

INTERET DES CAPTEURS DE SOLUTION DU SOL POUR QUANTIFIER LES PERTES EN ELEMENTS MINERAUX (CAS DES TERRES DE BARRE DU SUD-TOGO)

H. SARAGONI *, R. POSS **

Résumé : L'utilisation de capteurs en céramique a été combinée à la mesure du bilan hydrique (méthode tension-neutronique) pour évaluer les pertes minérales par lixiviation sous différents systèmes de culture. Les résultats obtenus pendant deux années de mesure consécutives ont été extrapolés dans le temps à l'aide d'un modèle de simulation du bilan hydrique.

Sur les sols ferrallitiques surexploités du Sud-Togo, la fertilisation potassique est primordiale dans les systèmes maïs-maïs et maïs-niébé. L'expérimentation a permis de montrer que l'apport d'engrais potassiques permettait, non seulement d'augmenter la teneur en potassium dans la solution du sol de la zone racinaire, mais également de limiter la migration en profondeur de l'azote, du calcium et du magnésium.

Mots clés : Bougie poreuse, capteur de solution, solution du sol, drainage, lixiviation, maïs, niébé, terres de Barre, Togo.

1. INTRODUCTION

L'épuisement des terres de Barre du Sud-Togo est une réalité (10 q/ha de maïs, 8 t/ha de manioc, 600 kg/ha d'arachide et 300 kg/ha de niébé). L'abandon de la jachère, lié à la pression démographique (200 hab./km²), et l'utilisation des résidus de récolte comme combustible n'y sont pas étrangers.

Afin de mieux comprendre les principaux mécanismes intervenant dans l'appauvrissement de ces sols, un programme conjoint IRAT/ORSTOM/DRA a été lancé en 1983. Il est intitulé "Dynamique de l'eau et des éléments minéraux au Togo méridional". L'ORSTOM s'occupe plus particulièrement du volet hydrodynamique, alors que l'IRAT-CIRAD/DRA prend en charge la partie agronomique et la dynamique des nutriments.

L'étude initiale des propriétés physiques et hydrodynamiques de ces sols ainsi que des conductivités hydrauliques déboucha sur l'évaluation des termes du bilan hydrique, un calage des cycles culturaux et un zonage agro-pédo-climatique (Fréteaud *et al.*, 1987 ; Poss et Saragoni, 1987 ; Poss *et al.*, 1988).

* IRAT / DRA, BP 1163 et 2318, Lomé, Togo.

** ORSTOM, BP 375, Lomé, Togo

Cet exposé ne traitera que du volet de ce programme concernant les éléments minéraux, et plus particulièrement de leur lixiviation.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. LIEUX, SOLS ET TRAITEMENTS

Cette étude a été conduite, au cours de deux années consécutives (1985 et 1986), sur un essai factoriel NPK mené par l'IRAT à Davié depuis 1976. Les sols, communément appelés "terres de Barre", sont des sols rouges ferrallitiques profonds, homogènes et sans éléments grossiers. Les principaux caractères analytiques de ces sols ont été reportés dans le tableau I.

Les traitements "N2-P1-K0" et "N2-P1-K2", ainsi que les sous-traitements A et B, ont été retenus :

- A : maïs de grande saison des pluies (GSP) et maïs de petite saison des pluies (PSP) ;
- B : maïs de GSP et niébé de PSP.

Profondeurs (cm)	0-10	10-20	30-40	80-100	140-160
Argile %	9,9	11,6	17,2	39,7	43,2
Limon fin %	3,3	2,7	2,1	2,1	2,6
Limon grossier %	7,6	5,3	5,8	3,3	5,7
Sable fin %	22,4	25,7	18,5	14,5	12,3
Sable grossier %	59,4	57,5	53,3	45,0	36,7
Mat. orga %	2,0	1,32	0,60	0,46	0,38
Carbone %	1,21	0,76	0,35	0,27	0,22
Azote total %.	0,99	0,67	0,35	0,38	0,27
Rapport C/N	12	11	10	7	8
Total %.	0,38	0,38	0,12	0,17	0,15
Ass. (Olsen) %.	0,01	<0,01	0,02	0,03	0,02
Ca mé/100g	2,60	1,73	1,62	1,56	1,68
Mg mé/100g	1,69	1,25	0,94	1,28	1,04
K mé/100g	0,25	0,14	0,05	0,03	0,04
Na mé/100g	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05
Somme mé/100g	4,58	3,16	2,64	2,92	2,81
CEC mé/100g	5,13	4,60	3,30	4,36	5,13
Saturation %	89	69	80	67	55
pH eau	6,2	6,0	6,7	5,9	5,8
pH KCl	5,8	5,4	5,4	5,0	5,0

Tableau I: Caractéristiques physico-chimiques des sols de Davié (jachère de 10 ans).

2.2. MESURE DU DRAINAGE

La méthode tensio-neutronique a été adoptée, du fait de sols favorables à ce type d'expérimentation (aucun élément grossier et absence de gradient textural brutal).

2.3. DISPOSITIF DE MESURE ET DE PRELEVEMENT DE LA SOLUTION DU SOL

2.2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Des capteurs de solution du sol ont été utilisés verticalement :

- 64 bougies sous culture (1985 et 1986) : 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) x 2 traitements (K0 et K2) x 2 sous-traitements (A et B) x 4 répétitions ;
- 32 bougies sous sol nu après jachère (SNJ), uniquement en 1986 : 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) x 8 répétitions.

2.2.2. PRELEVEMENTS

Pendant les 8-9 mois de chacune des deux années d'expérimentation (4 saisons culturales) où ils étaient réalisables, des prélèvements systématiques ont été effectués tous les 15 jours. La mise en dépression (600 hPa) était appliquée l'après-midi (et non le matin) du jour précédent le prélèvement, afin d'améliorer le taux de réussite (qui est ainsi passé de 75 % à 90 %). Le volume recueilli est fonction de la tension de l'eau dans le sol (fonction puissance où $r = -0,84$ pour $n = 176$) : au-delà de 150 hPa, le volume recueilli est inférieur à 20 ml.

2.2.3. REPRESENTATIVITE ET VARIABILITE DE LA SOLUTION PRELEVEE

Les bougies poreuses sont d'une utilisation facile, et elles sont peu perturbantes pour le sol et les racines. Mais, même en prenant un certain nombre de précautions avant et pendant l'installation, leur emploi doit cependant être considéré comme un "moindre mal" (Cheverry, 1983), car la question de la représentativité de la solution récoltée par rapport à la solution contenue dans le sol reste mal résolue. Il vaut donc mieux parler de "solution prélevée" que de "solution du sol".

Les répétitions permettent de vérifier les intervalles de confiance et d'éliminer les résultats aberrants. Avec 8 répétitions par traitement (culture) ou profondeur (SNJ), on constate que les coefficients de variation sont assez élevés (en moyenne 25 % sous culture et 20 % sous jachère). Ils sont plus faibles en profondeur qu'en surface, et ils sont amplifiés à proximité de la surface du sol par l'hétérogénéité introduite par certaines pratiques culturales (enfouissement des pailles, fertilisation...). Il conviendrait donc, lors de l'établissement d'un nouveau protocole, de ne pas être trop ambitieux : il est préférable de limiter le nombre de traitements étudiés afin de pouvoir multiplier les répétitions. La précision à attendre de ce genre d'expérimentation reste faible, même en multipliant les capteurs : pour obtenir des résultats à 10 % il faudrait disposer d'au moins... 50 capteurs par traitement.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RENDEMENTS ET CONDITIONS HYDRIQUES

Les différents termes du bilan hydrique ont été évalués à l'échelle journalière, puis les valeurs d'évapotranspiration ont été lissées en calculant les moyennes glissantes sur 5 jours (cf. fig. 1 pour l'année 1986). Les conditions hydriques (pluviométrie, ETR cycle et ETR/ETM floraison maïs) furent assez proches de celles des 53 dernières années (tab. II).

Saison	Année	Pluie cycle (mm)	ETRcycle (mm)	ETR/ETM floraison(%)
GSP	1985	462	329	94
	1986	441	298	87
	moy. 53 ans	493	300	93
PSP	1985	355	268	95
	1986	267	180	66
	moy. 53 ans	299	238	76

Tableau II : Conditions hydriques de la culture du maïs (Davié, 1985, 1986 et moyenne 1934-1986).

Les rendements sont essentiellement fonction de la fertilisation potassique pour le maïs de GSP (K0 = 13 q/ha et K2 = 30 q/ha) et le niébé de PSP (K0 = 300 kg/ha et K2 = 1000 kg/ha). En revanche, pour le maïs de PSP, l'absence de potasse se combine avec le déficit hydrique (K0 = 5 q/ha et K2 = 16 q/ha).

3.2. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA CONCENTRATION DE LA SOLUTION PRELEVEE DANS LES HORIZONS DE SURFACE ET LIAISON DES ELEMENTS ENTRE EUX

Outre la quantification des pertes de nutriments par lixiviation à la base du profil racinaire, les capteurs permettent de déterminer leur cinétique dans les horizons de surface, où les racines sont concentrées (dans le cas étudié, 90 % des racines du maïs sont comprises dans les 60 premiers centimètres). Il apparaît que les cinétiques des nitrates, du calcium et du magnésium sont liées (comme dans les sols "Dior" du Sénégal ; Piéri, 1979). Mais dans les terres de Barre, le chlore est également lié aux autres éléments, et la relation entre l'ensemble des éléments est très étroite ($r = 0,92$ pour $n = 395$). La relation est la suivante :

$$(Ca^{++} + Mg^{++})\text{mé/l} = 0,78 (NO_3^-)\text{mé/l} + 0,60 (Cl^-)\text{mé/l} + 0,40.$$

Ceci montre bien, outre le fait que l'activité nitrificatrice du sol reste l'une des causes essentielles de la mise en solution du calcium et du magnésium échangeables, l'effet complémentaire du chlore sur la désorption de ces cations alcalino-terreux du complexe adsorbant.

Les effets des traitements agronomiques sur la concentration de la solution prélevée dans les horizons de surface (30-60 cm) peuvent être résumés ainsi (tab. III) :

- une culture continue de maïs pendant 11 ans fait considérablement chuter les teneurs en nitrates, calcium et magnésium : elles ne

- représentent plus que le tiers (K0) ou le cinquième (K2) des celles observées après une jachère de même durée ;
- un apport régulier de potasse sur chacune des cultures d'un système à dominante maïs permet, toujours après 11 ans de culture continue et par rapport à un témoin sans potasse, de tripler la concentration du potassium de la solution du sol.

Profondeur (cm)	Système	Fumure	Teneurs(mé/l)			
			NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺
30-60	Culture	NPK0	1,09	0,84	0,69	0,03
		NPK2	0,54	0,61	0,52	0,09
	Jachère	-	3,48	2,56	2,37	0,05

Tableau III : Comparaison des concentrations moyennes de la solution du sol (Davié, 1986).

3.3. QUANTIFICATION DES PERTES MINÉRALES PAR LIXIVIATION

L'enracinement du maïs ne dépassant pas 150 cm et celui du niébé 60 cm, nous avons retenu la cote 180 cm comme profondeur d'évaluation du drainage et de la lixiviation.

La moyenne du drainage calculé sur deux ans a été comparée au drainage simulé sur 53 ans (tab. IV).

Période	Pluie		Traitement	Drainage			
	Moy. 85-86 mm	Moy. 53 ans mm		Moy. 85-86 mm	% pluie	Moy. 53ans mm%	% pluie
Janvier à juillet	666	675	K0	170	26	179	27
			K2	145	22	152	23
Août à décembre	400	368	K0	180	45	85	23
			K2	152	38	72	20
Total de l'année	1066	1043	K0	350	33	264	25
			K2	297	28	224	21

Tableau IV : Pluviométrie et drainage (Davié, culture de maïs, comparaison des moyennes 1985-1986 et 1932-1986).

Le développement végétatif du maïs sur les parcelles K0 et K2 est très différent, surtout au cours de la petite saison des pluies, où le déficit hydrique augmente l'expression de la carence potassique (fig. 2 et 3). L'évapotranspiration de la

parcelle K0 est donc plus faible que celle de la parcelle K2, ce qui explique les valeurs plus élevées de drainage qui ont été mesurées sur la parcelle K0.

On constate qu'en première saison le drainage peut être considéré comme représentatif de la valeur moyenne. En revanche en deuxième saison, et par conséquent pour l'année, il doit être affecté de coefficients (respectivement 0,47 et 0,75). Nous avons alors évalué les pertes minérales par lixiviation à partir des moyennes de concentration mesurées pendant deux ans à 180 cm (tab. V). Elles sont assez faibles pour le sodium (20 kg/ha de Na₂O) et le potassium (moins de 10 kg/ha de K₂O), mais importantes pour les nitrates et les cations alcalino-terreux. La fertilisation potassique réduit considérablement la lixiviation des nitrates et des alcalino-terreux :

. N(NO ₃ ⁻)	= 40kg/ha (K2)	contre 90 kg/ha (K0)
. CaO	= 80 kg/ha (K2)	contre 110kg/ha(K0)
. MgO	= 30 kg/ha (K2)	contre 50 kg/ha (K0).

Période	Traitement	Lixiviation(kg/ha)				
		N	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Janvier à juillet	K0	63	68	36	12	4
	K2	30	53	20	14	6
Août à décembre	K0	28	39	17	6	2
	K2	12	27	10	7	3
Total de l'année	K0	91	107	53	18	6
	K2	42	80	30	21	9

Tableau V : Pertes minérales par lixiviation (Davié, culture de maïs, évaluation sur 53 ans).

Ainsi constate-t-on qu'un apport régulier de potasse sur une culture continue de maïs permet de limiter le drainage (80 % de K0) et la migration en profondeur de N(NO₃⁻), Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ (respectivement 45 %, 75 % et 55 % de K0), probablement du fait d'une meilleure utilisation de l'azote par levée de la carence potassique. Par voie de conséquence, cela permet de tripler les rendements en maïs et en niébé. Par contre, toujours lorsque la carence potassique est levée, un système cultural maïs (GSP)-légumineuse (PSP), qui par ailleurs augmente de 65 % la teneur de la solution du sol en nitrates à 30-60 cm par rapport à une culture continue de maïs, entraîne une lixiviation supérieure de cet élément (+35 % à +75 % suivant l'année) - et partant du calcium et du magnésium - du fait que le niébé exerce une pression plus faible sur le milieu.

4. CONCLUSIONS

L'utilisation de capteurs en céramique poreuse, complétée par une évaluation du drainage à l'aide de la méthode tensio-neutronique, nous a permis - après deux années d'expérimentation suivies d'une simulation sur 53 ans - d'évaluer les pertes minérales par lixiviation de systèmes de culture pratiqués au Togo méridional et de mesurer l'effet des traitements agronomiques sur ceux-ci.

C'est ainsi que, pour les systèmes maïs-maïs et maïs-niébé de sols ferrallitiques souvent épuisés par surexploitation et absence d'intrants, le rôle primordial de la fumure potassique dans l'élaboration des rendements a pu être expliqué : augmentation de la teneur en potassium de la solution du sol prélevée dans les horizons exploités par les racines (30-60 cm) et limitation du drainage et de la migration en profondeur de l'azote, du calcium et du magnésium.

Cette approche n'est pas la panacée. Ses limites seront d'ailleurs précisées dans une prochaine publication. Il va sans dire que les résultats sont d'autant plus précis que les répétitions sont plus nombreuses (dans l'espace et dans le temps). Cela devrait souvent limiter le nombre de traitements étudiés, au profit de la multiplication des répétitions. Mais cette méthode, peu destructrice et de coût modéré, n'en reste pas moins l'une des meilleures pour établir des bilans minéraux.

Enfin, les résultats obtenus au Togo montrent que, dans ce type d'expérimentation très contraignante, il est possible de travailler, sans structure administrative lourde, en équipe pluridisciplinaire et multi-organismes.

BIBLIOGRAPHIE

- CHEVERRY (C.), 1983.- L'extraction de la "solution du sol" par le biais de bougies poreuses : une synthèse bibliographique des problèmes méthodologiques posés par ces dispositifs. Bull. GFHN, 14 : 48-71.
- FRETEAUD (J.P.), POSS (R.) & SARAGONI (H.), 1987.- Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ sous culture de maïs. L'Agron. Trop., 42(2) : 94-102.
- PIERI (C.), 1979.- Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal à l'aide de capteurs en céramique poreuse. L'Agron. Trop., 34(1) : 9-22.
- POSS (R.) & SARAGONI (H.), 1987.- Quelques problèmes posés par l'estimation du bilan hydrique en plein champ. Milieux poreux et transferts hydriques (Bull. GFHN), 22 : 32-46.
- POSS (R.), SARAGONI (H.) & IMBERNON (J.), 1988.- Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. L'Agron. Trop., 43(1) : 18-29.

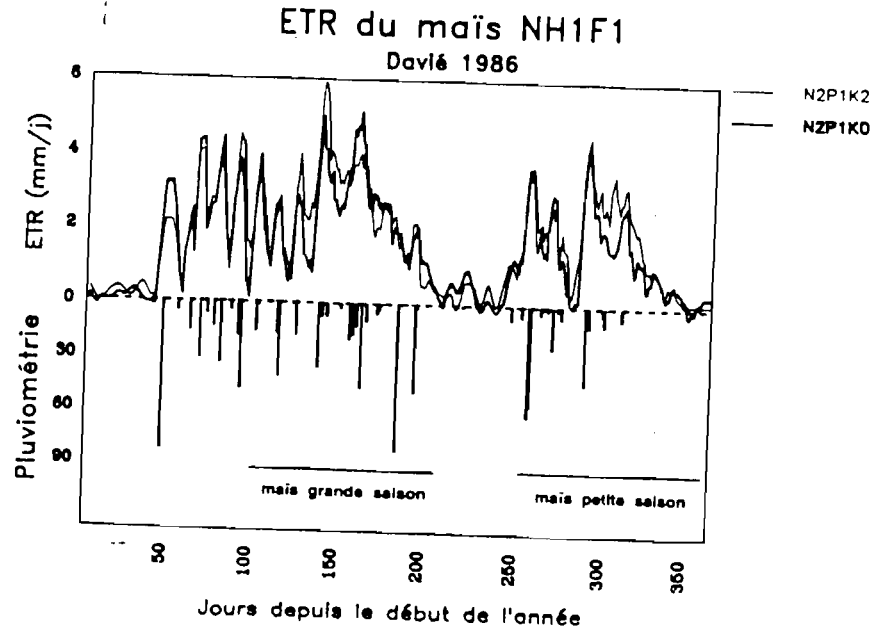


Figure 1 : Pluviométrie et évapotranspiration en 1986 sous culture de maïs (Davié, essai factoriel NPK).

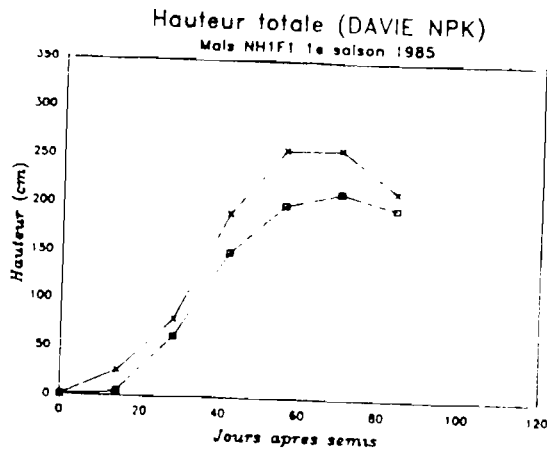


Figure 2.

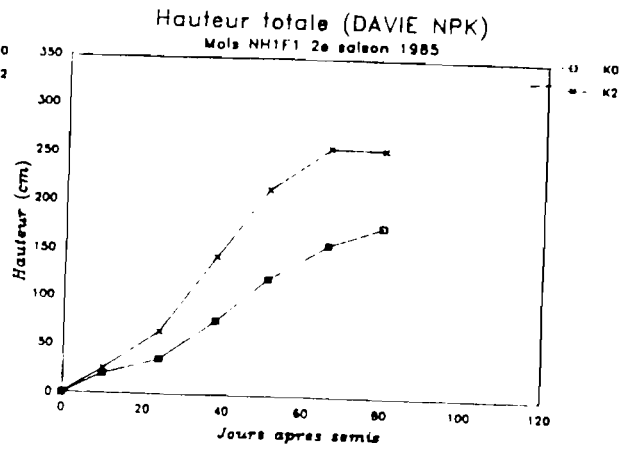


Figure 3.



12-15 septembre 1989

*Actes
des journées
de la DRN*

***Agronomie
et ressources naturelles
en régions tropicale***

TABLE DES MATIERES

PREFACE

- C. CHARREAU Directeur de l'IRAT V

INTRODUCTION

- C. PIERI : Exposé d'ouverture des journées de la DRN VII

SESSION 1 : EVALUATION DES SITUATIONS AGRICOLES

- J. KILLAN : Cartes du milieu pour le développement rural 3
- F. FOREST : Connaissances et méthodes conduisant à l'évaluation des facteurs agroclimatiques sur le risque agricole en régions tropicales 13
- A. ANGE : Stratification de l'espace rural et diagnostic des contraintes du milieu à la production végétale 35
- R. BERTRAND : Organisations morphopédologiques du milieu naturel et recherches agronomiques 67
- G. BOURGEON : Sols rouges indiens, sols ferrugineux tropicaux africains : différences et implications agronomiques 75
- M. RAUNET : Enseignements méthodologiques d'une opération de recherche interdisciplinaire à Madagascar : l'étude du fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé 83
- P. MORANT : Evaluation cartographique de l'emprise agricole sur le milieu physique à partir des données satellitaires SPOT dans la région de Houndé au Burkina Faso 105
- J. IMBERNON : Agroclimatologie régionale 113
- Synthèse des travaux 123

SESSION 2 : DU DIAGNOSTIC CULTURAL A L'ANALYSE AGRONOMIQUE

- P. JOUVE : L'analyse agronomique de situations culturales 127
- F.N. REYNIERS : Diagnostic de l'alimentation hydrique des cultures pluviales 137
- P. SIBAND : Le diagnostic nutritionnel des cultures annuelles 151
- C. PIERI : Maintien ou amélioration des systèmes de culture dans les savanes au sud du Sahara 171
- M. VAKSMANN, S. TRAORE : Etude du ruissellement sur une toposéquence sabélienne ; adaptation d'un modèle de bilan hydrique 203
- E. JUNCKI, R. PÉREZ, P. RUEI LE. : Economie de l'eau, défense et restauration des sols au Sine-Saloum (Sénégal) 213
- J.L. CHOPART : Rôle du travail du sol sur les termes du bilan hydrique. L'enracinement et le rendement des cultures pluviales (cas du Sénégal et de la Côte-d'Ivoire) 223
- A. DUCREUX : Relations sol/machine méthodes de terrain disponibles au LAGEPHY en vue de l'optimisation du travail du sol par les outils 239
- P. FALLAVIER, D. BABRE : Statut de l'aluminium dans deux sols tropicaux à minéralogie différenciée 247
- R. OLIVER : Appréciation de la dynamique des éléments minéraux dans les sols - Intérêt et limites des boues poreuses. Quelques résultats obtenus par le CIRAD 255
- H. SARAGONI, R. POSS : Intérêt des capteurs de solution du sol pour quantifier les pertes en éléments minéraux (cas des terres de Barre du Sud-Togo) 273
- F. GANRY : Rôle des légumineuses dans le maintien et la régénération de la fertilité azotée des sols sableux tropicaux 281
- C. SAMSON, P. AUTFRAY : Influence de l'arrangement spatial sur la production d'une association maïs-soja 289

- H. SAINT-MACARY : Fixation symbiotique de l'azote en milieu tropical. Quelles applications ?
Quelles limitations ? 305
- C. EGOUMENIDIS : Fractions de l'azote organique dans les sols tropicaux et fertilité azotée 317
- J. GIGOU : Que cultiver dans une région pluvieuse et sèche à la fois ?
Le problème du centre de la Côte-d'Ivoire 327
- Synthèse des travaux** 343

SESSION 3 : AMENAGEMENT ET TECHNIQUES DE GESTION DE L'ESPACE RURAL

- P. LAVELLE : Contribution des processus biologiques 349
- R. BERTRAND, A. ANGE, J.P. PARTY, A. CAUJOLLE-GAZET : Conception et mise en oeuvre
d'aménagements anti-érosifs dans le nord-ouest de la Côte-d'Ivoire 359
- C. GOUNEL : Méthode et production cartographique 371
- E. MARAUX : Quels modèles pour l'agrométéorologie opérationnelle ? 377
- J. CHAROY : L'hydraulique au service des aménagements hydroagricoles 385
- B. LIDON : Aménagements et gestion hydraulique des bas fonds
Présentation de travaux réalisés au Mali 399
- B. TRUONG : Gestion des ressources fertilisantes locales 419
- J.L. FARINET, P.L. SAAR : Rôle du compostage sur le maintien de la productivité d'une culture de mil
en zone aride 429
- P.-F. CHABALIER : Organisation et impact du conseil en fertilisation : l'exemple CIRAD à la Réunion 439
- A. GUILLONNEAU : Vers une recherche opérationnelle : le projet de recherche-développement
du lac Alaotra 453
- F. GUILLET, M. SERPENTIER, J.L. SABATIER : Modélisation des transferts hydriques à l'échelle d'un petit
bassin
versant de la zone soudano-sahélienne 473
- Synthèse des travaux** 483

LISTE DES PARTICIPANTS

M.T. ALLAFORT.	A. DREVIER.	G. LOYNET.	C. PIERI.
A. ANGE.	A. DUCREUX.	E. MARAUX.	G. POCHIER.
C. BARON.	C. EGOUMENIDIS	J.L. MARGER.	J.F. POUJAIN.
M. BENOIT-CATTIN.	J.L. FARINET.	S. MARLET.	D. POUZET.
R. BERTRAND.	E. FOREST.	P. MARNOITTE	P. QUIDEAU.
P. BEUNARD.	M. FORTIER.	J. MARQUETTE.	M. RAUNET.
BOCKELEEE-MORVAN.	E. GANRY.	T. MARTY	EN. REYNIERS.
G. BOYER.	J. GIGOU.	J.L. MAUBOUSSIN.	J.L. SABATIER.
J.L. BOZZA.	C. GOUNEL.	R. MICHETTON.	H. SAINT-MACARY.
M. BROUWERS.	P. GUILLAUME.	G. MONNIER	C. SAMSON.
H. CARSALADE.	S. GUILOBEZ.	D. MONTANGE.	H. SARRAGONI.
P. CASTA.	E. HEMSI.	P. MORANI.	R. SCHILLING.
P.F. CHABALIER.	M. HOARAU.	J. NABOS.	I. SEGUY.
J. CHAROY.	J. IMBERNON.	R. NICOU.	P. SIBAND.
C. CHARREAU.	E. JUNKER.	R. OLIVER.	TRAN-MING-DUC.
C. CHEVASSUS-ROSSET.	J. KILIAN.	J. PELAGE.	B. TRUONG.
J.L. CHOPART.	P. LAVELLE.	P. PERUZ.	M. VAKSMANN.
P. DALY.	J. LARCHER.	D. PICARD	S. VALET.
C. DANCETTE.	B. LIDON.	J. PICHOT	G. VALLEE.