérique

Un grand nombre d'études critiques sur ce problème ont été faites. Citons parmi les plus récentes celles de MOORE (1966), et de JURGENSEN et DAVEY (1970).

D'une façon générale, la possibilité pour un sol de fixer l'azote atmosphérique a été très souvent contestée. Il semble toutefois admis que les gains par la fixation non symbiotique soient reconnus appréciables

dans le cas des sols de rizière ; un rôle majeur a été souvent attribué aux cyanophycées fixatrices d'azote (DE, 1936, 1939), qui expliquerait qu'il fût possible de cultiver le riz aux Indes et dans les autres régions asiatiques tropicales et subtropicales, de nombreuses années sans apport d'engrais azotés (DE et SULAIMAN, 1950 ; WATANABE et coll., 1951 ; OKUDA et YAMAGUCHI, 1956 ; ALLEN, 1956).

La fixation non symbiotique de l'azote dans les sols dépend étroitement d'un certain nombre de facteurs :

1) Facteurs physiques

. L'hydromorphie (ROUQUEROL, 1962 ; TAHA et coll., 1967) et l'hydropériodisme (BJÄLFE, 1957 ; CALDER, 1959) sont favorables à la fixation d'azote.

. L'association photosynthèse-lumière n'est pas obligatoire pour la fixation d'azote par les cyanophycées (KRATZ et MYERS, 1955). Toutefois, la haute énergie produite lors des réactions photochimiques (FAY, 1965) stimule la fixation d'azote.

. Des pH voisins de la neutralité sont les plus favorables à l'activité fixatrice (OKUDA et YAMAGUCHI, 1956). On a trouvé toutefois des microorganismes capables de fixer l'azote à tous les pH habituels du sol (ALLISON et HOOVER, 1935 ; BECKING, 1961).

2) Effets de l'atmosphère du sol

La fixation d'azote est un phénomène essentiellement anaérobie (JENSEN, 1950 ; PARKER et SCUTT, 1960 ; BURRIS, 1969 ; STEWART et LEX, 1970). Selon STEWART (1966), ce phénomène se serait établi dans les conditions réductrices de l'atmosphère terrestre primitive.

3) Besoins énergétiques

La fixation d'azote est du point de vue thermodynamique, un processus exothermique (BAYLIS, 1956 ; WILSON, 1958). Une source d'énergie n'est donc pas nécessaire au processus de fixation lui-même, mais il est indispensable à la croissance des microorganismes fixateurs.

4) Azote du sol

L'effet inhibiteur de l'excès d'azote minéral sur des cultures pures de microorganismes fixateurs est bien connu (BURK, 1934). Cet effet inhibiteur se vérifie dans le sol, mais il semble y être sensiblement atténué (JENSEN, 1950).

Il semble d'autre part, que les rendements de fixation les plus élevés, se situent aux moments où le niveau en azote total est le plus bas (ROUQUEROL, 1964), ce qui rejoint l'hypothèse de RUSSEL (1962) selon laquelle pour des conditions données, l'azote total du sol tend vers une certaine valeur d'équilibre.

β- Minéralisation de l'azote

L'azote du sol se trouve essentiellement sous forme organique. Dans les sols de rizières, en raison des effets de la submersion, la fraction minérale de l'azote se trouve essentiellement sous forme d'azote ammoniacal ; on ne trouve du nitrate que dans l'horizon supérieur. Plus mobile que les ions ammonium, le nitrate est entraîné par lessivage dans les horizons réduits sous-jacents, où il est dénitrifié (AOMINE, 1962).

Par contre, une partie importante de l'azote ammoniacal peut être retenue sous forme échangeable ou fixée irréversiblement sur la partie colloïdale du sol (argiles et matière organique). L'azote ammoniacal peut être aussi assimilé par les microorganismes et les plantes supérieures, ou perdu par volatilisation dans l'atmosphère ou lessivage (SHREVEN, 1965).

γ - Dénitrification

Les produits de la dénitrification sont l'azote moléculaire et les oxydes d'azote. Selon WILJER et DELWICHE (1954), l'oxyde nitreux serait le produit principal de la dénitrification dans les sols humides. La dénitrification dépend étroitement d'un certain nombre de facteurs :

1) Matière organique

Les pertes en azote par dénitrification dépendent de la quantité et du type de matière organique ; la vitesse de dénitrification est d'autant plus rapide que celle-ci est plus facilement assimilable (BREMNER et SHAW, 1958).

2) Tension d'oxygène

A partir de cultures pures, PICHINOTY (1965) montre que l'oxygène inhibe la dénitrification bactérienne. Dans les sols bien aérés, les pertes en azote sont nulles ou négligeables (BREMNER et SHAW, 1958 ; NOMMIK, 1956).

3) Humidité

La dénitrification est négligeable aux humidités inférieures à 60 % de la capacité au champ (BREMNER et SHAW, 1958).

4) pH

Un pH neutre ou alcalin favorise la dénitrification (BROADBENT, 1951 ; WILJER et DELWICHE, 1954 ; BREMNER et SHAW, 1958).

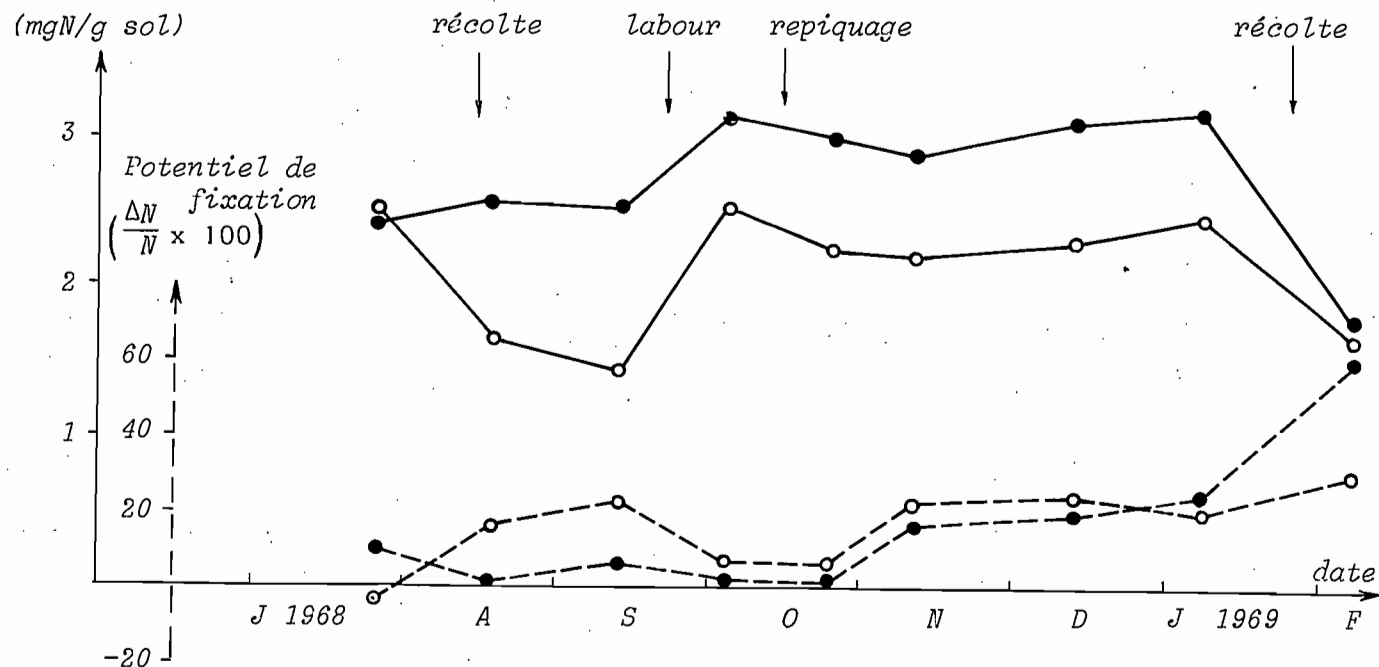
b) Résultats et discussion

a - Azote total - Activité fixatrice potentielle

En raison des effets que pouvaient avoir l'azote total et l'azote minéral sur l'activité fixatrice, nous avons porté sur des graphiques parallèles, les résultats des mesures qui ont été faites de ces différents paramètres (fig. 10, 11, 12)

SOL DE DABOU.

Azote total



Azote minéral

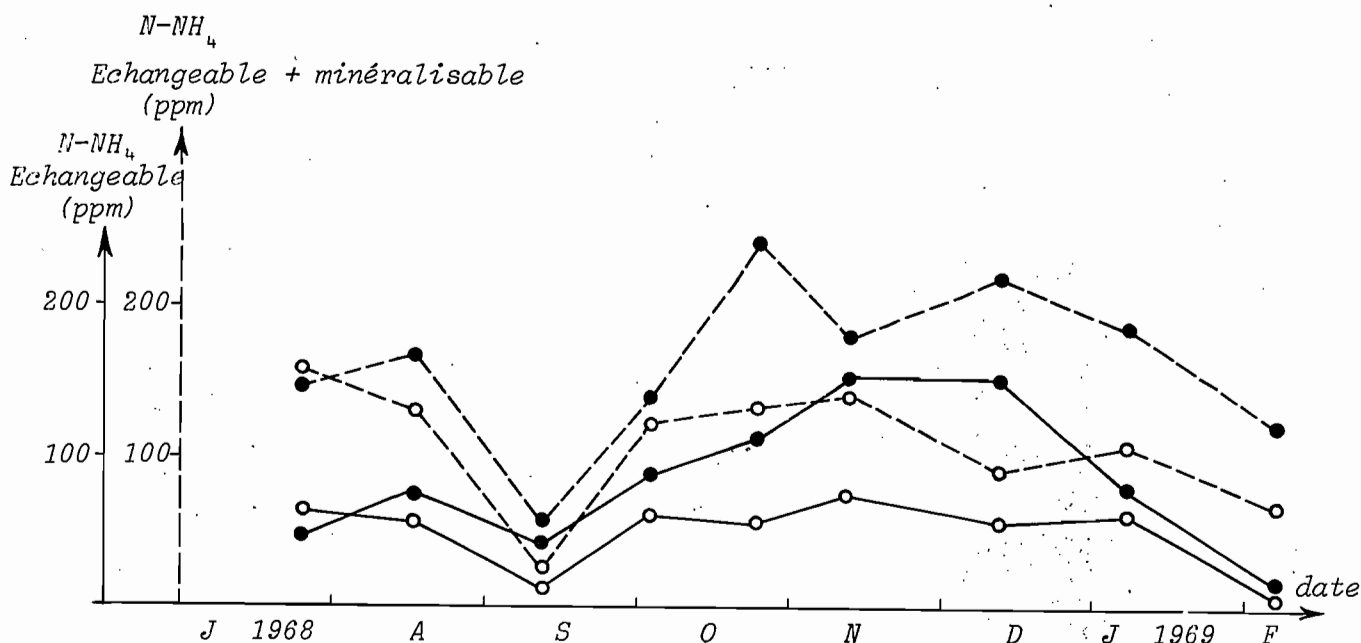


Fig. 10 - Variations saisonnières de l'azote total, du potentiel de fixation, de l'azote ammoniacal échangeable et minéralisable.

- — horizon 1 (0-5 cm)
- — horizon 2 (5-20 cm)

SOL D'ABENGOUROU.

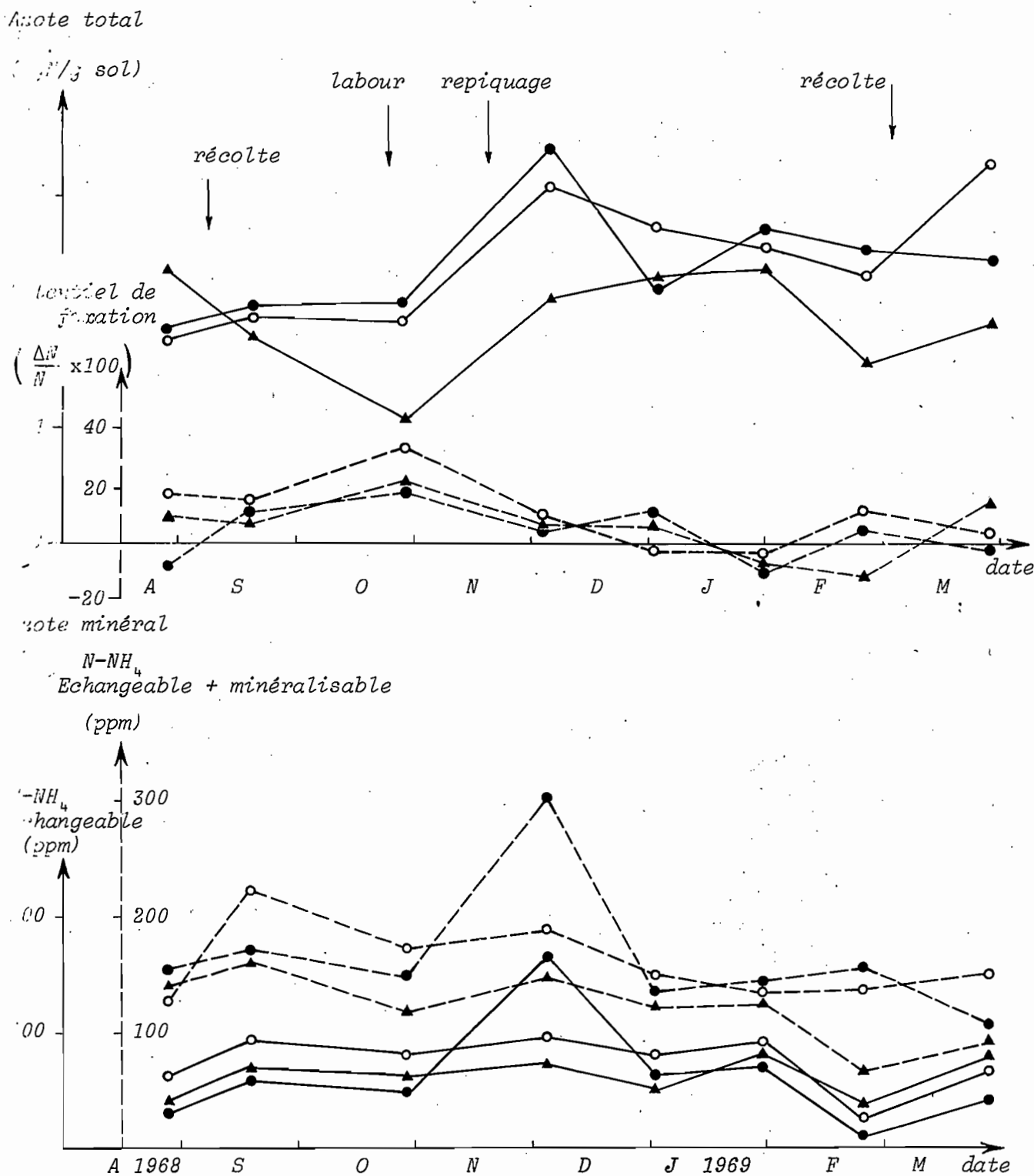


Fig. 11 - Variations saisonnières de l'azote total, du potentiel de fixation de l'azote ammoniacal échangeable et minéralisable.

- horizon 1 (0-5 cm)
- horizon 2 (5-20 cm)
- ▲—▲ horizon 3 (20-40 cm)

SOL DE YAMOUSSOKRO

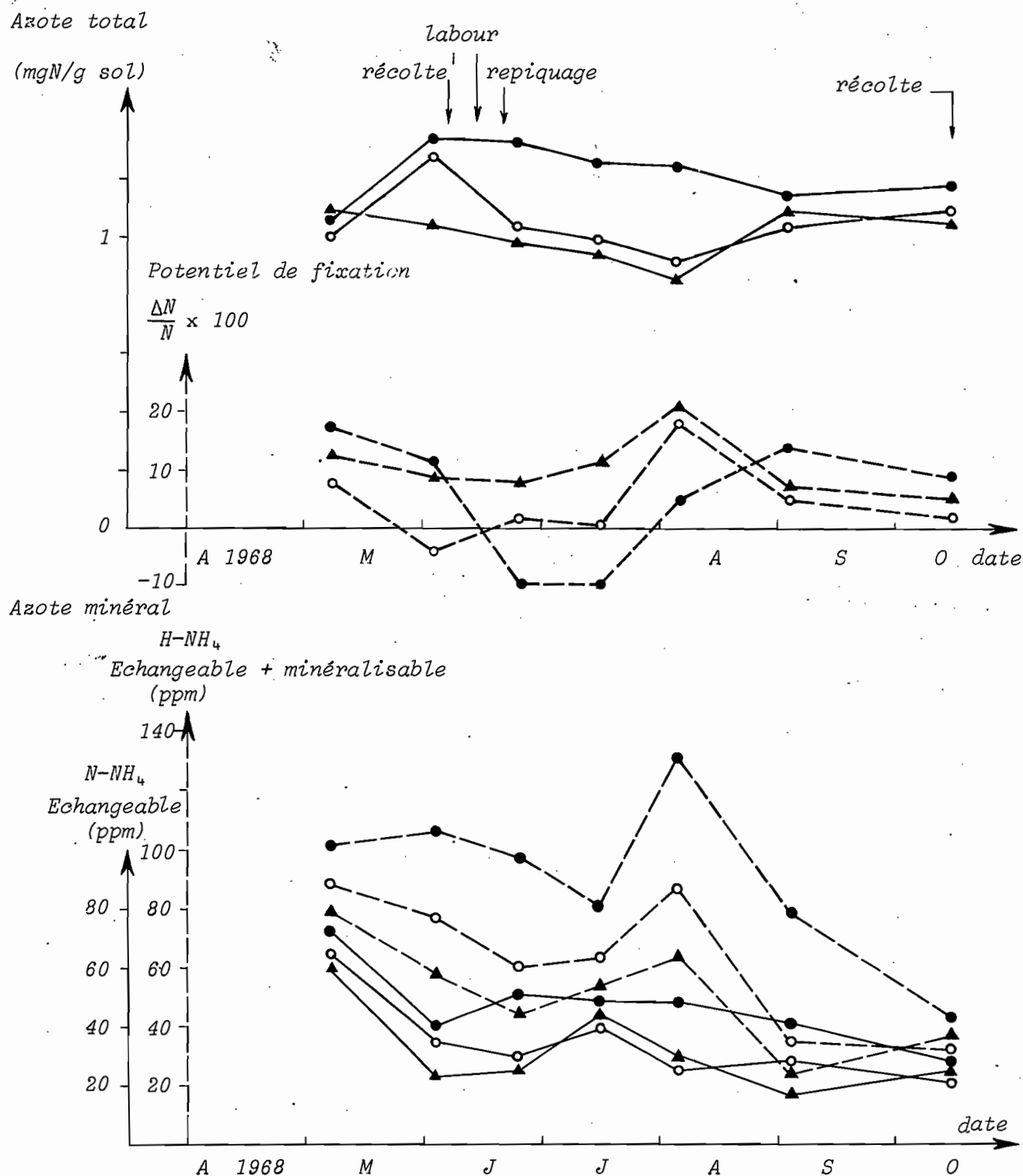


Fig. 12 - Variations saisonnières de l'azote total, du potentiel de fixation de l'azote ammoniacal échangeable et minéralisable.

- horizon 1 (0- 5 cm)
- horizon 2 (5-20 cm)
- ▲—▲ horizon 3 (20-40 cm)

- Variations de la teneur en azote total

(1) La teneur en azote des trois sols varie dans de grandes proportions et suivant un cycle rapide.

(2) La teneur en azote augmente en particulier dans la période qui suit le labour à Dabou, et Abengourou (fig. 10 et 11). Ces observations sont en accord avec les mesures d'activité déshydrogénasique correspondantes (fig. 7 et 8) et sembleraient confirmer l'effet positif de l'enfouissement des pailles sur l'activité fixatrice d'azote. On remarquera aussi une augmentation concomittente du nombre des bactéries fixatrices d'azote (fig. 13 & 14).

A Yamoussokro, par contre, on observe une augmentation de la teneur en azote dans la période qui précède le labour (fig. 12), puis celle-ci diminue progressivement. Ces variations sont difficilement explicables. Il est possible qu'elles soient liées à la situation particulière de la rizière. Celle-ci en effet se trouve sur granites et sa perméabilité est un peu forte pour une rizière. Il pourrait en résulter un lessivage excessif des glucides solubles, donc une perturbation de l'activité fixatrice. (Des observations du même ordre ont été faites en ce qui concerne l'activité déshydrogénasique à Yamoussokro).

- Variation de l'activité fixatrice potentielle

Au cours de ses études sur le phénomène de fixation d'azote dans les rizières de Camargue, Madame ROUQUEROL (1962, 1964, 1965) constata que les variations de la teneur en azote et de l'activité fixatrice potentielle présentaient des perturbations rapides dans le temps et de grande amplitude. L'auteur émit alors l'hypothèse selon laquelle les périodes d'activité fixatrice de la terre sont toujours fugaces, et sont accompagnées par des périodes de protéolyse au cours desquelles la matière organique est minéralisée (1964). Cette analyse portait sur un grand nombre de chiffres répartis sur une période de longue durée.

Nous avons fait des mesures similaires, mais sur un intervalle de temps plus réduit. Nos résultats s'accordent avec les observations de Madame ROUQUEROL :

(1) Les graphiques des variations du potentiel de fixation présentent des perturbations de grande amplitude.

(2) Dans l'ensemble, les variations de cette activité fixatrice potentielle sont opposées à celles de la richesse en azote total.

Ce phénomène est particulièrement net à Dabou et Abengourou, après la période de labour où l'on voit la richesse en azote total augmenter et l'activité fixatrice décroître. Pendant la période correspondante, on remarque à Yamoussokro des valeurs de potentiels de fixation fortement négatives, qui semblent confirmer que les anomalies que nous avons signalées plus haut pourraient bien être dues à une forte diminution de la concentration en substrats énergétiques.

(3) On enregistre parfois des enrichissements en azote très élevés (de 20 à 60 %) correspondant à des niveaux en azote total peu élevés. Ces valeurs obtenues sans apport de substrats énergétiques mettent bien en évidence l'importance de la fixation d'azote dans les sols de rizières et confirment l'efficacité de la synergie entre cellulolytiques et fixateurs d'azote.

Il peut paraître paradoxal que l'augmentation de la teneur en azote soit le plus souvent accompagnée d'une diminution de l'activité fixatrice potentielle. Ce phénomène semble logique, puisqu'il manifeste une tendance du sol à se maintenir ^{à un certain} équilibre en azote. Il est toutefois difficile à expliquer si ce n'est sous forme d'hypothèses. L'une d'elles consisterait à penser qu'une augmentation de la teneur en azote s'accompagne d'un épuisement relatif des substrats énergétiques responsables de cet enrichissement donc à une diminution de l'activité fixatrice potentielle.

- Numération des microflore fixatrices

Les numérations de germes ont été exprimées en logarithmes décimaux (fig. 13, 14 et 15). Les seuls microorganismes étudiés ont été Azotobacter et Beijerinckia (aérobies), Clostridium (anaérobies) et les Cyanophycées (photosynthétiques).

Beaucoup d'autres microorganismes sont aptes à fixer l'azote (cf. par ex. SCHREVEN, 1965 ; DOMMERGUES et MANGENOT, 1970). Toutefois, ceux-ci nous ont paru être représentatifs de la microflore fixatrice. Ils présentent en outre l'avantage de pouvoir être comptés par des techniques relativement faciles à mettre en oeuvre. Les numérations ne donnent qu'une idée de l'activité potentielle et non pas réelle des germes. Toutefois, les variations des chiffres ainsi obtenus sont susceptibles de nous donner des indications utiles.

. Fixateurs d'azote aérobies (Azotobacter et Beijerinckia)

Les premières observations que nous pouvons faire, concernant la répartition de ces microorganismes et leur tolérance vis à vis des conditions réductrices de la rizière.

Azotobacter et Beijerinckia ont été rencontrés à Dabou et Abengourou où leur nombre est le plus souvent inférieur à 2 000 germes par gramme de terre.

A Yamoussokro, par contre, on ne trouve pas Beijerinckia mais les numérations d'Azotobacter donnent des chiffres très élevés (150 000 à 300 000 par gramme de sol dans l'horizon de surface). Ces observations sont en accord avec ce que l'on sait de l'influence du pH sur ces deux germes (BECKING, 1959-1961 ; DOMMERGUES, 1963 ; HILGER, 1964 ; STRIJDOM, 1965). Il est bien connu en effet, que l'on rencontre Beijerinckia dans les sols de pH acide, Azotobacter dans les sols de pH neutre ou légèrement alcalin.

SOL DE DABOU.

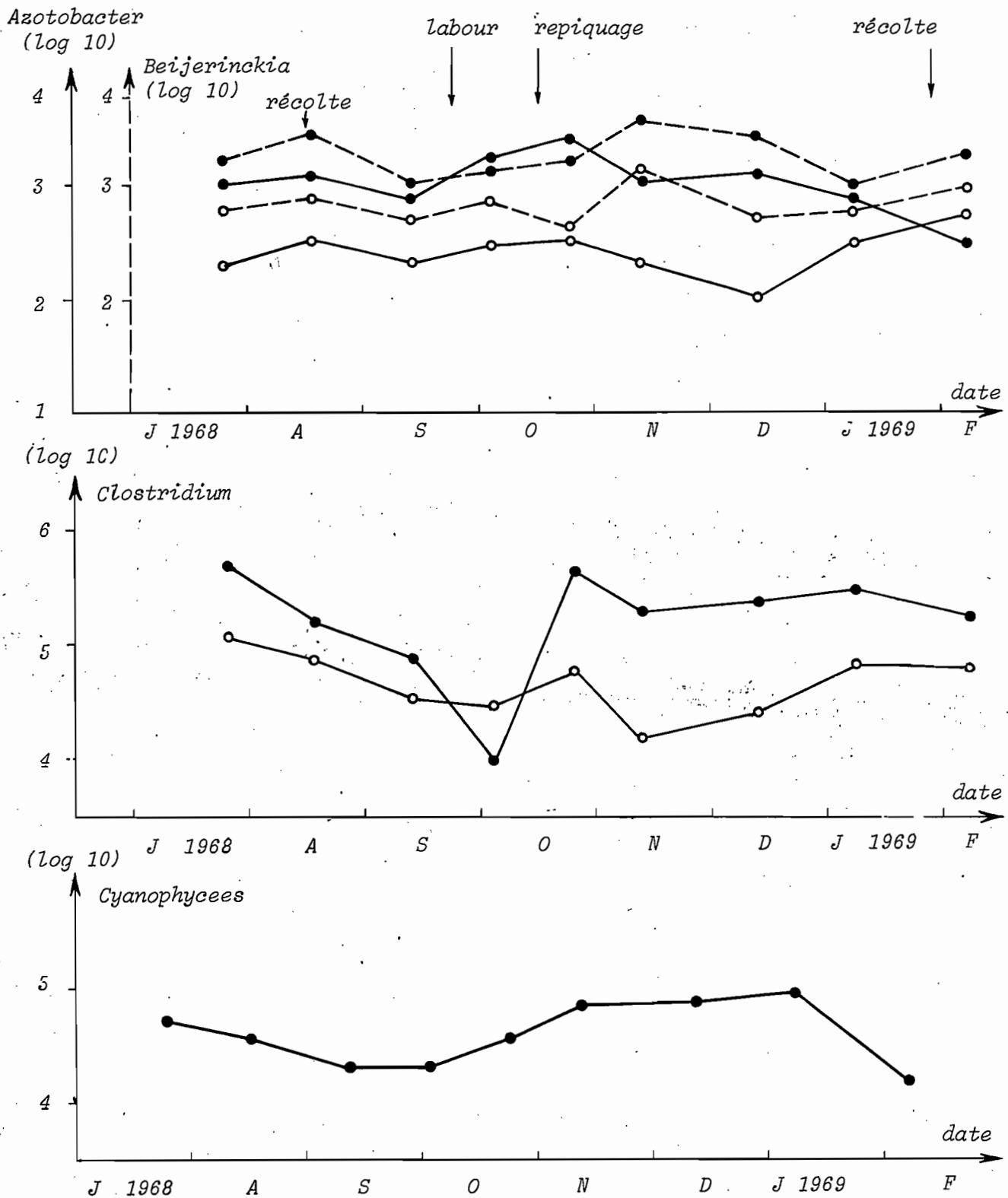


Fig. 13 - Variations saisonnières des microflore fixatrices d'azote.

- horizon 1 (0- 5 cm)
- horizon 2 (20-40 cm)

SOL D'ABENGOUROU

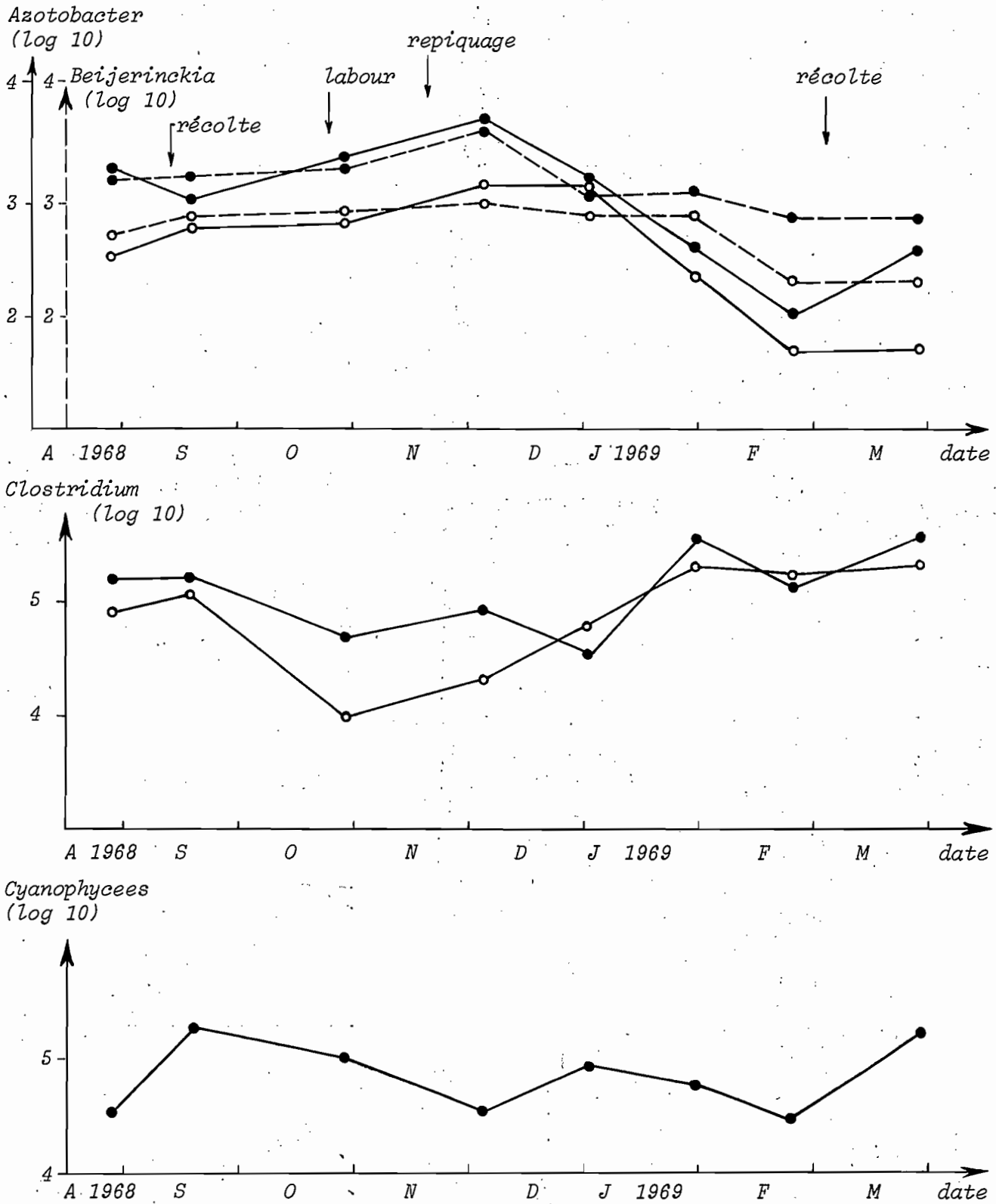
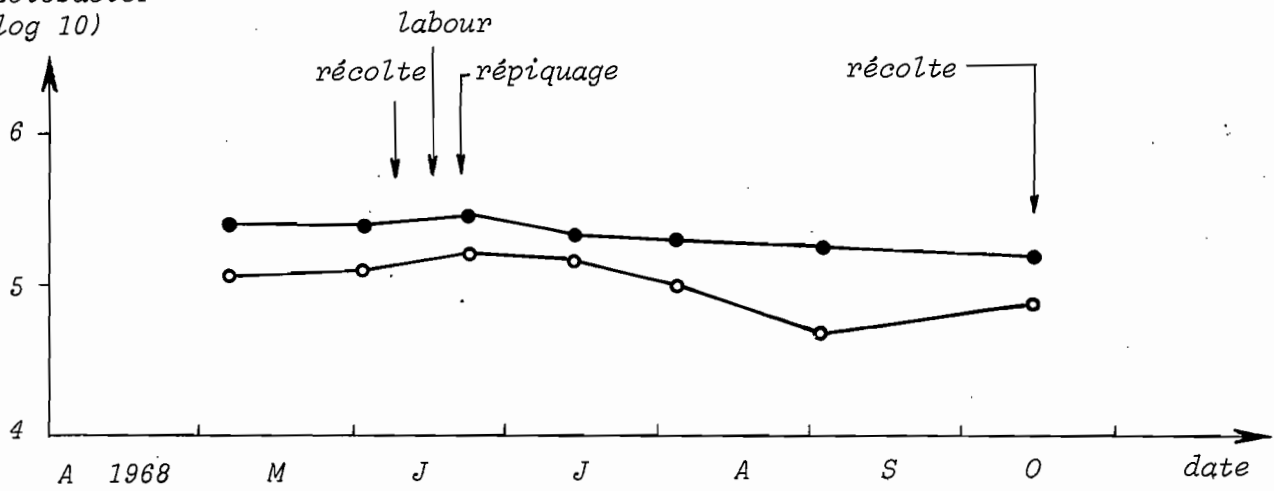


Fig. 14 - Variations saisonnières des microfiores fixatrices d'azote.

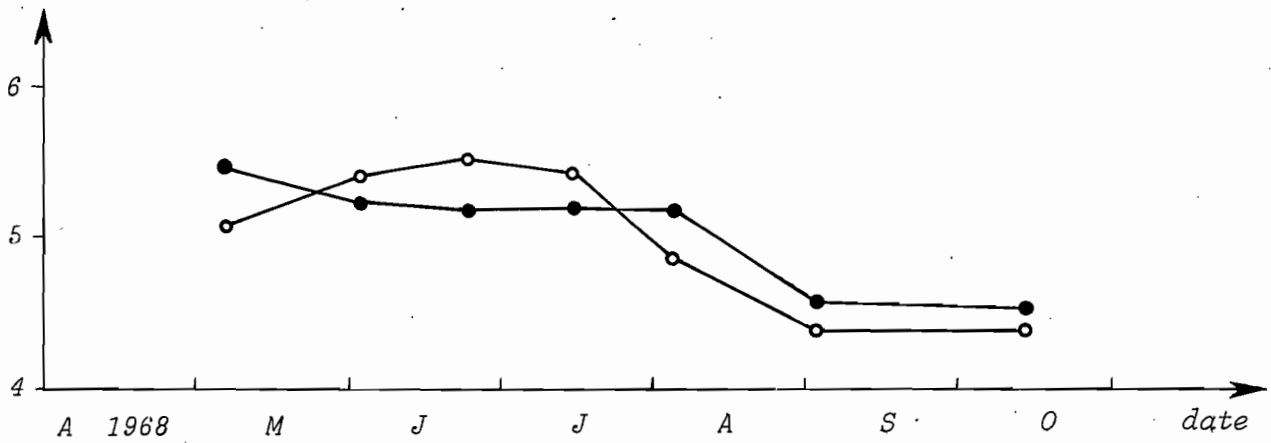
● — ● horizon 1 (0- 5 cm)
○ — ○ horizon 2 (5-20 cm)

SOL DE YAMOUSSOKRO

Azctobacter
(log 10)



Clostridium
(log 10)



Cyanophycees
(log 10)

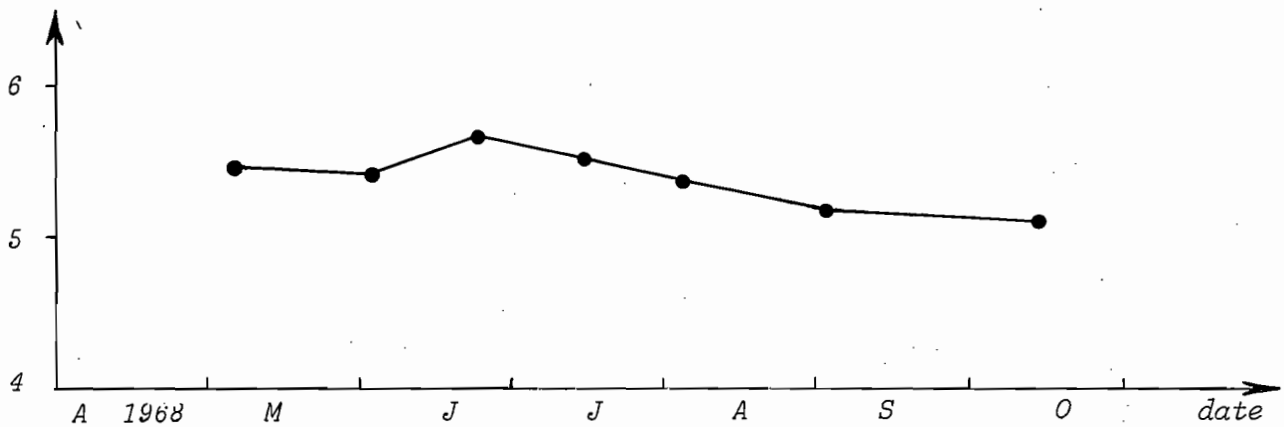


Fig. 15 - Variations saisonnières des microfiores fixatrices.

●—● horizon 1 (0- 5 cm)
○—○ horizon 2 (5-20 cm)

Le pH moyennement acide à Dabou et Abengourou limite donc l'activité d'Azotobacter. Il se développe par contre très bien à Yamoussokro, où le pH est plus proche de la neutralité.

BECKING indique que Beijerinckia s'accommode bien de pH neutres ou alcalins, mais que, dans ce cas, la compétition avec Azotobacter est à l'avantage de ce dernier. C'est précisément le cas à Yamoussokro.

On peut dire par ailleurs, qu'Azotobacter s'accommode très bien des conditions réductrices de la rizière quand le pH lui est favorable.

Beijerinckia par contre, paraît plus exigeant vis à vis de l'aération du milieu. Son rôle dans les sols de rizières y est pratiquement nul.

On observera aussi une augmentation du nombre de ces deux germes après le labour que l'on peut associer à la libération de substrats énergétiques à partir des pailles enfouies dans le sol.

Du point de vue qualitatif, la majeure partie des Beijerinckia isolés à Dabou et Abengourou sont des Beijerinckia indica (exceptionnellement Beijerinckia fluminensis).

Pour ce qui concerne Azotobacter, nous avons isolé à Dabou et Abengourou essentiellement Azotobacter beijerinckii, alors qu'à Yamoussokro, l'espèce dominante est Azotobacter chroococcum.

. Fixateurs d'azote anaérobies (Clostridium)

Le rôle de Clostridium dans la fixation anaérobie est suffisamment connu pour que nous n'ayons pas à insister particulièrement à ce sujet. De fait, les numérations que nous avons effectuées sont significatives : ce germe se trouve en grand nombre dans les trois sols étudiés. Comme pour les fixateurs aérobies, on observe une augmentation sensible de la densité en Clostridium après le labour.

. Cyanophycées fixatrices d'azote

Il est bien connu que les cyanophycées sont affectées par un pH trop acide et se développent bien dans les habitats modérément acides ou alcalins (SINGH, 1942 ; OKUDA et YAMAGUCHI, 1952).

L'effet du pH explique bien les densités en cyanophycées observées avec chacun des trois sols (Dabou : 10 000 à 90 000/g sol , ABENGOUROU : 30 000 à 190 000/g sol, Yamoussokro : 130 000 à 490 000/g sol).

. Conclusions

Les numérations de germes semblent indiquer que pour les trois sols, la fixation d'azote est essentiellement le fait des Clostridium et des Cyanophycées, les Azotobacter n'ayant un rôle appréciable qu'à Yamoussokro.

- Etude complémentaire : Influence du pH sur la distribution d'Azotobacter dans les trois sols étudiés

A. chroococcum est l'espèce dominante isolée à Yamoussokro. Cette espèce est pratiquement absente des sols de Dabou et Abengourou où l'on trouve essentiellement A. beijerinckii. Nous avons voulu vérifier si le pH de ces trois sols pouvait être à l'origine des différences observées.

Pour cela, nous avons fait des numérations d'Azotobacter sur boîtes de silicogel de pH 7,0 ou 5,5,ensemencées par des suspensions de chacun des trois sols. La préparation des boîtes à pH 7,0 a été décrite plus haut.

Pour obtenir des boîtes à pH 5,5, nous avons remplacé le carbonate de calcium par du chlorure de calcium apporté à la concentration de 0,5 g par litre du milieu final, et ajouté du tampon phosphate de pH 5,0 (concentration dans le milieu final : 5×10^{-3} M).

Sol	Nombre d' <i>Azotobacter</i> par boîte *	
	pH 7,0	pH 5,5
Dabou	180 (<i>A. beijerinckii</i> : 100 %)	184 (<i>A. beijerinckii</i> : 100 %)
Abengourou	36 (<i>A. chroococcum</i> : 10 %) (<i>A. beijerinckii</i> : 90 %)	34 (<i>A. beijerinckii</i> : 100 %)
Yamoussokro	66 (<i>A. chroococcum</i> : 65 %) (<i>A. beijerinckii</i> : 35 %)	23 (<i>A. beijerinckii</i> : 100 %)

(*) chaque chiffre est la moyenne de 10 répétitions).

Les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessus nous permettent de faire les observations suivantes :

- *A. chroococcum* se développe à pH 7,0 mais pas à pH 5,5.
- *A. beijerinckii* par contre, est moins exigeant vis à vis du pH et se développe encore à pH 5,5.

Par ailleurs, des expériences de croissance sur milieux liquides de pH différents nous ont montré qu'*A. chroococcum* ne se développe bien que sur des milieux dont le pH est compris entre 6,5 et 7,5. Sa croissance est nulle aux pH inférieurs à 6,0.

A. beijerinckii, par contre, s'il se développe bien à pH neutre montre une croissance encore notable à pH 5,5.

Le pH du sol semble donc être le facteur essentiel responsable de la distribution d'*Azotobacter*.

Quand le pH du sol est neutre (Yamoussokro) les conditions écologiques de la rizière sont très favorables au développement d'Azotobacter. Les densités sont alors très élevées (de l'ordre de 10^5 par g de sol) et l'espèce dominante est A. chroococcum.

Aux pH plus acides (Dabou et Abengourou), les densités en Azotobacter sont plus réduites (de l'ordre de 10^3 par g de sol) et l'on trouve essentiellement A. beijerinckii, cette bactérie étant plus tolérante vis à vis des pH moyennement acides qu'A. chroococcum.

Remarque : Les chiffres mentionnés dans le tableau ci-dessus pourraient laisser croire que les densités en Azotobacter sont les plus fortes à Dabou.

En fait, l'ensemencement des boîtes a été fait par 40 mg de terre pour Dabou et Abengourou, et 1 mg de terre pour Yamoussokro.

§ - Azote minéral et azote minéralisable

Remarques préalables

- 1) Pour les trois sols étudiés la presque totalité de l'azote minéral se trouve sous forme ammoniacale. Nous n'avons pas porté sur les graphiques les concentrations en nitrates qui sont très faibles (de 2 à 6 ppm).
- 2) Dans les conditions réductrices de la rizière, l'azote ammoniacal semble s'accumuler. De fait, une partie importante est adsorbée sur les colloïdes du sol, ou même fixée irréversiblement par la matière organique. Mais l'azote ammoniacal est aussi assimilé par les microorganismes et les plantes, ou perdu par suite des phénomènes de lessivage et de volatilisation dans l'atmosphère. De même, les nitrates peuvent être assimilés par les microorganismes et les plantes ou perdus par lessivage et dénitrification. Il est donc évident que les dosages d'azote minéral que nous faisons ne sauraient tenir compte de la complexité des processus que nous venons de décrire très sommairement. Ils ne permettent qu'une estimation de la minéralisation nette.

- Variations au cours du cycle de culture

L'analyse des résultats obtenus (fig. 10, 11 et 12) nous permet de faire les observations suivantes :

(1) Les concentrations en azote ammoniacal et en azote minéralisable dans les trois sols, sont fortes. On trouve respectivement à Dabou, Abengourou et Yamoussokro les valeurs moyennes suivantes :

100, 60 et 40 ppm pour l'azote ammoniacal,

200, 150 et 80 ppm pour l'azote minéral et minéralisable.

(2) On observe un certain parallélisme entre l'évolution de l'azote minéral et celle de la teneur en azote total à Dabou et Abengourou.

Il n'en va pas de même à Yamoussokro dans la période qui précède le labour, mais nous avons déjà remarqué que les autres paramètres mesurés présentaient aussi des variations anormales. Il semble donc que la concentration en azote ammoniacal soit fonction de la teneur en azote total. Autrement dit, le taux de minéralisation de l'azote est relativement stable.

(3) Compte tenu des concentrations élevées en azote ammoniacal, il est probable que celles-ci exercent une action inhibitrice sur la fixation d'azote, ce qui expliquerait la corrélation négative observée entre la teneur en azote total et l'activité fixatrice potentielle.

- Variations avec la profondeur

Les concentrations en azote minéral et en azote minéralisable sont plus fortes dans l'horizon I (0 à 5 cm) que dans les horizons plus profonds à Dabou et Yamoussokro. A Abengourou par contre, les concentrations les plus fortes se trouvent dans les horizons profonds (les valeurs particulièrement fortes observées en surface pour les prélèvements de décembre 1968 s'expliquent par un apport d' engrais récent).

Quand les valeurs les plus fortes sont obtenues en surface, elles reflètent simplement une activité biologique particulièrement intense. La microflore ammonifiante étant composée de la majeure partie de la microflore totale, la production d'azote ammoniacal est rapide. Les conditions sont suffisamment réductrices pour que l'oxydation de l'ammoniac en nitrate soit négligeable.

A Abengourou, par contre, où les possibilités d'irrigation sont limitées, la minéralisation de l'azote peut se poursuivre jusqu'au stade nitrate (tout au moins en surface et dans des proportions plus importantes que pour les deux autres sols). Le nitrate toutefois ne s'accumule pas. Une partie est utilisée par les microorganismes ou le riz, l'autre est perdue par lessivage ou dénitrification.

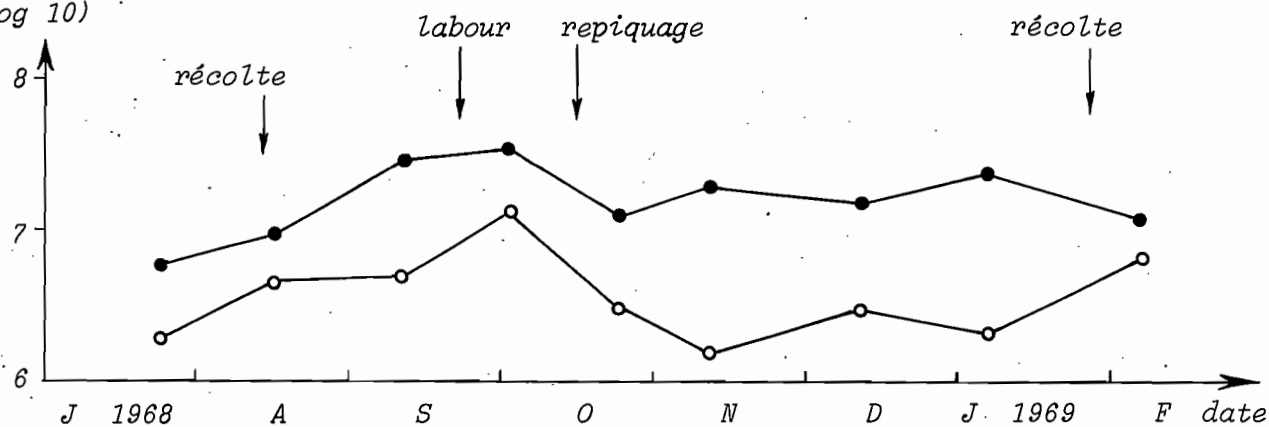
- Numération des ammonificateurs et des bactéries nitreuses

Dans les trois sols, la microflore ammonifiante est très nombreuse : les densités observées s'élèvent parfois à plusieurs dizaines de millions de germes par gramme de terre (fig. I6, I7 et I8).

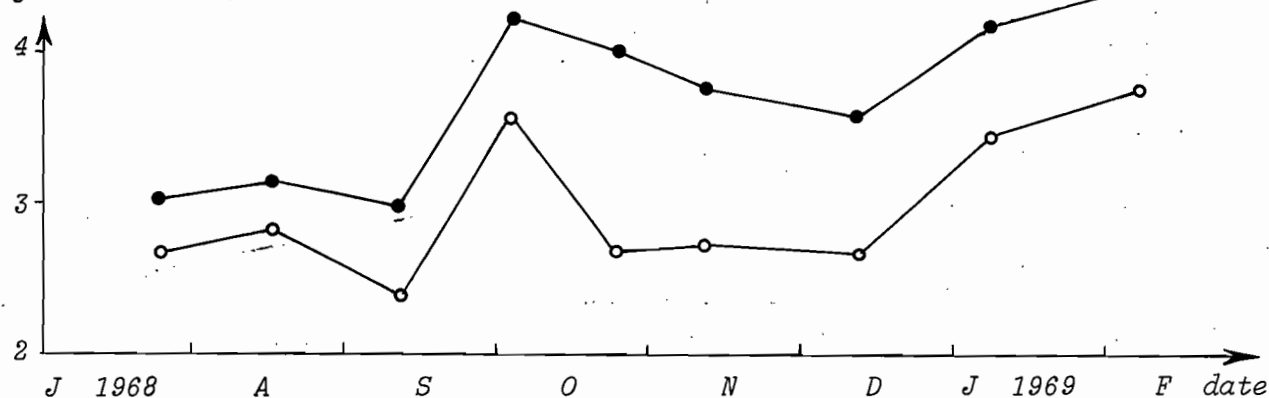
Ces chiffres ne sont pas particulièrement surprenants, car

SOL DE DABOU

Ammonificateurs
(log 10)



Bactéries nitreuses
(log 10)



Dénitrificateurs
(log 10)

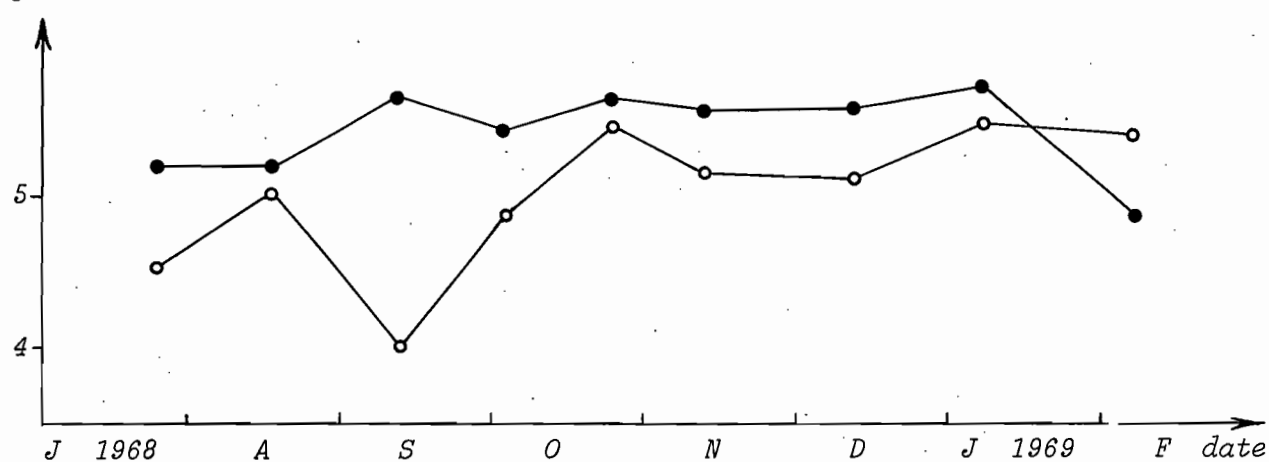


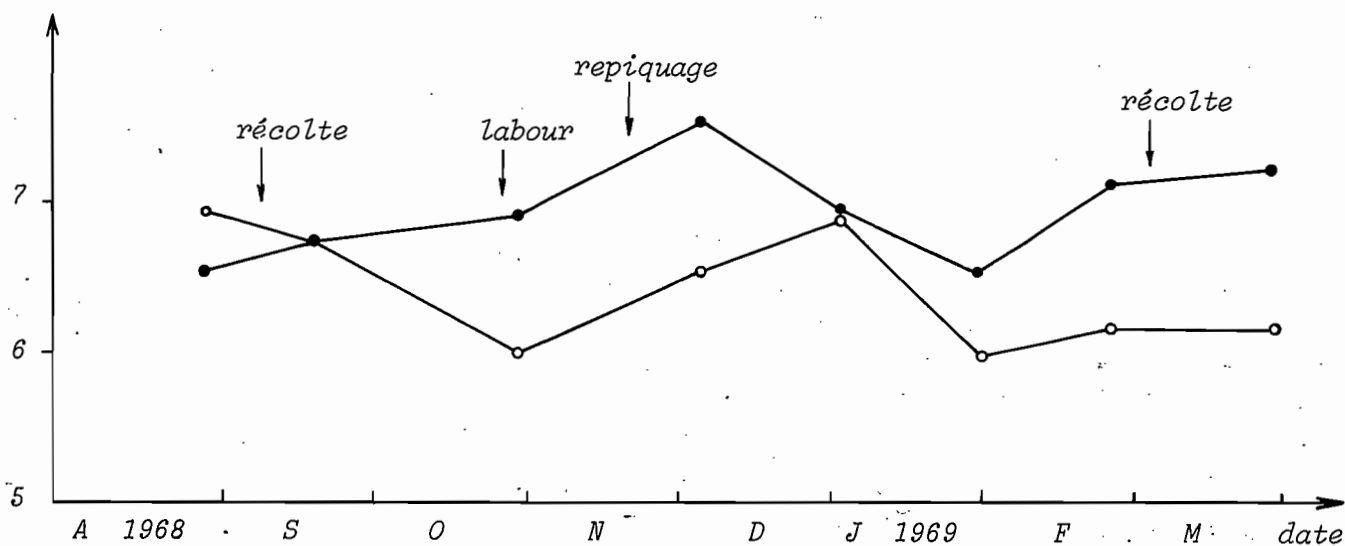
Fig. 16 - Variations saisonnières des microflores responsables de l'ammonification, de la nitrification et de la dénitrification.

●—● horizon 1 (0- 5 cm)

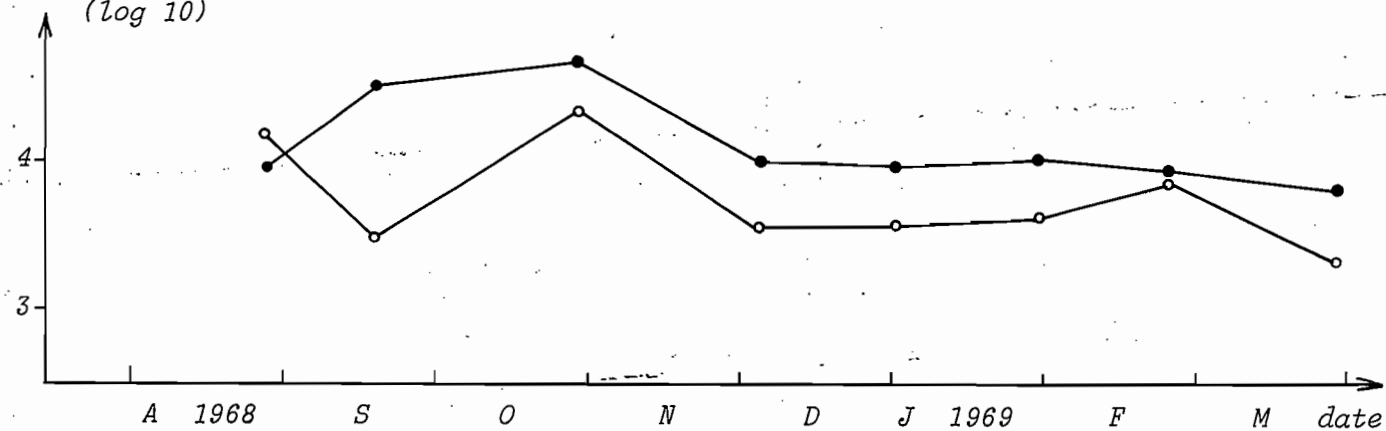
○—○ horizon 2 (5-20 cm)

Ammonificateurs
(log 10)

SOL D'ABENGOUROU



Bactéries nitrifiantes
(log 10)



Dénitrificateurs
(log 10)

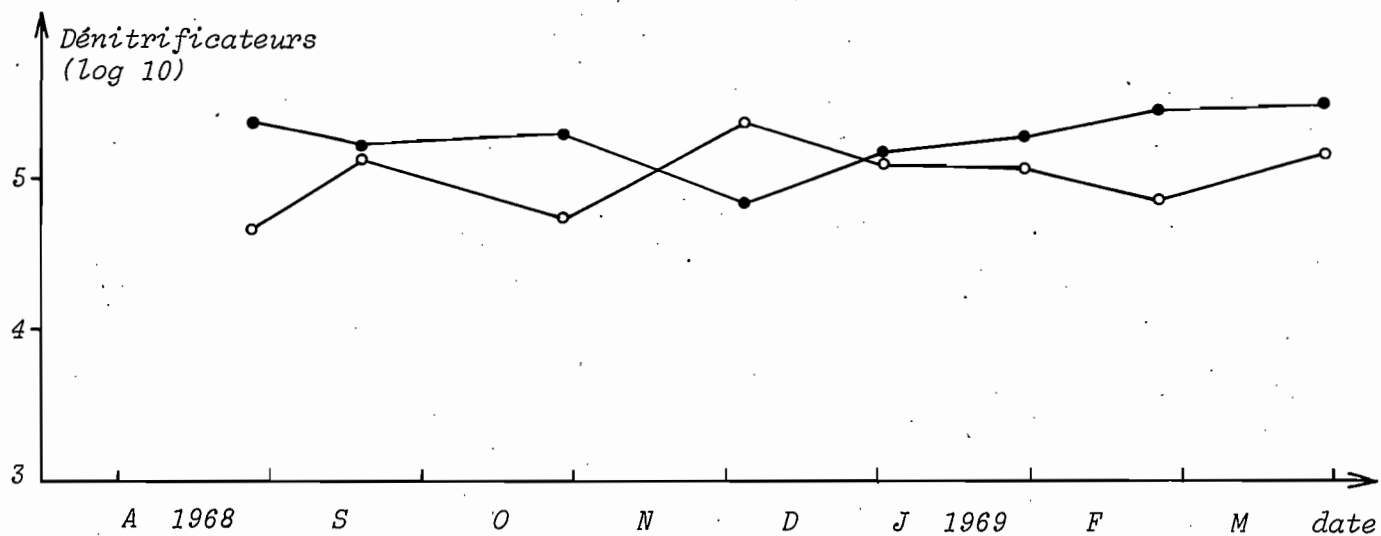


Fig. 17 - Variations saisonnières des microflore responsables de l'ammonification, de la nitrification et de la dénitrification.

—●— horizon 1 (0- 5 cm)
—○— horizon 2 (5-20 cm)

SOL DE YAMOUSSOKRO

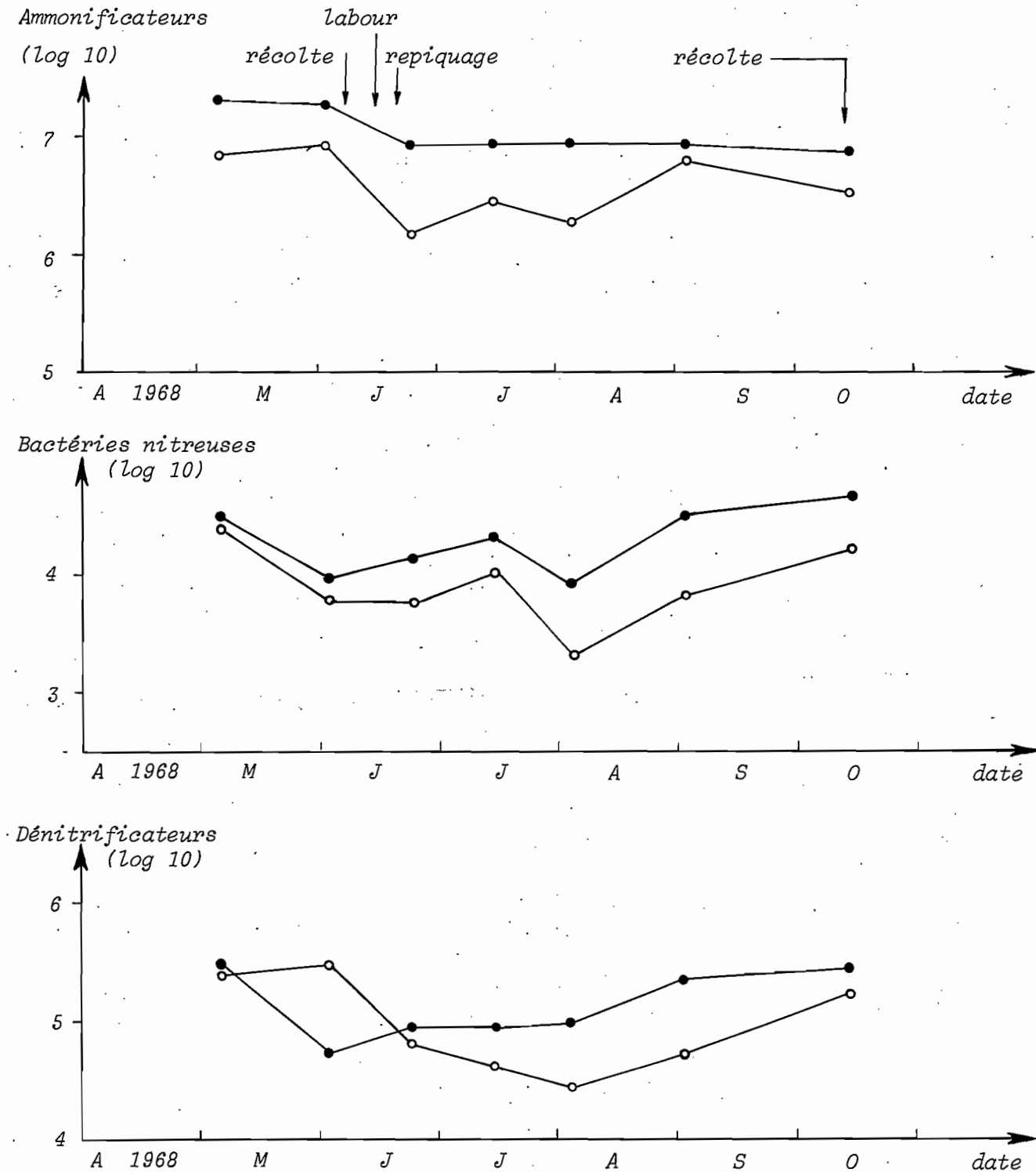


Fig. 18 - Variations saisonnières des microflore responsables de l'ammonification, de la nitrification et de la dénitrification.

●—● horizon 1 (0-5 cm)
○—○ horizon 2 (5-20 cm)

l'on sait que, d'une façon générale, l'ammonification est le fait d'un nombre considérable de microorganismes qui interviennent à un point ou à un autre des chaînes de dégradation et dans des conditions écologiques extrêmement variables d'une espèce à l'autre (cf. POCHON et DE BARJAC, 1958 ; DOMMERGUES et MANGENOT, 1970).

Par contre, les transformations qui conduisent à l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrites, puis nitrates, sont très spécifiques et les microorganismes responsables peu nombreux. Ainsi, Nitrosomonas et Nitrobacter sont autotrophes et aérobies stricts.

La nitrification est donc un phénomène aérobique qui ne devrait pas dans les conditions réductrices des sols de rizières, avoir un rôle important.

Si l'on considère nos résultats, nous remarquons que les chiffres obtenus varient dans l'ensemble de quelques milliers à 30 000 germes par gramme de sol, Il semble donc que ces bactéries soient capables de s'adapter aux basses tensions en oxygène de la rizière. Du reste, la concentration en nitrate est faible, mais non nulle.

Signalons à ce sujet que selon AMER et BARTHOLOMEW (1951) la nitrification est un phénomène aérobique, mais peut aussi avoir lieu à des tensions en oxygène assez basses.

γ - Dénitrification

DE BARJAC (1954) observa que la pouvoir dénitrifiant va de pair avec la fertilité apparente du sol, la microflore dénitrifiante pouvant être considérée comme constituante de la microflore totale normale. De fait, les chiffres obtenus avec les trois sols sont élevés puisque les densités sont de l'ordre de 10^5 (fig. 16, 17 et 18).

Précisons toutefois que la présence dans le sol d'un nombre même élevé de germes capables de réduire le nitrate n'implique pas une

dénitrification intense. Il faut pour cela au préalable d'une part une oxydation de l'ammoniac jusqu'au stade nitrate, donc une certaine quantité d'oxygène, des conditions réductrices d'autre part. Ces conditions sont bien sûr ^{incompatibles} au niveau d'un seul horizon. Mais il est possible que le nitrate produit à la surface des sols de rizières soit réduit après migration dans les horizons profonds.

L'intensité de la dénitrification est donc fonction de la quantité de nitrates produits.

Il ne semble pas que la nitrification dans nos sols soit importante, mais nous n'avons aucun moyen de le vérifier. Il faudrait pour cela utiliser les techniques isotopiques.

D. CONCLUSIONS D'ENSEMBLE

Nos observations peuvent être résumées ainsi :

1. L'enfouissement des pailles, suivi de la mise en eau est à l'origine d'une libération importante de substrats énergétiques.
2. La submersion a pour effet d'élever le pH des sols jusqu'à des valeurs relativement proches de la neutralité et d'induire l'établissement de conditions semi-réductrices. Elle favorise donc la fixation d'azote.
3. La libération de substrats énergétiques à partir des pailles s'accompagne d'une augmentation de la teneur en azote total des sols.
4. On observe parallèlement une augmentation de la concentration en azote ammoniacal, ce qui semble avoir pour effet de réduire l'activité fixatrice.

5. La concentration en azote ammoniacal dans les trois sols est particulièrement élevée. On peut se demander à ce propos si les quantités importantes d'engrais azotés qui sont apportées ne pourraient être sinon supprimées, du moins réduites (en particulier à Dabou où les concentrations en azote ammoniacal sont les plus fortes). En effet, outre le fait qu'elles paraissent excessives, elles contribuent sans doute à réduire l'activité fixatrice d'azote.

6. La fixation d'azote paraît être essentiellement le fait des Clostridium de des Cyanophycées. Les Azotobacter ne peuvent jouer un rôle appréciable qu'à Yamoussokro.

7. Les pertes d'azote par dénitrification dépendent de la concentration en nitrates. Celle-ci étant toujours faible, on peut penser que ces pertes sont peu importantes.

Ces observations mettent en évidence un certain nombre de facteurs susceptibles de conditionner l'évolution du stock d'azote des sols de rizières. Toutefois, à ce stade de nos recherches, il nous est difficile d'apporter des conclusions définitives, car ces facteurs peuvent induire une augmentation ou une diminution de la teneur en azote, et de plus, ils interviennent en même temps.

Ainsi, la submersion induit des modifications de pH et de potentiel d'oxydo-réduction favorables à la fixation d'azote, ainsi que la libération de substrats énergétiques.

En revanche, l'établissement de conditions réductrices favorise les pertes d'azote par dénitrification et provoque l'accumulation d'azote ammoniacal susceptible d'exercer sur la fixation d'azote un effet inhibiteur.

D'autre part, nous n'avons pas évalué la part des micro-organismes photosynthétiques dans l'enrichissement du sol en azote et nous ne savons rien de l'effet de l'exsudation racinaire.

Il est difficile aussi de conclure sur la fertilité comparée des trois types de rizières :

- du point de vue pédologique, Dabou est la rizière dont les caractéristiques chimiques sont les plus intéressantes, Abengourou la plus pauvre.
- du point de vue microflore fixatrice, la rizière de Yamoussokro paraît être la mieux pourvue en raison de son pH voisin de la neutralité, Dabou la moins favorable.
- Enfin, si l'on utilisait comme les Japonais l'azote minéralisable comme indice de fertilité, les trois rizières se classeraient dans l'ordre suivant : Dabou, Abengourou et Yamoussokro.

L'intérêt majeur de ces mesures effectuées in situ est de poser un certain nombre de problèmes précis. Mais il faut bien reconnaître qu'elles ne sauraient à elles seules les résoudre. Tout au plus, nous donnent-elles des éléments de réponses. Il apparaît donc souhaitable de compléter ces observations par des études au laboratoire.

Chapitre III

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FIXATION NETTE D'AZOTE DANS DES SOLS OU DES MODELES SANS PLANTE

Dans le sol, les différentes transformations de l'azote se déroulent simultanément. Lorsqu'il s'agit de processus agissant en sens contraire, cette simultanéité fait que les dosages chimiques permettent seulement d'apprécier l'effet net de ces processus.

En particulier, fixation d'azote et dénitrification sont susceptibles d'agir simultanément. On ne peut donc mesurer par analyse d'azote total que l'augmentation nette en azote résultant de ces deux phénomènes. On parle alors de fixation nette.

A. METHODES D'ETUDE

L'analyse des résultats de l'étude in situ nous ayant montré que l'activité fixatrice des sols de rizières dépend étroitement de certains facteurs, nous avons essayé d'apprécier l'importance relative de ces facteurs.

Pour cela, nous avons utilisé une technique simple consistant à placer au laboratoire un échantillon de sol dans des conditions relativement proches des conditions de terrain (sauf en ce qui concerne les apports énergétiques par les exsudats et le phénomène d'absorption de l'azote ammoniacal par la plante), et à déterminer les variations de la teneur en azote total de cet échantillon pendant un intervalle de temps assez long.

Nous avons d'autre part, utilisé des modèles simplifiés constitués par des suspensions de sol, suivant la technique déjà décrite de mesure de l'activité potentielle de fixation.

Pour chacune des trois rizières, les essais ont été faits sur du sol prélevé quelques jours plus tôt dans l'horizon de surface, séché modérément jusqu'à une humidité légèrement inférieure à la capacité au champ, et passé à travers un tamis de 2 mm.

1 - Fixation d'azote par des sols placés dans des conditions écologiques déterminées

Les essais ont été faits sur des échantillons de sols placés dans des béciers de 50 ml à raison de 20 g de sol sec par bécier (plus précisément l'équivalent de ce poids en sol humide), et soumis à des conditions variables suivant le facteur dont on a voulu apprécier le rôle.

Nous avons soumis le sol à des conditions d'humidité différentes (capacité au champ ou submersion, hygropériodisme), avec ou sans apport de substrat énergétique (glucose, pailles ou racines) ou d'azote ammoniacal.

Tous les béciers ont été incubés 28 jours à l'étuve à 28° C, à l'obscurité ou à la lumière.

Afin de maintenir constante l'humidité du sol pendant toute la durée de l'incubation, les béciers ont été recouverts d'une plaque de verre pour limiter l'évaporation, et pesés tous les 3 ou 4 jours pour apporter la quantité d'eau distillée nécessaire.

Chaque traitement a été fait avec quatre répétitions. Chaque bécier a donné lieu à trois dosages d'azote (soit au total 12 analyses d'azote par traitement).

Les dosages d'azote ont été faits comme suit :

- la totalité du sol contenu dans un bécier est transférée dans un erlen de 1 litre et portée à 500 ml avec de l'eau distillée ;
- après dispersion du sol par 15 mn d'agitation sur agitateur magnétique, on porte 5 ml de suspension en fiole de Kjeldahl (soit 0,2 g de sol sec par fiole) ;
- la suite des opérations (minéralisation et distillation) est alors celle que nous avons décrite en détail plus haut.

Remarque : Avant d'apprécier l'effet de tel ou tel facteur sur la fixation d'azote, il nous a paru utile de mesurer dans les mêmes conditions le pH et le rH de sols portés à une humidité correspondant à la capacité au champ ou soumis à la submersion.

Nous avons pour cela utilisé le matériel PONSELLE déjà employé in situ en remplaçant simplement les électrodes-cannes, par des électrodes classiques.

Les mesures, au nombre de 7, ont été faites à divers intervalles de temps (de 0 à 40 j d'incubation), à raison de 4 répétitions par mesure, chaque b cher ne servant qu'une fois (soit 28 b chers pour un sol).

Les facteurs dont nous avons voulu apprécier l'effet sur la fixation d'azote sont les suivants :

a) Submersion-lumière

Nous avons combiné deux traitements d'humidité (capacité au champ et submersion)   deux traitements d'éclairement (obscurité et 3 000 lux), soit 4 traitements différents.

L'éclairement a été obtenu en disposant 4 lampes au n on Mazda "Lumière du jour" au dessus d'une étuve Jouan (Bel) placée verticalement et sur laquelle nous avons remplacé la porte par une plaque de verre.

Les b chers ont été placés dans l'étuve à une distance telle qu'ils recevaient une intensité lumineuse de 3 000 lux (25 cm environ).

b) Hygropériodisme

Les sols ont été soumis à la submersion, puis placés dans une étuve ventilée. Leur assèchement durait 7 jours après quoi ils étaient à nouveau soumis à la submersion.

Ils ont été ainsi soumis à 4 cycles successifs de submersion-exondation.

Afin d'obtenir une évaporation régulière, nous avons simplement placé sur les béciers une feuille de papier filtre percée de trous.

c) Apport de substrats énergétiques et d'azote ammoniacal

Les sols ont été placés dans des conditions de submersion. 3 apports de substrat énergétique (0,5 % de glucose ou 1 % de pailles ou racines) ont été combinés à 3 concentrations d'azote ammoniacal (0, 100 et 200 ppm), soit 12 traitements différents, compte tenu des traitements sans apport de substrat énergétique.

Les concentrations en substrat énergétique ou azote sont exprimées par rapport au poids de sol.sec.

- . Apport de glucose : 1 ml d'une solution à 10g/100 ml par bécier
- . Apport de pailles ou racines : 0,2 g par bécier
- . Apport d'azote ammoniacal : 1 ml d'une solution à 0,944 g de sulfate d'ammoniac/100 ml par bécier (soit 100 ppm N-NH₄)
(2 ml de cette solution donnent 200 ppm N-NH₄).

Remarques :

1. Les pailles et racines ont été séchées à l'air puis finement broyées dans un mixer avant d'être mélangées au sol. Elles ont été dosées pour leur teneur en azote total afin de déterminer la quantité totale en azote par bécier au début de l'incubation (ces dosages ont été faits en plaçant 30 mg de broyat par fiole de Kjeldahl).
2. Parallèlement aux dosages sur les pailles et racines, nous avons dosé l'azote de la solution à 0,944 g de sulfate d'ammoniac : nous n'avons pas observé de différence significative avec sa concentration théorique en azote.

2 - Fixation d'azote par des suspensions de sol

La technique utilisée est celle de la mesure de l'activité potentielle de fixation déjà décrite (5 g de sol dispersés dans 200 ml d'eau distillée).

Afin d'apprécier la qualité de cette technique, nous avons apporté à la suspension de sol différentes concentrations de glucose et d'azote ammoniacal.

Nous pourrions ainsi comparer les résultats obtenus par cette technique à ceux obtenus par la technique décrite ci-dessus.

3 concentrations de glucose (0 ; 0,5 et 1 %) ont été combinées à 3 concentrations d'azote ammoniacal (0 ; 10 et 20 ppm), soit 9 traitements différents.

Les dosages d'azote ont été faits après 7 jours d'incubation à 28° C (5 ml de suspension par fiole de Kjeldahl, soit 0,125 g de sol sec par fiole). Les concentrations en glucose et azote ammoniacal sont exprimées par rapport au volume total de la suspension de sol.

- . Apport de glucose : 1 ml d'une solution à 10 g/100 ml par erlen (soit 0,5 % de glucose pour 200 ml de suspension de sol) ; (2 ml de cette solution donnent 1 % de glucose pour 200 ml).
- . Apport d'azote ammoniacal : 1 ml d'une solution à 0,944 g de sulfate d'ammoniaque/100 ml par erlen (soit 10 ppm N-NH₄) (2 ml de cette solution donnent 20 ppm N-NH₄).

B. RESULTATS - APPRECIATION DU ROLE DE CERTAINS FACTEURS ECOLOGIQUES SUR LA FIXATION D'AZOTE

Les résultats obtenus ont été mentionnés dans les tableaux 5 (submersion lumière), 6 (hydropériodisme), 7 (apports de substrats énergétiques et d'azote ammoniacal à des sols).

Sur les figures 20, 21 et 22, nous avons porté l'augmentation ou la diminution de la teneur en azote total pour chaque traitement (exprimée en mg d'azote par g de sol).

Remarque : La pH et le potentiel d'oxydo-réduction conditionnent directement l'activité fixatrice d'azote.

La figure 19 met bien en évidence les variations du pH et du rH dans des sols placés à une humidité correspondant à la capacité au champ ou dans des conditions de submersion. Celles-ci peuvent être résumées dans le tableau ci-dessous :

	pH		rH	
	Capacité au champ	Submersion	Capacité au champ	Submersion
Sol de Dabou	4,7	6,3	29	12
Sol d'Abengourou	4,8	6,6	28	13
Sol de Yamoussokro	5,1	6,9	28	13

L'analyse de ces chiffres et des graphiques nous permet de faire les observations suivantes :

- 1 - La submersion a pour effet de porter le pH des sols à une valeur relativement proche de la neutralité. Cette augmentation de pH est très rapide dans les sols d'Abengourou et Yamoussokro, plus lente à Dabou.
- 2 - Parallèlement à l'augmentation du pH, le rH tombe très rapidement dans les trois sols.
- 3 - L'incubation n'induit pas de modifications sensibles du pH et du rH des sols, quand ceux-ci sont portés à une humidité correspondant à la capacité au champ.

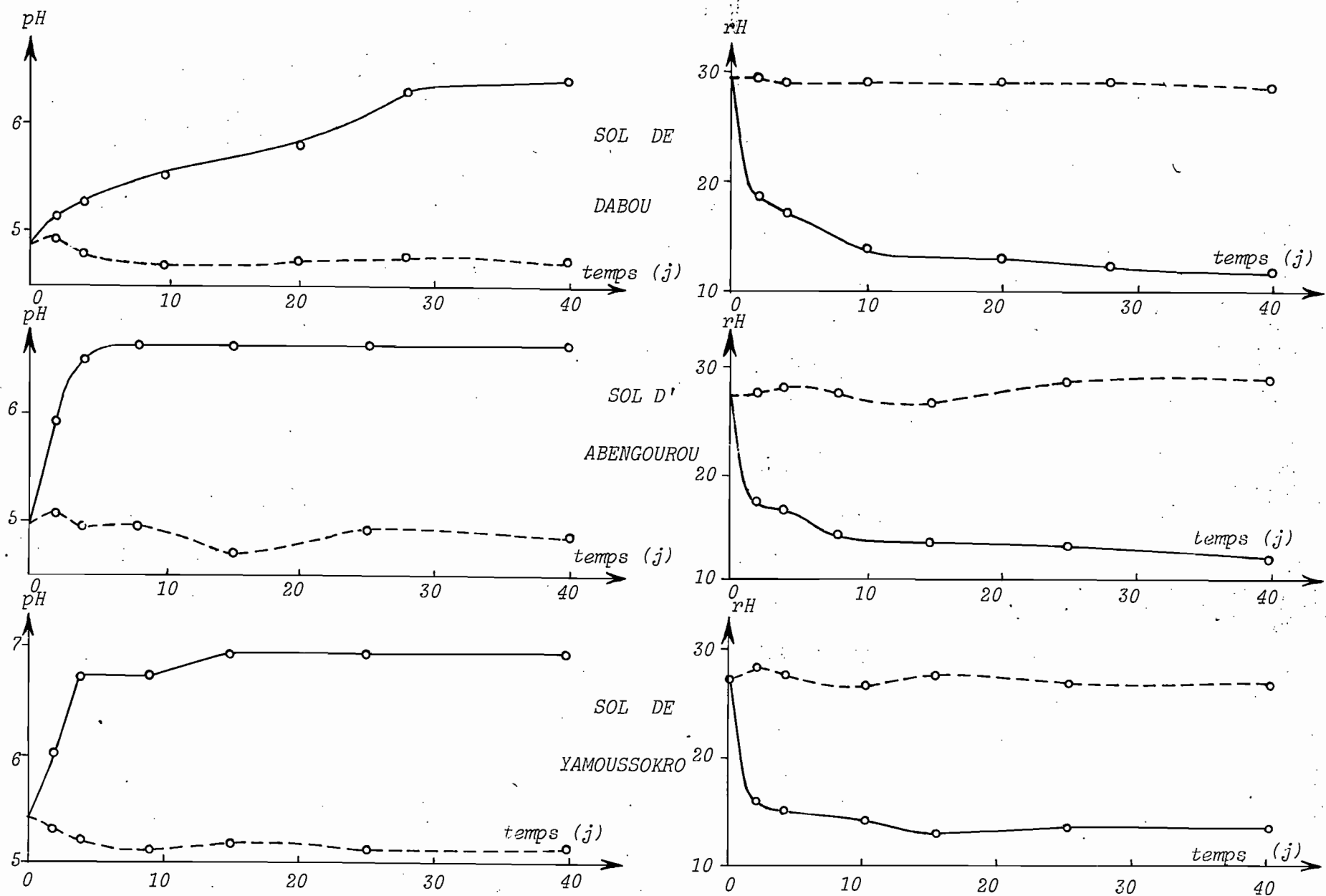


Fig. 19 - Variations en fonction du temps du pH et du potentiel d'oxydo-réduction dans des sols submergés ou maintenus à la capacité au champ.

○—○ submersion
 ○- - ○ capacité au champ

4 - L'augmentation du pH des sols sous l'effet de la submersion est, par rapport aux sols dont l'humidité correspond à la capacité au champ, de 1,6 unité pH pour le sol de Dabou, 1,8 unité pH pour les sols d'Abengourou et Yamoussokro. Parallèlement, la chute du rH est de 17 unités rH pour le sol de Dabou, 15 unités rH pour les deux autres sols.

5 - Nous pouvons considérer que les valeurs portées dans le tableau ci-dessus sont des valeurs limites entre lesquelles le pH et le rH des trois sols peuvent varier. Nous remarquons que les mesures effectuées in situ sont comprises entre ces différentes limites, ce qui justifie la validité de cette étude de laboratoire.

Nous ne reviendrons pas sur les causes qui peuvent expliquer ces variations.

Nous remarquerons simplement l'amplitude de ces variations et la rapidité avec laquelle elles se manifestent dans le temps.

Nous dirons pour conclure, que la submersion des sols favorise incontestablement la fixation d'azote en portant leur pH à des valeurs relativement proches de la neutralité en induisant des conditions semi-anaérobies.

Examinons maintenant l'effet des facteurs écologiques dont nous avons voulu apprécier le rôle sur l'activité fixatrice des sols.

1 - Submersion - lumière :

Nous avons porté dans le tableau 5 les teneurs en azote initiales et les teneurs correspondantes en fin d'incubation, ainsi que les gains observés sous l'effet des différents traitements. Pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus, n'ont été mentionnés sous forme de schéma (fig. 20) que les gains en azote.

Tableau 5 - INFLUENCE DE LA SUBMERSION ET DE L'ECLAIREMENT SUR L'AUGMENTATION DE LA TENEUR EN AZOTE DU SOL.

	Teneur en azote (mg N/g sol)	Teneur en azote après 28 jours							
		C O *		C L *		S O *		S L *	
		mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN
Sol de Dabou	3,020	3,050	+ 0,030	3,080	+ 0,060	3,115	+ 0,095	3,170	+ 0,150
Sol d'Abengourou	2,685	2,705	+ 0,020	2,730	+ 0,045	2,730	+ 0,045	2,810	+ 0,125
Sol de Yamoussokro	1,410	1,465	+ 0,055	1,535	+ 0,125	1,490	+ 0,080	1,550	+ 0,140

- * Conditions d'incubation :
- C O : capacité au champ - obscurité
 - C L : capacité au champ - lumière
 - S O : submersion - obscurité
 - S L : submersion - lumière.

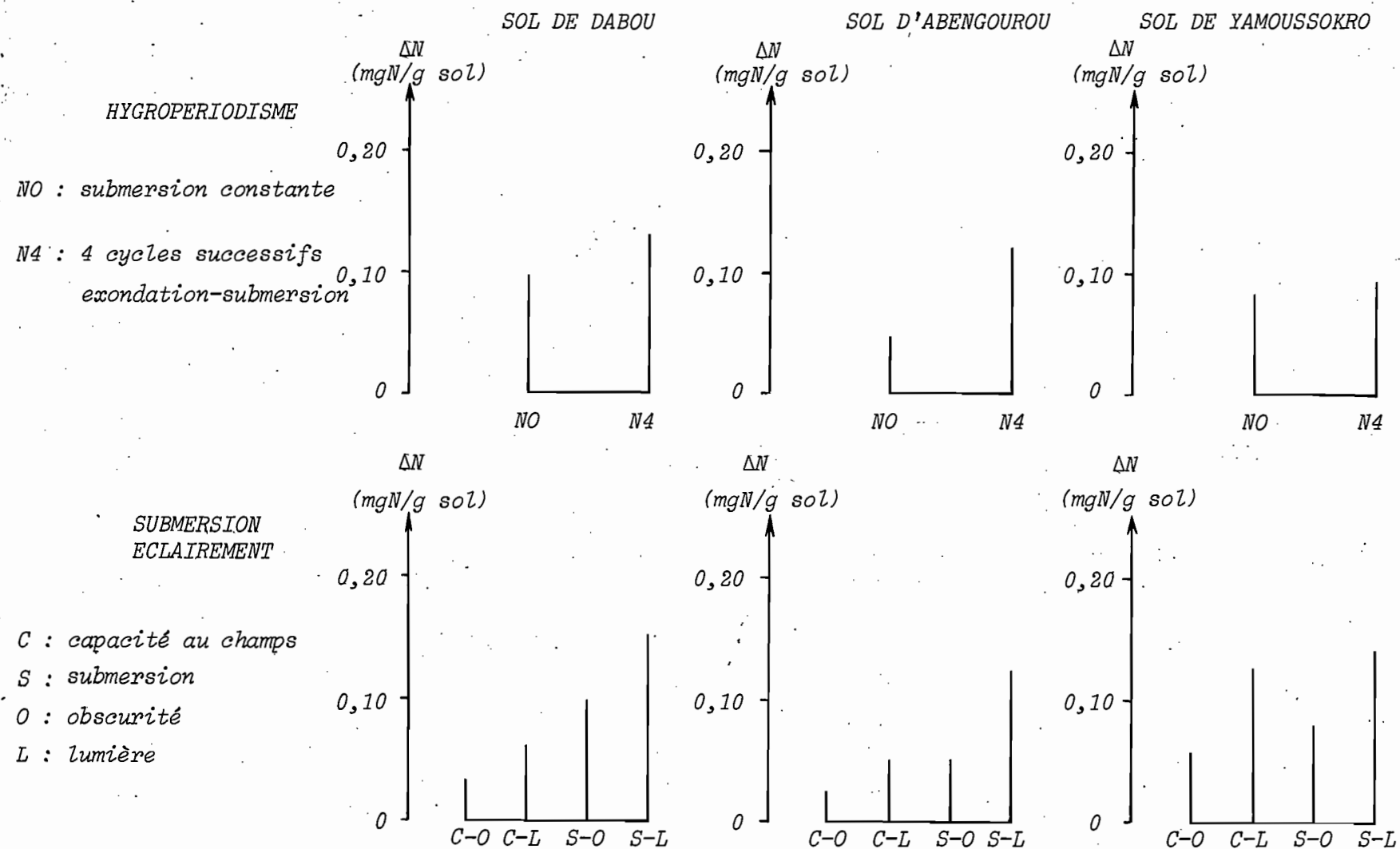


Fig. 20 - Variations de la teneur en azote total dans des sols sous l'effet de l'hydropériodisme, de la submersion et de l'éclairement.

Ces résultats mettent en évidence les faits suivants :

1°) Le traitement le moins favorable à la fixation d'azote est celui qui consiste à placer les sols à l'obscurité et à une humidité correspondant à la capacité au champ.

2°) Les gains en azote les plus considérables sont obtenus avec des sols soumis à la submersion et placés à la lumière. Dans ce cas, la fixation nette d'azote la plus importante est observée avec le sol de Dabou.

3°) Il semble pour le sol de Dabou, que la submersion stimule davantage l'activité fixatrice que ne le fait la lumière (du moins dans les conditions d'incubation présentes). L'explication peut en être le rôle majeur des fixateurs anaérobies (*Clostridium*) dans des conditions de submersion en présence d'une teneur vraisemblablement élevée en composés énergétiques, et un pH trop acide (4,7) pour les microorganismes photosynthétiques (cyanophycées et bactéries du cycle du soufre) quand le sol est bien aéré. Toutefois, quand les facteurs submersion et lumière sont associés, les microorganismes photosynthétiques deviennent très actifs en raison de l'élévation du pH.

4°) Dans le sol d'Abengourou, les gains observés sous l'effet de la lumière d'une part, de la submersion, d'autre part, sont identiques et relativement faibles par rapport au gain en azote obtenu avec le traitement le moins favorable à la fixation d'azote (capacité au champ - obscurité).

L'activité fixatrice n'est importante que dans la mesure où les facteurs lumière et submersion sont associés.

5°) Pour le sol de Yamoussokro enfin, il semble que la fixation d'azote soit essentiellement le fait des microorganismes photosynthétiques : l'enrichissement en azote est pratiquement aussi important avec le traitement capacité au champ - lumière que pour le traitement submersion-lumière. Le pH moins acide de ce sol explique sans doute que ces microorganismes aient pu avoir une activité fixatrice importante, même quand le sol est bien aéré.

2 - Hygropériodisme :

Les résultats des dosages d'azote sont mentionnés dans le tableau 6, comme précédemment nous avons représenté sous forme de schéma (fig. 20) les gains nets d'azote.

L'analyse des résultats obtenus permet les observations suivantes :

1°) Pour les trois sols, l'hygropériodisme provoque une augmentation de la teneur en azote plus forte que la submersion seule, en raison sans doute, d'une libération plus intense de substrats énergétiques à partir de la matière organique du sol.

2°) Toutefois, cette différence observée entre les deux traitements n'est importante que dans le cas du sol d'Abengourou. Elle est moyenne dans le sol de Dabou, faible dans le sol de Yamoussokro.

L'effet de l'hygropériodisme est plus marqué à Abengourou, car ce sol renferme vraisemblablement une plus forte teneur en composés organiques sensibles à l'hygropériodisme, c'est-à-dire donnant naissance par ce traitement à des quantités plus importantes de substrats énergétiques.

Quoi qu'il en soit, les dosages d'azote par la méthode de Kjeldahl nous permettent de faire un bilan, et ce bilan dans l'ensemble, est positif.

3 - Apports de substrats énergétiques et d'azote ammoniacal :

a) Fixation d'azote par des suspensions de sols

Nous avons porté dans le tableau 7 les teneurs en azote initiales et les teneurs correspondantes en fin d'incubation ainsi que les gains ou les pertes d'azote observées sous l'effet des différents traitements. Ces variations sont mentionnées fig. 21.

Tableau 66 - INFLUENCE DE L'HYGROPERIODISME SUR L'AUGMENTATION DE LA TENEUR EN AZOTE DU SOL

	Teneur initiale en azote (mg N/g sol)	Teneur en azote après 28 jours			
		Submersion constante		4 cycles exondation-submersion	
		mg N/g sol	Δ N	mg N/g sol	Δ N
Sol de Dabou	3,020	3,115	+ 0,095	3,150	+ 0,130
Sol d'/bengourou	2,685	2,730	+ 0,045	2,805	+ 0,120
Sol de Yamoussokro	1,410	1,490	+ 0,080	1,500	+ 0,090

Tableau 7 - INFLUENCE DE L'APPORT DE GLUCOSE ET D'AZOTE AMMONIACAL SUR L'AUGMENTATION OU LA DIMINUTION DE LA TENEUR EN AZOTE DE SUSPENSIONS DE SOLS

	Apport en azote ammoniacal* (ppm)	Teneur initiale en azote (mg N/g sol)	Teneur en azote après 7 jours (mg N/g sol)					
			Apport de glucose *					
			0 ‰		0,5 ‰		1 ‰	
			mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN
Sol de DABOU	0	3,020	3,100	+ 0,080	3,305	+ 0,285	3,330	+ 0,310
	10	3,420	3,440	+ 0,020	3,565	+ 0,145	3,450	+ 0,030
	20	3,820	3,830	+ 0,010	3,895	+ 0,075	3,710	- 0,110
Sol d'ABENGOUROU	0	2,685	2,730	+ 0,045	2,835	+ 0,150	2,910	+ 0,225
	10	2,085	3,085	0	3,085	0	3,110	+ 0,025
	20	3,485	3,445	- 0,040	3,435	- 0,050	3,435	- 0,050
Sol de YAMOUSSOKRO	0	1,410	1,470	+ 0,060	1,580	+ 0,170	1,650	+ 0,240
	10	1,810	1,790	- 0,020	1,810	0	1,835	+ 0,025
	20	2,210	2,180	- 0,030	2,170	- 0,040	2,165	- 0,045

* Les concentrations en glucose et azote ammoniacal, sont exprimées par rapport au volume total de la suspension de sol.

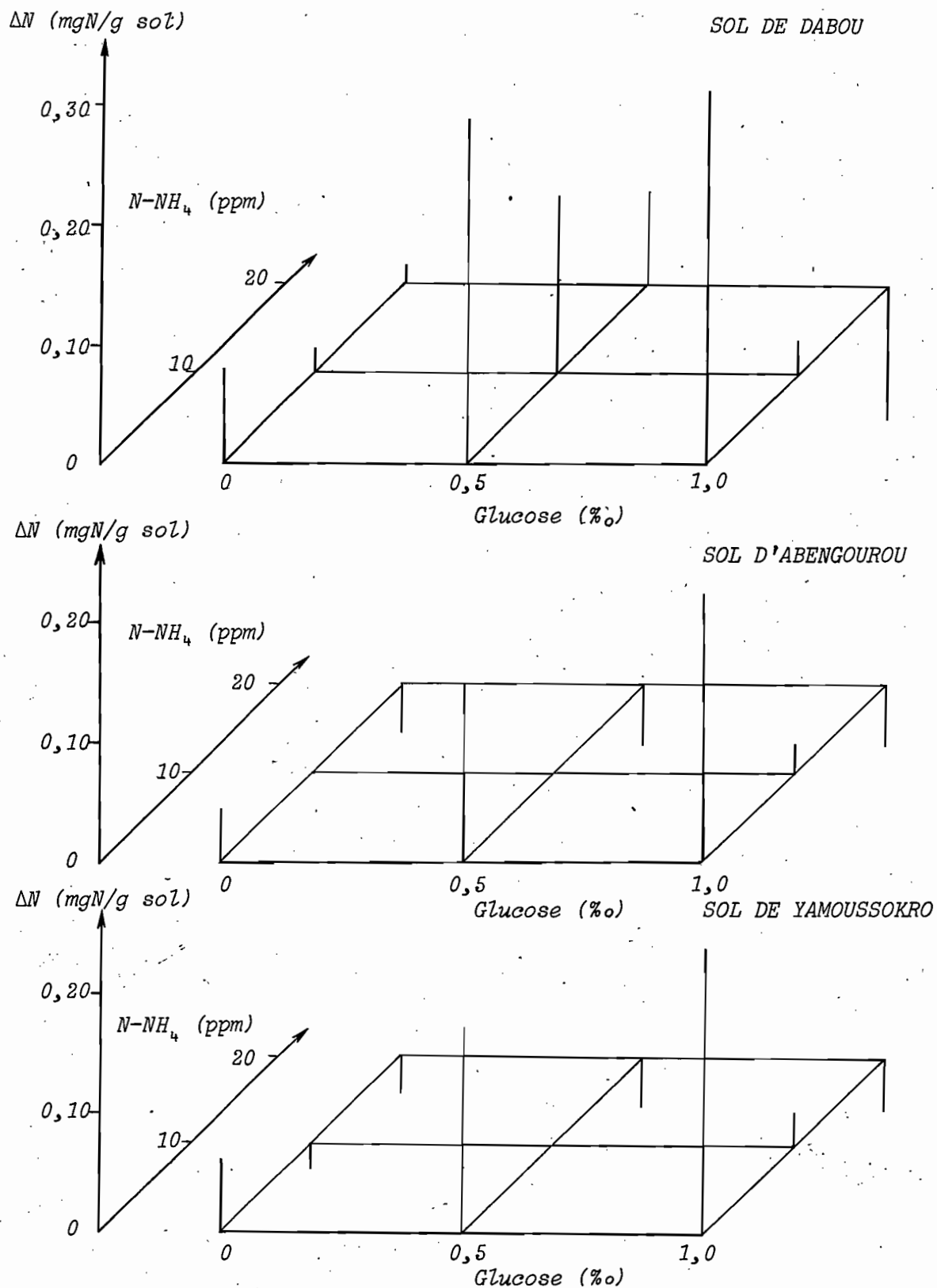


Fig. 21 - Interactions substrat-azote ammoniacal :
 variations de la teneur en azote total de
 suspensions de sols (Technique ROUQUEROL).
 (les concentrations en glucose et $N-NH_4$ sont exprimées par
 rapport au volume total).

Ces résultats peuvent s'interpréter comme suit :

1°) L'augmentation de la teneur en azote est importante en présence de glucose et cela d'autant plus que la concentration en glucose est plus forte.

2°) Toutefois, même quand du glucose n'est pas apporté, les gains en azote sont loin d'être négligeables. Il existe donc naturellement dans le sol une quantité appréciable de matière organique facilement décomposable susceptible de fournir aux microorganismes fixateurs les substrats énergétiques nécessaires à leur activité.

3°) Cette augmentation de la teneur en azote est plus faible (on enregistre même parfois une perte globale d'azote) quand on apporte à la suspension de sol de l'azote ammoniacal. L'azote ammoniacal exerce donc un effet inhibiteur sur l'activité fixatrice, d'autant plus marqué que la quantité apportée est plus grande.

4°) Les résultats obtenus mettent bien en évidence le fait que fixation d'azote et dénitrification d'azote peuvent avoir lieu simultanément. Considérons par exemple, dans le cas du sol de Dabou, les traitements pour lesquels on a apporté une quantité de glucose correspondant à 1 % dans la suspension de sol. Avec le traitement sans addition d'azote ammoniacal, le gain en azote est considérable. En présence de 10 ppm d'azote ammoniacal, le gain est faible et on enregistre avec 20 ppm d'azote ammoniacal une forte diminution de la teneur en azote. Il ne fait pas de doute que la présence de glucose stimule à la fois la fixation d'azote et la dénitrification. Il faut rappeler à ce propos que nous avons toujours trouvé in situ de faibles quantités de nitrates, ce qui nous a permis de penser que des pertes d'azote par dénitrification devaient avoir lieu.

On peut donc supposer que si l'on ajoute de l'azote ammoniacal la fixation d'azote est alors freinée ou même arrêtée et apparaissent alors les pertes par dénitrification.

5°) Si l'on compare maintenant les réactions des trois sols, on s'aperçoit que pour l'apport intermédiaire de glucose (0,5 ‰), le sol de Dabou est le moins sensible à l'effet inhibiteur de l'azote ammoniacal, même sans addition de glucose.

Il faut noter à ce propos que ces sols contiennent déjà naturellement des quantités importantes d'azote ammoniacal (50 à 70 ppm à Abengourou et Yamoussokro, 80 à 100 ppm à Dabou). Un apport supplémentaire d'azote ammoniacal a pour effet de perturber l'équilibre biologique et d'exercer un effet inhibiteur plus ou moins sensible suivant le sol.

b) Fixation d'azote par des sols

Les résultats des dosages d'azote sont mentionnés dans le tableau 8. Comme précédemment, nous avons représenté sous forme de schéma les gains ou les pertes nettes d'azote (fig. 22).

L'analyse des résultats obtenus permet des observations comparables à celles que nous avons pu faire dans le cas des suspensions de sol. En particulier, si l'on compare les deux techniques pour les traitements avec glucose ou sans apport de substrat énergétique, il apparaît dans les 2 cas que le sol de Dabou est le plus apte à s'enrichir en azote, et que le sol d'Abengourou est celui pour lequel les pertes d'azote l'emportent le plus facilement sur les gains en présence de concentrations élevées en azote ammoniacal.

De plus, nous avons apprécié le pouvoir énergétique de substrats naturels tels que les pailles ou les racines :

Tableau 8 - INFLUENCE DE L'APPORT DE SUBSTRATS ENERGETIQUES (GLUCOSE, PAILLES OU RACINES)
ET D'AZOTE AMMONIACAL SUR L'AUGMENTATION OU LA DIMINUTION DE LA TENEUR EN
AZOTE DE SOLS, DANS LES CONDITIONS DE SUBMERSION.

	Apport en azote ammoniacal* (ppm)	Teneur initiale en azote (mg N/g sol)			Teneur en azote après 28 jours							
					Substrats énergétiques							
					0		glucose* (0,5 %)		Pailles* (1 %)		Racines* (1 %)	
		Sol + glucose	Sol + pailles	Sol + racines	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN	mg N/g sol	DN
Sol de DABOU	0	3,020	3,080	3,150	3,115	+ 0,095	3,130	+ 0,110	3,175	+ 0,095	3,230	+ 0,080
	100	3,120	3,180	3,250	3,170	+ 0,050	3,145	+ 0,025	3,205	+ 0,025	3,250	0
	200	3,220	3,280	3,350	3,180	- 0,040	3,205	- 0,015	3,285	+ 0,005	3,340	- 0,010
Sol d'ABENGOUROU	0	2,685	2,750	2,805	2,730	+ 0,045	2,775	+ 0,090	2,825	+ 0,075	2,860	+ 0,055
	100	2,785	2,850	2,905	2,805	+ 0,020	2,790	+ 0,005	2,875	+ 0,025	2,890	- 0,015
	200	2,885	2,950	3,005	2,870	- 0,015	2,875	- 0,010	2,905	- 0,045	2,945	- 0,060
Sol de YAMOUSSOKRO	0	1,410	1,480	1,520	1,490	+ 0,080	1,545	+ 0,135	1,640	+ 0,160	1,635	+ 0,115
	100	1,510	1,580	1,620	1,520	+ 0,010	1,550	+ 0,040	1,660	+ 0,080	1,655	+ 0,035
	200	1,610	1,680	1,720	1,605	- 0,005	1,610	0	1,675	- 0,005	1,700	- 0,020

* Les concentrations en azote ammoniacal, glucose, pailles et racines, sont exprimées par rapport au poids de sol sec.

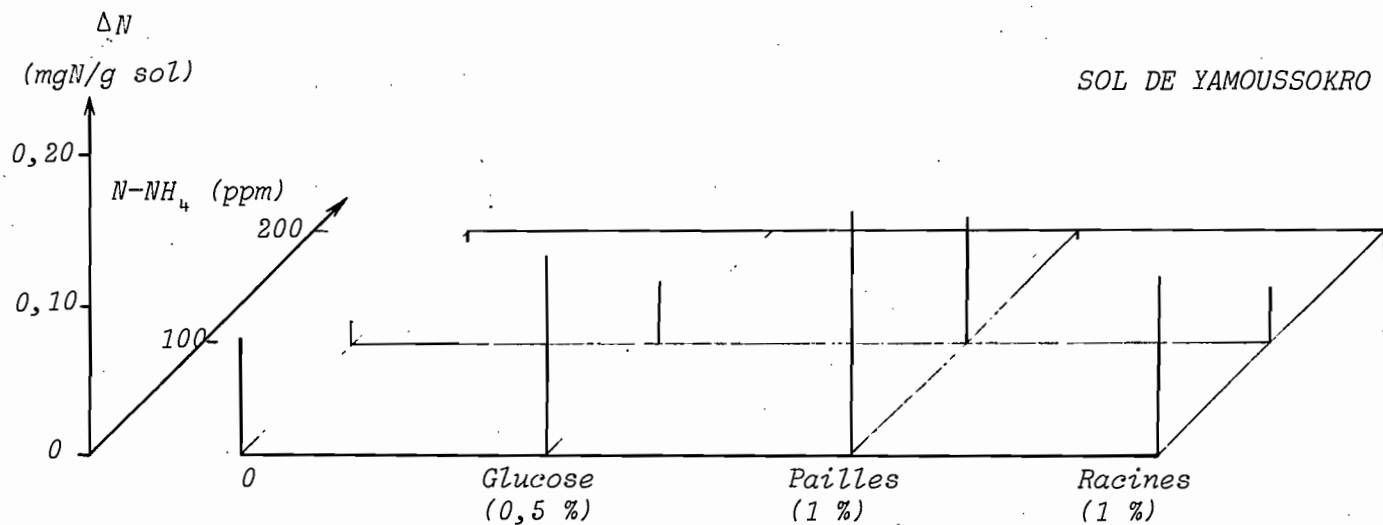
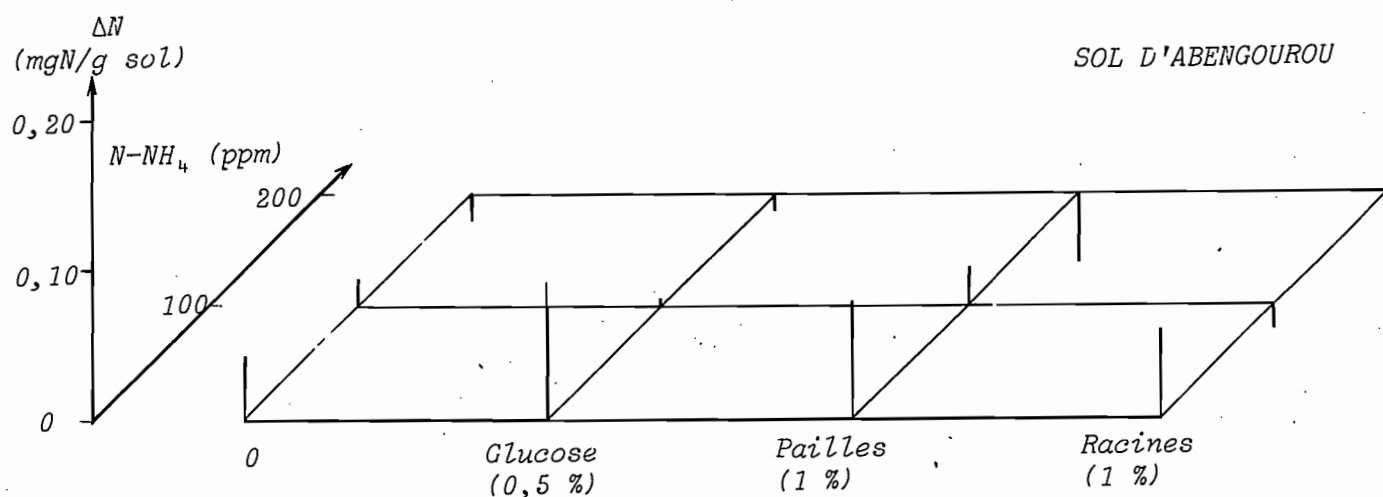
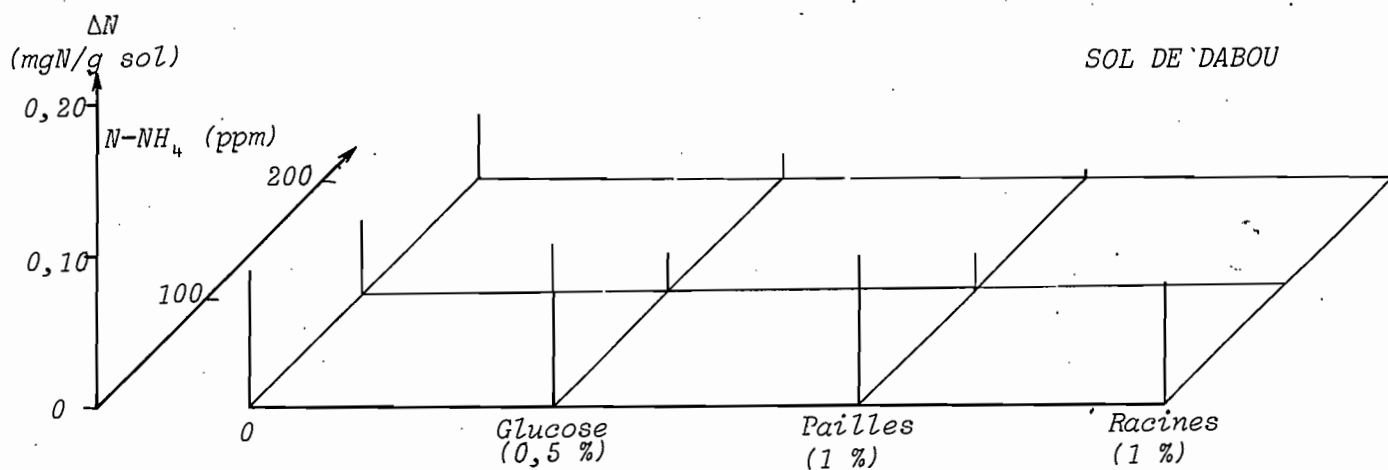


Fig. 22 - Interactions substrat-azote ammoniacal :

variations de la teneur en azote total de sols.

(les concentrations en $N-NH_4$, glucose, pailles et racines, sont exprimées par rapport au poids sec de sol).

1. Les pailles constituent un meilleur substrat énergétique que les racines (ce résultat n'est pas surprenant puisque les pailles renferment une proportion importante de cellulose).

2. L'apport de pailles ne paraît intéressant que dans le cas du sol de Yamoussokro. Pour les deux autres sols les gains observés après addition de pailles est du même ordre que pour le traitement sans apport de substrat. La raison en est vraisemblablement que les pailles stimulent la fixation d'azote, mais favorisent aussi la dénitrification.

C. CONCLUSIONS

1. La submersion stimule incontestablement l'activité fixatrice des sols de rizières. L'effet le plus net est observé avec le sol de Dabou.
2. L'hydropériodisme a dans l'ensemble, un effet encore plus important sur l'activité fixatrice qu'une submersion constante, en particulier dans le sol d'Abengourou. Le rôle de l'hydropériodisme peut être expliqué par une libération plus intense de substrats énergétiques à partir de la matière organique présente dans les sols.
3. Le traitement qui donne les fixations nettes les plus considérables consiste à associer la submersion à la lumière.

Ce traitement correspond précisément aux conditions écologiques réelles des sols de rizières. Toutefois, l'enrichissement en azote par les microorganismes photosynthétiques au premier rang desquels se situent les cyanophycées est moindre qu'il ne paraît à la simple lecture des analyses d'azote. En effet, "l'effet lumière" n'est appréciable qu'au niveau de la surface des sols.

4. La valeur énergétique des pailles est meilleure que celle des racines. Les résultats obtenus soulignent l'importance des pratiques culturales qui consistent à enfouir les pailles dans le sol au moment du labour.

Toutefois, l'effet obtenu n'est pas toujours aussi important que celui auquel on aurait pu s'attendre (très important avec le sol de Yamoussokro, il est pratiquement nul avec le sol de Dabou). En effet, les substrats énergétiques libérés à partir des pailles stimulent à la fois la fixation d'azote et la dénitrification.

5. L'addition aux sols d'azote ammoniacal freine ou arrête la fixation d'azote, mettant bien ainsi en évidence l'effet inhibiteur de cet élément sur la fixation d'azote. Quand l'azote ammoniacal est apporté aux sols en même temps que des substrats énergétiques, on peut observer des pertes nettes d'azote, ce qui confirme la simultanéité des processus de fixation d'azote et de dénitrification dans les sols de rizières en particulier, au moment de l'incorporation de pailles.

Remarque : L'analyse comparative des résultats obtenus dans le cas de sols ou de suspensions de sols (avec ou sans addition de glucose), nous permet de faire les mêmes observations, ce qui souligne l'intérêt de la méthode de mesure de l'activité potentielle de fixation, mise au point par Madame ROUQUEROL (1964). Cette méthode est en effet très facile à mettre en oeuvre et permet de suivre les variations saisonnières de l'activité fixatrice potentielle des sols.

Nous avons essayé d'extrapoler à la rizière, les résultats obtenus. Il est bien évident que cette extrapolation n'est pas valable, ne serait-ce que parce que le lessivage est nul dans notre expérimentation, de même que les exportations par les plantes. En outre, il n'y avait pas de plantes.

Nous pensons néanmoins que les chiffres mentionnés dans le tableau ci-dessous, permettent de se faire une idée de l'importance des phénomènes.

Ces chiffres expriment des gains d'azote à l'hectare pour une épaisseur de sol de 20 cm ($d = 1,65$), en 28 jours, sous l'effet des différents

facteurs écologiques étudiés.

Sols	Facteurs écologiques			
	Submersion ⁽¹⁾	Lumière ⁽²⁾	Hygropériodisme ⁽³⁾	Pailles ⁽⁴⁾
DABOU	195 kg	17 kg	95 kg	0 kg
ABENGOUROU	75 kg	24 kg	225 kg	90 kg
YAMOUSSOKRO	75 kg	18 kg	30 kg	240 kg

- N.B. (1) Différence entre la teneur en azote du sol soumis à la submersion et la teneur en azote du sol placé à une humidité correspondant à la capacité au champ (à l'obscurité).
- (2) Différence entre la teneur en azote du sol soumis à la submersion à la lumière et la teneur en azote du sol soumis à la submersion à l'obscurité.
- (3) Différence entre la teneur en azote du sol soumis à l'hygropériodisme et la teneur en azote du sol soumis à une submersion constante.
- (4) Différence entre la teneur en azote du sol enrichi en pailles et la teneur en azote du sol seul.

Remarques :

1. Les chiffres correspondant à l'effet lumière ont été calculés compte tenu du fait que l'épaisseur de sol dans les béciers est environ de 2 cm.
2. Nous n'avons pas mentionné dans ce tableau de chiffres correspondant à l'addition d'azote ammoniacal. C'est que les sols contiennent déjà naturellement des quantités importantes d'azote ammoniacal (60 à 100 ppm). Des additions d'azote ammoniacal n'ont été faites que pour mettre en évidence l'effet inhibiteur de cet élément sur la fixation d'azote.

Les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessus nous permettent de faire des observations comparables à celles que nous avons déjà exprimées. Leur intérêt est de préciser l'importance relative des différents facteurs écologiques étudiés.

On remarquera en particulier que la part des microorganismes photosynthétiques dans l'enrichissement en azote des sols de rizières, s'il n'est pas négligeable, est loin d'être aussi considérable que différents auteurs ont pu le penser. Autrement dit, la présence de cyanophycées fixatrices d'azote dans les sols de rizières n'explique pas à elle seule la fertilité parfois exceptionnelle de ces sols.

Chapitre IV

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA FIXATION BRUTE D'AZOTE
METHODE DE REDUCTION DE L'ACETYLENE

Nous avons vu que les différentes transformations de l'azote dans le sol se déroulent simultanément. Lorsqu'il s'agit de processus agissant en sens contraire, cette simultanéité fait que les analyses d'azote permettent seulement d'apprécier l'effet net de ces processus. Ainsi, l'évaluation de la fixation d'azote par la méthode de Kjeldahl ne nous a permis d'apprécier que la fixation nette.

La méthode isotopique et la méthode de réduction de l'acétylène présentent sur la méthode chimique deux avantages : elles permettent de déceler des fixations beaucoup plus faibles et de connaître avec certitude la quantité d'azote fixé, donc de déterminer la fixation brute.

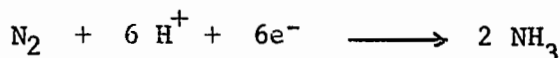
Les analyses de fixation brute d'azote qui font l'objet de ce chapitre ont été réalisées avec la méthode de réduction de l'acétylène.

A. RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS

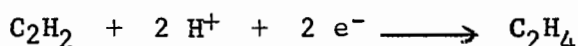
En 1966, SCHÖLHORN et BURRIS, ainsi que DILWORTH découvrent que le complexe enzymatique fixateur d'azote (nitrogénase) réduit l'acétylène en éthylène. Plus précisément, ces chercheurs mettent en évidence une inhibition de la fixation d'azote par l'acétylène avec des extraits de Clostridium pasteurianum : SCHÖLHORN et BURRIS démontrent la nature compétitive de cette inhibition et DILWORTH trouve que la réduction de l'acétylène en éthylène se fait par une réaction analogue à celle de la réduction de l'azote moléculaire en ammoniac.

En 1967, HARDY et KNIGHT ont l'idée d'utiliser la vitesse de réduction de l'acétylène en éthylène comme test permettant l'évaluation de la fixation d'azote moléculaire.

La méthode de réduction de l'acétylène est maintenant de plus en plus utilisée (cf. en particulier STEWART et coll., 1967 ; HARDY et coll., 1968) pour estimer la fixation biologique de l'azote dans les systèmes simples (extraits acellulaires, cultures pures de bactéries ou cyanophycées) ou des systèmes plus complexes (nodules de légumineuses et non légumineuses, sols, eaux). Cette estimation est fondée sur l'existence d'une relation quantitative constante entre la réaction de réduction de l'azote moléculaire.



et la réaction de réduction de l'acétylène :



Puisque la réduction d'une molécule d'azote exige 6 électrons, et la réduction d'une molécule d'acétylène en exige seulement 2, le rapport molaire théorique " $\text{C}_2\text{H}_4 : \text{N}_2$ réduit" est de 3 : 1. Mais l'expérience montre que si ce rapport est souvent de l'ordre de 3, notamment dans le cas des systèmes simples (BERGERSEN, 1970 ; DILWORTH, 1970), il peut être plus élevé, même dans le cas de systèmes simples tels que des extraits acellulaires bruts d'Azotobacter vinelandii, où ce rapport atteint 5 (STEWART et coll., 1967).

Dans les systèmes complexes tels que le sol, des rapports encore plus élevés ont été signalés (BROUZES et coll., 1971). Il apparaît donc indispensable, en particulier dans le cas des sols, de vérifier la valeur du rapport molaire " $\text{C}_2\text{H}_4 : \text{N}_2$ réduit".

B. MATERIEL ET METHODE D'ANALYSE

1. Matériel

Toutes les analyses ont été faites sur du sol prélevé dans l'horizon de surface des rizières de Dabou, Abengourou et Yamoussokro. Les sols ont été séchés modérément jusqu'à une humidité légèrement inférieure à la capacité au champ, et passés à travers un tamis de 2 mm.

Remarque : Les analyses n'ont pu être entreprises que plusieurs mois après les prélèvements. Les sols ont été conservés en chambre froide (+ 4° C) dans des sacs en plastique.

Pour la mesure de la fixation d'azote par des sols enrichis en pailles ou en racines, nous avons été amené à faire pousser du riz, (variété IR 8) dans un grand cristalliseur rempli pour moitié de sol. Les parties aériennes et les racines ont été récoltées après environ 1 mois de croissance. Elles ont été séchées à l'air, puis broyées finement à l'aide d'un mixer, avant d'être incorporées au sol.

La même variété de riz (IR 8) a été utilisée pour les mesures de fixation rhizosphérique.

2. Méthode d'analyse

La méthode de réduction de l'acétylène consiste à mettre le sol à étudier dans une enceinte fermée, en contact avec une atmosphère enrichie en acétylène, et à mesurer la production d'éthylène par chromatographie en phase gazeuse.

La méthode adoptée est celle de STEWART et coll. (1967) et HARDY et coll. (1968), modifiée en ce qui concerne la composition du mélange gazeux ; nous avons en effet remplacé le mélange oxygène-argon-acétylène par un mélange renfermant seulement argon et acétylène (A : 0,9 atm. ; C_2H_2 : 0,1 atm.) des expériences préliminaires ayant montré la supériorité de ce mélange.

a) Incubation sous acétylène

Chaque échantillon est placé dans un flacon dont le volume est fonction du type de matériel utilisé (flacon compte-gouttes de 12 ml dont le compte-gouttes a été remplacé par une rondelle de caoutchouc, ou flacon sérum de 140 ml fermé par un bouchon de caoutchouc étanche avec virolle).

L'atmosphère au dessus de l'échantillon est remplacée par le mélange argon-acétylène. Les échantillons sont alors placés à 28°C à l'obscurité ou à la lumière.

Incubation à la lumière :

Les échantillons sont placés dans une pièce étuve sous 5 lampes Mazda de 120 W à une distance de 60 cm environ des lampes.

L'intensité lumineuse distribuée au niveau des échantillons est de 20 000 lux environ.

Incubation à l'obscurité :

Les échantillons sont placés dans une étuve ou dans la pièce étuve éclairée. Dans ce dernier cas, il sont alors recouverts de papier aluminium.

b) Dosage de l'éthylène

Le dosage de l'éthylène produit durant l'incubation sous acétylène est effectué à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse Varian Aérograph 1400.

Ethylène et acétylène sont séparés à 60°C sur colonne de Porapak R (diamètre 1/4 pouce ; longueur 5 pieds).

La détection se fait par ionisation de flamme d'hydrogène. L'enregistrement est assuré par un enregistreur TACUSSEL EPLI. La forme des pics d'éthylène du chromatogramme est telle que leur hauteur est proportionnelle à la quantité d'éthylène à mesurer.

Le volume du mélange gazeux introduit dans la colonne est de 0,5 ml.

Les résultats sont exprimés en nanomoles d'éthylène par gramme de sol sec (nmoles C_2H_4 /g sol).

On se réfère pour cela à une courbe étalon établie à partir de quantités connues d'éthylène.

C. FIXATION D'AZOTE PAR DES SOLS

Trois sources d'énergie ont été utilisées : glucose, résidus végétaux (pailles ou racines), énergie lumineuse.

Les sols ont été répartis dans des flacons de 12ml. à raison de 2 g de sol humide par flacon, puis soumis à la submersion.

Chaque analyse a donné lieu à cinq répétitions.

I - Sols enrichis en glucose

L'enrichissement du sol en glucose, n'a pas de signification écologique. Il est bien évident que des concentrations en glucose de 1 % ou plus, ne se rencontrent pas dans les conditions naturelles.

Cet enrichissement peut être utile toutefois, si l'on veut mettre en évidence certains processus qui, autrement, seraient peu ou pas visibles.

Ainsi, nous avons été amené à enrichir nos sols en glucose pour mettre en évidence l'effet inhibiteur de l'oxygène et de l'azote ammoniacal sur la fixation d'azote.

Mais au préalable, il nous a fallu rechercher les conditions expérimentales optimales d'utilisation du glucose, c'est-à-dire les conditions pour lesquelles la vitesse de réduction de l'acétylène sera la plus grande.

a) Mise au point des conditions expérimentales

Les expériences qui ont été faites peuvent être schématisées ainsi :

- 1) - Les sols sont placés un certain temps dans des conditions

de submersion (des expériences préliminaires nous ayant montré que ce temps de submersion préalable est nécessaire pour que les sols retrouvent une bonne activité fixatrice).

2) - Après environ 15 jours de submersion, on ajoute du glucose ; commence alors la préincubation avec glucose.

3) - Après un certain temps de préincubation, les flacons sont fermés et on remplace l'atmosphère au dessus du sol par le mélange argon-acétylène.

4) - L'incubation sous acétylène se fait dans les conditions décrites ci-dessus. Elle dure 24 h au maximum, et les mesures de production de l'éthylène sont effectuées après des durées d'incubation variables.

α - Prétraitement des sols : submersion préalable à l'apport de glucose

Les sols soumis à des durées variables de submersion (avec de l'eau distillée), ont été enrichis par 2 % de glucose, puis mis en incubation sous acétylène après des temps de préincubation avec glucose appropriés (cf. § suivant:β).

Les divers temps de submersion sont : 0, 3, 6, 11, et 17 jours. Les durées de préincubations pour les sols de Dabou, Abengourou et Yamoussokro sont respectivement : 38 h, 45 h, et 36 h. Les mesures d'éthylène ont été effectuées après 5 h d'incubation sous acétylène.

Résultats

La figure 23 représente pour chaque sol la vitesse de production de l'éthylène (nmoles C_2H_4 /g sol/h) en fonction des temps de submersion.

L'analyse des résultats obtenus met bien en évidence l'intérêt que l'on a à soumettre les sols à la submersion un certain temps avant de mesurer leur activité fixatrice. Celle-ci n'est optimale qu'après 6 à 7 jours de submersion avec les sols de Dabou et Yamoussokro, 11 à 12 jours pour le sol d'Abengourou.

Ce phénomène est probablement dû à la mise à l'état de repos (sous formes de Kystes ou de spores) des microorganismes fixateurs par suite du stockage des sols.

β - Préincubation avec glucose

Des sols soumis préalablement à 15 jours de submersion ont été enrichis par 0,5 ml d'une solution de glucose. La concentration de cette solution a été déterminée de manière à ce que 0,5 ml de solution apporte au sol une quantité de glucose correspondant à 2 % de son poids sec.

Les flacons ont été bouchés et mis à incuber sous acétylène après : 6 h, 16 h, 20 h, 24 h, 29 h, 40 h, 44 h, 48 h, 64 h de préincubation. Les mesures d'éthylène ont été effectuées après 3 h, 7 h, et 24 h d'incubation sous acétylène.

Résultats

La figure 24 représente pour chaque sol les vitesses moyennes de production d'éthylène (nmoles C_2H_4 /g sol/h) mesurées après 3 h d'incubation sous acétylène et correspondant aux divers temps de préincubation avec glucose.

A titre d'exemple nous avons construit les courbes cumulatives de production d'éthylène (nmoles C_2H_4 /g sol) pour le sol de Dabou (fig. 25).

L'analyse des résultats obtenus nous permet de faire les observations suivantes :

- 1) - Après des temps de préincubation courts (10 à 15 h), la vitesse de production d'éthylène est nulle.
- 2) - Après un laps de temps variable suivant le sol, l'activité fixatrice se manifeste brutalement.
- 3) - Quand le sol est resté longtemps en contact avec le glucose, la production d'éthylène se ralentit (autrement dit la vitesse de production d'éthylène ou encore l'activité fixatrice diminue).
- 4) - La durée optimale de préincubation avec glucose est variable suivant le type de sol (Dabou 38 h, Yamoussokro 36 h, Abengourou 45 h).

Des résultats analogues ont été obtenus dans le même laboratoire par OULIE (1970), à partir de sols de l'Est de la France, ainsi que par BROUZES et coll. (1971) sur des sols canadiens. Les durées optimales de préincubation avec glucose se situent entre 24 h et 48 h.

γ - Concentration en glucose

Des sols soumis à 15 jours de submersion ont été enrichis avec différentes quantités de glucose puis mis en incubation sous acétylène après les temps de préincubation appropriés.

Les concentrations en glucose exprimées en % du poids de sol sec sont : 0, 0,5, 1, 1,5, 2 et 3 %. Les mesures ont été faites après 5 heures d'incubation sous acétylène.

Résultats

La figure 26 représente pour chaque sol la vitesse de production de l'éthylène en fonction de la concentration en glucose.

L'analyse des résultats obtenus nous montre que la concentration en glucose qui permet la meilleure activité fixatrice se situe entre 1,5 % et 3 % (Dabou 3 %, Abengourou 2 %, Yamoussokro 1,5 %).

Pour la suite de l'expérimentation nous avons choisi la concentration en glucose de 2 %.

Cette concentration nous assure un niveau sinon optimal, du moins très élevé de l'activité fixatrice.

D'autre part, les effets toxiques dont nous avons parlé plus haut apparaîtront moins vite qu'avec une concentration en glucose de 3 %.

δ - Conclusions

Les conditions optimales pour la mesure de la fixation d'azote par des sols enrichis en glucose peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Sol	Temps de submersion préalable à l'apport de glucose	Temps de préincubation avec 2 % de glucose
Dabou	15 j	38 h
Abengourou	15 j	45 h
Yamoussokro	15 j	36 h

b) Influence de la pression partielle en oxygène

Des sols soumis à 15 jours de submersion, ont été enrichis par 2 % de glucose. Après des temps de préincubation appropriés, la mise en incubation sous acétylène a consisté à remplacer l'atmosphère gazeuse au-dessus du sol par un mélange d'argon-acétylène et oxygène à la pression atmosphérique.

Les mélanges utilisés ont été les suivants :

	Pressions partielles (atm.)				
A	0,900	0,890	0,875	0,850	0,825
C ₂ H ₂	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
O ₂	0,000	0,010	0,025	0,050	0,075

Les mesures d'éthylène ont été faites après 5 h d'incubation sous acétylène.

Résultats

Les résultats obtenus (fig. 27) mettent bien en évidence l'effet inhibiteur de l'oxygène sur la fixation d'azote. Ce phénomène est bien connu et l'on sait que la capacité fixatrice de la nitrogénase purifiée est immédiatement et de façon irréversible inhibée par l'oxygène. (BURRIS, 1969 ; BERGERSEN, 1969). De même, azotobacter, aérobie strict, fixe mieux

l'azote à des pressions partielles en oxygène faibles (DALTON, et POSTGATE, 1969). Il est intéressant toutefois de noter que dans le sol, l'effet inhibiteur de l'oxygène apparaît même à des pressions partielles en oxygène aussi faibles que 0,01 atm..

c) Influence de la concentration en azote ammoniacal

Des sols soumis à 15 jours de submersion, ont été enrichis en glucose et en azote ammoniacal. Après des temps de préincubation appropriés, ils ont été incubés sous acétylène.

Cinq concentrations en glucose (0, 0,5, 1, 1,5 et 2 %) ont été combinées à cinq concentrations en azote ammoniacal (0, 50, 100, 150 et 200 ppm). Ces diverses concentrations, exprimées par rapport au poids de sol sec, ont été apportées par 0,5 ml de solution de glucose ou de sulfate d'ammoniac. Les mesures d'éthylène ont été effectuées après 5 h d'incubation sous acétylène.

Remarque :

Les concentrations initiales en azote ammoniacal sont les suivantes :
Dabou : 85 ppm N-NH_4 ; Abengourou : 74 ppm N-NH_4 ; Yamoussokro : 62 ppm N-NH_4

Résultats

Les résultats obtenus ont été portés sur les figures 28 (Dabou), 29 (Abengourou) et 30 (Yamoussokro). Leur analyse nous permet de faire les observations suivantes :

1) - L'effet inhibiteur d'un apport d'azote ammoniacal sur la fixation d'azote est net quelque soit la concentration en glucose dans le sol.

2) - Toutefois, l'allure des graphiques obtenus nous permet de penser que sans cet apport extérieur, l'azote ammoniacal natif n'a pas un effet inhibiteur très marqué sur la fixation d'azote. Dans le sol de Dabou, par exemple, avec une concentration en glucose de 2 %, la vitesse de production de l'éthylène ne diminue que de 372 à 356 nmoles/g sol/h après un apport de 50 ppm d'azote ammoniacal.

(n moles C_2H_4 /g sol/h)

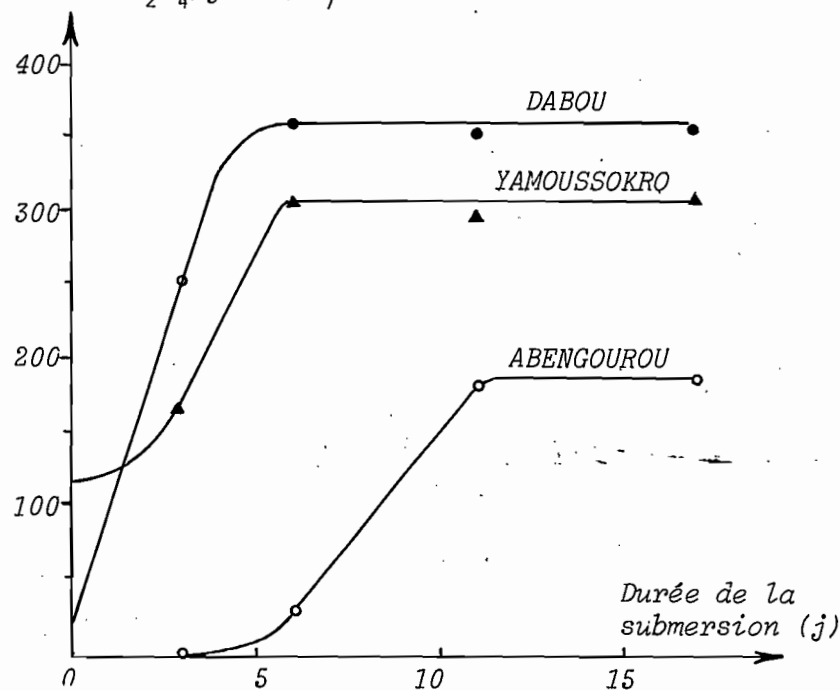


Fig. 23 - Influence sur la vitesse de production de l'éthylène, de la durée de submersion du sol précédant l'apport de glucose.

(n moles C_2H_4 /g sol/h)

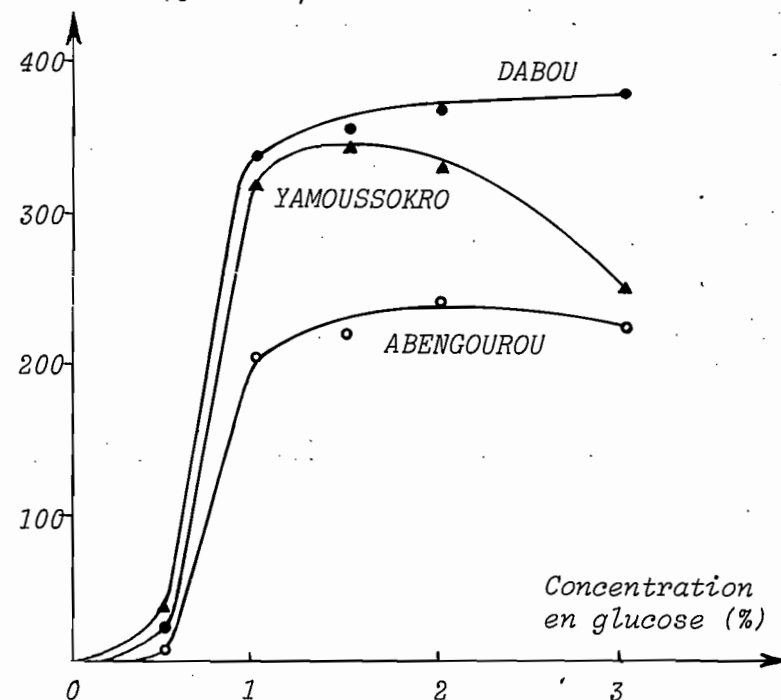


Fig. 26 - Influence de la concentration en glucose sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 5 h d'incubation sous acétylène.

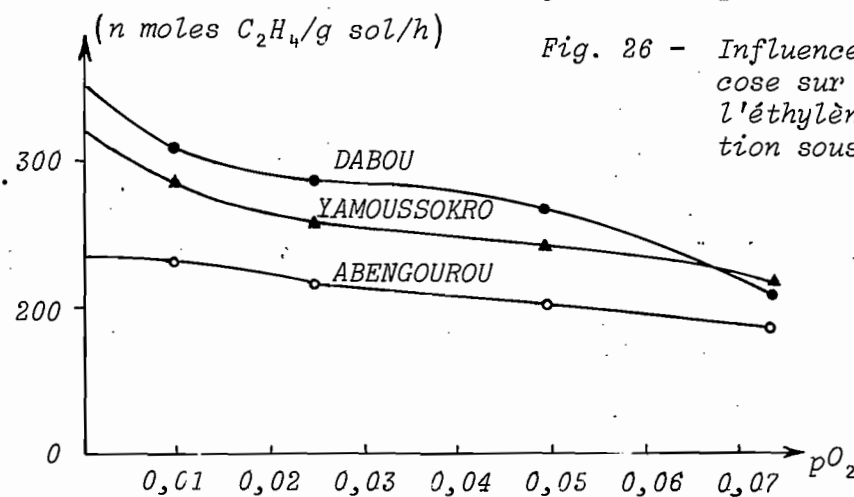


Fig. 27 - Influence de pO_2 sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 3 h d'incubation sous acétylène.

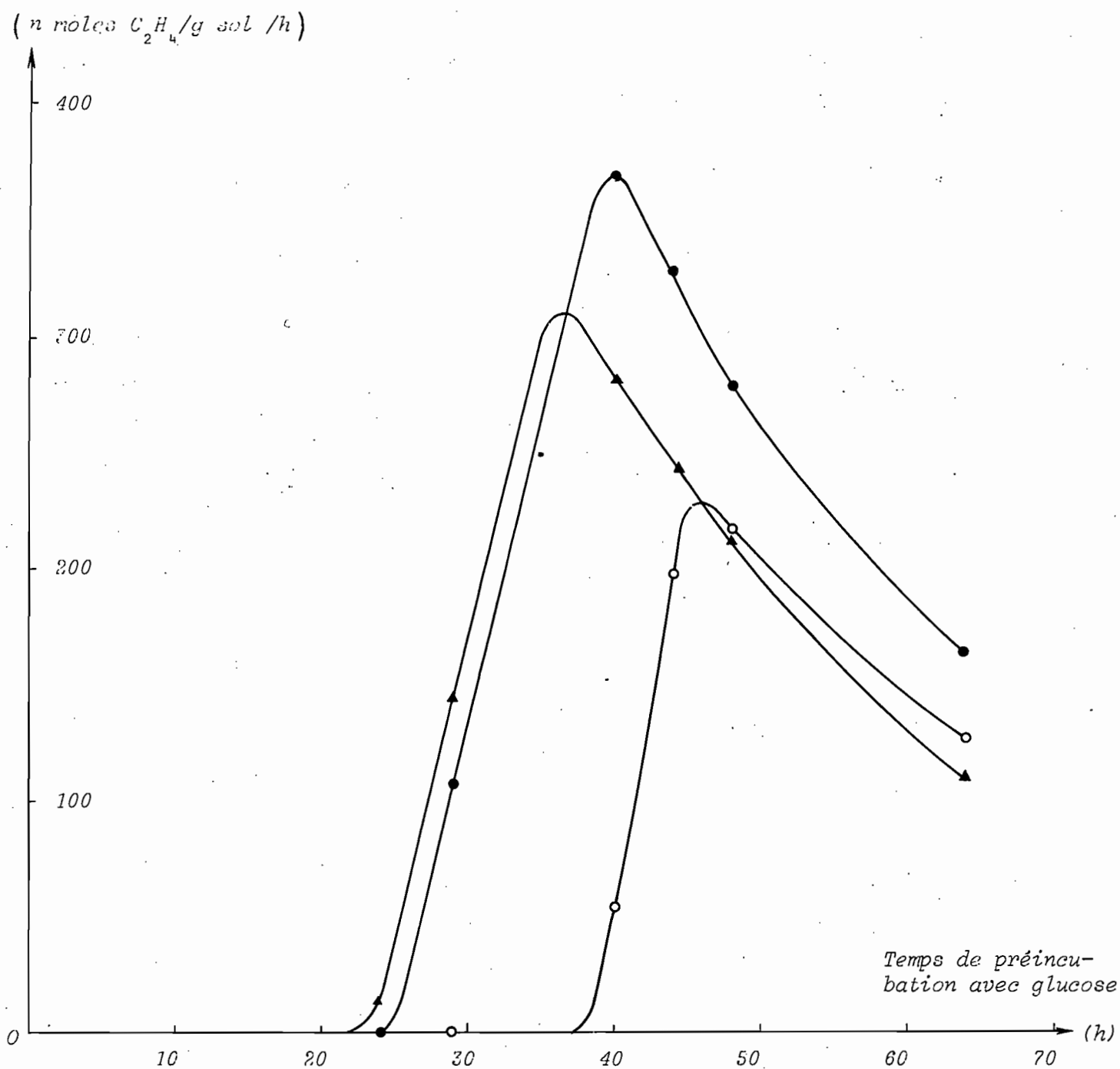


Fig. 24 - Influence du temps de préincubation avec glucose, sur la vitesse de production de l'éthylène (vitesse mesurée après 3 h d'incubation sous acétylène).

- — ● sol de DABOU
- — ○ sol d'ABENGOUROU
- ▲ — ▲ sol de YAMOUSSOKRO

SOL DE DABOU

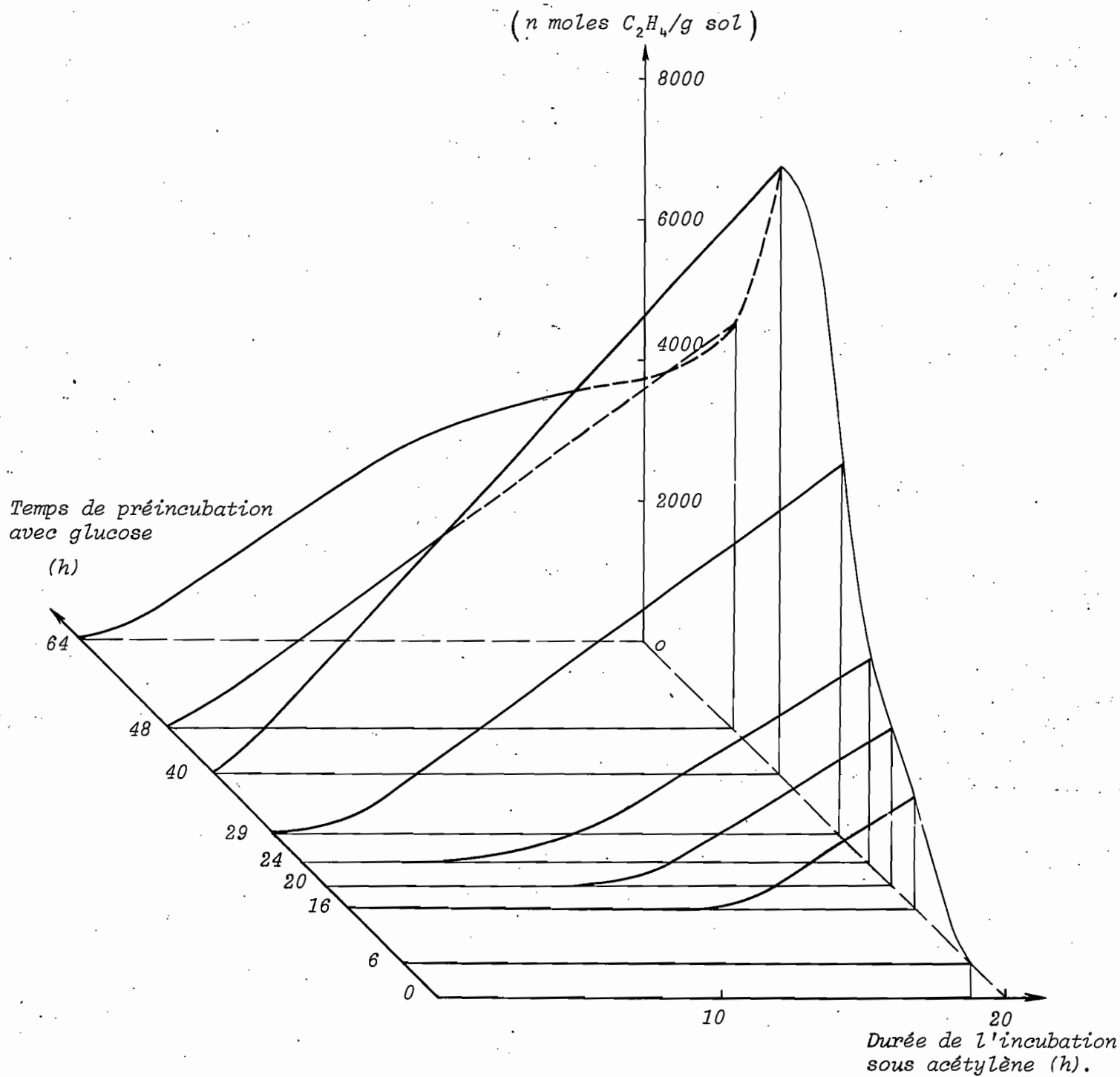


Fig. 25 -- Mesure de production de l'éthylène dans un échantillon de sol enrichi en en glucose, en fonction du temps de préincubation avec glucose et de la durée de l'incubation sous acétylène.

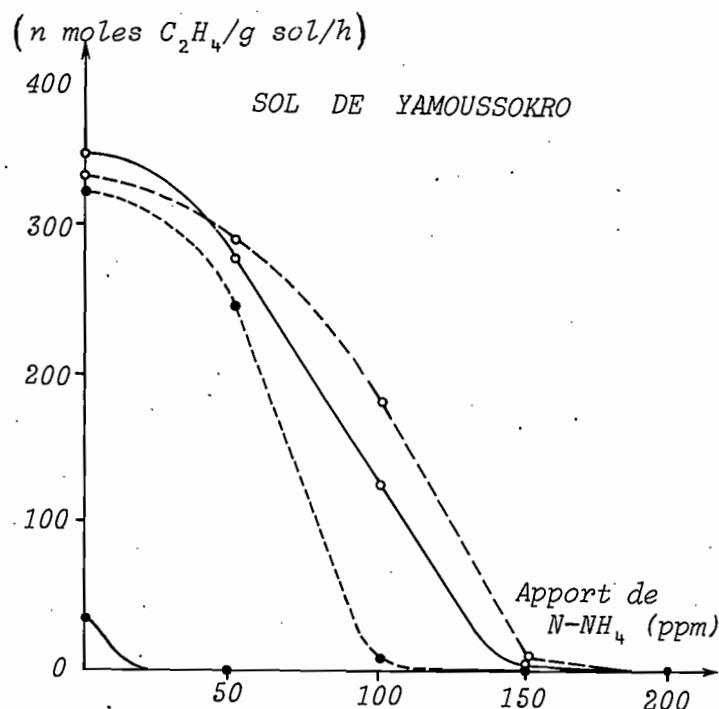


Fig. 30 - Influence d'un apport d'azote ammoniacal sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 5 h d'incubation sans acétylène.

- 0,5 % de glucose
- 1 % de glucose
- 1,5 % de glucose
- 2 % de glucose

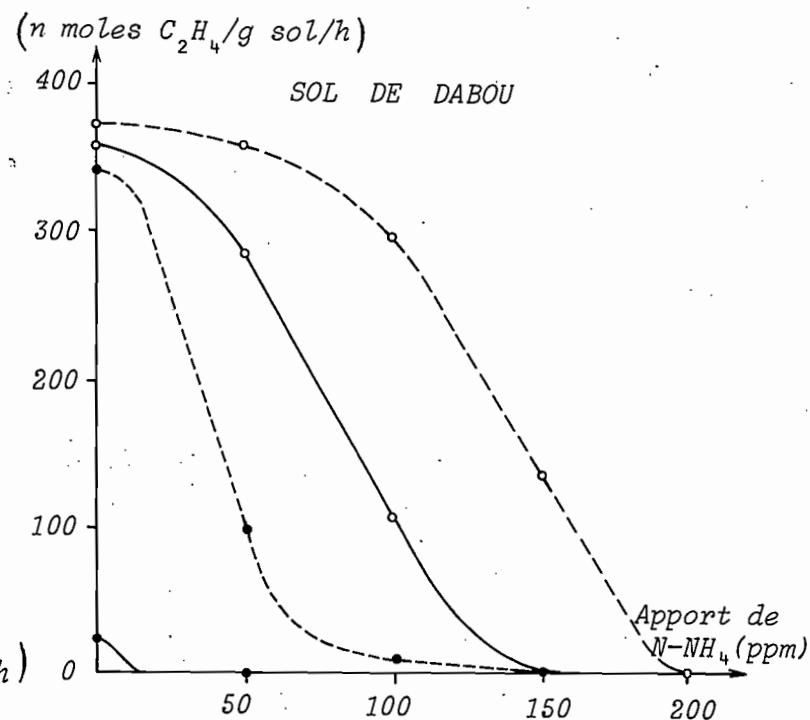


Fig. 28 - Influence d'un apport d'azote ammoniacal sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 5 h d'incubation sous acétylène.

- 0,5 % de glucose
- 1 % de glucose
- 1,5 % de glucose
- 2 % de glucose

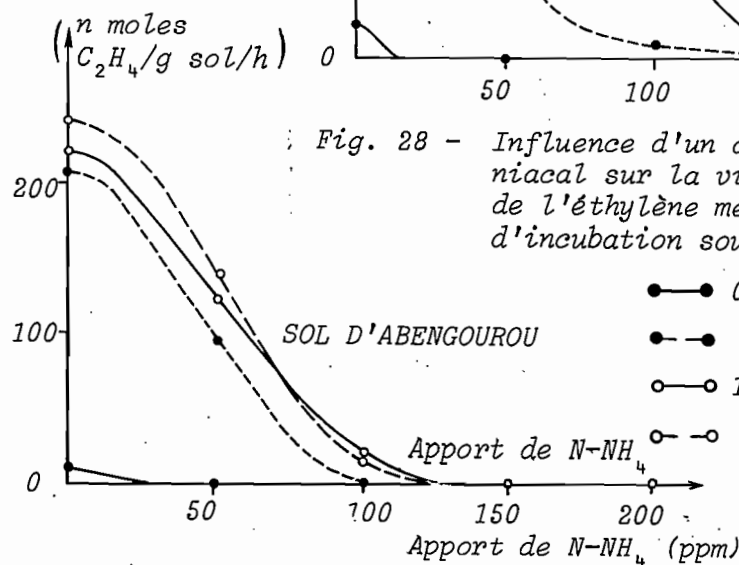


Fig. 29 - Influence d'un apport d'azote ammoniacal sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 5 h d'incubation sous acétylène.

- 0,5 % de glucose
- 1 % de glucose
- 1,5 % de glucose
- 2 % de glucose

Compte tenu des concentrations élevées en azote ammoniacal natif, tout se passe comme s'il existait un seuil relativement élevé en azote combiné en-deçà duquel les microorganismes auraient à la fois la possibilité d'assimiler l'azote combiné et de fixer l'azote moléculaire ; au delà de ce seuil l'activité fixatrice diminue : très rapidement. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- La nitrogénase de certains microorganismes fixateurs ne serait inhibée que par de très fortes concentrations en azote ammoniacal.

- Si l'on considère le sol comme une mosaïque de microhabitats, on peut penser que certains d'entre eux présentent une concentration en azote combiné faible.

3) - La diminution de l'activité fixatrice par l'azote ammoniacal est fonction de la quantité de substrats énergétiques. Ces substrats ont pour effet d'accélérer la consommation de l'azote ammoniacal par l'ensemble de la microflore tellurique (immobilisation) donc de diminuer l'inhibition de la fixation d'azote par l'azote ammoniacal.

2 - Sols enrichis en pailles ou racines

Si l'apport du glucose n'a que peu d'intérêt du point de vue écologique, l'enrichissement de sols de rizières par des pailles ou des racines correspond en revanche aux pratiques culturales.

Les pailles sont enfouies dans le sol au moment du labour qui précède le repiquage. Quant aux racines, on peut penser qu'après la coupe, elles se décomposent lentement fournissant ainsi des substrats énergétiques stimulant l'activité fixatrice.

Des sols soumis au préalable à 15 jours de submersion, ont été enrichis par des quantités de pailles ou de racines correspondant à 2 % de leur poids sec. Les flacons ont été bouchés et mis en incubation sous acétylène après des temps de préincubation variables (2, 4, 8, 12, 19 et 24 jours).

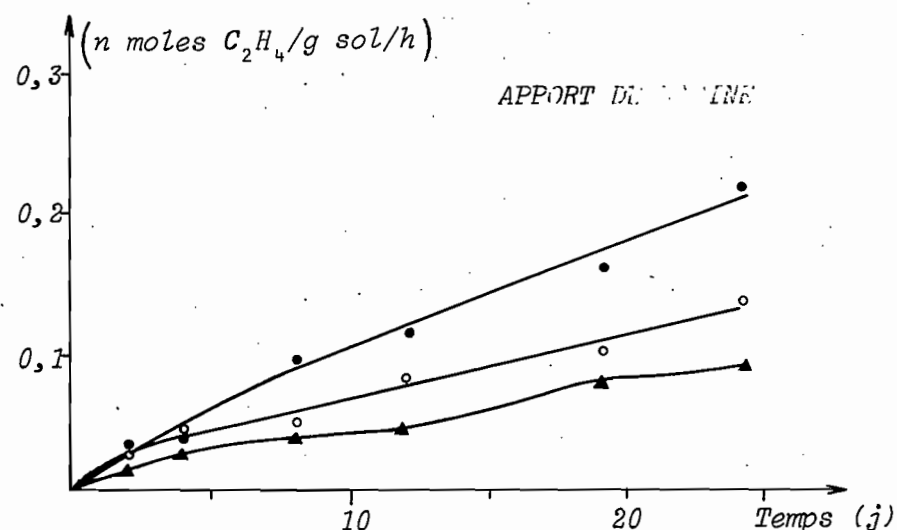
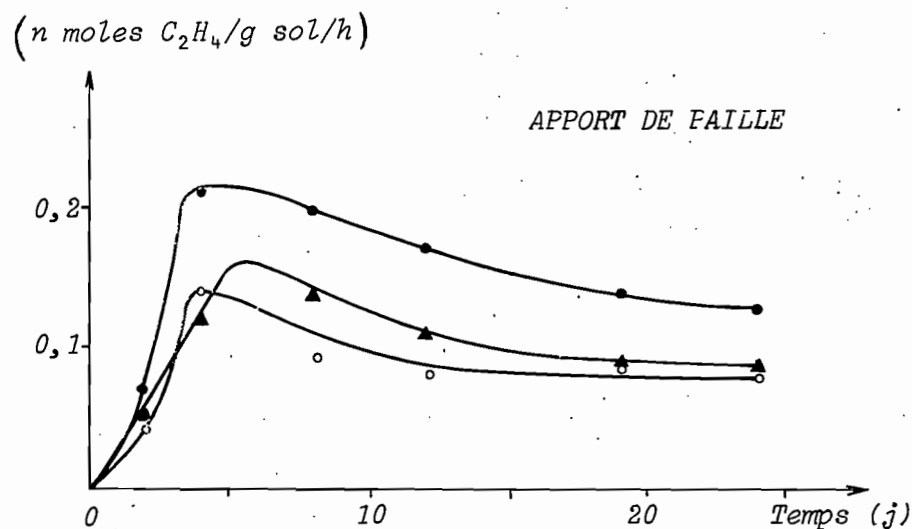


Fig. 31 - Influence en fonction du temps d'un apport de pailles ou de racines au sol, sur la vitesse de production de l'éthylène mesurée après 5 h d'incubation sous acétylène.

●—● sol de DABOU
○—○ sol d'ABENGOUROU
▲—▲ sol de YAMOUSSOKRO

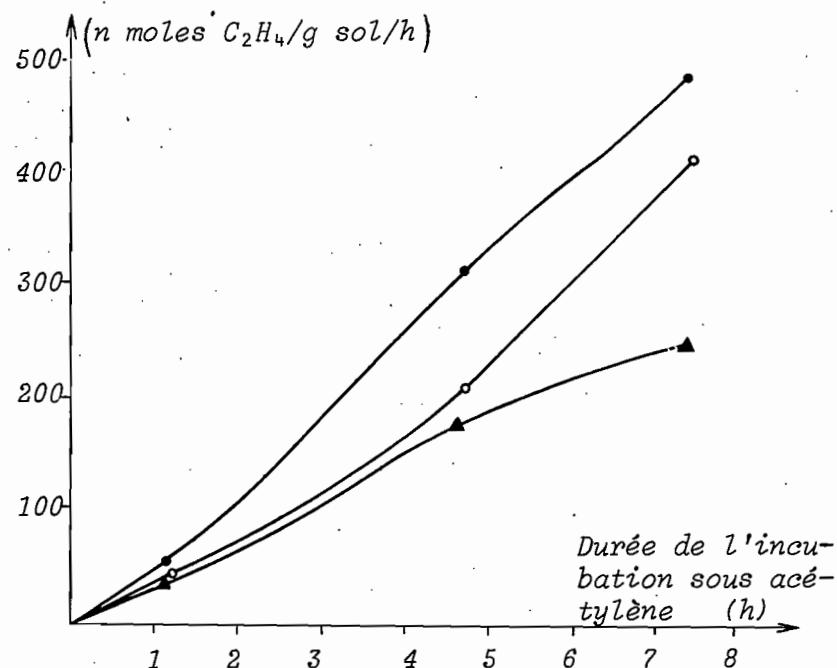


Fig. 32 - Fixation d'azote par les microorganismes photosynthétiques (intensité lumineuse : 30 000 lux) : mesure de la production de l'éthylène en fonction de la durée de l'incubation sous acétylène. (la production d'éthylène est pratiquement nulle dans le cas de sols maintenus à l'obscurité).

●—● Sol de DABOU
○—○ Sol d'ABENGOUROU
▲—▲ Sol de YAMOUSSOKRO

Parallèlement des témoins constitués par du sol non enrichi en pailles ou racines ont été exposés aux mêmes conditions. Les mesures d'éthylène ont été effectuées après 5 heures d'incubation sous acétylène. Chaque mesure a donné lieu à cinq répétitions.

Résultats

L'analyse des résultats obtenus (fig. 3I) nous permet de faire les observations suivantes :

1) - L'enfouissement de pailles s'accompagne très rapidement de pics d'activité fixatrice (4 à 6 jours après l'apport), après quoi l'activité fixatrice semble se stabiliser.

2) - En revanche, la fixation d'azote après incorporation de racines aux sols est plus lente à décoller ; à la fin de l'incubation (24ème jour), la vitesse de production de l'éthylène augmente toujours.

3) - Quoiqu'il en soit, la part jouée par les débris végétaux dans la fixation d'azote paraît faible (tout au moins dans les conditions d'incubation présentes). Un rapide calcul des quantités d'azote apportées au sol par la fixation d'azote sous l'effet de l'enrichissement en pailles ou en racines, donne des chiffres compris entre 2 kg et 4 kg d'azote fixé par hectare et par mois (en se fondant sur le rapport molaire théorique C_2H_4/N_2 réduit de 3 : 1). Il faut noter toutefois que cet effet est durable. On ne peut donc le tenir pour négligeable.

3 - Sols soumis à l'effet de la lumière

De même que l'apport de pailles ou de racines au sol, l'éclairage constitue un facteur de première importance. Dans les sols de rizières en particulier, les microorganismes photosynthétiques en général et les cyanophycées en particulier semblent d'après de nombreux auteurs (cités plus haut) être à l'origine d'une fertilité souvent très élevée. Il convenait donc de vérifier avec la méthode de réduction de l'acétylène le bien-fondé de ces affirmations, dans le cas particulier des trois sols de rizières que nous étudions. Cette étude a fait l'objet d'une publica-

tion (RINAUDO et coll., 1971).

a) Matériel et méthodes

α - Protocole expérimental

Les sols ont été placés dans des flacons de 12 ml à raison de 2 g de sol humide par fiole, soumis à la submersion et mis à incuber 30 jours à la lumière (intensité lumineuse : 20 000 lux environ, photopériode : 14 h). Parallèlement, ont été préparés des témoins dont l'incubation s'est faite à l'obscurité (les fioles étant recouvertes de papier aluminium). Chaque mesure a donné lieu à six répétitions.

β - Evaluation de la fixation d'azote par la méthode de réduction de l'acétylène.

Après 30 jours d'incubation à la lumière ou à l'obscurité, chaque flacon a été bouché et mis en incubation sous acétylène à la lumière. Les mesures d'éthylène ont été effectuées après 1h, 4h, et 7h d'incubation sous acétylène.

γ - Evaluation de la fixation d'azote par la méthode de Kjeldahl

Le contenu de trois flacons a été transféré dans un erlen de 500 ml et porté à 200 ml avec de l'eau distillée. La suite des opérations est alors celle que nous avons décrite plus haut. Le nombre de répétitions par traitement étant de six, il a donc été possible de préparer 2 erlens à partir desquels nous avons fait 4 dosages d'azote (soit 8 dosages par traitement).

b) Résultats

La figure 32 représente la cinétique de la fixation d'azote en fonction du temps d'incubation sous acétylène. Les taux de fixation d'azote calculés à partir des vitesses maximales de production d'éthylène sont respectivement 9,82, 10,10 et 5,54 $\mu\text{g N/g sol sec/J}$ pour les sols de Dabou, Abengourou et Yamoussokro ; les valeurs correspondantes obtenues par la méthode de Kjeldahl sont 7,00, 7,33, 7,33 (tableau 9).

Tableau 9 - FIXATION D'AZOTE PAR LES MICROORGANISMES PHOTOSYNTHETIQUES
DANS LES TROIS SOLS.

	Méthode de réduction de l'acétylène				Méthode de Kjeldahl				
	Vitesse de réduction (n moles C_2H_4 /g.sol/h)			Fixation d'azote correspondant à la vitesse de production d'éthy- lène maximum (μg N/g sol/jour)	Teneur initiale en azpte (mg N/g sol)	Teneur finale en azote (mg N/g sol)	Augmentation de la teneur en azote ⁽¹⁾ mg N/g sol)	Fixation d'azote due aux algues ⁽²⁾	
	1ère heure	3ème heure	6ème heure					(mg N/g sol)	(μg N/g sol/j)
Sol de DABOU									
Lumière	46,20	75,00	65,00	<u>9,82</u>	3,00	3,25	0,25		
Obscurité	0	0	0	0	3,00	3,04	0,04	0,21	<u>7,00</u>
Sol d' ABENGOUROU									
Lumière	38,80	47,50	77,50	<u>10,10</u>	2,57	2,80	0,23		
Obscurité	0	0	0	0	2,57	2,58	0,01	0,22	<u>7,33</u>
Sol de YAMOOUSSOKRO									
Lumière	34,50	42,50	27,50	<u>5,54</u>	1,505	1,730	0,225		
Obscurité	0	0	0	0	1,505	1,510	0,005	0,22	<u>7,33</u>

(1) Différence entre les teneurs en azote finale et initiale.

(2) Différence entre l'augmentation de la teneur en azote à la lumière et l'augmentation de la teneur en azote à l'obscurité.

L'étude comparative des résultats obtenus nous permet de faire les observations suivantes :

1) - Les taux de fixation calculés à partir des analyses d'azote par la méthode de Kjeldahl sont plus faibles (à une exception près) que les taux correspondant calculés à l'aide de la méthode de réduction de l'acétylène. Cette différence doit être attribuée au fait que par la méthode de réduction de l'acétylène, nous avons mesuré l'activité fixatrice en fin d'incubation alors que la méthode de Kjeldahl intègre la fixation d'azote durant toute la durée de l'expérience.

2) - On observe une augmentation sensible de la teneur en azote dans les sols incubés 30 jours à l'obscurité, par rapport à leur teneur initiale. Cette différence est simplement due à la mise brutale en submersion qui provoque la libération de substrats énergétiques à partir des résidus végétaux, après quoi la teneur en azote doit tendre vers un certain équilibre.

3) - L'épaisseur de sol dans les flacons est de 0,5 cm environ. Si l'on extrapole les résultats obtenus par la méthode de réduction de l'acétylène, à l'hectare de rizière, on obtient pour un poids de sol de 80 t/ha, des chiffres d'azote fixés compris entre 15 kg et 20 kg/ha/mois, ce qui est très important.

D. FIXATION D'AZOTE RHIZOSPHERIQUE

La rhizosphère est constituée par cette portion de sol située au contact des racines ou du moins soumise directement à l'influence de celles-ci, et dans laquelle se manifeste une intense activité biologique.

De très nombreuses études ont été faites sur la rhizosphère (cf. en particulier : KATZNELSON, 1965 ; ROVIRA, 1965). La rhizosphère est souvent considérée comme un site particulièrement favorable à la fixation d'azote, mais en fait, peu d'études précises ont été faites en ce domaine.

A l'occasion d'une récente étude critique, JURGERSEN et DAVEY (1970) ont tenté de faire une mise au point des connaissances sur cette question. Nous en avons relevé quelques aspects :

- la majeure partie des substances organiques excrétées par les racines ne contient pas d'azote, ou du moins est pauvre en cet élément (STARKEY, 1958) ;

- l'assimilation de l'azote par les plantes tend à appauvrir le sol en cet élément ;

- cette assimilation a pour effet d'élever le p^H quand il s'agit de nitrates (sols exondés), de le faire diminuer quand il s'agit d'azote ammoniacal (JACKSON, 1967) ;

- parmi les microorganismes fixateurs d'azote, Azotobacter est de loin celui qui a été le plus étudié. Les résultats du reste sont assez décevants : l'effet de la rhizosphère sur Azotobacter est faible ou négatif (JENSEN, 1965). Il semble que parmi les nombreux facteurs auxquels a pu être attribué le faible développement d'Azotobacter dans la rhizosphère, le p^H soit le plus important (BROWN et coll., 1962).

Signalons enfin l'étude de Madame HAUKE PACEWICZOWA et coll. (1970), sur la fixation d'azote dans la rhizosphère du maïs. Ces chercheurs ont mis en évidence par la méthode de réduction de l'acétylène et à partir de fragments de racines, l'existence d'une interaction hautement significative, effet rhizosphérique x humidité, en ce qui concerne la fixation d'azote.

Nous avons eu l'idée de faire une étude analogue avec le riz, non plus avec des fragments de racines, mais avec des plantes entières.

I - Matériel expérimental et méthodes d'analyses

a) Matériel expérimental

Les expériences ont été conduites avec le riz IR 8 cultivé dans les trois sols déjà décrits. Pendant toute la durée de l'expérience,

les sols ont été maintenus sous une lame d'eau (submersion) et à l'abri de la lumière pour éviter le développement des algues (les tubes ont été recouverts de papier d'aluminium). La photopériode a été de 14 heures et l'intensité lumineuse d'environ 20 000 lux.

Signalons à ce sujet qu'une cuve en plastique remplie d'eau se trouvait sous les lampes, ce qui avait pour effet de filtrer une partie des rayons infra-rouges nocifs pour les plantes et d'absorber une partie de l'énergie lumineuse sous forme d'énergie calorifique. De plus, un humidificateur assurait une humidité correcte pour les plantes, et l'air ambiant était brassé par un ventilateur.

Pour chacun des sols, le dispositif expérimental a comporté deux traitements :

- microcolonnes de sol de 12 x 120 mm (tubes en pyrex) ensemencées avec une graine de riz prégermée (sol rhizosphérique)
- microcolonnes de sol de 12 x 120 mm non ensemencées (sol non rhizosphérique).

Le nombre de microcolonnes a été suffisant pour permettre d'effectuer cinq répétitions par mesure.

Remarque

L'utilisation de microcolonnes ainsi constituées pour l'étude de la fixation d'azote rhizosphérique présente un certain nombre d'avantages :

1) - Elles constituent une reproduction assez bonne des conditions naturelles. L'enracinement est suffisamment intense pour que la totalité du sol soit soumise à son influence, sans pour autant qu'on se limite à la rhizosphère proche : on peut parler de rhizosphère au sens large.

2) - L'intensité relative de l'enracinement permet de sortir des tubes l'ensemble de l'écosystème sol + plante en tirant simplement la plante.

3) - Leur encombrement est réduit et permet de placer sur une surface de 1 m² plusieurs centaines de tubes.

4) - La quantité de sol relativement faible (6 à 7 g de sol sec par tube) autorise les dosages d'azote par la méthode de Kjeldahl, donc une comparaison des deux techniques d'évaluation de la fixation d'azote.

En revanche ces microcolonnes ont aussi quelques défauts :

1) - En premier lieu, la croissance de la plante est limitée. Les plantules atteignent en 15 à 20 jours une hauteur de 20 cm environ, après quoi elles déclinent..

2) - Ces microcolonnes constituent un système clos (pas de drainage) rendant possible l'accumulation de substances toxiques.

b) Méthodes d'analyses

α - Méthode de réduction de l'acétylène

Chaque échantillon de sol rhizosphérique ou non rhizosphérique est placé dans un flacon serum de 140 ml fermé par un bouchon de caoutchouc étanche avec virolle. Dans chaque flacon, on fait le vide et l'on introduit le mélange gazeux argon-acétylène. Les flacons sont incubés à l'obscurité à 28° C et les mesures d'éthylène sont effectuées après 4 h, 8 h, et 24 h d'incubation, de façon à construire dans chaque cas, la courbe de réduction de l'acétylène en fonction du temps (l'expérience a montré que trois mesures pouvaient suffire pour établir cette courbe).

Les premières observations sur la fixation d'azote rhizosphérique (RINAUDO et coll., 1971) ont consisté à faire des analyses, 18 jours après le repiquage. Les courbes de production d'éthylène (fig. 33) font apparaître deux phases successives : une phase de latence au cours des premières heures d'incubation suivie d'une phase linéaire. Il est apparu, que la vitesse de fixation d'azote devait être déduite de la vitesse de réduction de l'acétylène correspondant à la phase linéaire (tableau 10). La phase de latence semble devoir être attribuée à l'oxygène de l'air qui, selon POSTGATE (1970) exerce un effet inhibiteur sur la nitrogénase, durant le transfert du sol des microcolonnes

Tableau 10 - FIXATION D'AZOTE DANS LA RHIZOSPHERE
(18 jours après le repiquage)

	Méthode de réduction de l'acétylène				Méthode de Kjeldahl				
	Vitesse de réduction (n moles C_2H_4 /g sol / h			Fixation d'azote correspondant à la vitesse de réduction à la 24ème heure (μ g N/g sol/j)	Teneur initiale en azote par micro- colonne (mg N)	Teneur finale en azote par microcolonne (mg N)		Fixation d'azote dans la rhizos- phère (*)	
	1ère heure	5ème heure	24ème heure			Sol seul	Sol + plante	(mg N/ microco- lonne	(μ gN/g sol/j)
Sol de DABOU rhizosphérique non rhizosphérique	0,568	4,840	22,80	<u>5,11</u>	17,00	17,10	17,77	0,32	<u>3,14</u>
	0,010	0,010	0,010	0,002	17,00	17,45	-		
Sol d'ABENGOUROU rhizosphérique non rhizosphérique	0,070	0,510	8,20	<u>1,84</u>	15,50	15,85	16,48	0,08	<u>0,74</u>
	0,005	0,005	0,005	0,001	15,50	16,40	-		
Sol de YAMOUSSOKRO rhizosphérique non rhizosphérique	0,371	3,710	13,00	<u>2,91</u>	11,35	11,50	12,12	0,27	<u>1,98</u>
	0,008	0,008	0,008	0,002	11,35	11,85	-		

(*) Différence entre l'augmentation de la teneur en azote dans le sol rhizosphérique, et la teneur en azote dans le sol non rhizosphérique.

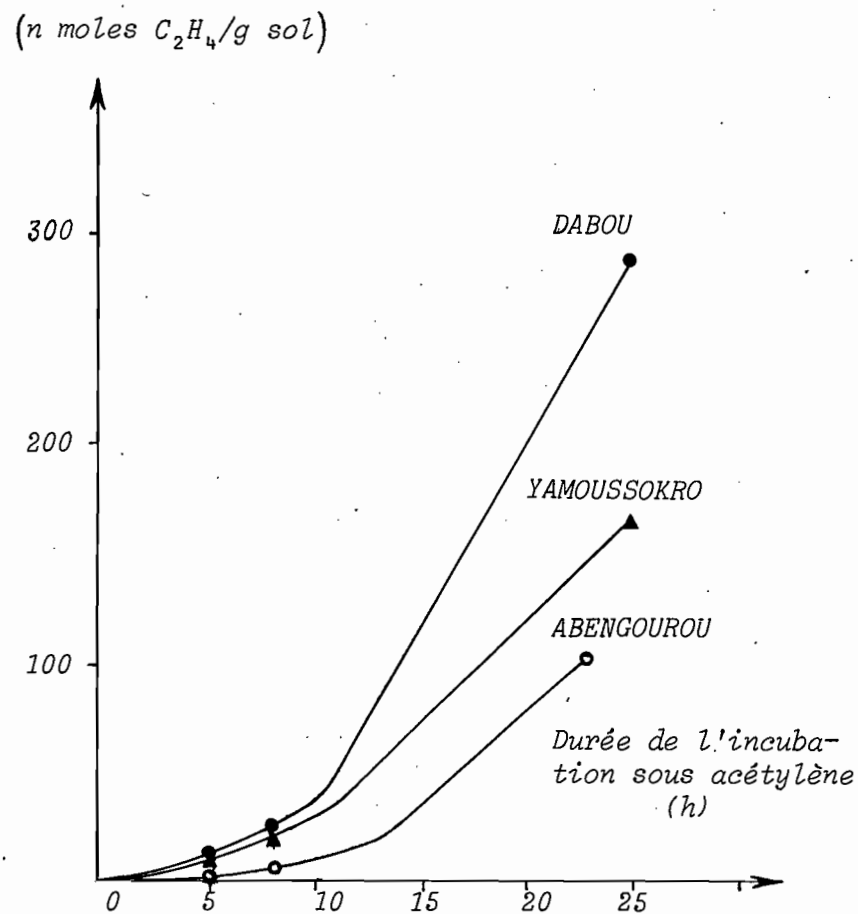


Fig. 33 - Mesure de production de l'éthylène dans la rhizosphère du riz, en fonction de la durée de l'incubation sous acétylène.

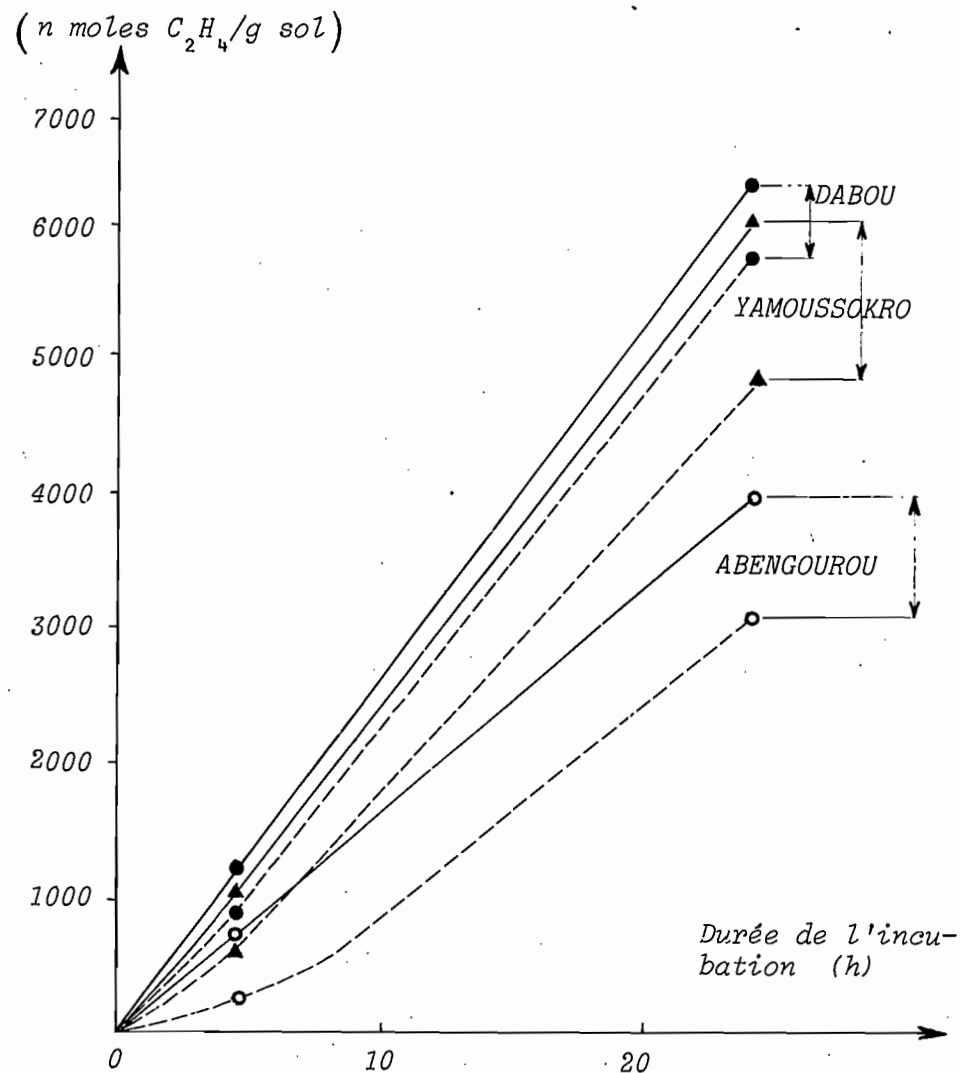


Fig. 34 - Influence de l'incorporation de l'oxygène au mélange gazeux argon-acétylène, sur la vitesse de production de l'éthylène en fonction de la durée de l'incubation sous acétylène.

— incubation sans oxygène
 --- incubation avec oxygène
 ($p_{O_2} = 0,1 \text{ atm.}$)

jusqu'aux flacons où l'on introduit le mélange argon-acétylène (switch/off - switch/on process). Nous avons voulu vérifier le bien fondé de cette hypothèse en traçant la courbe de production d'éthylène à partir de sols placés dans des flacons de 140 ml à raison de 20 g de sol (en poids sec) par flacon, soumis préalablement à 15 jours de submersion. L'incubation sous acétylène a consisté à introduire dans des flacons témoins un mélange argon-acétylène (A : 0,9 atm., C_2H_2 , 0,1 atm.) et, dans d'autres flacons un mélange argon-acétylène-oxygène (A : 0,8 atm., C_2H_2 0,1 atm., O_2 : 0,1 atm.). Les mesures ont été faites avec cinq répétitions.

Les résultats obtenus (fig. 34) sont clairs : quand le mélange gazeux ne contient pas d'oxygène, la courbe de production d'éthylène est pratiquement linéaire ; en présence d'oxygène, en revanche, on observe une période de latence suivie d'une phase linéaire dont la pente est approximativement égale à celle de l'essai correspondant sans oxygène. La phase de latence dans ce cas, ne peut être due qu'à l'oxygène. Elle cesse quand tout l'oxygène a été consommé.

Dans le cas de la mesure de la fixation d'azote rhizosphérique, il n'est pas certain que la phase de latence soit la conséquence exclusive de l'effet inhibiteur de l'oxygène sur la nitrogénase. Il est probable toutefois que ce facteur intervienne pour une part appréciable.

Remarque

Les mesures d'éthylène ont été effectuées après une période d'éclairement. Nous avons voulu savoir si une différence significative existait entre la vitesse de production de l'éthylène déterminée après une période d'éclairement, et cette vitesse déterminée après une période d'obscurité. Les résultats obtenus (tableau II) montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre ces deux vitesses. Par la suite nous ferons donc systématiquement les mesures d'éthylène, après la période d'éclairement.

Tableau 11 - VITESSE DE REDUCTION DE L'ACETYLENE DETERMINEE APRES UNE PERIODE
D'ECLAIREMENT (L) OU APRES UNE PERIODE D'OBSCURITE (O)

Sol de Dabou		Sol d'Abengourou		Sol de Yamoussokro	
L	O	L	O	L	O
14,7	20,2	4,5	8,5	9,4	11,2
16,1	18,6	7,0	6,3	11,2	10,1
14,6	16,8	5,9	4,1	15,6	13,5
19,3	14,3	9,2	5,2	7,8	8,9
18,8	16,6	8,6	6,2	11,4	10,0
14,7	17,1	6,3	7,3	12,3	8,2
<u>16,4</u>	<u>17,3</u>	<u>6,9</u>	<u>6,3</u>	<u>11,3</u>	<u>10,3</u>

N.B. 1 : La vitesse de réduction de l'acétylène est exprimée en n moles C_2H_4 /g sol/h

N.B. 2 : Les moyennes sont soulignées.

B - Méthode de Kjeldahl

L'estimation de la fixation d'azote dans la rhizosphère par la méthode de Kjeldahl a consisté à doser l'azote total dans le système "sol rhizosphérique + plante" et dans le système "sol non rhizosphérique", et à faire la différence entre ces deux données.

Dosage de l'azote dans le sol :

La totalité du sol contenu dans un tube est placée dans un erlen de 500 ml et portée à 300 ml avec de l'eau distillée. Dans le cas du sol rhizosphérique, l'ensemble sol + plante est agité dans environ 200 ml d'eau de manière à ce que le sol se sépare des racines, après quoi on lave soigneusement la plante avec des jets de pissettes afin de récupérer la totalité du sol. On ajuste alors à 300 ml. Le sol est dispersé par 15 mn d'agitation sur agitateur magnétique. La suite des opérations est alors celle que nous avons décrite plus haut.

Dosage de l'azote sur la plante :

L'azote est dosé séparément sur les racines et les parties aériennes. La plante entière est séchée à 70° environ. Racines et parties aériennes sont alors pesées séparément. Les dosages se font sur 30 mg de matière végétale.

Chaque mesure d'éthylène a donné lieu à cinq répétitions (5 microcolonnes). Les dosages d'azote n'ont été effectués que sur trois des cinq microcolonnes avec pour chacune trois dosages d'azote (soit au total 9 dosages d'azote par traitement et par type de matériel analysé).

2 - Fixation d'azote rhizosphérique en fonction de l'âge de la plante.

Les mesures de fixation d'azote par la méthode de réduction de l'acétylène se fondent sur le rapport molaire théorique " C_2H_2 réduit : N_2 " de 3 : 1. Nous avons signalé plus haut que certains auteurs avaient observé que ce rapport pouvait être différent de 3. Une étude récente de BERGERSEN (1970) montre que ce rapport est susceptible de variations importantes au cours de la croissance d'Azoto-

bacter vinelandii ou de Klebsiella aerogenes. Il est donc nécessaire de vérifier avec chaque type de matériel analysé, la validité de ce rapport molaire théorique. L'estimation de la validité de ce rapport ne peut-être faite en comparant simplement deux résultats obtenus, l'un par la méthode de réduction de l'acétylène, l'autre par la méthode de Kjeldahl, car par cette dernière méthode on intègre la totalité de l'azote fixé pendant toute la durée de l'expérience.

L'étude qui suit a eu précisément pour but de tracer la courbe des vitesses de fixation d'azote en fonction de l'âge de la plante, courbe à partir de laquelle on a calculé par intégration la fixation d'azote pendant le temps considéré, ce qui a rendu possible la comparaison des deux méthodes (RINAUDO et DOMMERGUES, 1971).

a) Mode opératoire

Nous avons préparé un nombre de microcolonnes suffisant pour pouvoir sacrifier cinq d'entre elles à chacune des six dates d'observations choisies (3ème ou 4ème jour, 7ème ou 8ème jour, 14ème, 21ème, 28ème et 35ème jour) afin de déterminer la vitesse de fixation de l'azote par la méthode de réduction de l'acétylène. L'estimation de la fixation de l'azote dans la rhizosphère par la méthode de Kjeldahl a consisté à doser au 35ème jour l'azote total dans le système "sol rhizosphérique + plante" et dans le système "sol non rhizosphérique", et à faire la différence entre ces deux données. Ces deux méthodes d'analyses ont été exposées en détail plus haut.

b) Résultats

α - Méthode de réduction de l'acétylène

Les vitesses de fixation journalière de l'azote déterminées par cette méthode, correspondant pour chacun des trois sols aux différents âges des plants de riz, ont été reportées au tableau I2, 3ème colonne.

Ces vitesses correspondent à la phase linéaire de production d'éthylène lors de l'incubation sous acétylène, pour les différents âges des plants de riz. A titre d'exemple, nous avons représenté dans le cas du sol de Dabou (fig. 35) les différentes courbes de vitesse de

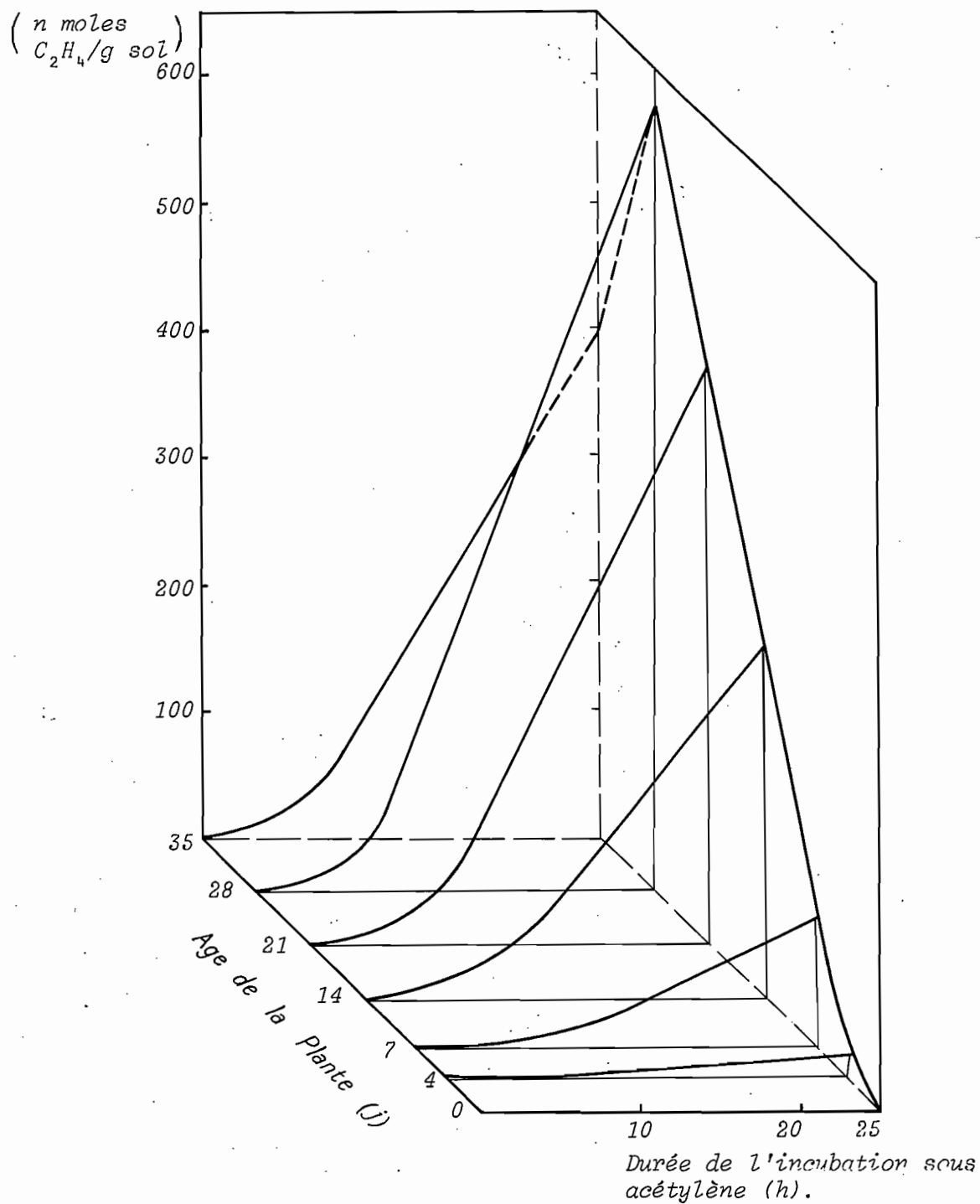


Fig. 35 - Mesure de production de l'éthylène dans la rhizosphère du riz, en fonction de la durée de l'incubation sous acétylène et de l'âge de la plante.

Vitesse de fixation de l'azote

(n moles C_2H_4 /
g sol/h)

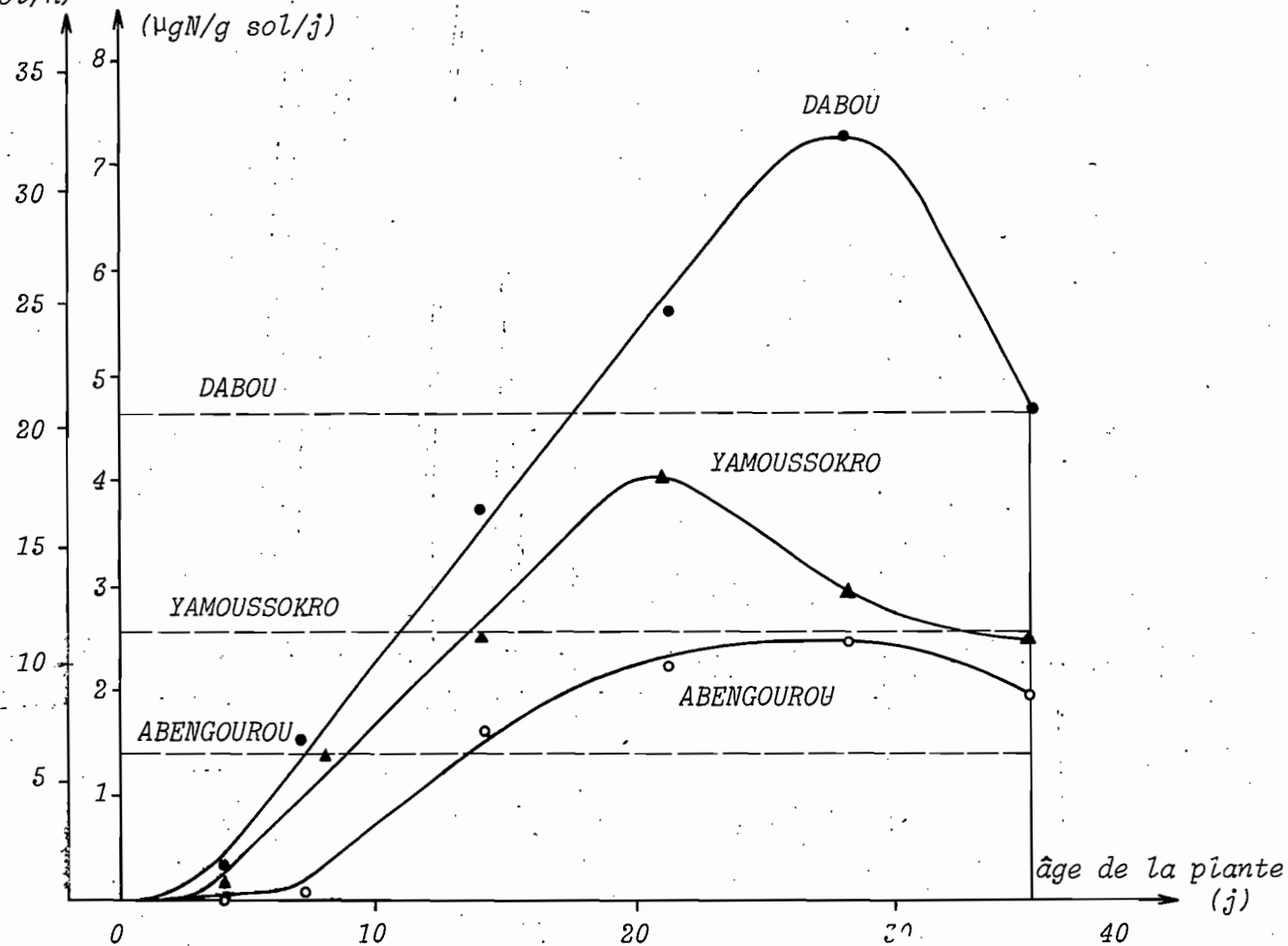


Fig. 36 - Mesure de l'activité fixatrice d'azote dans la rhizosphère du riz.

— vitesse déterminée par la méthode de réduction de l'acétylène.

--- vitesse moyenne déterminée par la méthode de Kjeldahl.

Tableau 12 : VITESSE DE FIXATION DE L'AZOTE DANS LA RHIZOSPHERE DU RIZ
(Méthode de réduction de l'acétylène)

	Age de la plante (j)	Vitesse de réduction de l'acétylène (n moles C_2H_4 /g sol/h)	Vitesse de fixation de l'azote (μg N/g sol/j)
Sol de Dabou	4	1,5	0,34
	7	6,7	1,50
	14	16,5	3,70
	21	25,0	5,60
	28	32,5	7,27
	35	21,0	4,70
Sol d'Abengourou	3	0,1	0,02
	7	0,3	0,07
	14	7,1	1,59
	21	9,9	2,22
	28	10,9	2,44
	35	8,5	1,90
Sol de Yamoussokro	4	0,6	0,13
	8	6,2	1,39
	14	11,2	2,51
	21	18,0	4,03
	28	13,2	2,95
	35	11,2	2,51

N.B. 1 - Pour transformer la vitesse de réduction de l'acétylène en vitesse de fixation de l'azote, on a adopté le rapport molaire théorique " $C_2H_2 : N_2$ réduit " de 3 : 1

N.B. 2 - La vitesse de réduction de l'acétylène dans les sols non rhizosphériques est négligeable : 0,007 à 0,0064 n moles C_2H_4 /g sol/h. pour le sol de Dabou ; 0,002 à 0,057 n moles C_2H_4 /g sol/h pour le sol d'Abengourou ; 0,014 à 0,057 n moles C_2H_4 /g sol/h pour le sol de Yamoussokro.

N.B. 3 - Chaque chiffre correspond à la moyenne de 5 mesures.

production d'éthylène. Les courbes de vitesses de fixation en fonction de l'âge du riz ont été construites pour les trois sols (fig. 36). Dans chaque cas, la fixation d'azote rhizosphérique en 35 jours est représentée par la surface comprise entre cette courbe et l'axe des abscisses.

β - Méthode de Kjeldahl

Les valeurs de fixation d'azote en 35 jours figurent pour chaque sol au tableau I3, 4ème colonne. A partir de ces valeurs, on a calculé la vitesse moyenne de fixation journalière (5ème colonne). On a reporté sur la figure 36, la valeur de la vitesse moyenne correspondant aux trois sols. Pour chacun d'eux, la fixation d'azote en 35 jours est représentée par la surface comprise entre cette valeur moyenne et l'axe des abscisses.

c) Conclusions

1) - Il ressort du tableau I4 que les résultats obtenus par la méthode de Kjeldahl et les résultats obtenus par la méthode de réduction de l'acétylène (avec estimation de la fixation fondée sur le rapport molaire théorique " $C_2H_4 : N_2$ réduit" de 3 : 1) sont très voisins. L'adoption du rapport molaire de 3 : 1 est donc justifiée dans le cas du système expérimental considéré (rhizosphère du riz). L'estimation de la fixation d'azote par la méthode de réduction de l'acétylène présente en outre sur la méthode de Kjeldahl l'avantage de permettre l'évaluation précise de la fixation d'azote pour des laps de temps très courts alors que la méthode de Kjeldahl est difficilement applicable dans ces conditions. Afin de faciliter la comparaison de nos résultats avec ceux publiés par d'autres auteurs, nous les avons exprimés en fonction des rapports molaires calculés (tableau I5).

2) - La présente étude montre d'autre part la nécessité de mesurer la vitesse de réduction de l'acétylène à des intervalles de temps assez rapprochés pour tracer la courbe de fixation de l'azote en fonction de l'âge de la plante, courbe à partir de laquelle on calcule par intégration la fixation pendant la période considérée.

Tableau 13 - FIXATION DE L'AZOTE DANS LA RHIZOSPHERE DE PLANTS DE RIZ

AGES DE 35 JOURS

(Méthode de Kjeldahl)

	Teneur en azote des microcolonnes au 35ème jour (mg N/microcolonne)		Fixation de l'azote dans la rhizosphère		
	non plantées (sol non rhizosphérique)	plantées (sol rhizos- phérique + plante)	en mg N par microcolonne en 35 j	en µg N par g de sol en 35 j	en µg N par g de sol et par jour
Sol de Dabou	17,50	18,43	0,93	164,0	4,69
Sol d'Abengourou	16,45	16,75	0,30	49,8	1,42
Sol de Yamoussokro	12,02	12,70	0,68	90,0	2,57

Tableau 14 - FIXATION DE L'AZOTE EN 35 JOURS DANS LA RHIZOSPHERE DU RIZ DETERMINEE
PAR LA METHODE DE REDUCTION DE L'ACETYLENE ET PAR LA
METHODE KJELDAHL ($\mu\text{g N/g sol}$)

	Méthode de réduction de l'acétylène	Méthode de Kjeldahl
Sol de Dabou	144,0	164,0
Sol d'Abengourou	52,1	49,8
Sol de Yamoussokro	82,1	90,0

N.B. On a fondé l'estimation de la fixation d'azote sur le rapport molaire
théorique " C_2H_4 : N_2 réduit" de 3 : 1

Tableau 15 : RAPPORTS MOLAIRES " C_2H_2 : N_2 REDUITS" CALCULES A PARTIR
DES DONNEES EXPERIMENTALES

	Fixation de l'azote en 35 jours		Rapport molaire calculé
	Méthode de réduction de l'acétylène (n moles C_2H_2 /g sol/35 j)	Méthode de Kjeldahl (n moles N/g sol/35 j)	
Sol de Dabou	15 420	5 860	2,64
Sol d'Abengourou	5 580	1 780	3,14
Sol de Yamoussokro	8 790	3 210	2,74

3) - La hauteur de sol dans les microcolonnes est de 9 cm environ. Si on extrapole les vitesses maximales de fixation d'azote rhizosphérique mesurées par la méthode de réduction de l'acétylène, à l'hectare de rizière, on obtient pour un poids de sol de 1 500 t, les chiffres d'azote fixés suivants :

330 Kg N/ha/mois	dans le sol de Dabou
110 Kg N/ha/mois	dans le sol d'Abengou-
180 Kg N/ha/mois	dans le sol de ^{rou} Yamoussokro

Il est bien évident que l'on ne peut faire valablement une telle extrapolation car les proportions de sol et de racines ne sont pas les mêmes sur le terrain et dans les microcolonnes utilisées au laboratoire.

Ces résultats toutefois nous permettent d'affirmer que la fixation d'azote au niveau de la rhizosphère est importante. On remarquera en particulier que la vitesse de fixation augmente rapidement avec l'âge de la plante. Elle ne décline dans les conditions expérimentales présentes qu'en raison de l'épuisement des éléments nutritifs présents dans le sol. Il est probable que dans les conditions de terrain la vitesse de fixation rhizosphérique progresse pendant une période plus longue.

4) - Les analyses d'azote par la méthode de Kjeldahl nous montrent (tableau 10) que la teneur en azote dans le sol seul est plus faible dans le système sol rhizosphérique que dans le système sol non rhizosphérique, en raison de la nutrition azotée de la plante. Toutefois, les gains en azote du système "sol rhizosphérique" sont sensiblement égaux à la teneur en azote des parties aériennes dans les sols de Dabou et Yamoussokro. Ils ne sont inférieurs, que pour le sol d'Abengourou. Autrement dit, ces résultats semblent indiquer que les exportations d'azote par les récoltes pourraient être en grande partie compensées par la fixation d'azote rhizosphérique.

Remarque

On pourrait objecter que la comparaison de la méthode de réduction de l'acétylène avec la méthode de Kjeldahl n'est pas valable car la première méthode ne permet d'apprécier que la fixation d'azote brute, sans tenir compte des pertes d'azote par dénitrification,

En fait, nous pensons que certaines pertes ont du effectivement avoir lieu encore que les conditions très réductrices dans les microcolonnes ont sans doute limité fortement la production de nitrates.

Mais ces pertes par dénitrification, même dans la mesure où elles seraient appréciables, ont également lieu dans les deux traitements (sol rhizosphérique et sol non rhizosphérique). Elles doivent pratiquement s'annuler quand on fait la différence entre les teneurs en azote des deux traitements, et c'est cette différence que l'on utilise pour comparer les deux méthodes. Dans ces conditions, la comparaison de ces deux méthodes nous paraît valable.

3 - Effet de la coupe sur la fixation d'azote rhizosphérique

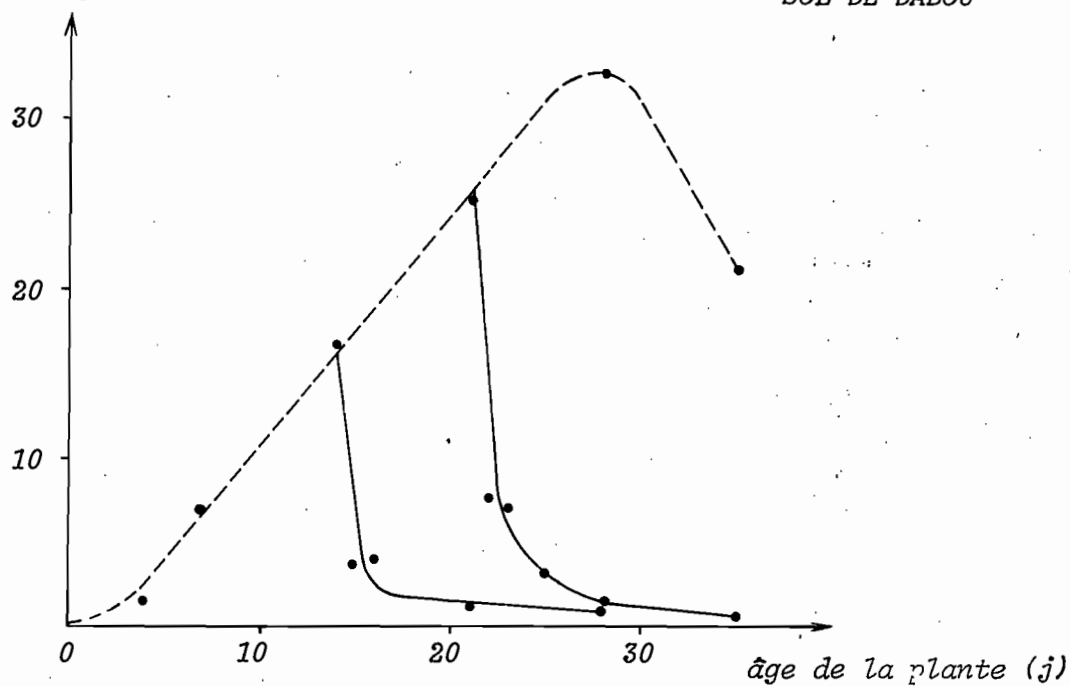
Au cours de la même étude, nous avons mesuré la vitesse de fixation après la coupe des parties aériennes. Cette coupe est intervenue au 14ème jour et au 21ème jour. On a reporté sur la figure 37 les valeurs des vitesses de fixation dans les jours qui suivent la coupe. Dans les trois sols, l'effet de la coupe est très net : la vitesse de fixation baisse en moyenne de 80 % dans les 24 heures qui suivent la coupe ; elle devient pratiquement négligeable après 5 jours. Cette expérience met bien en évidence l'effet positif des exsudats racinaires sur l'activité fixatrice d'azote. Quand la plante meurt, l'exsudation cesse et l'activité fixatrice devient à peu près nulle. Un autre facteur favorable à la fixation d'azote dans la rhizosphère du riz peut être aussi l'épuisement de l'azote ammoniacal par les racines, ce qui a pour effet de lever l'effet inhibiteur de cet élément sur la fixation d'azote.

E. CONCLUSIONS

La méthode de réduction de l'acétylène nous a permis d'apprécier à partir de sols enrichis en glucose, l'effet de l'oxygène et de l'apport d'azote ammoniacal sur la fixation d'azote.

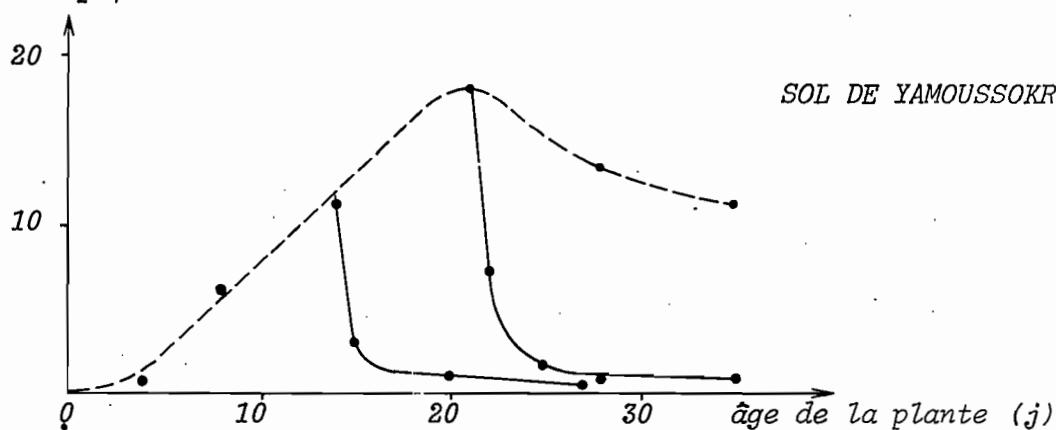
(n moles C_2H_4/g sol/h)

SOL DE DABOU



(n moles C_2H_4/g sol/h)

SOL DE YAMOUSSOKRO



(n moles C_2H_4/g sol/h)

SOL D'ABENGOUROU

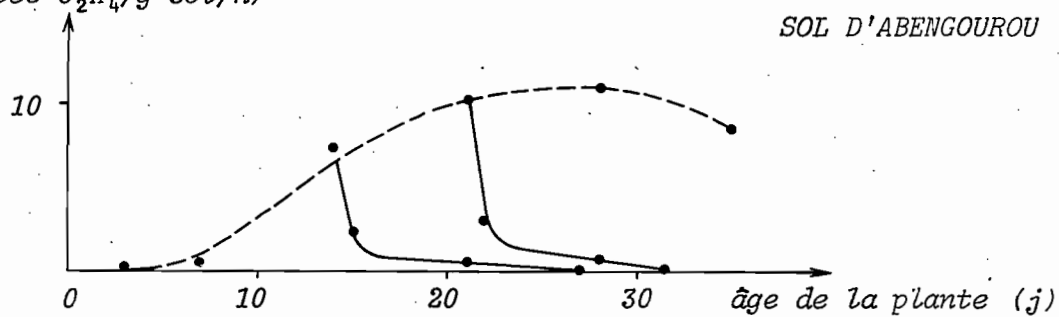


Fig. 37 - Influence de la coupe sur l'activité fixatrice d'azote dans la rhizosphère du riz.

--- plante entière
— plante coupée

1) - L'effet inhibiteur de l'oxygène est fonction de la pression partielle de ce gaz dans le milieu ; il est déjà appréciable à des pressions partielles aussi faibles que 0,01 atm.

2) - De même, l'addition aux sols d'azote ammoniacal diminue ou arrête la fixation d'azote. Il semble toutefois que sans cet apport extérieur, l'azote ammoniacal natif n'ait pas un effet inhibiteur très marqué. Compte tenu des concentrations élevées en azote ammoniacal natif, tout se passe comme s'il existait un seuil relativement élevé en azote combiné en-deçà duquel les microorganismes fixateurs auraient à la fois la possibilité d'assimiler cet azote combiné (immobilisation) et de fixer l'azote moléculaire.

En outre, les mesures de fixation brute d'azote par la méthode de réduction de l'acétylène nous ont permis d'apprécier l'importance relative des trois principaux facteurs énergétiques qui sont à l'origine de la fertilité élevée des sols de rizières : débris végétaux, lumière, "effet rhizosphère".

- La décomposition des pailles et des racines donne lieu à une fixation d'azote de faible importance. Mais cet effet est durable et ne peut donc être tenu pour négligeable.

- L'énergie lumineuse permet une activité fixatrice d'azote très forte, par l'ensemble des microorganismes photosynthétiques fixateurs d'azote (cyanophycées et bactéries du cycle du soufre). Il est permis de penser aussi que les algues non fixatrices libèrent une certaine quantité de substrats énergétiques stimulant l'activité des fixateurs hétérotrophes. Mais l'effet de la lumière se limite à une mince pellicule à la surface du sol.

- La fixation d'azote au niveau de la rhizosphère du riz est d'un niveau remarquablement élevé. En raison de l'épaisseur de sol prospectée par les racines et de la densité de celles-ci, il ne fait pas de doute que "l'effet rhizosphère" soit le facteur majeur qui explique la fertilité élevée des sols de rizières.

De plus, l'étude comparative de la fixation d'azote rhizosphérique par la méthode de réduction de l'acétylène et par la méthode de Kjeldahl, nous a permis de confirmer la validité du rapport

molaire théorique " C_2H_4 : N_2 réduit" de 3 : 1.

Enfin, si l'on classe les trois sols en fonction de leurs aptitudes à fixer l'azote atmosphérique, Dabou est le sol qui donne les meilleurs résultats ; viennent ensuite les sols de Yamoussokro, puis d'Abengourou.

CONCLUSIONS GENERALES

oooooooooooo

Il est bien connu que la fertilité des sols de rizières peut se maintenir longtemps à un niveau élevé sans apports d'engrais azotés. Comme les exportations d'azote par les récoltes sont importantes, on peut supposer qu'elles sont compensées par une fixation de l'azote atmosphérique du même ordre de grandeur.

L'étude de la fixation biologique de l'azote dans ces écosystèmes est donc d'un grand intérêt.

Nous avons pour cela, choisi trois rizières de Côte d'Ivoire, situées respectivement à Dabou, Abengourou et Yamoussokro, et représentatives de trois grands types de sols aptes à la riziculture irriguée :

- grandes vallées alluviales de Basse Côte d'Ivoire (type:Dabou),
- bas-fonds de Moyenne Côte d'Ivoire sur schistes (type : Abengourou),
- bas-fonds de Moyenne Côte d'Ivoire sur granites (type : Yamoussokro).

Une étude préalable in situ, nous a permis d'apprécier l'incidence des pratiques culturales sur l'activité fixatrice des sols de rizières. Ainsi, la submersion a pour effet de créer des conditions particulièrement favorables à la fixation d'azote , en élevant le pH de ces sols jusqu'à des valeurs relativement proches de la neutralité et en induisant l'établissement d'un milieu semi-anaérobie. De plus, on observe après l'enfouissement des pailles et la mise en eau, une augmentation de la teneur en azote total des sols, associée à une libération de substrats énergétiques, libération que l'hydropériodisme doit accentuer.

En revanche, l'établissement de conditions réductrices provoque l'accumulation d'azote ammoniacal susceptible d'exercer sur la fixation d'azote un effet inhibiteur : il semble qu'il y ait une corrélation négative entre les variations de l'azote ammoniacal et les variations de l'activité fixatrice potentielle.

La fixation d'azote paraît être essentiellement le fait des Glostridium et des Cyanophycées dont les densités sont fortes dans les trois sols (de l'ordre de 10^5 par g de sol). Les Azotobacter ne semblent pouvoir jouer un rôle appréciable qu'à Yamoussokro en raison d'un pH voisin de la neutralité. Les densités en Azotobacter y sont alors particulièrement élevées (de l'ordre de 10^5) et l'espèce dominante est A. chroococcum. En revanche, dans les sols de Dabou et Abengourou, dont le pH est plus acide, les densités en Azotobacter sont plus réduites (de l'ordre de 10^3) et on trouve essentiellement A. beijerinckii, bactérie plus tolérante qu'A. chroococcum vis à vis de pH moyennement acides (pH 5,5).

Les mesures effectuées in situ ont eu pour intérêt majeur de poser un certain nombre de problèmes précis. Toutefois, elles ne pouvaient à elles seules les résoudre. En particulier, nous n'avons pu évaluer la part des microorganismes photosynthétiques dans l'enrichissement en azote, ou l'effet de l'exsudation racinaire. De même, nous n'avons pu conclure sur la fertilité comparée des trois types de sols de rizières. Il est donc apparu souhaitable de compléter ces observations par des études complémentaires au laboratoire.

Ces études ont consisté à mesurer dans des sols ou des modèles placés dans des conditions d'incubation contrôlées en présence ou en l'absence de plante, la fixation d'azote nette par la méthode de Kjeldahl et la fixation brute par la méthode de réduction de l'acétylène.

Les faits suivants ont pu être mis en évidence :

- 1 - La submersion favorise incontestablement l'activité fixatrice des sols de rizières. L'effet le plus net est observé avec le sol de Dabou.
- 2 - L'hydropériodisme a, dans l'ensemble, un effet encore plus net qu'une submersion constante, en particulier dans le sol d'Abengourou.
- 3 - L'oxygène exerce sur la fixation d'azote un effet inhibiteur déjà appréciable à des pressions partielles aussi faibles que 0,01 atm.
- 4 - De même, l'addition aux sols d'azote ammoniacal freine ou arrête la fixation d'azote. Si l'azote ammoniacal est apporté en même temps que des substrats énergétiques, on peut observer des pertes nettes d'azote vraisemblablement dues à la dénitrification, en particulier dans le sol d'Abengourou.

Il semble toutefois que sans cet apport d'azote extérieur, l'azote ammoniacal natif n'ait pas un effet inhibiteur très marqué malgré les concentrations élevées généralement observées dans ces sols (60 à 100 ppm N-NH_4). Ceci implique l'existence d'un seuil relativement élevé en azote ammoniacal, en deçà duquel les microorganismes auraient à la fois la possibilité d'assimiler l'azote combiné et de fixer l'azote moléculaire ; au delà de ce seuil, l'activité fixatrice diminue très rapidement, et des pertes par dénitrification peuvent apparaître. On peut se demander, à ce propos, si les quantités importantes d'engrais azotés apportées aux sols, ne pourraient sinon être supprimées, du moins être réduites (en particulier à Dabou, où les concentrations en azote ammoniacal sont les plus fortes). En effet, outre le fait qu'elles paraissent excessives, elles contribuent sans doute à réduire l'activité fixatrice.

- 5 - Les résidus végétaux (pailles ou racines) donnent lieu à une activité fixatrice moins importante qu'on aurait pu le penser. Toutefois leur effet est durable (la libération de substrats énergétiques est lente) et ne peut donc être tenu pour négligeable.

6 - L'énergie lumineuse permet en revanche une intense activité fixatrice d'azote par les microorganismes photosynthétiques, au premier rang desquels se situent les cyanophycées. Toutefois, "l'effet lumière" n'est appréciable qu'au niveau de la surface des sols.

7 - Enfin, la fixation d'azote au niveau de la rhizosphère est d'un niveau remarquablement élevé, en particulier dans le sol de Dabou. En raison de l'épaisseur de sol prospectée par les racines, et de la densité de l'enracinement, "l'effet rhizosphère" paraît être le facteur majeur de l'enrichissement en azote des sols de rizières.

L'étude comparative de la fixation d'azote rhizosphérique par la méthode de réduction de l'acétylène et par la méthode de Kjeldahl, nous a permis de confirmer la validité du rapport molaire théorique " $C_2H_4 : N_2$ réduit" de 3 : 1, dans cet écosystème.

Des trois types de sols de rizières étudiés, le sol de Yamoussokro est celui dont le pH est le plus favorable à l'activité fixatrice d'azote. Du reste, ce sol est le mieux pourvu en microorganismes fixateurs, puisque, outre des densités élevées en Clostridium et en Cyanophycées, on y trouve de fortes densités en Azotobacter. Mais en fait, il est apparu que le sol le plus intéressant du point de vue de la fixation d'azote est celui de Dabou, malgré un pH moyennement acide. Les remarquables aptitudes de ce sol semblent devoir être attribuées à de très bonnes caractéristiques chimiques.

Le sol d'Abengourou, qui, du point de vue chimique est le plus pauvre, est aussi celui dont les aptitudes à s'enrichir en azote sont les plus limitées.

REFERENCES

.....

- AMER (F.M.), BARTHOLOMEW (W.V.), 1951 .- Influence of oxygen concentration in soil air on nitrification. Soil Sci., 71, 215-219.
- ALLEN (M.B.), 1956 .- Photosynthetic nitrogen fixation by blue green algae. Sci. monthly, 83, 100-106.
- ALLISON (F.E.), HOOVER (S.R.), 1935.- Conditions which favor nitrogen fixation by a blue green algae. Transl. 3rd Int. Congr. Soil Sci., 1, 145-47.
- AOMINE (S.), 1962.- A review of research on redox potentials of paddy soils in Japan. Soil Sci., 94, 1, 6-13.
- BAUZON (D.), VAN DEN DRIESSCHE (R.), DOMMERGUES (Y.), 1968 .- Caractérisation respirométrique et enzymatique des horizons de surface des sols forestiers. Science du Sol, 2, 55-78.
- BAYLISS (N.S.), 1956.- The thermochemistry of biological nitrogen fixation. Aust. J. Biol. Sci., 9, 364-370.
- BECKING (J.H.), 1959.- Nitrogen-fixing bacteria of the genus *Beijerinckia* in South African soils. Plant and Soil, 11, 3, 193-206.
- BECKING (J.H.), 1961 .- Studies on nitrogen-fixing bacteria of the genus *Beijerinckia*. I- Geographical and ecological distribution in soils. Plant and Soil, 14, 1, 49-81.
- BERGERSEN (F.J.), 1969.- Nitrogen fixation in legume root nodules. Biochemical studies with soybean. Proc. Roy. Soc. London B, 172, 401-416.
- BERGERSEN (F.J.), 1970.- The quantitative relationship between nitrogen fixation and the acetylene reduction assay. Aust. J. Biol. Sci. (sous presse).
- BIRCH (H.F.), 1958.- The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 1, 9-31.
- BJALFVE (G.), 1957.- Fixation of atmospheric nitrogen (3). Grund für battring, 10, 183-192.
- BRADFIELD (R.), BATJER (L.P.), OSKEMP (J.), 1934 .- Soils in relation to fruit growing in New-York. 4 - The significance of the oxidation reduction in evaluating soils for orchard purposes. Cornell. Univ. Agric. Exp. Sta. Bull., 592.

- BREMNER (J.M.), SHAW (K.), 1958 .- Denitrification in soil. I - Methods of investigation, J. Agric. Sci. 51, 22-39. II - Factors affecting denitrification. J. Agric. Sci., 51, 40-52.
- BROADBENT (F.E.), 1951 .- Denitrification in some Californian soils. Soil Sci., 72, 129-137.
- BROUZES (R.), MAYFIELD (C.I.), KNOWLES (R.), 1971 .- Effect of oxygen partial pressure on nitrogen fixation and acetylene reduction in a sandy loam amended with glucose. Plant and Soil (sous presse).
- BROWN (M.E.), BURLINGHAM (S.K.), JACKSON (R.M.), 1962.- Studies on Azotobacter species in soil. 2 - Populations of Azotobacter in the rhizosphere and effects of artificial inoculation. Plant and Soil, 17, 320-332.
- BURCK (D.), 1934.- Azotase and nitrogenase in Azotobacter. Ergeb. Enzymforsch., 3, 23-56.
- BURRIS (R.H.), 1969 .- Progress in the biochemistry of nitrogen fixation. Proc. Roy. Soc. B, 172, 317-347.
- CALDER (E.A.), 1959 .- Nitrogen fixation in a Uganda swamp soil. Nature, 184-746.
- CASIDA (L.E.), KLEIN (D.A.), SANTORO (T.), 1964.- Soil deshydrogenase activity. Soil Sci., 98, 6, 371-376.
- DALTON (H.), POSTGATE (J.R.), 1969.- Growth and physiology of Azotobacter chroococcum in continuous culture. J. Gen. Microbiol., 56, 307-319.
- DE (P.K.), 1936 .- The nitrogen supply of rice. I - Fixation of nitrogen in rice soils under waterlogged conditions. Ind. J. Agric. Sci., 6, 1237-1245.
- DE (P.K.), 1939 .- The role of blue-green algae in nitrogen fixation in rice fields. Proc. Soc. London, Ser. B, 127, 846, 121-139.
- DE (P.K.), SULAIMAN (M.), 1950.- Influence of algal growth in rice fields on the yield of crops. Ind. J. Agric. Sci., 20, 324-342.
- DE BARJAC (H.), 1954 .- Ann. Inst. Pasteur, 87, 440.

- DE GEE (J.C.), 1950 .- Preliminary oxidation potential. Determination in a "Sawah" profil near Bogor (Java). C.R. 4th Congr. Soil Sci., Amsterdam, vol. 1.
- DENNETT (J.H.), 1932 .- A preliminary note on the reaction of paddy soils. Malayan Agric. J., 20, 518.
- DILWORTH (M.), 1966 .- Acetylene reduction by nitrogen-fixing preparations from *Clostridium pasteurianum*. Biochim. Biophys. Acta, 127, 285-294.
- DILWORTH (M.J.), 1970 .- The acetylene reduction method for measuring biological nitrogen fixation. Rhizobium Newsletter, 15, 1,7-15.
- DOMMERGUES (Y.), 1960 .- La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. Agron. Tropicale, 15, 211-216.
- DOMMERGUES (Y.), 1963.- Distribution des *Azotobacter* et des *Beijerinckia* dans les principaux types de sols de l'Ouest Africain. Ann. Inst. Pasteur, 105, 179-187.
- DOMMERGUES (Y.), MANGENOT (F.), 1970.- Ecologie microbienne du sol. Masson & Cie, Editeur.
- FAY (P.), 1965 .- Heterotrophy and nitrogen fixation in *Chlorogloea fritschii*. J. Gen. Microbiol., 39, 1, 11-20.
- GOTOH (S.), YAMASHITA (K.), 1966 .- Oxidation-reduction potentials of a paddy soil in situ, with special reference to the production of ferrous iron, manganous manganese and sulfide. Soil Sci. Plant Nutr., 12, 6, 24-32.
- HARDY (R.W.F.), HOLSTEN (R.D.), JACKSON (E.K.), BURNS (R.C.), 1968.- The acetylene-ethylene assay for N_2 -fixation : laboratory and field evaluation. Plant Physiol., 43, 1185-1207.
- HARDY (R.W.F.), KNIGHT (E. Jr.), 1967 .- ATP dependent reduction of azode and HCN by N_2 -fixing enzymes of *Azotobacter vinelandii* and *Clostridium pasteurianum*. Biochim. Biophys. Acta, 139, 69-90.
- HAUCKE-PACEWICZOWA (T.), BALANDREAU (J.), DOMMERGUES (Y.), 1970 .- Fixation microbienne de l'azote dans un sol salin Tunisien. Soil Biol. Biochem. 2, 47-53.

- HILGER (F.), 1964.- Comportement des bactéries fixatrices d'azote du genre Beijerinckia à l'égard du pH et du calcium. Ann. Inst. Pasteur, 106, 279-291.
- JACKSON (M.L.), 1960.- Soil chemical analysis. Prentice-Hall inc. Englewood Cliffs, N.J.
- JACKSON (W.A.), 1967.- Physiological effects of soil acidity. In "Acidity and Liming". Agron. Monogr. n°12 (R.W. Pearson and F. Adams, eds), pp 43-124. American Society of Agronomy, Madison.
- JACQ (V.), 1970.- Facteurs édaphiques régissant la sulfato-réduction rhizosphérique et la sulfato-réduction spermosphérique. Thèse Doct. spécialité. Pédologie. Fac. Sci. Nancy.
- JENSEN (H.L.), 1950.- A survey of biological nitrogen fixation in relation to the world supply of nitrogen. Transl. 4th Int. Congr. Soil Sci., 1, 165-172.
- JENSEN (H.L.), 1965.- Non symbiotic nitrogen fixation. In "Soil Nitrogen". Agron. Monogr. n°10 (W.V. Bartholomew and F.E. Clark, eds), pp. 436-480. American Society of Agronomy, Madison.
- JURGENSEN (M.F.), DAVEY (C.B.), 1970.- Non symbiotic nitrogen-fixing microorganisms in acid soils and the rhizosphere. Soils and Fertil., 33, 5, 435-446.
- KATZNELSON (H.), 1965.- Nature and importance of the rhizosphere. In "Ecology of soil borne plant pathogens". (K.F. Baker and W.C. Synder, eds.), pp. 187-207. Univ. California Press, Berkeley.
- KOYAMA (T.), 1964.- Biogeochemical studies on lake sediments and paddy soils, and the production of atmosphere methane and hydrogen. Recent Res. in the fields of hydrosphere, atmosphere and nuclear Geochemistry, 143-177.
- KRATZ (W.A.), MYERS (J.), 1955.- Nutrition and growth of several blue-green algae. Am. J. Botm, 42, 282-287.
- LAMOTTE (M.), 1967.- Initiation aux méthodes statistiques en biologie. Masson & Cie.
- MAKRINOFF 1933.- Arch. Biol. Nank., 33, 367.

- MITSUI (S.), 1949 .- Nature of akiuchi (autumn-decline of rice plants), and its amelioration. Agriculture and Horticulture, 24, 173-176.
- MOORE (A.W.), 1966.- Non symbiotic nitrogen fixation in soil and plant systems. Soils and Fertil., 29, 113-128.
- MORTIMER (C.H.), 1942 .- The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. J. Ecol., 26, 180-193.
- MOURARET (M.), 1968 .- Communication personnelle.
- NOMMIK (H.), 1956 .- Investigations on denitrification in soil. Acta Agric. Scand., 6, 195-228.
- OKUDA (A.), YAMAGUCHI (M.), 1952 .- Algae and atmospheric nitrogen fixation in paddy soil. I. Classification of algae, nitrogen fixation under waterlogged conditions, and distribution of blue-green algae. Mem. Res. Inst. Food Sci., Kyoto Univ., 2, 1-14.
- OKUDA (A.), YAMAGUCHI (M.), 1956 .- Nitrogen-fixing microorganisms in paddy soils. 2. Distribution of blue-green algae in paddy soils and the relationship between the growth of them and soil properties. Soil and Plant Food, 2, 4-7.
- OULIE (B.), 1970 .- La réduction microbienne de l'acétylène en éthylène : contribution à l'étude d'une méthode de mesure de la fixation d'azote dans le sol. D.E.A. Pédologie, Fac. Sci. Nancy.
- PARKER (C.A.), 1953 .- Non symbiotic nitrogen fixation and the nitrogen status of agricultural soils. Aust. Conf. Soil Sci. Adelaide, 1, 3-6.
- PARKER (C.A.), SCUTT (P.B.), 1960 .- The effect of oxygen on nitrogen fixation by Azotobacter. Biochim. Biophys. Acta, 38, 230-238.
- PEECH (M.), BOYNTON (D.), 1937 .- Soils in relation to fruit growing in New-York. 10. Susceptibility of various orchard soils to reduction upon waterlogging. Cornell Univ. Agric. Exp. Sta. Bull., 667.
- PICHINOTY (F.), 1965 .- L'inhibition par l'oxygène de la dénitrification bactérienne. Ann. Inst. Pasteur, suppl. n° 3, 248-255.
- POCHON (J.), DE BARJAC (H.), 1958 .- Traité de Microbiologie du sol. Dunod, Paris.

- POCHON (J.), TARDIEUX (P.), 1962 .- Techniques d'analyse en microbiologie du sol. Editions de la Tourelle, St-Mandé, Seine.
- POCHON (J.), TCHAN (Y.T.), 1946 .- Ann. Inst. Pasteur, 72, 824.
- PONNAMPERUMA (F.N.), MARTINEZ (E.), LOY (T.), 1966 .- Influence of redox potential and partial pressure of carbon dioxide on pH values and the suspension effect of flooded soils. Soil Sci., 101, 6, 421,431.
- POSTGATE (J.R.), 1970 .- Communication personnelle.
- QUISPEL (A.), 1947 .- Measurement of the oxidation-reduction potentials of normal and innundated soils. Soil Sci., 63,265-275.
- RINAUDO (G.), BALANDREAU (J.), DOMMERGUES (Y.), 1971.- Algal and bacterial non symbiotic nitrogen fixation in paddy soils. Plant and Soil (Sous presse).
- RINAUDO (G.), DOMMERGUES (Y.), 1971 .- Validité de l'estimation de la fixation biologique de l'azote dans la rhizosphère par la méthode de réduction de l'acétylène. Ann. Inst. Pasteur (sous presse).
- RIVIERE (A.), 1959 .- Etats d'oxydo-réduction dans les milieux naturels. Technique de détermination directe du rH. Quelques résultats en milieu lagunaire. Cahiers Océanographiques, n° 5, 309-314.
- ROMANOFF (M.), 1945 .- Effect of aeration on hydrogen-ion concentration of soils in relation to identification of corrosive soils. J. Res. Nat. Bur. standards, 34, 227-241, Res. paper n° 1639.
- ROUQUEROL (T.), 1962 .- Sur le phénomène de fixation de l'azote dans les rizières de Camargue. Ann. Agron., 13, 4, 325-346.
- ROUQUEROL (T.), 1964 .- Sur l'activité des fixateurs d'azote dans les sols du delta de Camargue. Application d'une technique de mesure de capacité potentielle de fixation. Ann. Agron., 15, 6, 599-617.
- ROUQUEROL (T.), 1965 .- Variations sur le pouvoir fixateur des sols de rizières de Camargue. Ann. Inst. Pasteur, supp. n° 3, 293-300.
- RCVIRA (A.D.), 1965 .- Interactions between plant roots and soil micro-organisms. Ann. Rev. Microbiol., 19, 241-266.

- RUSSEL (J.S.), 1962 .- Estimation of the time factor in soil organic matter equilibrium under pastures. Transl. Int. Soil Congr.N.Z.,191-196.
- SALEH-RASTINE (N.), 1968 .- Contribution à l'étude des glucides libres dans les sols de rizières. Thèse Doctorat de Spécialité, Fac. Sci. Montpellier.
- SCHAEFFER (R.), 1963.- L'activité déshydrogénasique comme mesure de l'activité biologique globale des sols. Ann. Inst. Pasteur, 105, 326-331.
- SCHOLLENBERGER (C.J.), 1928 .- Manganese as an active base in the soil. Soil Sci., 25, 357-358.
- SCHÖLLHORN (R.), BURRIS (R.H.), 1966 .- Study of intermediates in nitrogen fixation. Federation Proc., 24, 710.
- SCOTT (A.D.), EVANS (D.D.), 1955 .- Dissolved oxygen in saturated soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 19, 7-12.
- SHIOIRI (M.), AOMINE(S.), 1938-1940 .- Nitrogen transformations in paddy soils. J. Sci. Soil Manure, Japan : 12, 406-410, 1938
13, 284-287, 1939
14, 368-370, 1940.
- SHIOIRI (M.), AOMINE (S.), 1940 .- Bull. of the Imperial Agricultural Exp. Station, Japan. (An extra report).
- SHREVEN (D.A.) Van , 1965 .- Quelques aspects microbiologiques du métabolisme de l'azote dans le sol. Ann. Inst. Pasteur, suppl. n° 3, 19-49.
- SINGH (R.N.), 1942 .- The fixation of elementary nitrogen by some of commonest blue-green algae from the paddy field soils of the United Provinces and Bihar. Indian J. Agric. Sci., 12, 743-756.
- STARKEY (R.L.), 1958 .- Interrrelation between microorganisms and plant roots in the rhizosphere. Bacteriol. Rev., 22, 152-172.
- STEWART (W.D.P.), 1966 .- Nitrogen fixation in plant. The Athlone Press.
- STEWART (W.D.P.), FITZGERALD (G.P.), BURRIS (R.H.), 1967 .- In situ studies on N_2 fixation using the acetylene reduction technique. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S. 58, 2071-2078.

- STEWART (W.D.P.), LEX (M.), 1970 .- Nitrogenase activity in the blue-green alga *Plectonema boryanum*, strain 594. Arch. Mikrobiol., 73, 250-260.
- STRIJDOM (B. W.), 1965 .- The effect of soil pH and soil type on the occurrence of *Beijerinckia* in non-lateritic soils. S. Afric. J. Agric. Sci., 8, 853-861.
- SUBRAHMANYAN (V.), 1927 .- Biochemistry of waterlogged soils.1. The effect of waterlogging on the different forms of nitrogen, on the reaction, on the gaseous relationship and on bacterial flora. J. Agric. Res., 17, 429-467.
- TAHA (S.M.), MAHMOUD (S.A.Z.), IBRAHIM (A.N.), 1967 .- Microbiological and chemical properties of paddy soils. Plant and Soil, 26, 1, 33-48.
- TAKAI (Y.), KOYAMA (T.), KAMURA (T.) , 1956.- Microbial metabolism in reduction process of paddy soils (1) Soil and Plant Food, 1, 63-66.
- VANLANDE (C.), 1955 .- Travaux des sections Pédologie et Agrologie d'Alger. Bull. n° 1, 9-11.
- WARING (S.A.), BREMNER (J.M.), 1964 .- Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. Nature, 201, 951-952.
- WATANABE (A.), NISHIGAKI (A.S.), KONISHI (C.), 1951 .- Effect of nitrogen fixing blue-green algae on the growth of rice plants. Nature, 168, 748-749.
- WILJER (J.), DELWICHE (C.C.), 1954 .- Investigations on the denitrifying process in soil. Plant and Soil, 5, 155-169.
- WILSON (W.P.), 1958 .- Asymbiotic nitrogen fixation. In "Encyclopedia of Plant Physiology", 8, 9-47. Springer, Verlag, Berlin.
- WOLDENDORP (J.W.) , 1963 .- The influence of living plants on denitrification. Mededel. Van der Landl. Te Wageningen, Nederland, 63,13.

Vu et permis d'imprimer

Montpellier, le

Le Doyen de la Faculté
des Sciences,