

Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du sud du Togo

Roland

H. SARAGONI (1), R/POSS (2),
R. OLIVER (3)

RÉSUMÉ — Des capteurs de solution du sol en céramique ont été utilisés pour étudier les transferts d'éléments minéraux dans la zone d'extraction racinaire et pour évaluer les pertes par lixiviation sous culture. La méthode, fondée sur des prélèvements bimensuels à plusieurs profondeurs, est précisée et analysée. Les variations de concentration sont rapides dans la zone d'extraction racinaire. Pour le potassium, les apports d'engrais provoquent une augmentation de concentration, qui se maintient seulement pendant deux mois. Les dynamiques de l'azote nitrique, du calcium et du magnésium sont parallèles. Elles dépendent des apports d'engrais, de la minéralisation de la matière organique et des prélèvements par les plantes. Les pertes annuelles par lixiviation sont toujours inférieures à dix kilos à l'hectare pour le potassium, quelle que soit la fumure. Elles peuvent s'élever à près de cent kilos à l'hectare pour l'azote nitrique et le calcium. Les apports d'azote et de chlorure favorisent la mobilisation du calcium et du magnésium, et donc leur lixiviation, si le développement des cultures n'est pas suffisant pour prélever les ions mis en solution.

Mots clés : capteur en céramique, bougie poreuse, potassium, solution du sol, drainage, lixiviation, maïs, niébé, terre de barre, Continental terminal, Togo.

Les terres de barre sont des sols, largement répandus au sud du Togo, du Bénin et du Ghana, dont la diminution de productivité agricole préoccupe les aménageurs et les chercheurs depuis plus de trois décennies (DABIN, 1956). La densité de population peut en effet y atteindre jusqu'à 500 habitants au kilomètre carré. Ainsi, au Togo, les terres de barre ne représentent que 10 % du territoire, mais elles produisent l'essentiel de l'alimentation du tiers du pays, dont celle de sa capitale, Lomé, qui compte 600 000 habitants.

Cette diminution des rendements est liée à un épuisement des sols consécutif à une surexploitation du milieu. Sous l'effet de la pression démographique, les jachères sont progressivement abandonnées, et les résidus de récolte sont de plus en plus utilisés comme combustible ménager ou pour la fabrication de savon. Les rendements moyens

actuels ne sont plus que de 1 t ha⁻¹ en maïs, 8 t ha⁻¹ en manioc, 0,6 t ha⁻¹ en arachide et 0,3 t ha⁻¹ en niébé (MARQUETTE, 1986). Ces valeurs moyennes masquent cependant une forte variabilité interannuelle liée à des pluies peu abondantes et irrégulières, de 800 à 1 100 mm en deux saisons des pluies.

Un programme de recherche conjoint entre l'IRAT, l'ORSTOM et la direction de la recherche agronomique togolaise a débuté en 1983 afin d'établir le bilan hydrique et minéral des terres de barre, préalable indispensable à une mise en valeur rationnelle de ces sols. L'étude des propriétés physiques et hydrodynamiques des sols, couplée à un suivi au champ des humidités et des suctions, a permis d'évaluer les termes du bilan hydrique. Un calage du cycle cultural du maïs et un zonage agroclimatique en ont été déduits (FRETEAUD *et al.*, 1987 ; POSS et SARAGONI, 1987 ; POSS *et al.*, 1988). Dans cet article, les mouvements des éléments minéraux en solution dans le sol seront précisés pour les différents traitements agronomiques à partir des résultats obtenus à l'aide de capteurs en céramique poreuse. L'évolution des concentrations dans la zone racinaire, les équilibres entre les différents ions et les pertes minérales par lixiviation seront étudiés. Le bilan minéral du sol, qui fait intervenir les mobilisations par le maïs et l'évolution du complexe d'échange du sol, sera précisé ultérieurement.

Matériel et méthode

Milieu naturel

Les sols

L'étude a été réalisée à la station de recherche de Davié, à trente-cinq kilomètres au nord du littoral de l'océan Atlantique. Cette station est représentative des terres de barre (DOME, 1985), sols dominants dans la région. Il s'agit de sols rouges ferrallitiques profonds et homogènes, sans éléments grossiers, formés à partir de l'évolution d'un dépôt continental qui a recouvert la région au début du quaternaire. Selon leur potentiel de production, lié à leur exploitation antérieure, on distingue des sols « dégradés » et « non dégradés ». Sur la station de Davié, où l'emprise humaine est restée limitée, les sols sont caractéristiques des terres de barre non dégradées.

(1) DRA-IRAT, BP 1163, Lomé, Togo.

(2) ORSTOM UR2B, DPVE, CEN Cadarache, 13108 Saint-Paul-lès-Durance Cedex, France.

(3) CIRAD-IRAT, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex I, France.

COTEZ : PB 10

NIÉBÉ : 1

DIFF 6B; 6F

L'AGRONOMIE TROPICALE 1990, 45 - 4

NIÉBÉ 1 : 2

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 35 504 eel

Cote : B... M P81

La texture (tableau I) est sableuse dans les horizons de surface (10 % d'argile), mais elle devient progressivement argileuse en profondeur (40 à 45 % d'argile en dessous de 80 cm). La phase argileuse est essentiellement constituée de kaolinite (80 %), mais elle contient aussi de la vermiculite ou des interstratifiés smectitiques résultant de l'altération de micas. Ces sols sont peu pourvus en matière organique (2,1 % en surface sous jachère, moins de 1 % dès la mise en culture) ainsi qu'en azote total (1 ‰ sous jachère, 0,2 à 0,5 ‰ sous culture). Enfin, ils présentent un complexe d'échange peu développé (capacité d'échange cationique à pH 7 de 5 mé 100 g⁻¹ sous jachère, 3 mé 100 g⁻¹ après mise en culture) et incomplètement saturé. Les teneurs en potassium échangeable, qui atteignent 0,3 mé 100 g⁻¹ en surface sous jachère, diminuent rapidement à 0,08 mé 100 g⁻¹ après quelques années de culture sans fertilisation.

Apports minéraux atmosphériques

Comme cela avait déjà été noté en Afrique de l'Ouest (PIERI, 1979 ; ROOSE, 1981), les apports en éléments minéraux par les eaux de pluie, déterminés sur huit échantillons recueillis entre 1984 et 1986 (tableau II), sont inférieurs à 5 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour N, Mg, K et P, mais atteignent près de 30 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour Cl. Les apports en Na et Cl sont plus élevés que ceux cités dans la

bibliographie, en raison de la proximité de l'océan. Cependant, les teneurs en éléments minéraux des eaux de pluie sont toujours très faibles par rapport à celles mesurées dans la phase liquide du sol. L'eau de pluie provoque donc principalement une dilution de la solution du sol.

Parcelles

Traitements

L'étude a porté sur deux traitements d'un essai factoriel NPK 3³ avec confondu (*confounding*) à deux répétitions, mené par l'IRAT depuis 1976 : un traitement avec fertilisation complète, NPK2, et un traitement avec fertilisation incomplète, NPK0. Chaque parcelle de 72 mètres carrés était divisée en deux sous-parcelles, notées A et B. La sous-parcelle A était cultivée en maïs deux fois par an depuis 1976, alors que la sous-parcelle B était cultivée en maïs au cours de la première saison des pluies, ou grande saison des pluies (GSP), mais en niébé au cours de la seconde, ou petite saison des pluies (PSP).

Une parcelle témoin de 100 mètres carrés située à côté de l'essai factoriel a été étudiée en 1986. Il s'agit d'une parcelle laissée en jachère depuis 1976 (tableau I), qui a été défrichée au début de l'année 1986 et gardée nue jusqu'à la fin de l'expérimentation par des sarclages répétés.

Tableau I. Caractéristiques physico-chimiques du sol de Davié, après dix ans de jachère.

Analyses	Profondeur (cm)				
	0-10	10-20	30-40	80-100	140-160
Granulométrie (%)					
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
Matière organique					
Taux de matière organique (%)	2,09	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	0,39
C/N	12	11	10	7	6
Phosphore (mg kg⁻¹ P)					
Total	570	560	370	440	240
Assimilable (Olsen)	43	37	33	30	20
Complexe absorbant (mé 100 g⁻¹)					
Ca	2,60	1,73	1,62	1,56	1,68
Mg	1,69	1,25	0,94	1,28	1,04
K	0,25	0,14	0,05	0,03	0,04
Na	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05
Somme des bases	4,58	3,16	2,64	2,92	2,81
CEC à pH 7	5,13	4,60	3,30	4,36	5,13
Saturation (%)	89	69	80	67	55
Acidité					
pH eau	5,7	5,1	5,6	5,2	5,1
pH KCl	5,2	4,8	4,7	4,2	4,2

Tableau II. Teneurs et apports minéraux annuels moyens par les eaux de pluie, mesurés à Davié (pluviosité moyenne de 1934 à 1986 = 1 043 mm).

Eléments	N	Ca	Mg	Na	K	P	Cl
Teneurs (mé l ⁻¹)	0,03	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,08
Apports minéraux (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	4,4	10,4	2,5	7,2	4,1	1,1	29,5

Les engrais sont apportés sous forme d'urée, de superphosphate triple et de chlorure de potassium. Les engrais P et K sont épandus à la volée à la préparation du sol, puis enterrés à l'aide d'un léger sarclage. Seul le maïs reçoit de l'azote, à raison de 60 kg N ha⁻¹, fractionné en deux apports (tableau III). Au cours des deux années étudiées, les doses de phosphore furent identiques en GSP, mais différentes en PSP. En 1985, l'engrais a été épandu en une seule fois sur les parcelles qui recevaient du potassium (parcelles NPK2). En 1986, en revanche, l'apport d'engrais a été effectué en deux fois à chaque saison de culture, afin de tester l'effet d'un fractionnement de la fertilisation potassique sur le rendement.

Techniques culturales et calendrier

Depuis l'origine de l'essai (1976), le sol n'est labouré qu'une seule fois par an. Le labour est effectué à la « daba » au début de la première saison des pluies (GSP), sur une profondeur de l'ordre de 10 cm. Pendant la seconde saison de culture, seule la surface du sol est travaillée (nettoyage). De 1976 à 1980, les résidus de récolte ont été exportés. Ils sont enfouis lors du labour depuis 1981.

Les semis sont effectués au début des mois d'avril et de septembre, après une pluie de 15 à 20 millimètres. Les variétés utilisées sont le maïs NH1 (cycle de 110 jours, floraison vers le 50^e jour) et le niébé Vita 5 (cycle de 75 jours). Les graines sont semées aux densités de 42 000 plants ha⁻¹ pour le maïs et de 100 000 plants ha⁻¹ pour le niébé. Deux sarclages manuels sont nécessaires pour contrôler les adventices.

Evaluation du drainage

L'expérimentation a été réalisée au cours de deux années consécutives, 1985 et 1986. Du fait de sols favorables à ce type d'expérimentation, sans éléments grossiers ni gradient

textural brutal, l'évaluation du drainage a pu être effectuée à l'aide de la méthode tensio-neutronique. Toutes les parcelles étaient équipées de quatorze tensiomètres à bougies en céramique poreuse et manomètres à mercure pour déterminer la tension de l'eau et les gradients de charge dans le sol. Les humidités ont été mesurées à l'aide d'un humidimètre à neutrons dans quatre tubes d'accès par parcelle.

Les coefficients de conductivité de la loi de Darcy généralisée ont été déterminés sur chaque parcelle (POSS et SARAGONI, 1987) par la méthode du bilan naturel (VACHAUD *et al.*, 1978). Le drainage à 150 cm en a été déduit, à l'aide du gradient de charge à cette profondeur et de la relation entre la tension de l'eau et la conductivité hydraulique.

Pour évaluer le drainage moyen sur une longue durée, un modèle de simulation du bilan hydrique a été utilisé. Ce modèle, dérivé du modèle BIP (FRANQUIN et FOREST, 1977), a été validé par les données obtenues au champ (FRETEAUD *et al.*, 1987).

Problèmes méthodologiques liés à l'utilisation des capteurs de solution

Problèmes physiques

L'idée d'utiliser un « tube en porcelaine à grain fin » pour prélever la « solution du sol » par succion date de 1904 (BRIGGS et MCCALL). Mais la méthode ne s'est répandue qu'au cours des années 60, après la commercialisation du premier « échantillonneur d'eau du sol » (*soil water sampler*). Comme le montrent les synthèses bibliographiques de CHEVERRY (1983) et de LITAOR (1988), l'étude des problèmes méthodologiques posés par ce dispositif ne s'est développée qu'après 1970.

Tableau III. Fertilisation minérale (kg ha⁻¹) des parcelles étudiées, en 1985 et 1986.

Année	Sous-parcelles	N		P ₂ O ₅		K ₂ O (parcelles NPK2)	
		GSP	PSP	GSP	PSP	GSP	PSP
1985	A	30 + 30	30 + 30	45	30	90	60
	B	30 + 30	0	45	20	90	60
1986	A	30 + 30	30 + 30	45	45	45 + 45	45 + 45
	B	30 + 30	0	45	45	45 + 45	45 + 45

GSP : grande saison des pluies ; PSP : petite saison des pluies.

Différents types de matériaux ont été testés pour constituer les capteurs : la céramique poreuse, le verre fritté, les fibres creuses et le Téflon. La céramique poreuse présente l'inconvénient de perturber la composition de la solution qui la traverse, mais les autres matériaux sont onéreux, fragiles (verre fritté et fibres creuses) ou présentent des pressions d'entrée d'air faibles (Téflon). C'est pourquoi les capteurs en céramique restent le dispositif le mieux adapté aux études au champ (LEVIN et JACKSON, 1977 ; SILKWORTH et GRIGAL, 1981). Notre choix s'est porté sur des bougies en céramique poreuse de 4,5 cm de diamètre, de marque Soil Moisture, qui sont probablement les capteurs les plus utilisés dans le monde (figure 1).



Figure 1. Bougie en céramique poreuse Soil Moisture en place dans le sol.

Les facteurs qui interviennent sur la conductivité hydraulique des bougies ont été étudiés par plusieurs auteurs, dont HANSEN et HARRIS (1975). Constatant une importante variabilité des volumes prélevés avec un même type de bougie, ces auteurs ont préconisé de tester les bougies au laboratoire avant de les mettre en place au champ. Pour notre expérimentation, la conductivité hydraulique des bougies a été mesurée en les immergeant dans de l'eau distillée et en effectuant une dépression de 500 hPa pendant 30 minutes. Le volume moyen recueilli a été de 162 cm³, avec un écart-type de 30 cm³, chiffres comparables à ceux de HANSEN et HARRIS (1975).

Ces bougies ont ensuite été placées au champ. Les volumes recueillis pendant deux ans, en utilisant la méthode détaillée plus loin, ont été représentés en fonction de la tension de l'eau dans le sol sur la figure 2. Il apparaît que les volumes recueillis, de 10 à 200 cm³, sont fortement liés à la tension de l'eau dans le sol. Ces résultats sont en accord avec ceux de DE JONG (1976). Il s'agit — tous traitements, profondeurs et années confondus — d'une relation du type fonction puissance ($r = -0,84$ pour $n = 176$). Il en découle que la variabilité liée à la conductivité hydraulique des bougies est négligeable devant l'effet de la tension de l'eau dans le sol. Ce résultat est en accord avec ceux de SILKWORTH et GRIGAL (1981), qui soulignent de plus qu'aucune différence de composition chimique n'affecte apparemment les échantillons récoltés à l'aide de capteurs de conductivité hydraulique différente. Il semble donc que l'importance accordée à la valeur de la conductivité hydraulique initiale des capteurs doit être tempérée.

La figure 2 démontre en outre que les volumes sont très faibles (moins de 20 cm³) dès que la tension de l'eau dans le sol dépasse 150 hPa (pF 2,2). Comme les analyses chimiques deviennent délicates lorsque les volumes sont réduits, cette méthode n'est donc utilisable que dans des sols humides.

Une étude comparative entre les capteurs Soil Moisture et des capteurs de marque Nardeux, de même composition mais de diamètre différent (6 cm), a été réalisée. Sur une des parcelles, huit capteurs Soil Moisture et six capteurs Nardeux ont été mis en place à 180 cm de profondeur. Ils ont tous été relevés aux mêmes dates. Bien que la surface plus importante des capteurs Nardeux multiplie par plus de dix leur conductivité hydraulique par rapport à celle des capteurs Soil Moisture (2 505 cm³ recueillis contre 162 cm³

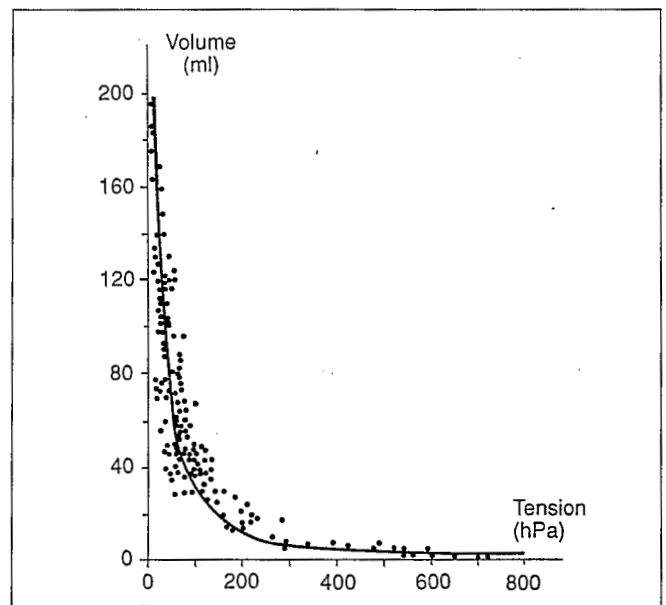


Figure 2. Relation entre le volume prélevé et la tension de l'eau dans le sol (dépression de 600 hPa pendant vingt-quatre heures, tous traitements et profondeurs confondus).

lors d'une aspiration dans l'eau pendant 30 minutes sous une dépression de 500 hPa), le volume obtenu dans le sol n'est pas significativement différent. Il faut probablement voir, là également, l'effet prépondérant de l'humidité du sol sur le volume recueilli. La composition chimique des solutions prélevées est également très voisine, comme le montre la figure 3 pour le calcium. Il s'avère donc que, dans le cas étudié, il aurait été possible d'utiliser indifféremment des capteurs de marque Nardeux ou des capteurs Soil Moisture.

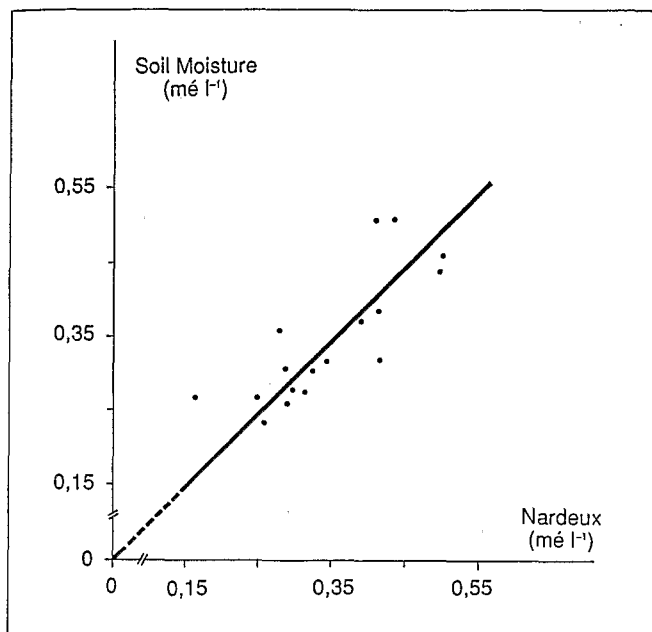


Figure 3. Comparaison des teneurs en calcium obtenues au moyen des capteurs Soil Moisture et des capteurs Nardeux (sol nu, huit répétitions).

La mise en place des capteurs au champ peut modifier la quantité de solution prélevée ainsi que sa composition chimique. La plupart des auteurs s'accordent pour recommander d'introduire les capteurs en force dans le sol, sans addition de sable ou de boue destinés à améliorer le contact entre la bougie et le sol. Dans notre expérimentation, l'implantation a été réalisée verticalement, en enfonçant en force les capteurs dans un trou dont le diamètre était de 1 mm inférieur à celui de la bougie. Même ainsi, l'introduction des capteurs peut modifier les caractéristiques porales du sol, par tassement au contact de la bougie, et par création de voies de circulation privilégiées lors de l'aspiration. Au démontage du dispositif utilisé, aucune modification du sol à proximité des bougies n'a cependant pu être observée à l'œil nu, probablement en raison d'une forte résistance du sol à l'écrasement.

Le colmatage des bougies au champ est important dans certains cas (HANSEN et HARRIS, 1975 ; TALSMA *et al.*, 1979 ; DEBYLE *et al.*, 1988). Après la première année d'utilisation, nous avons rapporté les capteurs au laboratoire et mesuré à nouveau leur conductivité par aspiration d'eau

distillée. Aucune diminution significative de conductivité n'a pu être mise en évidence. Deux raisons peuvent être invoquées. La première est d'ordre minéralogique : en effet, la phase argileuse du sol étudié est principalement constituée de kaolinite fortement floculée par les oxydes de fer. Elle ne se disperse que très peu, contrairement aux minéraux smectitiques et à la kaolinite des sols ferrugineux tropicaux, faiblement liée aux oxydes de fer. La seconde est technique : le contact entre les bougies et le sol n'est pas parfait. Ainsi, le contact s'effectuait sur les deux tiers de la surface pour les bougies observées lors du démontage. Or, les zones qui ne sont pas au contact du sol ne sont pas traversées par les solutions pendant les prélèvements. Elles ne se colmatent donc pas, mais peuvent ensuite jouer un rôle important lorsque les bougies sont testées dans l'eau. Cependant, comme le problème du contact se posait également pour les auteurs, qui ont constaté une importante diminution de conductivité, il est probable que la nature minéralogique des argiles joue ici le rôle principal.

La détermination de la dépression à appliquer et celle du temps d'aspiration soulèvent des questions de fond sur la représentativité des solutions prélevées avec ces dispositifs. En effet, selon la dépression exercée et le temps pendant lequel elle est appliquée, des eaux retenues par des forces de succion variables sont recueillies, et la circulation de l'eau au voisinage du capteur est plus ou moins fortement perturbée.

Notre expérimentation ne permet pas d'aborder le problème des liaisons entre la valeur de la dépression utilisée, le temps d'application et la charge ionique des échantillons récoltés. Il s'agit d'un sujet délicat et mal connu (SEVERSON et GRIGAL, 1976). L'influence de la dépression sur la composition chimique de la solution récoltée ne doit toutefois pas être surévaluée. En effet, les succions appliquées — généralement entre 500 et 700 hPa, soit moins de pF 3 — ne permettent pas d'accéder à l'eau fortement liée au sol, qui présente les plus fortes minéralisations. Par ailleurs, plus les succions sont élevées, plus les conductivités hydrauliques sont faibles : les solutions retenues par les forces de succion les plus faibles constituent donc la plus grande part des échantillons prélevés. Une dépression de 600 hPa exercée pendant 24 heures a été retenue dans cette expérimentation. Le même protocole a été utilisé pour tous les prélèvements, afin de diminuer la variabilité des résultats (HANSEN et HARRIS, 1975).

Des recherches méthodologiques ont permis de définir les perturbations apportées par les capteurs à la répartition des charges hydrauliques dans le sol, et de montrer que les échantillons récoltés proviennent d'une sphère dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 30 cm, même à des pF de l'ordre de 2,5, lorsque la dépression est maintenue pendant vingt jours (WARRICK et AMOOZEGAR-FARD, 1977 ; VAN DER PLOEG et BEESE, 1977 ; TALSMA *et al.*, 1979). Cette valeur du diamètre d'influence semble constituer un maximum, du fait de l'hétérogénéité du sol en place, des temps de dépression habituellement utilisés — de quelques heures à quelques jours —, et du tassement du sol à proximité du

capteur (TALSMA *et al.*, 1979). Il n'en reste pas moins qu'un prélèvement à l'aide d'un capteur intègre un volume de sol qui peut être assez important.

Problèmes chimiques

Des multiples articles consacrés à l'influence du contact entre la solution extraite et la bougie, trois principaux obstacles ressortent : la libération d'ions par les bougies, l'adsorption de certains ions sur la céramique et la correspondance avec d'autres méthodes de prélèvement.

Lorsque des bougies neuves sont installées, elles peuvent libérer différents ions, dont du calcium, du sodium et du potassium. C'est pourquoi GROVER et LAMBORN (1970) ont proposé de faire percoler de l'acide chlorhydrique 1N à travers les bougies, et de les rincer ensuite à l'eau permutée. En opérant de cette façon, la libération ultérieure des ions est considérablement diminuée. Cette méthode permet de plus de redonner un comportement de capteurs neufs à des capteurs déjà utilisés au champ (DEBYLE *et al.*, 1988). Elle constitue actuellement la méthode de référence pour la préparation des capteurs en céramique. Tous les capteurs que nous avons utilisés ont séjourné dans l'acide pendant trois jours, avant d'être rincés à l'eau distillée par aspiration à travers la bougie, jusqu'à égalisation du pH de l'eau recueillie et de l'eau distillée.

Comme le souligne LITAOR (1988), les résultats concernant l'adsorption des ions par la céramique des bougies ont donné lieu à des publications contradictoires, probablement en raison de la diversité des matériels et des protocoles utilisés. Sans entrer dans une discussion toujours d'actualité, il paraît maintenant certain que des problèmes d'adsorption importants apparaissent pour le phosphore (HANSEN et HARRIS, 1975 ; NAGPAL, 1982 ; GAUDIN *et al.*, 1985), et pour l'ion ammonium lorsqu'il se trouve à de faibles concentrations (WAGNER, 1962 ; ZIMMERMAN *et al.*, 1978 ; BERNHARD et SHENCK, 1986). Pour les ions K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et NO_3^- , les résultats ne sont pas tous cohérents, mais la plupart des auteurs concluent à l'absence d'adsorption, du moins après le passage d'une certaine quantité de solution à travers la paroi de la bougie.

Des liaisons entre la composition des solutions prélevées et celle des sols ont parfois été recherchées. Aucune relation n'a pu être trouvée, ni avec les extraits de pâte saturée (BARBARICK *et al.*, 1979), ni, dans notre cas, avec les bases extractibles à l'eau ou à l'acétate : les méthodes d'extraction chimique donnent des chiffres beaucoup plus élevés, mais sans relation avec ceux obtenus dans les solutions prélevées. En revanche, les comparaisons entre les résultats des capteurs et ceux des lysimètres ne montrent pas de différences importantes (CHABALIER, 1984). Les études comparatives sont cependant trop peu nombreuses pour pouvoir conclure de manière définitive.

L'étude de la dynamique des éléments minéraux dans le sol à l'aide des capteurs en céramique reste donc actuellement la seule méthode pratique pour obtenir la

solution du sol au champ (ALBERTS *et al.*, 1977), mais elle ne doit être considérée que comme un moindre mal (CHEVERRY, 1983), et tous les détails du protocole doivent être précisés, en raison de la variabilité des résultats en fonction du mode opératoire (LITAOR, 1988).

Dispositif de prélèvement de la solution du sol

Les capteurs en céramique poreuse Soil Moisture ont été fixés sur des tubes en PVC à l'aide de résine époxyde selon la méthode décrite par WAGNER (1962). Après lavage à l'acide chlorhydrique, ils ont été conservés dans de l'eau distillée jusqu'à leur pose. Sous culture, 64 capteurs ont été implantés entre les lignes de semis, à mi-distance des pieds de maïs ou de niébé (figure 4), selon le dispositif suivant :

- 2 traitements (NPK0 et NPK2) ;
- 2 sous-traitements (A et B) ;
- 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) ;
- 4 répétitions.

Sur le sol nu après jachère (SNJ), 32 capteurs ont été installés, suivant :

- 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) ;
- 8 répétitions.

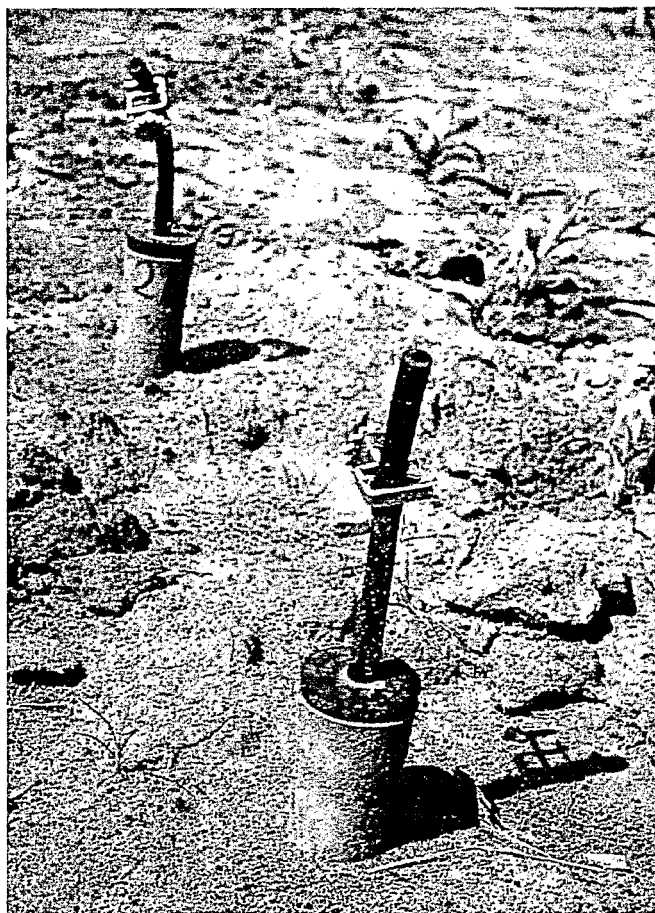


Figure 4. Implantation des capteurs dans les parcelles.

Le rythme des prélèvements avait été fixé à deux prélèvements par mois. En raison d'une bonne répartition des pluies, ils ont pu être réalisés sans interruption pendant huit à neuf mois consécutifs au cours des deux années d'expérimentation. Le nombre de prélèvements réussis a été de 19 en 1985 et de 17 à 20, selon la profondeur, en 1986.

Pour la collecte de la solution, deux protocoles ont été successivement utilisés. En première année (1985), une dépression de 600 hPa était appliquée un jour, et la solution était récoltée le lendemain. En seconde année, les modifications suivantes ont été apportées :

- mise en dépression l'après-midi, et non le matin, du jour précédant le prélèvement ;
- lorsqu'aucune solution ne se trouvait dans le capteur le jour du prélèvement, une nouvelle dépression était appliquée, et le recueil de la solution était effectué le jour même, environ quatre heures plus tard, ou le lendemain.

Le taux de réussite, qui était de 75 % en 1985, a été porté à 90 % en 1986.

Dosage des éléments minéraux

Méthodes utilisées

Après mesure de leur volume au champ, les échantillons recueillis ont été aussitôt transportés au laboratoire pour y être conservés au réfrigérateur. Sur chaque prélèvement, le pH, les teneurs en cations majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et Na^+) et en certains anions (NO_3^- , Cl^- et HCO_3^-) ont été déterminés au centre ORSTOM de Lomé.

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode de verre combinée. Les concentrations en cations K^+ et Na^+ ont été déterminées en émission de flamme, celles en Ca^{++} et Mg^{++} par absorption atomique en milieu acide (HCl à 5 %) en présence d'un tampon spectral (lanthane à 1 %). Pour les anions, NO_3^- a été dosé par colorimétrie (méthode à l'acide phénoldisulfonique), Cl^- et HCO_3^- par potentiométrie. La recherche, sur quelques échantillons, du phosphore (colorimétrie au bleu de molybdène), de l'ammonium (coloration par le réactif de Nessler) et des sulfates (néphélométrie du précipité de sulfate de baryum) a donné des valeurs très faibles. On obtient, en moyenne, 0,006 mé l⁻¹ pour PO_4^{--} , 0,08 mé l⁻¹ pour NH_4^+ et 0,11 mé l⁻¹ pour SO_4^- . Ces ions susceptibles de se fixer sur la céramique des capteurs n'ont pas été étudiés lors de l'expérimentation.

Les résultats obtenus par le laboratoire de Lomé ont été comparés à ceux du laboratoire IRAT de Montpellier, à partir de l'étude de solutions témoins. Les résultats ont montré que les chiffres du laboratoire de Lomé sont généralement différents de moins de 10 % de ceux du laboratoire IRAT.

Variabilité des résultats

La précision des analyses réalisées à Lomé a été reportée dans le tableau IV, et les coefficients de variation moyens

des teneurs, pour huit répétitions par traitement et par profondeur, dans le tableau V.

Les coefficients de variation des concentrations des différents ions dans la solution sont assez élevés — 25 % en moyenne sous culture, 20 % sous sol nu après jachère —, en accord avec des résultats obtenus ailleurs par une méthode comparable (PIERI, 1979 ; GAUDIN *et al.*, 1985). Ils sont du même ordre de grandeur que ceux des rendements des essais agronomiques. Comme le remarque PIERI (1979), il aurait fallu disposer d'au moins 50 capteurs par traitement pour obtenir des résultats à 10 % près avec ces coefficients de variation. Par ailleurs, il apparaît que la variabilité est plus élevée en surface qu'en profondeur, et qu'elle est plus forte sur les parcelles cultivées que dans le sol nu après jachère, probablement en raison de l'hétérogénéité introduite par l'apport d'engrais et l'enfouissement des résidus de récolte.

La comparaison, pour chaque élément, des coefficients de variation et de la précision analytique montre que les erreurs analytiques sont négligeables devant la variabilité spatiale pour K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NO_3^- et le pH, mais qu'elles deviennent importantes pour Cl^- et HCO_3^- lorsque les teneurs sont faibles.

L'interprétation des résultats a porté sur les valeurs moyennes des quatre répétitions par niveau pour les parcelles cultivées et des huit répétitions par niveau pour la parcelle nue après jachère.

Tableau IV. Précision moyenne des analyses d'échantillons d'eau par le laboratoire ORSTOM de Lomé.

Analyse	Précision analytique moyenne
pH	± 0,3 % (0,02 unité pH)
K^+ et Na^+	± 1 % (teneurs > 0,025 mé l ⁻¹ pour K^+ , > 0,07 mé l ⁻¹ pour Na^+)
Ca^{++} et Mg^{++}	± 15 % (appareillage vétuste)
NO_3^-	± 5 % (teneurs > 0,15 mé l ⁻¹)
Cl^-	± 2 % pour 2 mé l ⁻¹ ± 10 % pour 1 mé l ⁻¹ (fréquent en profondeur) ± 30 % pour < 0,3 mé l ⁻¹ (fréquent en surface)

Tableau V. Coefficients de variation (%) moyens des teneurs en éléments minéraux dans la solution prélevée, pour 1985 et 1986, tous traitements confondus.

Profondeur (cm)	NO_3^-		Ca^{++} - Mg^{++}		K^+		Cl^-	
	C	SNJ	C	SNJ	C	SNJ	C	SNJ
30	31	23	27	18	32	16	22	15
60-120	33	19	29	16	22	16	22	16
180	15	24	20	21	17	23	18	18

C : culture (moyenne de 1985 et 1986).
SNJ : sol nu après jachère (1986).

Résultats et discussion

Conditions hydriques et rendements

Les conditions hydriques — pluviométrie et ETR par cycle et ETR/ETM à la floraison — jouent un rôle prépondérant dans l'élaboration du rendement du maïs sur les terres de barre du sud du Togo (Poss *et al.*, 1988). Au cours de la période d'expérimentation, elles furent assez proches de la moyenne des cinquante-trois dernières années, à l'exception de la PSP 1986, qui fut déficitaire (tableau VI et figure 5).

L'analyse agronomique des résultats fait l'objet d'une publication séparée (SARAGONI *et al.*, à paraître). En

Composition de la solution prélevée

Composition moyenne

Sous culture, la répartition dans le profil des teneurs en nitrates et en cations alcalino-terreux est différente de celle relevée dans le sol nu après jachère (tableau VIII). Dans le sol nu, les teneurs en profondeur (180 cm) sont dix fois plus faibles qu'en surface. L'inverse est observé sous culture, où les teneurs sont deux fois plus faibles à 30 et 60 cm qu'à 180 cm. Ces différences de répartition peuvent être expliquées par les différences d'enracinement. En effet, l'enracinement était profond sous la jachère initiale, alors que 90 % des racines du maïs et la totalité des racines de niébé sont situées dans la tranche 0-60 cm. Sous jachère, tous les éléments sont prélevés par le végétal, alors que sous culture une partie est entraînée en profondeur, hors de portée du système racinaire.

Tableau VI. Conditions hydriques de l'expérimentation en 1985 et 1986 pour la culture de maïs.

Saison	Année	Pluie cycle (mm)	ETR cycle (mm)	ETR/ETM floraison (%)
Grande saison des pluies (GSP)	1985	462	329	94
	1986	441	298	87
	Moyenne 1934-1986	493	300	93
Petite saison des pluies (PSP)	1985	355	268	95
	1986	267	180	66
	Moyenne 1934-1986	299	238	76

conditions d'alimentation en eau peu contraignantes (tableau VII). le rendement en GSP est fortement augmenté par la fertilisation potassique (13 q ha⁻¹ avec NPK0 et 30 q ha⁻¹ avec NPK2). En revanche, il n'a pas été influencé par le fractionnement du potassium testé en 1986. Bien qu'une seule année d'expérimentation soit insuffisante pour conclure d'une manière définitive, il semble donc que cette technique ne soit pas à même d'augmenter significativement les rendements. Par ailleurs, au cours des deux années d'expérimentation, le précédent légumineuse n'a pas eu d'effet sur le rendement. Il s'agit là d'une exception, car pour l'ensemble des parcelles et des années, le précédent légumineuse augmente les rendements en maïs de 10 à 20 % (SARAGONI *et al.*, à paraître).

Au cours de la petite saison des pluies, l'absence de fertilisation potassique combinée au déficit hydrique est responsable des très faibles rendements en maïs (2 à 8 q ha⁻¹ avec NPK0). Inversement, une dose de 60 à 90 K₂O ha⁻¹ permet de tripler le rendement (14 à 18 q ha⁻¹ avec NPK2), que l'apport soit fractionné ou non.

La pluviosité a été suffisante pour le niébé de PSP au cours des deux années étudiées. Seul l'effet de la fertilisation potassique a été mis en évidence (300 à 400 kg ha⁻¹ en NPK0, 900 à 1 000 kg ha⁻¹ pour NPK2).

Ces résultats montrent l'importance de la fertilisation potassique pour maintenir le potentiel de production des terres de barre, aussi bien pour le maïs que pour le niébé.

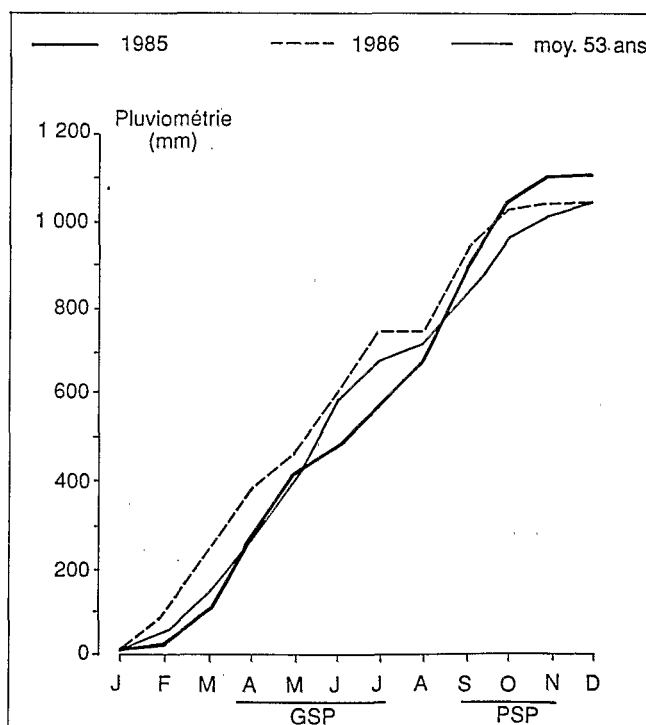


Figure 5. Pluviométrie mensuelle cumulée (1985, 1986 et moyenne 1934-1986).

Tableau VII. Rendements en grains obtenus en 1985 et 1986.

Saison	Culture	Année	Traitement			
			NPK0		NPK2	
			A	B	A	B
Grande saison des pluies (GSP)	Maïs (q ha ⁻¹)	1985	10,9	12,6	29,1	31,2
		1986	15,3	12,5	30,8	28,7
		Moyenne	13,1	12,6	30,0	30,0
Petite saison des pluies (PSP)	Maïs (q ha ⁻¹)	1985	7,6		18,0	
		1986	2,3		14,2	
		Moyenne	5,0		16,1	
	Niébé (kg ha ⁻¹)	1985		270		1 000
1986			370		940	
Moyenne			320		970	

A Succession maïs-maïs.

B Succession maïs-niébé.

Tableau VIII. Concentration moyenne de la solution du sol en 1986.

Profondeur (cm)	Système	Fumure	Teneur (mé l ⁻¹)			
			NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺
30-60	Maïs-maïs	NPK0	1,09	0,84	0,69	0,03
		NPK2	0,54	0,61	0,52	0,09
	SNJ	N0P0K0	3,48	2,56	2,37	0,05
180	Maïs-maïs	NPK0	2,58	1,76	1,21	0,04
		NPK2	0,93	1,15	0,64	0,07
	SNJ	N0P0K0	0,34	0,28	0,22	0,03

SNJ : sol nu après jachère.

Les teneurs moyennes en NO₃⁻, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de la solution du sol à 30-60 cm sous le système maïs-maïs ne représentent que le tiers (NPK0) ou le cinquième (NPK2) de celles observées dans le sol nu après jachère, en contraste avec le pH, qui reste pratiquement identique (6,2 à 6,4). Les concentrations plus élevées après jachère proviennent certainement de la décomposition des résidus végétaux et de la minéralisation de la matière organique, dont la teneur est plus de deux fois supérieure à celle des sols sous culture. La quantité de calcium présente dans le superphosphate triple (20 % de CaO) semble suffisante pour maintenir un pH constant sous culture, au moins pendant les dix premières années, alors que des chutes importantes de pH apparaissent sous culture continue sans apport de calcium (DABIN, 1956).

Les teneurs moyennes en potassium sont inférieures à 0,09 mé l⁻¹. Par rapport à la parcelle après jachère, les teneurs en potassium aux profondeurs 30 et 60 cm sont deux fois plus faibles sur la parcelle sans engrais, mais deux fois plus fortes sur la parcelle fertilisée. L'apport d'engrais permet donc d'augmenter la concentration du potassium dans la solution du sol de la zone d'extraction racinaire, même en culture intensive. En profondeur, les teneurs sont en revanche voisines sous le sol nu après jachère et sous les

parcelles non fertilisées. Elles représentent environ la moitié des valeurs obtenues sous parcelles fertilisées.

Les teneurs en azote nitrique sont différentes selon la rotation utilisée (tableau IX) : l'introduction d'une légumineuse (niébé) dans l'assolement augmente nettement la teneur en nitrates dans la solution du sol par rapport à une culture continue de maïs, à fertilisation et taux de matière organique très voisins. L'effet de la légumineuse sur la fixation de l'azote apparaît donc clairement. Mais les teneurs à la base du profil sont plus élevées sous le système maïs-légumineuse que sous la culture pure de maïs. Cette différence semble être à imputer au système racinaire plus réduit des légumineuses.

Evolution spatio-temporelle des concentrations

pH et Na⁺

Le pH et les teneurs en Na⁺ varient peu dans le temps, et sont peu sensibles aux traitements. La répartition dans le profil est différente selon les éléments : elle diminue avec la profondeur pour le pH (de 6,4 à 6,1), alors qu'elle augmente pour Na⁺ (de 0,15 à 0,25 mé l⁻¹).

Tableau IX. Influence de la rotation sur la concentration moyenne en nitrates (mé l⁻¹) dans la solution du sol après fertilisation NPK complète.

Profondeur (cm)	Année	Maïs-maïs	Maïs-légumineuse
30-60	1985	0,7	1,2
	1986	0,5	0,8
	Moyenne	0,6	1,0
180	1985	1,1	2,1
	1986	0,9	1,0
	Moyenne	1,0	1,5

Cl⁻

En l'absence d'apport de chlorure de potassium, les teneurs en ions Cl⁻ sont de l'ordre de 0,4 mé l⁻¹, quels que soient le système, l'année et la profondeur. En parcelles fertilisées, cet ion est en revanche très rapidement lessivé. Il se retrouve à 60 cm en deux à trois semaines (1,2 mé l⁻¹), et s'accumule en profondeur (1,7-2,0 mé l⁻¹ à 120 et 180 cm).

K⁺

La fertilisation potassique du maïs entraîne un accroissement significatif de la teneur en potassium de la solution captée à 30 cm pendant les deux mois qui suivent son application (figure 6). En moyenne, les concentrations à 30 cm sont de 0,20 mé l⁻¹ en GSP et de 0,10 mé l⁻¹ en PSP 15 jours après l'apport. Mais elles retombent à des valeurs proches de celles observées sur les parcelles non fertilisées (tableau VIII) 60 jours après le semis. L'augmentation de concentration liée à l'apport d'engrais est donc fugace. En profondeur, la présence de variations de concentrations, même très atténuées, traduit l'existence d'une lixiviation en dessous de la zone d'extraction racinaire.

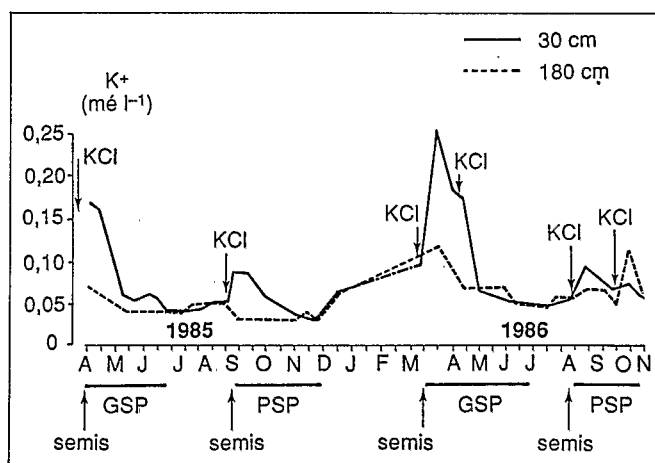


Figure 6. Evolution de la concentration en potassium de la solution du sol, traitement NPK2, systèmes maïs-maïs et maïs-légumineuse confondus.

NO₃⁻, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺

Les teneurs en NO₃⁻, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺, sous sol nu après jachère (SNJ) comme sous culture (figures 7 et 8), varient selon la profondeur et le traitement. Sous SNJ, les concentrations sont beaucoup plus faibles à la base du profil (180 cm) qu'en surface, alors que sous culture elles restent supérieures en profondeur la plus grande partie de l'année.

Les teneurs en profondeur augmentent au cours de l'année d'expérimentation sous SNJ, alors qu'elles sont variables tout au long des deux années de mesure sous culture. A proximité de la surface, des variations de teneurs importantes apparaissent (de 0,04 à 2,44 mé l⁻¹ pour NO₃⁻ sous culture), que ce soit sous SNJ ou sous culture. L'évolution des teneurs est comparable pour les différents éléments, et les relations qui les unissent seront étudiées plus loin.

Sous SNJ, les teneurs en surface sont minimales pendant les saisons sèches, et passent par un maximum au cours des saisons des pluies (variations de l'ordre de 1 à 3). Au cours des deux années étudiées, la dynamique observée sous culture est voisine :

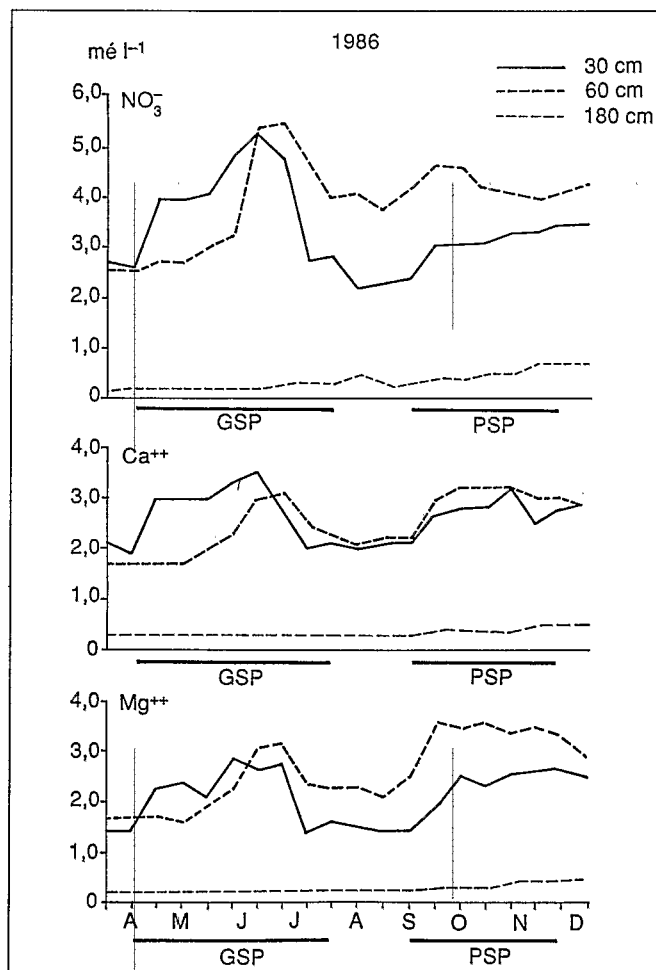


Figure 7. Evolution de la concentration en N (NO₃⁻), Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de la solution du sol sous sol nu après jachère, en grande saison des pluies (GSP) et en petite saison des pluies (PSP) de 1986.

— les teneurs les plus faibles sont observées pendant les saisons sèches ;

— les teneurs les plus fortes s'observent au cours des saisons des pluies, mais pendant les deux années étudiées les teneurs chutent rapidement, à des valeurs voisines d'une année à l'autre, au milieu de la GSP.

Sous culture, comme sous SNJ, les variations de teneurs en surface résultent probablement de la minéralisation de la matière organique, à laquelle s'ajoute, sous culture, l'effet des apports d'azote. La diminution rapide des teneurs au milieu des saisons des pluies est à relier à la lixiviation et à la demande des plantes, qui sont en période de croissance maximale.

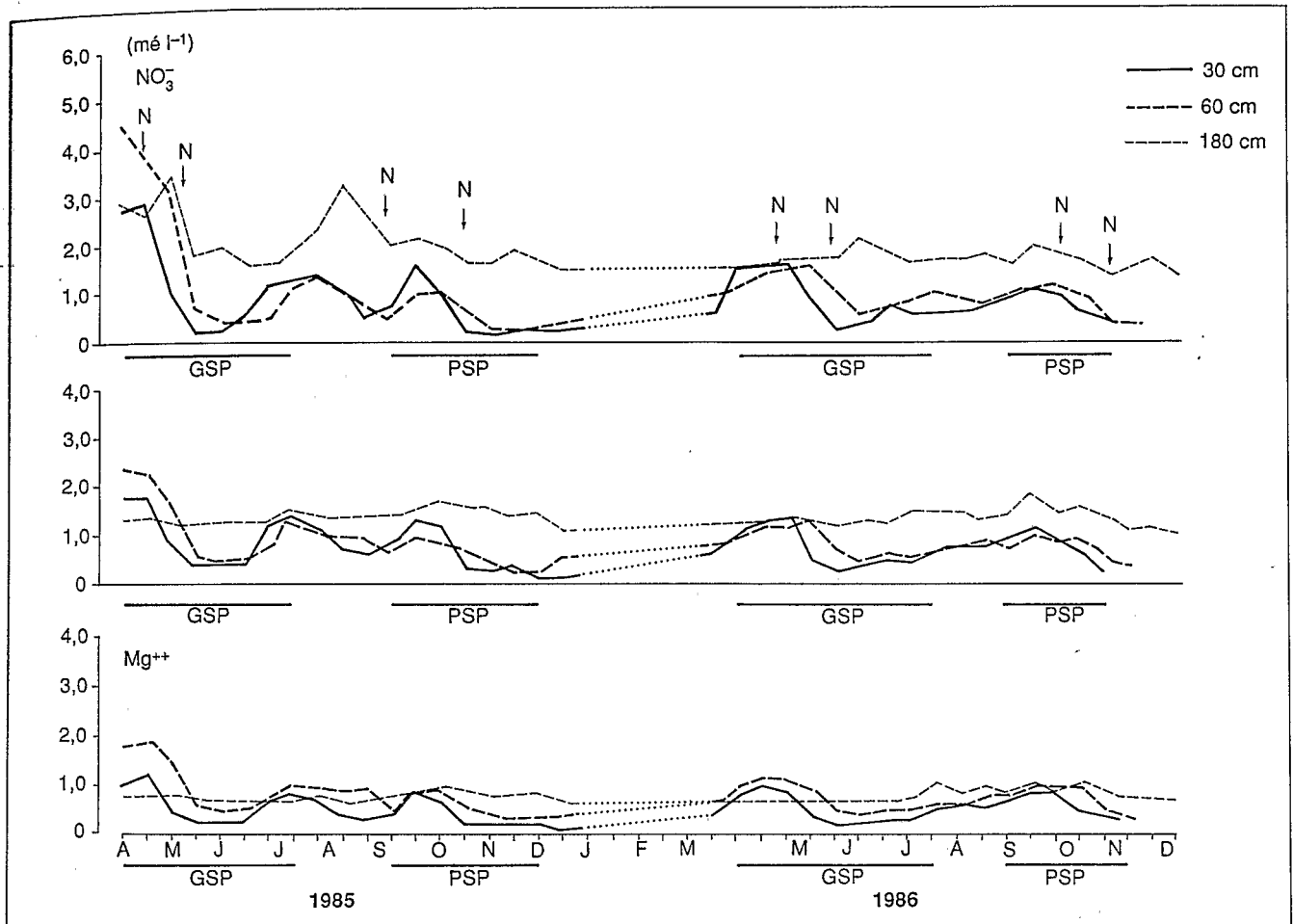


Figure 8. Evolution de la concentration en $N(NO_3^-)$, Ca^{++} et Mg^{++} de la solution du sol sous culture, tous traitements confondus, en grande saison des pluies (GSP) et en petite saison des pluies (PSP) de 1985 et 1986.

Une interprétation fondée sur les différents systèmes de culture peut être proposée pour rendre compte de la répartition des teneurs dans le profil et de leur évolution au cours du temps. Sur le sol nu après jachère, les pics d'azote observés dès le début de la saison des pluies s'accompagnent d'une augmentation des teneurs en Ca^{++} et Mg^{++} . Ils sont probablement liés à la minéralisation de la matière organique (2,1 % au moment où l'herbe a été coupée), sous l'effet du développement rapide des micro-organismes. Les faibles teneurs en profondeur observées au début de l'expérimentation sous SNJ prouvent l'efficacité du système racinaire profond de la jachère pour prélever les éléments minéraux dans le sol et éviter ainsi leur lixiviation. Ces teneurs augmentent logiquement après la destruction de la jachère.

Relations entre les éléments minéraux

Les teneurs en Ca^{++} et en Mg^{++} de la solution prélevée sont étroitement corrélées ($r = 0,90$ pour $n = 278$). Ces teneurs sont corrélées à celles en NO_3^- , comme dans le cas des sols « dior » du Sénégal (PIERI, 1979). La comparaison des parcelles NPK0 et NPK2 (figure 9) fait apparaître que l'apport de chlorure de potassium joue également un rôle dans la mobilisation du calcium. La matrice de corrélations entre les concentrations des différents ions montre que les teneurs en Ca^{++} sur les parcelles fertilisées sont corrélées aux teneurs en chlore, mais pas aux teneurs en potassium, sans que le mécanisme ait pu être déterminé.

Une régression multiple, tous horizons confondus, a été réalisée entre les teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, NO_3^- et Cl^- , exprimées en milliéquivalents par litre :

$$[\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}] = 0,78 [\text{NO}_3^-] + 0,60 [\text{Cl}^-] + 0,40$$

($r = 0,92$ pour $n = 395$)

L'analyse de la matrice de corrélations prouve que la teneur en nitrates, donc l'activité nitrificatrice du sol, est le premier facteur explicatif des teneurs en calcium et en magnésium, donc de la mise en solution de ces ions. Mais le chlorure de potassium peut également jouer un rôle important lorsqu'il est apporté en grande quantité.

Evaluation des pertes minérales par lixiviation

Pour évaluer la lixiviation, nous faisons l'hypothèse que la solution recueillie présente la même composition que l'eau qui draine naturellement dans le sol. Les quantités lixiviées au cours d'un temps donné sont donc évaluées en multipliant la concentration des solutions recueillies par la quantité d'eau qui a percolé à 150 cm au cours de cette période.

Le drainage et les pertes minérales cumulées de trois éléments pour le traitement NPK2 au cours de l'année 1986 ont été représentés sur la figure 10. Les valeurs de drainage et de lixiviation de l'année 1986 sont plus élevées que la moyenne (tableau X). En effet, les épisodes pluvieux ont été concentrés sur des périodes plus courtes que la moyenne.

Comme les concentrations varient peu à 180 cm (figures 6 et 8), la lixiviation de chaque élément a été évaluée à partir de la moyenne des valeurs mesurées pendant les deux années de l'expérimentation (tableau XI). Il apparaît que les pertes sont assez faibles pour le sodium ($20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de Na_2O) et le potassium (moins de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de K_2O), mais qu'elles sont importantes pour les nitrates et les cations alcalino-terreux.

Pour le potassium, les pertes sous la parcelle NPK2 ($9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de K_2O) représentent environ 5 % des apports annuels. La valeur des pertes est difficile à connaître avec précision, en raison des incertitudes sur le bilan hydrique. L'ordre de grandeur est cependant certain, car il

résulte des concentrations extrêmement faibles du potassium dans la solution du sol. Ces pertes limitées de potassium confirment que le potassium est très peu lixivié dans les régions tropicales sous des systèmes peu intensifiés, même dans des sols où le complexe d'échange est peu développé (PIERI, 1979 ; CHABALIER, 1984 ; PIERI et OLIVER, 1986).

La lixiviation de l'azote et des cations alcalino-terreux est considérablement diminuée (de 25 à 55 %) par la fertilisation potassique. Ceci résulte en partie d'une diminution du drainage consécutive à une meilleure croissance des plantes sur les parcelles fertilisées en potassium (de l'ordre de 15 %, tableau X). Mais il semble que le facteur principal soit une meilleure utilisation de l'azote par la plante à la suite de la levée de la carence potassique. La croissance du végétal étant améliorée, l'absorption d'azote est stimulée, entraînant une diminution de la teneur en nitrates dans la solution du sol. L'évolution des teneurs en calcium et en magnésium étant parallèle à celle des nitrates, ces éléments sont moins lixiviés lorsque la concentration des nitrates diminue.

L'introduction d'une légumineuse dans la rotation (niébé de PSP) augmente les pertes d'azote par lixiviation (tableau XII), comme celles de calcium et de magnésium. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sous arachide au Sénégal (PIERI, 1989). Ils proviennent vraisemblablement de la plus faible pression exercée sur le milieu par le niébé qui, par rapport au maïs, présente un enracinement moins profond, des mobilisations et une évapotranspiration plus faibles.

Tableau X. Drainage à 180 cm sous culture de maïs, mesuré en 1985 et 1986 (moyenne estimée par simulation).

Période	1985		1986		Moyenne 1934-1986	
	NPK0	NPK2	NPK0	NPK2	NPK0	NPK2
Janvier-juillet (mm)	60	48	280	242	179	152
Août-décembre (mm)	204	163	157	140	85	72
Total annuel (mm)	264	211	437	382	264	224
% pluie	24	19	42	37	25	21

Tableau XI. Evaluation des pertes minérales annuelles par lixiviation sous culture de maïs des parcelles fertilisées en azote et phosphore, fertilisées et non fertilisées en potassium, avec drainage à 150 cm évalué par simulation du bilan hydrique.

Période	Traitement	Lixiviation ($\text{kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)				
		N	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Janvier à juillet	NPK0	63	68	36	12	4
	NPK2	30	53	20	14	6
Août à décembre	NPK0	28	39	17	6	2
	NPK2	12	27	10	7	3
Total annuel	NPK0	91	107	53	18	6
	NPK2	42	80	30	21	9

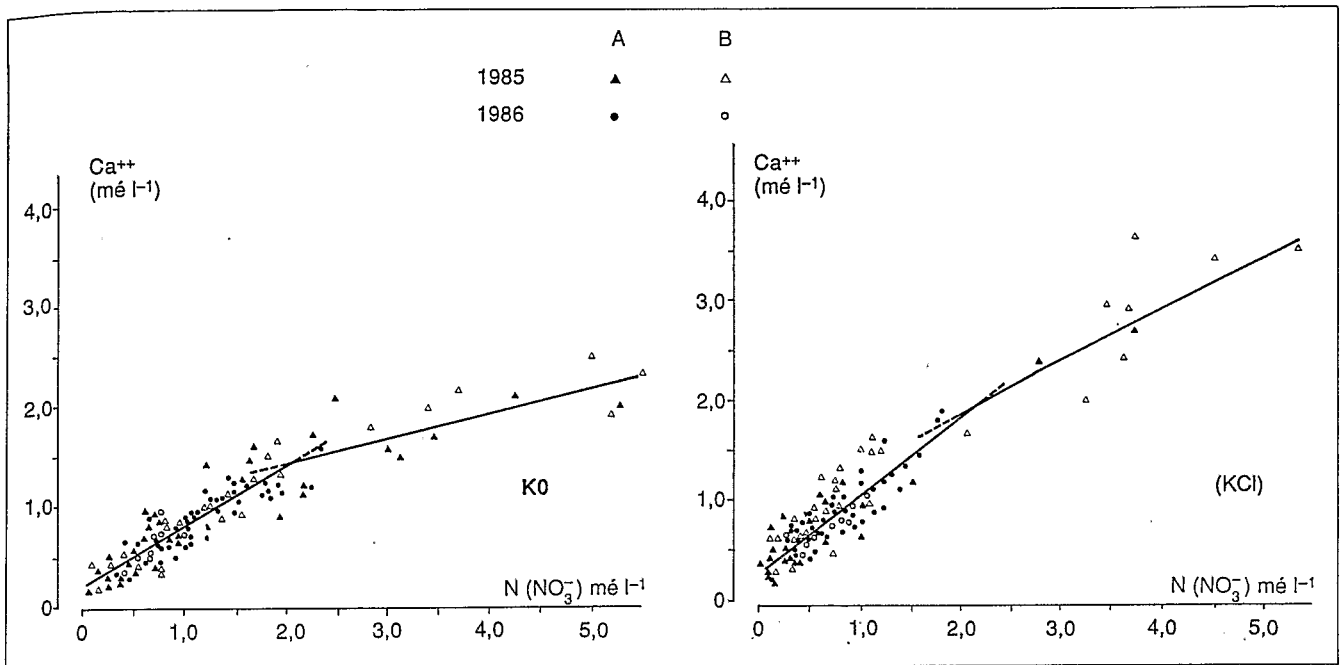


Figure 9. Relations entre les teneurs en calcium et en nitrates dans la solution du sol sous culture, aux profondeurs 30 et 60 cm.

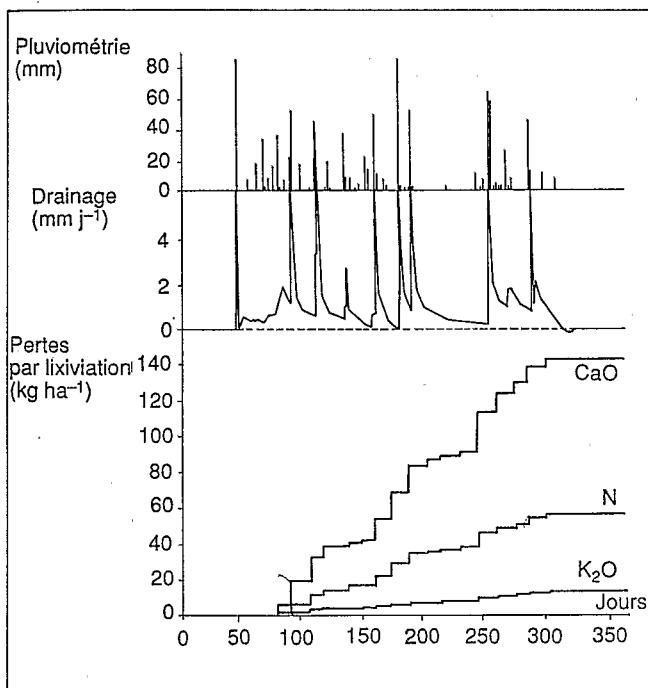


Figure 10. Pluviométrie, drainage et lixiviation à 180 cm sous maïs fertilisé, depuis le début de l'année 1986.

Conclusion

Les capteurs de solution du sol en céramique permettent de suivre l'évolution des concentrations de certains éléments minéraux dans la zone racinaire et d'évaluer la lixiviation au champ. Mais leur utilisation soulève des problèmes méthodologiques encore mal résolus, dont celui de la représentativité de la solution prélevée. Un protocole opératoire strict doit être observé, car la composition des échantillons peut varier de larges proportions selon la méthode utilisée. Par ailleurs, il est nécessaire que les échantillons récoltés puissent être acheminés rapidement vers un laboratoire d'analyse et qu'ils soient traités le plus vite possible, car leur composition chimique est susceptible d'évoluer.

Dans les terres de barre, la composition de la solution captée par les bougies poreuses dans la zone d'exploitation racinaire évolue au cours du temps selon un cycle annuel. Pour le potassium, les teneurs augmentent après les apports d'engrais, pour retomber à leurs valeurs initiales après deux mois. L'azote nitrique semble déterminant pour expliquer la dynamique du calcium et celle du magnésium. L'évolution des concentrations de ces trois éléments au cours du temps est complexe, car l'effet des apports d'engrais se combine à la minéralisation de la matière organique, aux réorganisations microbiennes et aux prélèvements par les plantes. Le suivi des teneurs à l'aide des capteurs en céramique semble donc constituer une voie d'étude prometteuse de l'effet des apports d'engrais sur la concentration des éléments nutritifs dans la zone d'extraction racinaire.

Tableau XII. Pertes d'azote nitrique par lixiviation ($N\text{ kg ha}^{-1}\text{ an}^{-1}$) sous culture pour deux rotations après fertilisation complète (mesurées en 1985 et 1986, moyenne estimée par simulation).

Année	Maïs-maïs	Maïs-légumineuse
1985	35	62
1986	65	88
Moyenne 1934-1986	34	50

La lixiviation des éléments minéraux à la base du profil est très variable selon les éléments. Elle demeure toujours inférieure à $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le potassium, même avec des apports annuels de 150 kg ha^{-1} , alors qu'elle peut atteindre $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour l'azote nitrique et le calcium. Les apports d'azote et de chlorure de potassium augmentent considérablement la mobilisation du calcium et du magnésium, et favorisent donc leur entraînement si les végétaux n'exercent pas un prélèvement suffisant.

Les faibles concentrations observées en profondeur après jachère prouvent l'importance du facteur enracinement pour limiter la lixiviation. *A contrario*, la lixiviation est plus élevée sous les légumineuses, à enracinement peu profond, que sous maïs. Comme toutes les études récentes conduites dans cette zone climatique concluent à d'importantes pertes par lixiviation souvent accompagnées de diminution de pH, il apparaît souhaitable de chercher à développer l'utilisation de variétés qui présentent un système racinaire puissant.

Les résultats obtenus à l'aide des capteurs de solution en céramique doivent maintenant être confrontés aux apports par les engrais, aux mobilisations par les plantes et à la composition chimique du sol afin d'établir un bilan minéral complet, et de proposer une fertilisation raisonnée des terres de barre qui permette le maintien à long terme de leur fertilité.

Reçu le 30 avril 1990.

Accepté le 25 janvier 1991.

Remerciements. Les auteurs remercient MM. A. FORGET, assistant pédologue, et J. LARVY-DELARIVIERE, responsable du laboratoire d'analyses, du centre ORSTOM de Lomé, ainsi que M. ISSIFOU, responsable de la station IRAT de Davié, pour leur aide lors de la réalisation de cette étude.

Références bibliographiques

- ALBERTS E.E., BURWELL R.E., SCHUMAN G.E., 1977. Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution extraction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 (1) : 90-92.
- BARBARICK K.A., SABEY B.R., KLUTE A., 1979. Comparison of various methods of sampling soil water for determining ionic salts, sodium, and calcium content in soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43 (5) : 1053-1055.
- BERNHARD C., SCHENCK C., 1986. Utilisation de bougies poreuses pour extraire la solution du sol dans le ried central de l'Alsace. *Bull. GFHN*, 20 : 73-85.
- BRIGGS L.J., MCCALL A.G., 1904. An artificial root for inducing capillary movement of soil moisture. *Science*, 20 (513) : 566-569.
- CHABALIER P.-F., 1984. Comparaison de deux méthodes de mesure de la lixiviation en sol ferrallitique. *L'Agron. Trop.*, 39 (1) : 22-30.
- 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 : 47-71.
- DABIN B., 1956. Contribution à l'étude de la fertilité des terres de barre. *L'Agron. Trop.*, 11 (4) : 490-506.
- DE JONG E., 1976. Inexpensive micro-soil solution sampler. *Can. J. Soil Sci.*, 56 : 315-317.
- DEBYLE N.V., HENNES R.W., HART G.E., 1988. Evaluation of ceramic cups for determining soil solution chemistry. *Soil Sci.*, 146 (1) : 30-36.
- DOME D., 1985. Carte pédologique de la région de Tsévié (Togo) au 1/50 000. Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de barre du Togo. Lomé, ORSTOM, 138 p.
- FRANQUIN P., FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. Trop.*, 32 (1) : 7-11.
- 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.
- GAUDIN R., DUPUY J., RANAIVO J., 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre NH_4^+ et NO_3^- en solution dans les sols de rizières. I. Etude bibliographique. II. Etude expérimentale. *L'Agron. Trop.*, 40 (1) : 26-39.
- GROVER B.L., LAMBORN R.E., 1970. Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low solute concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34 (4) : 706-708.
- HANSEN E.A., HARRIS A.R., 1975. Validity of soil water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39 (3) : 528-536.
- LEVIN M.J., JACKSON D.R., 1977. A comparison of *in situ* extractors for sampling soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 535-536.
- LITAOR M.I., 1988. Review of soil solution samplers. *Water Resour. Res.*, 24 (5) : 727-733.
- MARQUETTE J., 1986. Maintien et amélioration des rendements du maïs sur les terres de barre dans le sud du Togo. *L'Agron. Trop.*, 41 (2) : 132-148.
- NAGPAL N.K., 1982. Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water samplers for nutrient transport studies. *Can. J. Soil Sci.*, 62 : 685-694.
- 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.
- PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD-IRAT, 444 p.
- PIERI C., OLIVER R., 1986. Assessment of K losses in tropical cropping systems of francophone Africa and Madagascar. *In* : Nutrient balances and the need for potassium. Proceedings of the 13th IPI Congress. Reims, France, 25-28 August, p. 73-92. Worblaufen, Suisse, IPI.
- 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.

ROOSE E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Paris, ORSTOM, 569 p. (Travaux et documents de l'ORSTOM, n° 130).

SARAGONI H., POSS R., MARQUETTE J., LATRILLE E., 1992. Fertilisation et succession des cultures vivrières au sud du Togo. Synthèse d'une expérimentation de longue durée (1976-1989) sur terres de barre. *L'Agron. Trop.* (à paraître).

SEVERSON R.C., GRIGAL D.F., 1976. Soil solution concentration: effect of extraction time using porous ceramic cups under constant tension. *Water Resour. Bull.*, 12 (6) : 1161-1170.

SILKWORTH D.R., GRIGAL D.F., 1981. Field comparison of soil solution samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 (2) : 440-442.

TALSMA T., HALLAM P.M., MANSELL R.S., 1979. Evaluation of porous cup soil-water extractors: physical factors. *Aust. J. Soil Res.*, 17 (3) : 417-422.

VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.-L., 1978. Méthodes de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 29 (1) : 1-36.

VAN DER PLOEG R.R., BEESE F., 1977. Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 (3) : 466-470.

WAGNER G.H., 1962. Use of porous ceramic cups to sample soil-water within the profile. *Soil Sci.*, 94 (6) : 379-386.

WARRICK A.W., AMOOZEGAR-FARD A., 1977. Soil water regimes near porous cup water samplers. *Water Resour. Res.*, 13 (1) : 203-207.

ZIMMERMANN C.F., PRICE M.T., MONTGOMERY J.R., 1978. A comparison of ceramic and teflon *in situ* samplers for nutrient pore water determinations. *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, 7 : 93-97.

Summary

SARAGONI H., POSS R., OLIVER R. – Dynamics and lixiviation of minerals in the terres de barre in South Togo.

Porous ceramic cups were used to investigate the transfer of minerals in the root extraction area and to assess lixiviation losses under crops. The methodology used, based on bi-monthly samplings at different depths, is described and analysed. Concentration has varied rapidly in the root extraction area. As regards potassium, fertilizer applications have caused an increase in concentration maintained for only two months. The dynamics of nitrate nitrogen, calcium, and magnesium were similar. They depended on fertilizer applications, mineralization of organic matter, and plant uptake. Potassium losses due to lixiviation were always less than $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, whatever the fertilizer application. Losses of nitrate nitrogen and calcium could be up to nearly $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Nitrogen and chloride applications promoted calcium and magnesium mobilization and thereby their lixiviation when the crop development was not sufficient to uptake the ions in solution.

Key words: porous ceramic cup, potassium, soil solution, drainage, lixiviation, maize, cowpea, terres de barre, Continental terminal, Togo.

Resumen

SARAGONI H., POSS R., OLIVER R. – Dinámica y lixiviación de los elementos minerales en las tierras de barre del Sur del Togo.

Se utilizaron captadores de solución del suelo de cerámica para estudiar la traslocación de elementos minerales en la zona de extracción de las raíces y evaluar las pérdidas por lixivación bajo cultivo. Se define y se analiza la metodología, basada en muestras bimensuales sacadas a diferentes profundidades. Las variaciones de concentración son rápidas en la zona de extracción de las raíces. En lo que se refiere al potasio, los aportes de abono provocan un aumento de concentración que sólo se mantiene durante dos meses. Las dinámicas del nitrógeno nítrico, del calcio y del magnesio son paralelas. Dependen de los aportes de abono, de la mineralización de la materia orgánica y de los elementos extraídos por las plantas. En lo que se refiere al potasio, las pérdidas ocasionadas por lixivación son siempre inferiores a $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, cualquiera que sea la fertilización. Las del ácido nítrico y del calcio pueden alcanzar $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los aportes de nitrógeno y de cloruro favorecen la movilización del calcio y del magnesio, y por lo tanto su lixivación si el desarrollo de los cultivos no es suficiente para extraer los iones puestos en solución.

Palabras-clave : captador de cerámica, vela porosa, potasio, solución del suelo, drenaje, lixivación, maíz, arveja de vaca, tierras de barre, Continental terminal, Togo.