ETUDE DE LA COMPOSITION DE LA SOLUTION DU SOL DES TERRES DE BARRE DU SUD-TOGO A L'AIDE DE CAPTEURS EN CERAMIQUE POREUSE

H. SARAGONI* et R. POSS**

Communication présentée lors de l'atelier ATP/Dynamique des cations (IRAT-CIRAD, Montpellier, décembre 1988)

* Agronome IRAT/DRA - B.P. 1163 et 2318 - LOME (TOGO)
** Pédologue ORSTOM - B.P. 375 - LOME (TOGO)

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 30.083 ex 1
Cote : B M
17 MAI 1990

INTRODUCTION

Le Togo méridional (figure 1) est une zone vitale pour l'agriculture du pays : sur 10 % du territoire (4 000 km^2) vit le tiers de la population (800 000 habitants). La densité rurale peut dépasser les 200 hab/km^2.

Contribuant pour une grande part à l'alimentation de Lomé (400 000 hab.), les sols de cette région sont fréquemment cultivés sans jachère ni restitution organique (utilisation des résidus de récolte comme combustible ménager). Ce sont, pour la plupart, des sols ferrallitiques profonds communément appelés "terres de Barre".

Zone la moins arrosée du golfe de Guinée, le sud-Togo est soumis à un régime pluviométrique bimodal et souvent aléatoire (respectivement quelques 500 mm et 300 mm en grande et petite saisons).

Cet handicap pluviométrique et la dégradation des sols (abandon des jachères lié à la pression démographique, absence de restitution organique...) entraînent une production agricole de plus en plus incertaine et préoccupante : 10 q/ha de maïs, 8 t/ha de manioc, 600 kg/ha d'arachide et 300 kg/ha de niébé (MARQUETTE, 1986).

Le programme conjoint IRAT/ORSTOM/DRA présenté a été lancé en 1983 et est intitulé "Dynamique de l'eau et des éléments minéraux dans les terres de Barre du sud-Togo". L'ORSTOM s'occupe plus particulièrement du volet hydrodynamique tandis que l'IRAT-CIRAD/DRA prend en charge la partie agronomique et la dynamique des éléments minéraux. Il vise à la compréhension des principaux mécanismes intervenant dans l'appauvrissement de ces sols. Pour ce faire, l'étude de leurs propriétés physiques et hydrodynamiques a tout d'abord été entreprise (POSS et al., 1984). Elle fut suivie de celle des conductivités hydrauliques (POSS et al., 1985), du bilan hydrique (FRETEAUD et al., 1987; POSS et SARAGONI, 1987) ainsi que du calage des cycles culturaux et du zonage agro-pédoclimatique (POSS et SARAGONI, 1987 ; POSS et al., 1988).

Cette communication ne traitera donc que de l'aspect agro-chimique du programme pour les années 1985 et 1986 :

- étude de la composition de la solution du sol, à l'aide de capteurs en céramique poreuse, sous culture pluviale de maïs et de niébé ainsi que sous sol nu après jachère ;

- détermination des quantités d'éléments minéraux entraînés en profondeur (lixiviation).

I - MATERIEL ET METHODES

1 - Lieu et sols

Cette étude a été réalisée sur l'essai NPK mené par l'IRAT depuis 1976 sur sa station de Davié (figure 1). Les sols sont des "terres de Barre non dégradées" (tableau I). Ce sont des sols rouges ferrallitiques profonds et homogènes, sans éléments grossiers, formés à partir d'une évolution du dépôt continental qui a recouvert la région au début du quaternaire. La teneur en argile est de 7% dans les horizons de surface et atteint 20% dans celui 20-50 cm. Elle est essentiellement constituée de kaolinite (70%) mais aussi de vermiculite (OLIVER, 1986 b) et/ou de smectites résultant de l'altération de micas (QUANTIN, 1988) qui pourraient modifier la réaction du complexe d'échange et expliquer le comportement de ces sols vis à vis du potassium: activité à l'équilibre assez faible et pouvoir tampon assez élevé (OLIVER, 1986 a et b) ainsi que rétrogradation (FARDEAU, 1985). Enfin, on observe que ces sols sont pauvres en matière organique (8 °/oo en surface) ainsi qu'en azote total (0,4 °/oo) et présentent de faibles somme des bases (2 meq/100g) et capacité d'échange cationique (3 meq/100g).

2 - Traitements

Les traitements N2P1K0 et N2P1K2, ainsi que les sous-traitements A et B, ont été retenus. Ces sous-traitements correspondent à la subdivision suivante :

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

- B : maïs de GSP et niébé (légumineuse) de PSP.

Les doses et épandages d'engrais sont les suivants :

- azote : 60 N/ha sur maïs (fractionnés en deux apports) et pas d'azote sur niébé ;

- phosphore : au semis, 45 P_2O_5/ha en GSP et 25 (1985) ou 45 (1986) P_2O_5/ha en PSP ;

- potasse (K2) : au semis (1985) ou fractionnés en deux apports (1986). En 1985, on a apporté au semis 90 K_2O/ha en GSP et 60 K_2O/ha en PSP. En 1986 la même dose (90 K_2O/ha) a été apportée sous forme fractionnée, pour chacune des deux saisons de culture.

Les formes d'engrais utilisées sont l'urée, le superphosphate triple et le chlorure de potasse.

3 - Techniques culturales et calendrier

Un labour à la "daba" est effectué en début de GSP avec, depuis 1981, enfouissement des résidus de récolte de GSP et PSP. En début de PSP, seul un affinage du sol est pratiqué. Les semis interviennent après une pluie de 15-20 mm, soit vers les 5-10 avril (GSP) et 10-15 septembre (PSP). Les variétés utilisés sont le NH1F1 (maïs) et le Vita 5 (niébé). Elles sont semées aux densités de 42 000 plants/ha pour le maïs et de 100 000 plants/ha pour le niébé. Deux sarclages manuels sont nécessaires. La floraison du maïs intervient vers 55 jours et les cycles végétatifs sont de 110 jours (maïs) et 75 jours (niébé).

4 - 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). La détermination des coefficients de conductivité hydraulique de la loi de Darcy généralisée a été effectuée sur chaque parcelle (POSS et SARAGONI, 1987). Elle a été réalisée à l'aide de la méthode du "bilan naturel" (VACHAUD et al., 1978). Ainsi, 14 tensiomètres ont été implantés au centre de chaque parcelle (tensiomètres à bougie en céramique poreuse et à manomètre à mercure, système DTM 5000 Nardeux) : tous les 10 cm entre 5 et 75 cm et tous les 20 cm ensuite jusqu'à 1,95 m. Les profondeurs d'implantation des tensiomètres ont été choisies égales aux profondeurs de mesure de l'humidimètre à neutrons (SOLO 25 Nardeux à source Am-Be) afin de simplifier les calculs.

5 - Dispositif de mesure et de prélèvement de la solution du sol

5.1 Dispositif expérimental

Le matériel retenu correspond à des capteurs de solution du sol Soil Moisture réf. 1900. Montés sur tube PVC (fabrication locale) à la colle de type "Araldite spéciale", lavés plusieurs fois à l'acide dilué et laissés dans l'eau distillée jusqu'à leur pose, les 64 capteurs installés sous culture (1985 et 1986) ont été répartis de la façon suivante : 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) X 2 traitements (KO et K2) x 2 sous-traitements (A et B) x 4 répétitions. Ils étaient localisés entre les lignes de semis, à mi-distance des pieds de maïs et de niébé. Les 32 capteurs installés sur sol nu après jachère (SNJ) en 1986 ont été répartis ainsi : 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) X 8 répétitions. Ils ont été implantés sur une parcelle proche de l'essai NPK (jachère depuis 1976)

5.2 Prélèvements

Cette expérimentation, qui a débuté en 1984, ne fut en première année qu'une campagne de lancement et de mise au point de la méthode : 3 prélèvements en GSP. Aussi, nous ne tiendrons compte que des résultats des deux années suivantes.

En 1985, les prélèvements de solution du sol ont été réalisés le lendemain de la mise en dépression des capteurs (600 hPa à l'aide d'une pompe à vélo inversée). Afin d'améliorer le taux de réussite, deux modifications ont été apportées en 1986 :

- mise en dépression l'après-midi (et non le matin) du jour précédent le prélèvement ;

- le jour du prélèvement et là où rien n'est recueilli (très souvent dépression n'ayant pas tenu), nouvelle mise en dépression immédiate et nouveau prélèvement le jour même (environ 4 heures plus tard) ou le lendemain.

Le pourcentage de réussite est ainsi passé de 75% (1985) à 90% (1986).

Du fait d'une assez bonne répartition pluviométrique (surtout en 1985), la fréquence des prélèvements de solution du sol initialement prévue toutes les deux semaines a pu être maintenue pendant les 8-9 mois des deux années d'expérimentation. Ainsi, le nombre de prélèvements continus a été le suivant : 19 en 1985 et 17 à 20 (suivant la profondeur) en 1986.

Le volume recueilli est fonction de la tension de l'eau dans le sol. Il s'agit - toutes profondeurs, années et traitements confondus - d'une relation très étroite ($r = -0,84$ pour $n = 176$) de type fonction puissance (figure 2). On s'aperçoit qu'au delà d'une tension matricielle de 100 - 150 hPa moins de 20 - 30 ml de solution sont prélevés et qu'en deçà de 50 hPa ce volume devient important (de 70 ml à plus de 200 ml). Cette courbe permet de lever un certain nombre d'interrogations quant aux dates de prélèvements et ainsi de conduire une telle expérimentation de façon plus précise que ce qui avait été initialement proposé (PIERI, 1980).

5.3 Comparaison de deux types de capteurs

En 1986, sur la parcelle SNJ, une étude comparative des capteurs Soil Moisture (USA) et Nardeux (France) a été mise en place. La représentation graphique des résultats par couple (figure 3) montre qu'il existe une assez bonne

concordance entre les valeurs obtenues avec les deux matériels : points représentatifs peu éloignés de la bissectrice et assez bien répartis de part et d'autre de celle-ci. En conséquence, il s'avère donc possible de substituer les capteurs Nardeux à ceux de la marque Soil Moisture, qui sont généralement utilisés.

6 - Méthodes de dosage des éléments minéraux de la solution du sol

Les prélèvements de solution du sol sont, une fois leur volume mesuré au champ, rapidement transportés au laboratoire pour y être conservés au réfrigérateur.

Les analyses ont été réalisées, au fur et à mesure des possibilités, au Centre ORSTOM de Lomé. Chaque prélèvement fait l'objet d'une mesure de pH et de dosages des cations (Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}, Na^{+}) et des anions (NO_3^{-}, Cl^{-}, HCO_3^{-}).

Le pH de la solution est mesuré à l'aide d'un pH-mètre équipé d'une électrode de verre. Pour les cations, K^{+} et Na^{+} sont mesurés en émission de flamme et Ca^{++} et Mg^{++} en absorption atomique. Pour les anions, NO_3^{-} est dosé par colorimétrie à l'acide phénoldisulfonique, Cl^{-} et HCO_3^{-} par potentiométrie.

La recherche, sur quelques prélèvements, du phosphore (colorimétrie au bleu de molybdène) susceptible d'être absorbé par la céramique des capteurs, de l'ammonium (coloration par le réactif de Nessler) et des sulfates (néphélémétrie du précipité de sulfate de baryum) a donné des valeurs moyennes très faibles : 0,006 mé/l PO_4^{---}, 0,08 mé/l NH_4^{+} et 0,11 mé/l SO_4^{--}.

Une fois analysés, les échantillons sont conservés au réfrigérateur pour d'éventuels contrôles (moins de 10% des résultats).

Enfin, à partir de deux solutions - test mises au point par le laboratoire de chimie des sols de la DRN (Division des Ressources Naturelles) de l'IRAT-CIRAD/Montpellier, des comparaisons de résultats d'analyses ont pu être établis au laboratoire ORSTOM/Lomé. Il s'avère qu'en moyenne la dérive ORSTOM/IRAT est inférieure à 10% (SARAGONI, 1986).

II - RESULTATS ET DISCUSSION

1 - Rendements et conditions hydriques

Nous avons déjà montré (POSS et al., 1988) que le rendement en maïs des terres de Barre du sud-Togo est fonction de la fertilité/fertilisation du sol mais aussi des conditions hydriques (pluviométrie, ETR cycle et ETR/ETM floraison).

Les résultats de la présente étude confirment et précisent ceux-ci. Ainsi, on constate (tableaux II et III) que :

- les conditions hydriques de GSP étant peu contraignantes (pluie = 440-490 mm, ETR cycle = 300-330 mm et ETR/ETM floraison = 87-94%), le rendement en maïs correctement fertilisé en azote (60 N/ha) et en phosphore (45 P_2O_5/ha) est essentiellement fonction de la fumure potassique (KO = 13 q/ha et K2 = 30 q/ha). Alors, ni le précédent cultural de PSP (maïs ou légumineuse), ni le fractionnement de la potasse (90 K_20/ha) ne la modifient de façon significative ;

- par contre, en PSP, l'absence de fertilisation potassique se combine avec le déficit hydrique pour produire les faibles rendements en maïs observés (KO = 2-8 q/ha et K2 = 14-18 q/ha). Une dose de 60 K_20/ha suffit pour obtenir près de 20 q/ha et là aussi le fractionnement de l'apport n'augmente pas le rendement.

Pour ce qui concerne le niébé - cultivé uniquement en PSP, sans azote et avec au moins 20 P_20_5/ha - la pluviométrie (250 - 300 mm) n'a que peu d'incidence sur son rendement en regard de la fertilisation potassique (tant sur niébé - 60 K_20/ha - qu'en arrière action de celle sur précédent maïs) : KO = 300 - 400 kg/ha et K2 = 900 - 1 000kg/ha.

2 - Variabilité des teneurs de la solution prélevée

Cette variabilité a été évaluée à partir de la moyenne des coefficients de variation des valeurs obtenues au cours des cycles de mesure.

Avec, par profondeur et par traitement (culture) 8 capteurs, on constate (tableau IV) que ces coefficients de variation :

- sont élevés (en moyenne 25% sous culture et 20% sous jachère);

- sont plus faibles en profondeur (en moyenne, sous culture, 18% à 180 cm contre 30% à 30 cm) ;

- sont, dans l'horizon de surface, amplifiés par l'hétérogénéité supplémentaire qu'amènent certaines pratiques culturales (enfouissement des pailles, fumure potassique...) : ainsi, à 30 cm, le coefficient de variation du potassium passe de 16% sous jachère non travaillée à 26% sous culture de maïs sans potasse mais avec enfouissement des pailles, et à 39% avec en plus application de 90 K_20/ha ;

- sont comparables et parfois même inférieurs (surtout à 180 cm) à ceux trouvés par d'autres auteurs (PIERI, 1979 et GAUDIN et al, 1985) ;

- ne pourraient être significativement réduits que par une importante multiplication des répétitions, ce qui s'avère bien souvent impossible ;

- ne sauraient mettre en cause la méthode, dans la mesure où, facile d'emploi et peu perturbante pour le sol et les cultures, elle apporte un degré de précision comparable à celui généralement obtenu en expérimentation au champ (PIERI, 1979);

- devraient, enfin, nous inciter à considérer l'emploi des capteurs en céramique poreuse comme un "moindre mal" et non comme la panacée (CHEVERRY, 1982).

3 - Apports minéraux atmosphériques

Dans le but d'établir ultérieurement les bilans minéraux des systèmes de culture étudiés, nous avons procédé à l'étude de la concentration des eaux de pluie. Elle nous a permis d'évaluer les apports minéraux atmosphériques (tableau V). Pour une pluviométrie annuelle de 1 040 mm (moyenne sur 53 ans) et une localisation à 30 km du bord de mer, ces apports sont de : N (5 kg/ha), CaO (15 kg/ha), MgO (4 kg/ha), Na_2O (10 kg/ha), K_2O (5 kg/ha), P_2O_5 (3 kg/ha) et Cl (30 kg/ha). On constate, comme d'autres auteurs (ROOSE et TALINEAU, 1973 et PIERI, 1985), que ces quantités sont très faibles pour N, Mg, K et P mais non négligeables pour Ca, Na et Cl.

4 - Concentration de la solution prélevée

4.1 Concentrations moyennes

Comparativement, après 11 ans de jachère ou de culture continue de maïs, on observe (tableau VI) que :

- les teneurs en nitrates et cations alcalino-terreux sont quatre fois plus faibles sous culture à 30 - 60 cm (90% des racines du maïs) et cinq fois plus faibles sous jachère à 180 cm. Le drainage et la lixiviation peuvent être évalués à 180 cm puisqu'une étude de l'évolution de la profondeur d'enracinement du maïs (figure 4) nous a montré qu'elle ne dépassait pas 1,5 m. Les analyses de sol (en cours) devraient nous indiquer si elles peuvent être reliées à ces observations ;

- par rapport à un témoin KO, un système de culture continue de maïs avec fertilisation potassique réduit à peu près de moitié les teneurs en nitrates, calcium et magnésium à la cote 180 cm. Cela signifie qu'il en diminue d'au moins autant les pertes par lixiviation ;

- la teneur en potassium est, pour les niveaux 30 - 60 cm et par rapport au témoin culture - KO, deux fois plus forte sous jachère et trois fois plus élevée pour le système culture - K2. Là aussi les analyses de sol devraient permettre de dire si cet enrichissement se retrouve au niveau du complexe d'échange.

4.2 Evolution des concentrations

4.2.1. pH, HCO_3^- et Na^+

Le pH, comme les concentrations en HCO_3^- et Na^+, est assez peu variable avec les traitements et le temps. Mais tandis que pH et HCO_3^- sont toujours supérieurs en surface -pH = 6,5 (30 cm) et 6,1 (180 cm) et HCO_3^-= 0,25 mé/l (30 cm) et 0,15 mé/l (180 cm)-, Na^+ va en augmentant avec la profondeur (0,15 mé/l à 30 cm et 0,25 mé/l à 180 cm). Il faut également noter qu'un système de culture continue -dont azote, phosphore et potasse sont apportés respectivement sous forme d'urée, de super triple et de chlorure- n'entraîne pas de diminution du pH de la solution du sol par rapport à une jachère de même durée.

4.2.2. Cl^-

En l'absence de chlorure de potasse -quels que soient le système, l'année et la profondeur- le chlore varie peu : Cl^- = 0,4 mé/l. Par contre, cet élément est très rapidement lessivé lorsqu'on apporte du KCl à une culture : il se retrouve à 60 cm en 2-3 semaines (1,2 mé/l) avant de s'accumuler à 120 - 180 cm (1,7-2,0 mé/l).

4.2.3. K^+

- En l'absence de fertilisation potassique (figure 5), la concentration en potassium de la solution prélevée est toujours très faible sous culture (0,03 mé/l). Elle double (0,06 mé/l à 30 cm) après jachère de longue durée;

- avec une fertilisation potassique, on assiste à un très net enrichissement de cette teneur à 30 cm pendant les deux premiers mois de culture (tableau VII). En moyenne, elle passe de 0,20 mé/l (GSP) et 0,10 mé/l (PSP) 15 jours après apport de KCl à 0,05 mé/l (apport unique) et 0,07 mé/l (fractionnement) 60 jours après semis;

- une partie du potassium apporté à la culture est entraîné en profondeur. Mais du fait de très faibles concentrations, nous verrons que ces pertes par lixiviation sont peu importantes.

4.2.4. NO_3^-, Ca^{++} et Mg^{++}

L'évolution des concentrations est particulièrement intéressante à considérer pour les nitrates et les cations alcalino-terreux. Ces éléments minéraux présentent une évolution comparable dans le temps (figure 6). Les relations qui les unissent seront étudiées plus loin.

Nous observons (tableau VIII), pour les horizons 30 - 60 cm :

- que, sous culture, les concentrations sont variables d'une année à l'autre mais évoluent toujours dans le même sens :

  . elles sont les plus élevées en début et fin de GSP ainsi qu'en début de PSP ;

  . elles sont les plus faibles en milieu de GSP et PSP (55 - 60 jours, floraison du maïs) ainsi qu'en fin de PSP ;

- que, sous jachère, cette évolution est inversée.

Par contre, à 180 cm, les concentrations observées:

- sont assez stables sous culture, généralement élevées (2,0 mé/l pour NO_3^-) et fonction des traitements agronomiques. Ce dernier point sera développé avec l'étude des pertes minérales par lixiviation ;

- sont très faibles sous sol nu après jachère mais augmentent régulièrement (comme à 120 cm) avec le temps et la pluviométrie. Alors, il existe une étroite relation NO_3^-/pluie annuelle cumulée ($r = +0,88$ pour $n = 20$).

5 - Relations entre les éléments minéraux de la solution prélevée

Les teneurs en Ca^{++} et Mg^{++} de la solution prélevée, qui sont étroitement liées (tableau IX et figure 7), sont essentiellement fonction de celles en NO_3^- (tableau X et XI ainsi que figures 8 et 9). Ces liaisons avaient déjà été mises en évidence sur sols "dior" du Sénégal (PIERI, 1979). Par conséquent, il semble bien que "l'activité nitrificatrice du sol soit l'une des causes essentielles de la mise en solution des cations échangeables, et plus particulièrement du calcium et du magnésium" (PIERI, 1979).

Cependant, on remarque également que sur terres de Barre du sud-Togo (sols beaucoup plus argileux que les dior du Sénégal : respectivement 7% à 10 cm, 15% à 30cm, 30% à 60 cm et 45% à 120-180 cm contre moins de 5% dans les 150 premiers centimètres) la

présence de KCl facilite la solubilisation du calcium et du magnésium dans le milieu. Ainsi observe-t-on, pour les horizons 30 - 60 cm des parcelles sous culture (figures 8 et 9) :

- que jusqu'à une teneur en NO_3^- de 2,0 mé/l, la libération de ces cations correspond, pour 1,0 mé/l NO_3^-, à :

  . 0,8 mé/l (KO) et 1,1 mé/l (K2) pour Ca^{++}
  . 0,6 mé/l (KO) et 0,9 mé/l (K2) pour Mg^{++} ;

- qu'au delà, cette proportion est réduite mais avec une rupture de pente moins importante pour K2 :

  . 0,2 mé/l (KO) et 0,5 mé/l (K2) pour Ca^{++}
  . 0,1 mé/l (KO) et 0,3 mé/l (K2) pour Mg^{++}.

Puisque la fertilisation potassique (KCl) semble influer sur la relation Ca^{++}/NO_3^- et qu'il n'existe pas de liaison Ca^{++}/K^+, nous avons étudié la relation Ca^{++}/Cl^-. Il s'avère que 40% des variations de Ca^{++} peuvent être expliqués par Cl^- (r^2 = 0,40 pour n = 199).

Le calcium et le magnésium suivant une évolution parallèle, nous les avons alors associés dans l'étude de la relation Ca + Mg = f(N + Cl). Les points du traitement K2 font bien partie du même nuage que ceux du traitement KO (figure 10) et la liaison est très étroite (r = 0,90 pour n = 395). Ceci montre bien, outre la liaison primordiale entre taux de nitrates et teneurs en calcium et magnésium de la solution du sol, l'effet complémentaire du chlore sur la désorption de ces cations alcalino-terreux du complexe adsorbant.

Une corrélation multiple a également été établie entre les variables : (Ca^{++} + Mg^{++}) = f(NO_3^- ; Cl^-). La relation est la suivante :

$$Ca^{++} + Mg^{++} = 0{,}78\ NO_3^- + 0{,}60\ Cl^- + 0{,}40 \quad (r = 0{,}92 \text{ pour } n = 395)$$

6 - Evaluation des pertes minérales par lixiviation

La profondeur d'enracinement du maïs ne dépassant pas 1,50 m, nous avons pris, pour le calcul des pertes minérales par lixiviation, le drainage (tableau XII) et les concentrations de la solution prélevée (tableau XIII et figure 11) à 180 cm.

On s'aperçoit que, sous culture et par rapport à un témoin sans potasse (KO), l'apport d'une fertilisation potassique (K2) réduit de façon importante les pertes par drainage (-15%) ainsi que les concentrations de la solution du sol en NO_3^- (-45%), Ca^{++} (-15%) et Mg^{++} (-35%).

En comparant pluviométrie, drainage et lixiviation des années étudiées aux valeurs observées ou simulées sur 53 ans (1932 - 1986), on constate (tableaux XIV et XV):

- que la pluviométrie des années d'expérimentation peut être considérée comme représentative ;

- que drainage et lixiviation de GSP peuvent également être considérés comme représentatifs, mais que ceux de PSP et de l'année ne peuvent l'être. Ces valeurs doivent être affectées de coefficients : 0,50 pour la deuxième saison et 0,75 pour l'année;

- que par conséquent, vu les concentrations mesurées, les pertes annuelles moyennes par lixiviation évaluées sur 53 ans sont assez faibles pour le sodium (20 kg/ha Na_2O) et le potassium (moins de 10 kg/ha K_2O) mais importantes pour les nitrates et les cations alcalino-terreux. Pour eux, une fertilisation potassique réduit considérablement ces pertes :

  . $N(NO_3^-)$ = 40 kg/ha (K2) contre 90 kg/ha (KO)
  . CaO = 80 kg/ha (K2) contre 110 kg/ha (KO)
  . MgO = 30 kg/ha (K2) contre 50 kg/ha (KO).

7 - <u>Effets des traitements agronomiques et des systèmes de culture sur la composition de la solution du sol et les quantités d'éléments minéraux lixiviés en profondeur</u>

Nous pouvons ainsi résumer ces effets :

- comparativement après 11 ans de jachère ou de culture continue de maïs (2 cycles/an), les teneurs en nitrates et cations alcalino-terreux de la solution du sol prélevée à 30-60 cm sont quatre fois moindres sous culture : NO_3^- (0,8 mé/l contre 3,5 mé/l), Ca^{++} (0,7 mé/l contre 2,6 mé/l) et Mg^{++} (0,6 mé/l contre 2,4 mé/l) ;

- un apport régulier de potasse (fractionné ou non) sur chacune des cultures d'un système à dominante maïs permet, après 11 ans de culture continue et par rapport à un témoin sans potasse :

  . de tripler la concentration en K^+ de la solution du sol pour les horizons 30-60 cm (0,09 mé/l contre 0,03 mé/l) ;

  . de limiter la migration en profondeur de NO_3^-, Ca^{++} et Mg^{++} (indices 45, 75 et 60 pour une base 100 = KO), probablement du fait d'une meilleure utilisation de l'azote par levée de la carence potassique ;

  . de tripler les rendements en maïs de GSP et PSP (respectivement 30 q/ha contre 13 q/ha et 16 q/ha contre 5 q/ha) et en niébé de PSP (1 000 kg/ha contre 300 kg/ha) ;

- dans une zone à deux saisons de culture et lorsque la contrainte potassique est levée, un système cultural maïs (GSP) - légumineuse (PSP) augmente, par rapport à une culture continue de maïs, la teneur de la solution du sol en NO_3^- (et partant en Ca^{++} et Mg^{++}) des horizons 30 - 60 cm (figure 12) mais n'augmente pas corrélativement le rendement en maïs de GSP. En effet, ce système entraîne également une lixiviation supérieure de ces éléments (de 20% à 50%), du fait que le niébé (ou l'arachide) exerce une pression plus faible sur le milieu.

CONCLUSIONS

Ce premier bilan a d'ores et déjà permis de dégager un certain nombre de résultats essentiels. Ceux des analyses de sol (en cours) nous donnera la possibilité d'étudier l'équilibre sol-solution. Ceci est d'autant plus important que, à l'exception d'un enrichissement par fumure, les phénomènes d'échange sol-solution sont primordiaux dans la composition de la solution du sol. En effet, celle-ci est essentiellement fonction du sol dans la mesure où les apports minéraux atmosphériques actuels n'ont que peu de répercussion sur sa composition. Il s'ensuit donc que la caractérisation minéralogique fine de ces sols (également en cours) devrait nous permettre d'expliquer certaines réactions du complexe d'échange et nous apporter des précisions sur leur comportement vis à vis du potassium (mécanismes de fixation - libération).

Cette approche et l'étude des mobilisations minérales pour les agrosystèmes observés nous conduiront à l'établissement de bilans minéraux. Et, par conséquent, à la formulation de quelques propositions en matière de conservation et de restauration de la fertilité des terres de Barre du Togo méridional.

Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur participation à cette étude :

- A. FORGET et J. LARVY-DELARIVIERE (respectivement assistant - pédologue et responsable du laboratoire d'analyses au Centre ORSTOM de Lomé) ;

- C. PIERI (Directeur de la Division des Ressources Naturelles à l'IRAT-CIRAD) pour avoir initié et soutenu cette expérimentation ;

- R. OLIVER (responsable du laboratoire de chimie des sols de la DRN à l'IRAT-CIRAD et secrétaire de l'ATP/Dynamique des cations de la MICAM au CIRAD) pour l'aide matérielle apportée ainsi que pour ses observations sur les résultats de l'année 1985 ;

- Ed. LATRILLE (chef de la mission IRAT-CIRAD au Togo) pour l'aide qu'il a bien voulu nous apporter tout au long de cette étude ;

- A. ISSIFOU (responsable de la station IRAT de Davié).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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.

- FARDEAU J.C., 1985. Premiers résultats sur une étude rétrogradation - libération du potassium dans les terres de Barre du sud-Togo. Documents manuscrits des 11, 20 et 28 avril 1985. Service de Radio-Agronomie, CEN Cadarache .

- 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.

- LAMOUROUX M., 1969. Carte pédologique du Togo au 1/1 000 000. Not. expl. n°34. ORSTOM (Paris), 91 p., 1 carte h.t.

- 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.

- OLIVER R., 1985. Résultats d'analyses. IRAT-CIRAD, Division d'Agronomie, mars 1985 .

- OLIVER R., 1986 a. Résultats d'analyses et réflexions. IRAT-CIRAD, Division d'Agronomie, n°248/RO, 3 mars 1986 .

- OLIVER R., 1986 b. Résultats d'analyses et réflexions. IRAT-CIRAD, Division d'Agronomie, n°347/RO/JM, 26 mars 1986 .

- 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 - 19 .

- PIERI C., 1980. Projet d'action élémentaire de recherche. Etude de la solution d'un sol cultivé et mesure des pertes par lixiviation. IRAT-CIRAD, Division d'Agronomie, 18 juin 1980, 6 p.

- PIERI C., 1985. Bilans minéraux des systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. L'Agron. Trop. 40(1): 1 - 20 .

- POSS R., FORGET A., SARAGONI H., 1984. Quelques propriétés physiques et hydrodynamiques des terres de Barre. Etude des sols de la station agronomique de Davié. ORSTOM (Lomé), février 1984, 32 p.

- POSS R., SARAGONI H., FORGET A., 1985. Etude des conductivités hydrauliques dans les terres de Barre. ORSTOM (Lomé), novembre 1985, 35 p.

- POSS R., SARAGONI H., 1987. Quelques problèmes posés par l'estimation du bilan hydrique en plein champ. Bulletin du GFHN, n° 22, novembre 1987, Milieux Poreux et Transferts Hydriques, pp. 32-46 .

- POSS R., SARAGONI H., IMBERNON J., 1988. Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. L'Agron. Trop., 43(1) : 18-29.

- QUANTIN P., 1988. Premiers résultats de caractérisation fine des terres de Barre du sud-Togo. Communications orales à R. POSS .

- ROOSE E.J., TALINEAU J.C., 1973. Influence du niveau de fertilisation sur le bilan des éléments nutritifs majeurs de deux plantes fourragères cultivées sur un sol sableux de Basse Côte d'Ivoire. Compte-rendu du 10ème Colloque de l'Institut International de la Potasse, Abidjan, pp. 305 - 320 .

- SARAGONI H., 1986. Etude de la composition de la solution du sol des terres de Barre à l'aide de capteurs en céramique poreuse. DRA (Lomé), 19 p., fig. et ann.

- VACHAUD G., DANCETTE C., THONY T.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. L'Agron. Trop., 29(1) : 1-36 .

Tableau I Caractéristiques physico-chimiques des sols de Davié (Poss et al., 1984).

Caractéristiques		Horizon (cm)				
		0-10	10-20	20-50	50-120	120-190
Granulométrie						
Argile	%	6,6	8,1	20,5	35,9	43,6
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	%	59,7	57,5	53,3	45,0	36,7
Matière organique						
Matière organique	%	0,86	0,71	0,50	0,31	0,10
Carbone	%	0,50	0,41	0,29	0,18	0,06
Azote total	‰	0,48	0,43	0,34	0,36	0,34
Rapport C/N		10	10	9	5	2
Phosphore *						
Total	ppm	148	152	160	-	-
Assimilable (Olsen)	ppm	7	6	6	-	-
Complexe absorbant						
Ca	meq/100 g	1,26	1,51	1,04	1,14	1,39
Mg	meq/100 g	0,75	0,62	0,59	1,20	1,22
K	meq/100 g	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02
Na	meq/100 g	0,04	0,02	0,04	0,02	0,04
Somme bases	meq/100 g	2,12	2,18	1,69	2,38	2,67
CEC	meq/100 g	2,51	3,24	3,05	3,32	4,39
Saturation	%	84	67	55	72	61
Acidité						
pH eau		5,5	5,7	5,3	5,1	5,1
pH KCl		4,8	4,9	4,2	4,3	4,5

* OLIVER, 1985

Tableau II Rendements (Davié, 1985 et 1986).

Saison	Culture	Année	KO		K2	
			A	B	A	B
GSP	Maïs (q/ha)	1985 1986	10,9 15,3	12,6 12,5	29,1 30,8	31,2 28,7
		moy.	13,1	12,6	30,0	30,0
PSP	Maïs (q/ha)	1985 1986	7,6 2,3	- -	18,0 14,2	- -
		moy.	5,0	-	16,1	-
	Niébé (kg/ha)	1985 1986	- -	270 370	- -	1 000 940
		moy.	-	320	-	970

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

Saison	Année	Pluie cycle (mm)	ETR cycle (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 IV Coefficients de variation moyens des teneurs en éléments minéraux de la solution prélevée (Davié, 1985 et 1986, %).

Prof. (cm)	Trait.	$NO3^-$		Ca^{++} et Mg^{++}		K^+		Cl^-	
		C*	SNJ**	C	SNJ	C	SNJ	C	SNJ
30	KO	32,9	23,0	27,6	17,6	26,2	15,9	16,0	14,6
	K2	28,8	-	27,2	-	39,3	-	28,2	-
60-120	KO	33,1	19,3	30,8	16,2	21,2	16,4	20,1	15,8
	K2	32,5	-	27,3	-	23,7	-	25,2	-
180	KO	12,9	23,6	20,4	20,9	18,5	22,8	17,4	17,8
	K2	17,3	-	19,5	-	15,6	-	18,3	-

*C = Culture (moy. 1985 - 1986)
**SNJ = Sol nu après jachère (1986).

Tableau V Teneurs et apports minéraux par les eaux de pluie (Davié, moyenne 1984-1986, pluviométrie = 1 040mm).

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

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

Profondeur (cm)	Système	Fumure	Teneurs (mé/l)			
			$NO3^-$	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+
30 - 60	Culture	NPKO	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
180	Culture	NPKO	2,58	1,76	1,21	0,04
		NPK2	0,93	1,15	0,64	0,07
	Jachère	-	0,34	0,28	0,22	0,03

Tableau VII Effet de l'apport de potasse sur la teneur en K^+ de la solution du sol (Davié, culture, 30 cm, KO = 0,03 mé/l).

	1985		1986			
	GSP	PSP	GSP		PSP	
	90 K	60 K	45 K	45 K	45 K	45 K
Jours après apport de potassium	J 0	J 0	J 0	J 31	J 0	J 46
15	0,17	0,09	0,25	-	0,10	-
30	0,16	0,08	0,19	-	0,08	-
45	0,09	0,06	-	0,18	0,07	-
60	0,05	0,05	-	0,07	-	0,08

Tableau VIII Evolution des concentrations en nitrates et cations alcalino-terreux de la solution du sol (Davié, 30 - 60 cm, mé/l).

Saison	Stade	Culture						Jachère (1986)		
		$NO3^-$		Ca^{++}		Mg^{++}		$NO3^-$	Ca^{++}	Mg^{++}
		85	86	85	86	85	86			
GSP	Début	3,82	1,30	2,10	1,02	1,39	0,81	2,55	1,81	1,54
	Milieu	0,42	0,48	0,48	0,48	0,37	0,35	5,34	3,24	2,88
	Fin	1,20	0,80	1,31	0,70	0,91	0,57	3,46	2,21	1,96
PSP	Début	0,54	0,93	0,78	0,85	0,48	0,73	3,30	2,16	1,95
	Milieu	0,27	0,38	0,46	0,41	0,34	0,39	4,02	3,00	2,92
	Fin	0,27	-	0,39	-	0,24	-	3,78	2,81	3,07

Tableau IX Relations entre les teneurs en calcium et magnésium de la solution du sol (Davié, tous traitements, horizons 30 - 60 cm).

Système et année	Limites (mé/l)		Corrélation		
	Mg^{++} (x)	Ca^{++} (y)	r	n	équation
Culture (1985+1986)	0,1-2,8	0,2-3,3	0,90	278	y = 1,12x + 0,12
SNJ* (1986)	1,1-3,7	1,8-3,4	0,81	80	y = 0,63x + 1,07

Tableau X Relations entre les teneurs en calcium et nitrates de la solution du sol (Davié, horizons 30 - 60 cm).

Système et année	Trait.	Limites (mé/l)		Corrélation		
		$NO3^-$ (x)	Ca^{++} (y)	r	n	équation
Culture (1985 + 1986)	KO	0,1-2,0	0,2-1,4	0,89	126	y = 0,61x + 0,20
		2,0-5,5	1,4-2,2	0,74	18	y = 0,23x + 0,95
	K2**	0,1-2,0	0,4-1,9	0,85	129	y = 0,79x + 0,29
		2,0-5,3	1,9-3,6	0,83	13	y = 0,53x + 0,81
SNJ* (1986)	-	1,4-6,5	1,5-3,9	0,78	80	y = 0,46x + 0,49

Tableau XI Relations entre les teneurs en magnésium et nitrates de la solutin du sol (Davié, horizons 30 - 60 cm).

Système et année	Trait.	Limites (mé/l)		Corrélation		
		$NO3^-$ (x)	Mg^{++} (y)	r	n	équation
Culture (1985 + 1986)	KO	0,1-2,0	0,2-1,0	0,89	122	y = 0,44x + 0,17
		2,0-5,5	1,0-1,4	0,62	18	y = 0,12x + 0,76
	K2**	0,1-2,0	0,3-1,6	0,85	125	y = 0,70x + 0,19
		2,0-5,3	1,6-2,7	0,77	13	y = 0,34x + 0,92
SNJ* (1986)	-	1,4-6,5	1,2-3,9	0,73	80	y = 0,52x + 0,47

*SNJ = Sol nu après jachère **K2 = forme KCL

Tableau XII Drainage (Davié, culture, 180 cm).

Saison		1985 (mm)		1986 (mm)		Moyenne 85 - 86			
						mm		%	
		KO	K2	KO	K2	KO	K2	KO	K2
GSP		60	48	280	242	170	145	100	85
PSP		204	163	157	140	180	152	100	84
Total	mm	264	211	437	382	350	297	100	85
	% pluie année	24	19	42	37	33	28		

Tableau XIII Concentrations moyennes en nitrates et cations de la solution du sol aux périodes de drainage (Davié, culture, moyenne 1985-1986, 180 cm).

Saison	Traitement	Concentration (ppm)				
		$NO3^-$	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+
GSP	KO	35	27	12	5	2
	K2	20	25	8	7	3
PSP	KO	33	33	12	5	2
	K2	16	27	8	7	3
Moyenne année	KO	34	30	12	5	2
	K2	18	26	8	7	3

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

Saison	Pluie (mm)		Trait.	Drainage			
	moy. 85 - 86	moy. 53 ans		moy. 85 - 86		moy. 53 ans	
				mm	% pluie	mm	% pluie
GSP	666	675	KO	170	26	179	27
			K2	145	22	152	23
PSP	400	368	KO	180	45	85	23
			K2	152	38	72	20
Total année	1 066	1 043	KO	350	33	264	25
			K2	297	28	224	21

Tableau XV Pertes minérales par lixiviation (Davié, culture de maïs, comparaison des moyennes 1985 - 1986 et 1932 - 1986).

Saison	Trait.	Lixiviation (kg/ha)									
		moy. 85 - 86					moy. 53 ans				
		N	CaO	MgO	Na2O	K2O	N	CaO	MgO	Na2O	K2O
GSP	KO	55	66	29	12	4	63	68	36	12	4
	K2	28	53	20	13	5	30	53	20	14	6
PSP	KO	62	84	41	12	3	28	39	17	6	2
	K2	24	57	21	15	4	12	27	10	7	3
Total année	KO	117	150	70	24	7	91	107	53	18	6
	K2	52	110	41	28	9	42	80	30	21	9

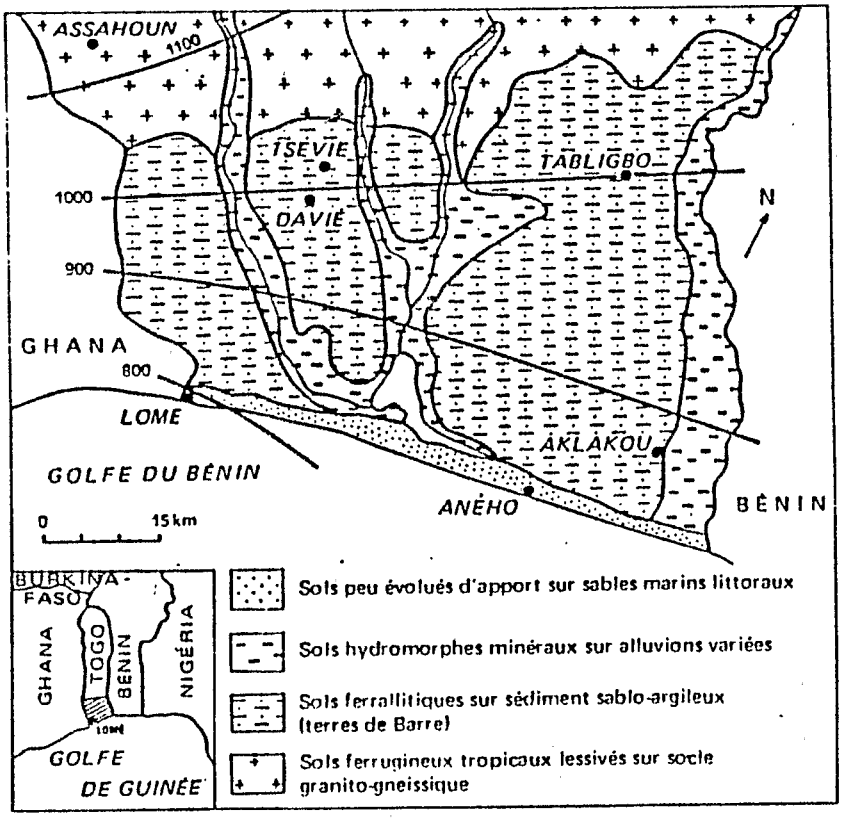

Figure 1 : Organisation générale des sols au Togo méridional (d'après LAMOUROUX, 1969) et isohyètes annuelles moyennes (1965-1985) .

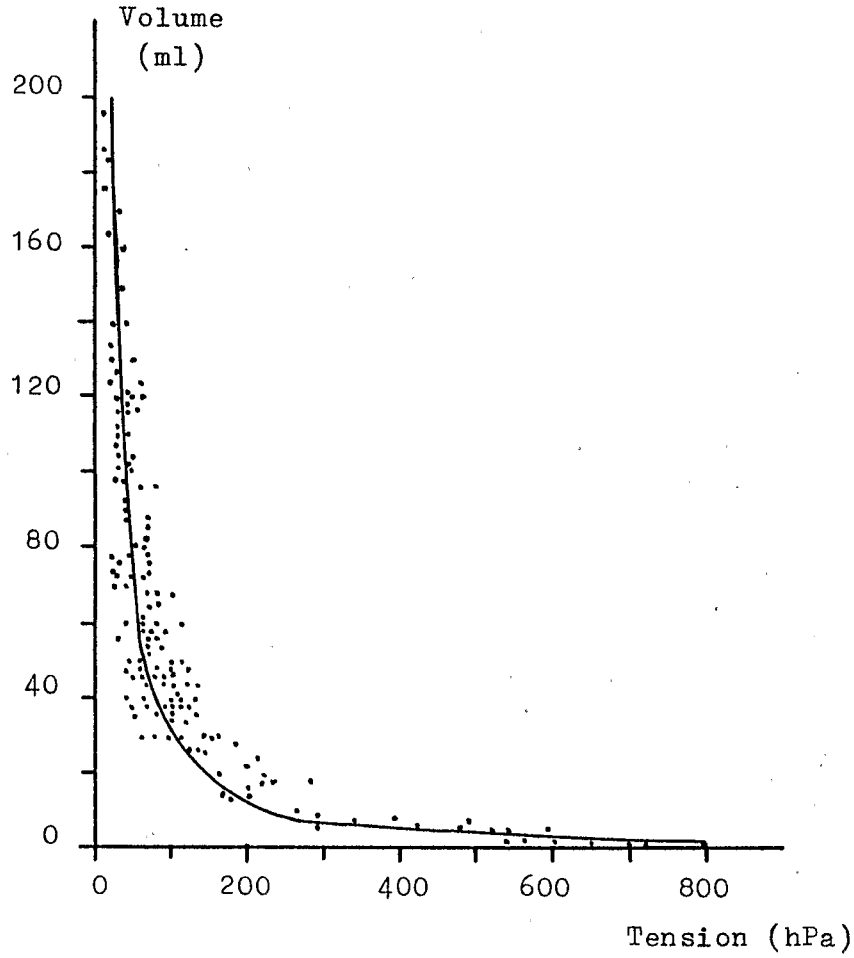

Figure 2 : Relation entre le volume de solution prélevée et la tension de l'eau dans le sol (Davié, tous traitements et profondeurs, 1985 et 1986).

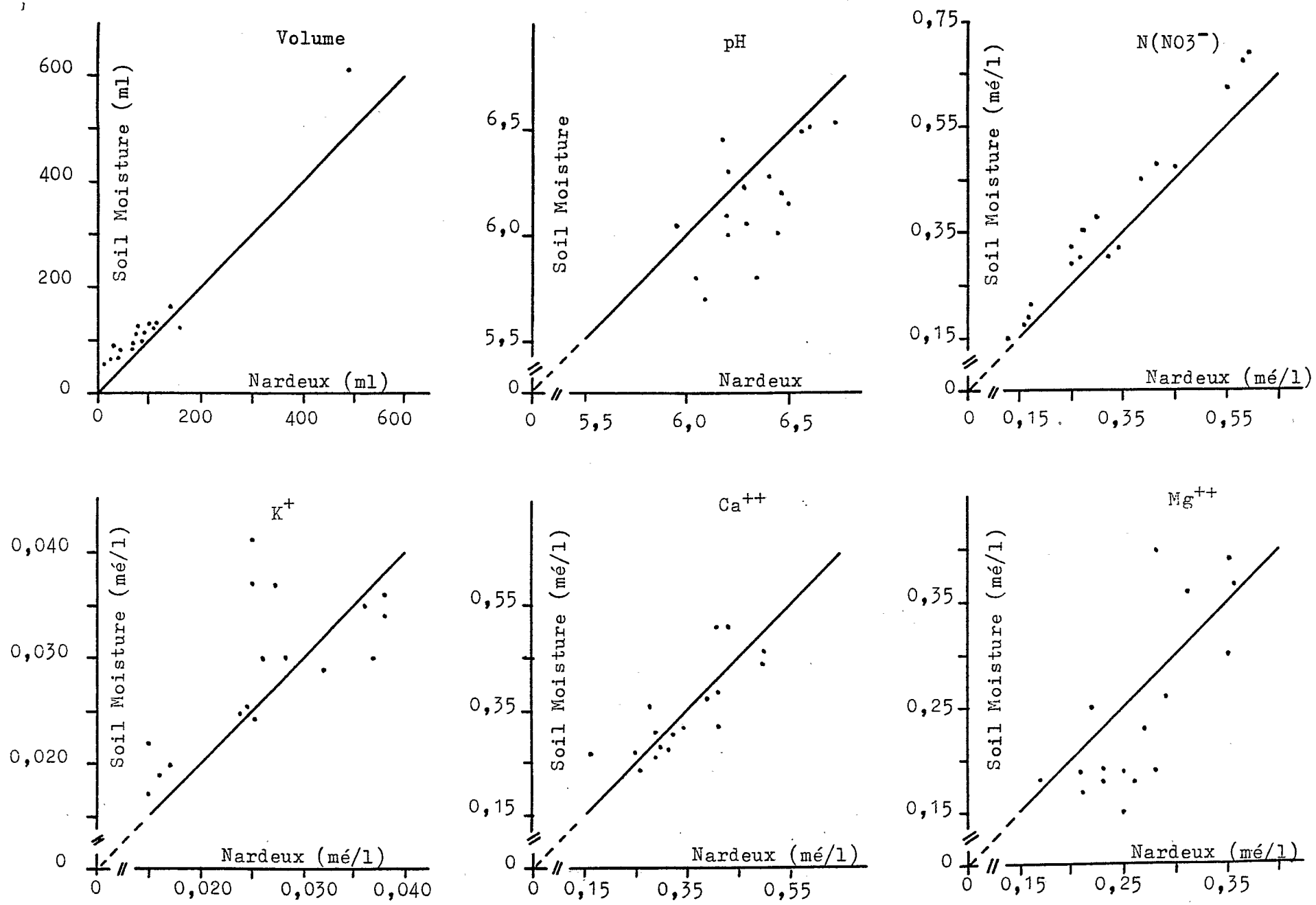

Figure 3 : Représentation graphique des résultats de l'étude par couples de deux types de capteurs (Davié, 1986, sol nu après jachère, profondeur 180 cm, 17 prélèvements, moyennes 8 répétitions).

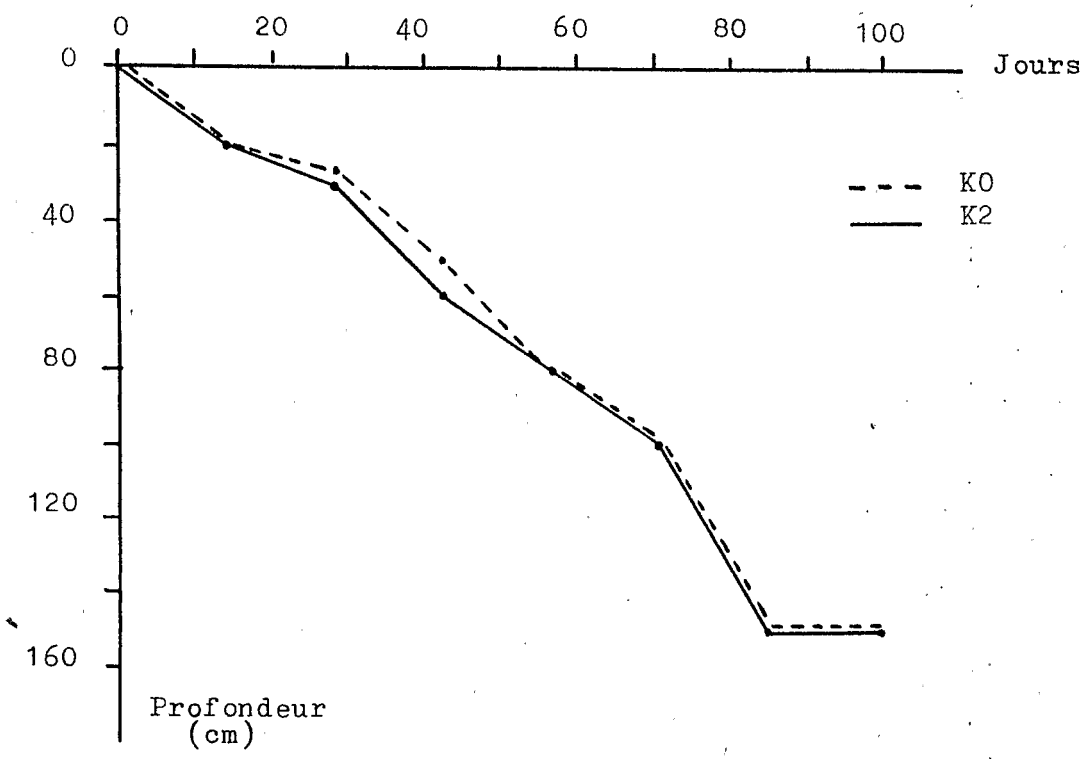

Figure 4 : Evolution de la profondeur d'enracinement du maïs (Davié, variété NH1F1, grande saison des pluies 1985).

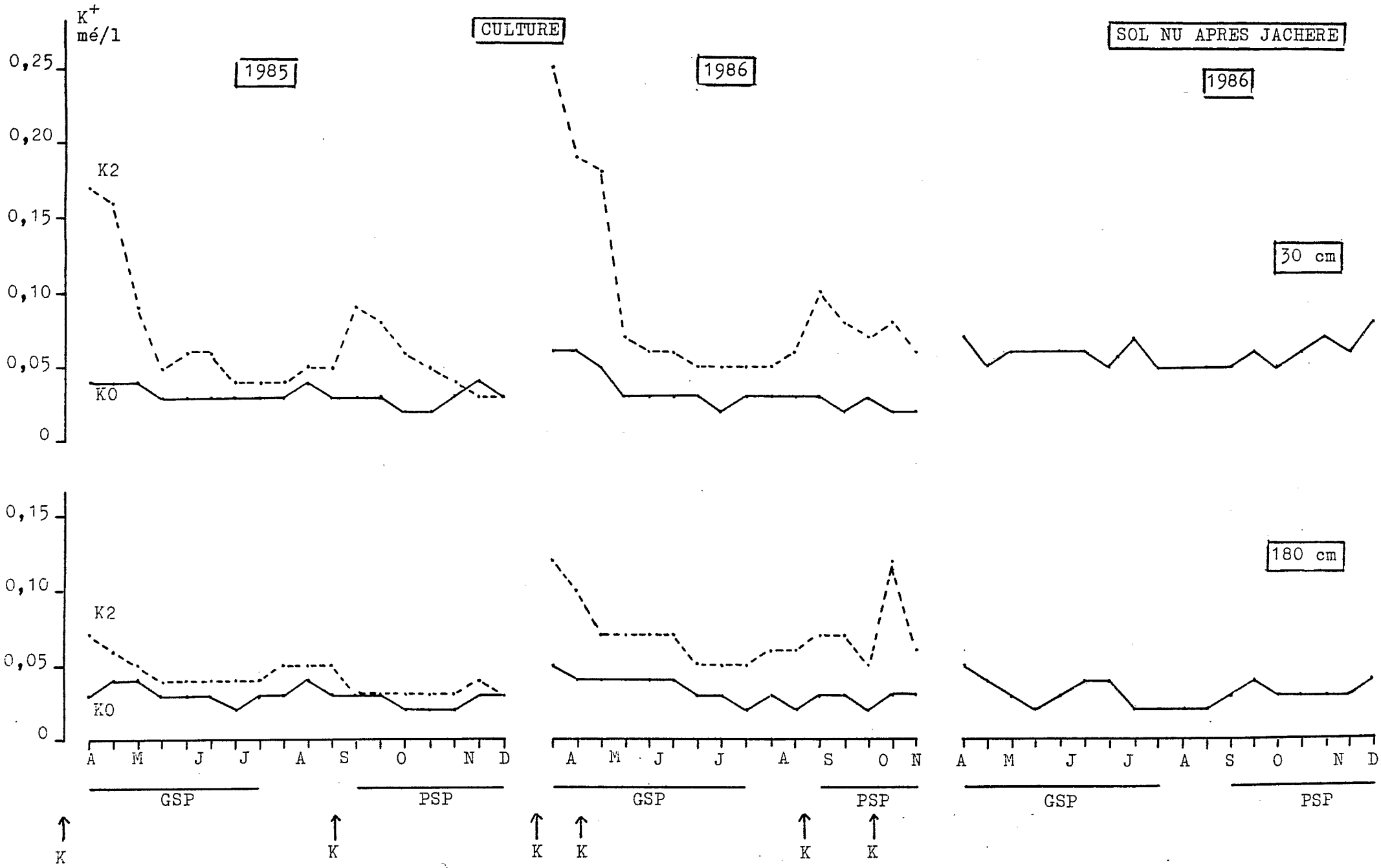

Figure 5 : Evolution de la concentration en K^+ de la solution du sol (Davié, traitements KO et K2) .

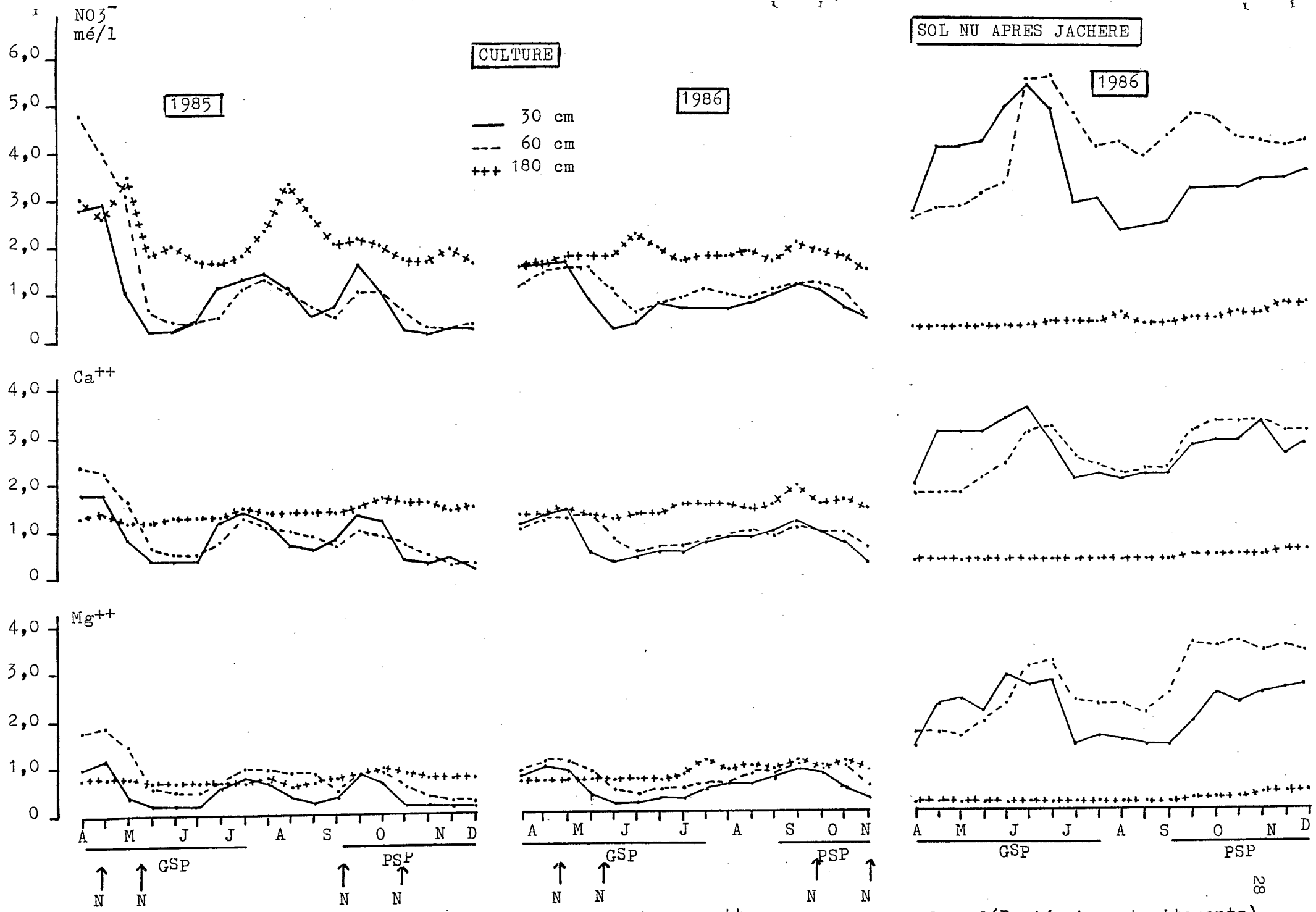

Figure 6 : Evolution de la concentration en N(NO_3^-), Ca^{++} et Mg^{++} de la solution du sol(Davié, tous traitements).

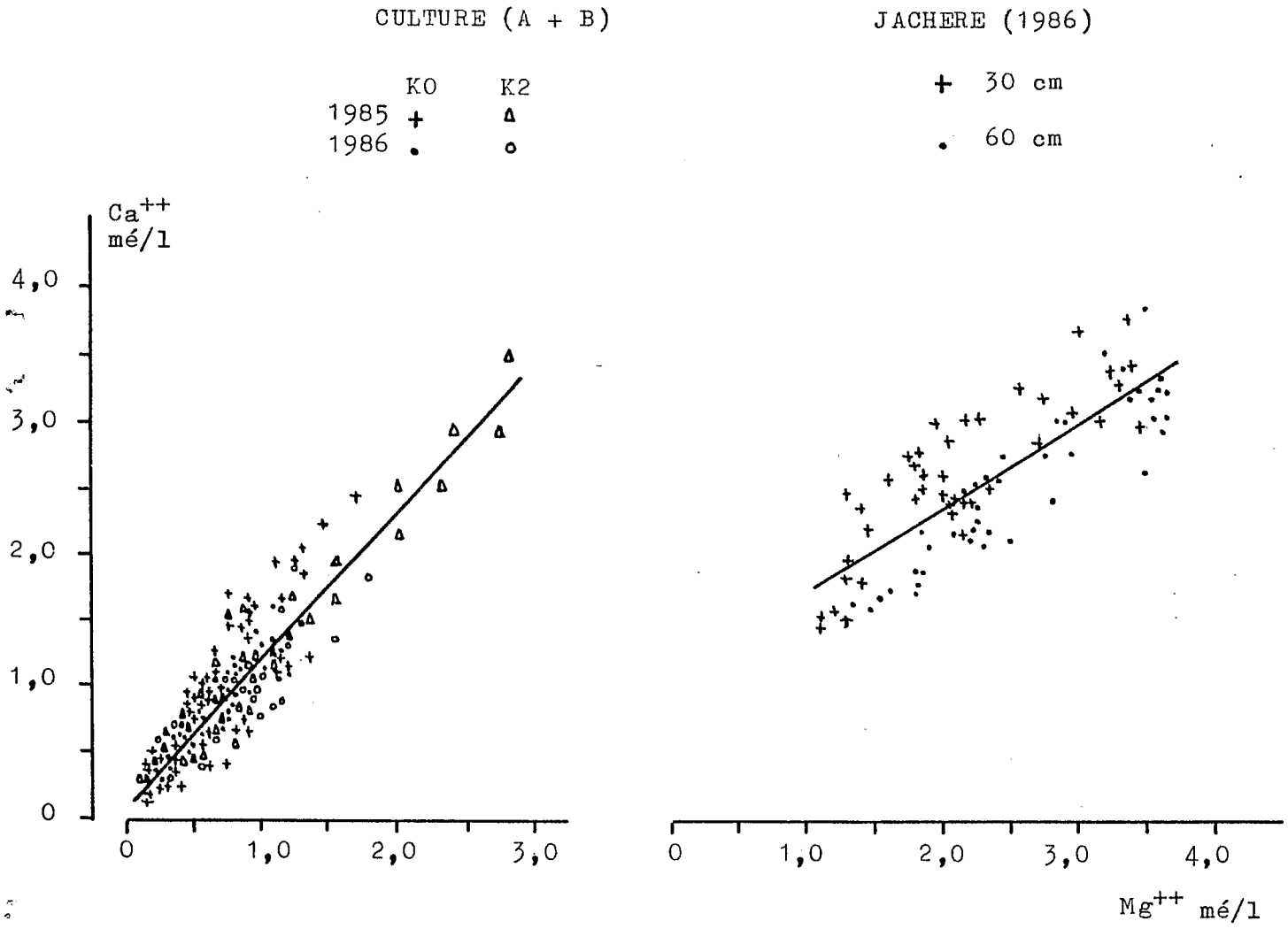

Figure 7 : Relations entre les teneurs en calcium et magnésium de la solution du sol (Davié, horizons 30 - 60 cm)

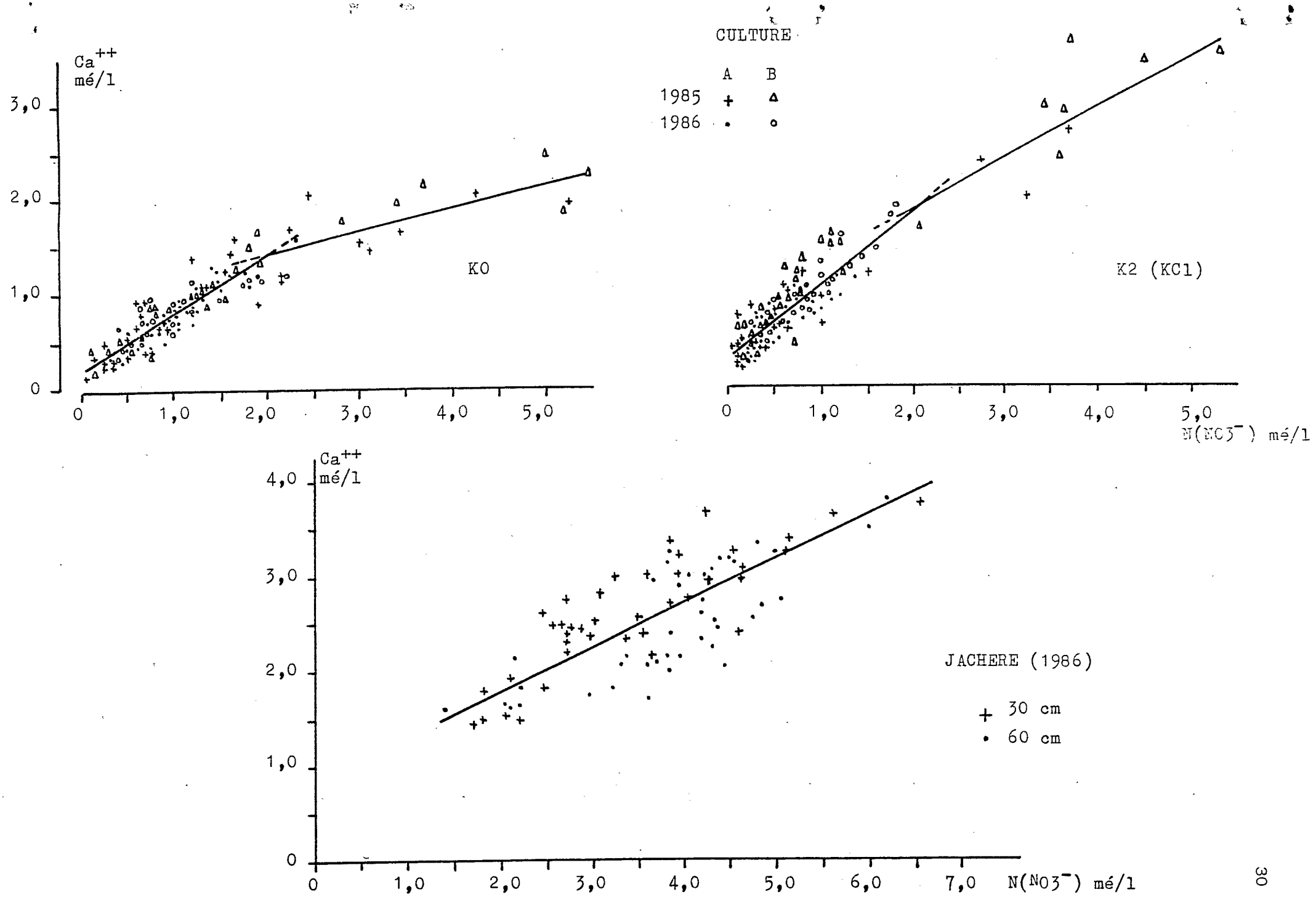

Figure 8 : Relations entre les teneurs en calcium et nitrates de la solution du sol (Davié, horizons 30 et 60 cm).

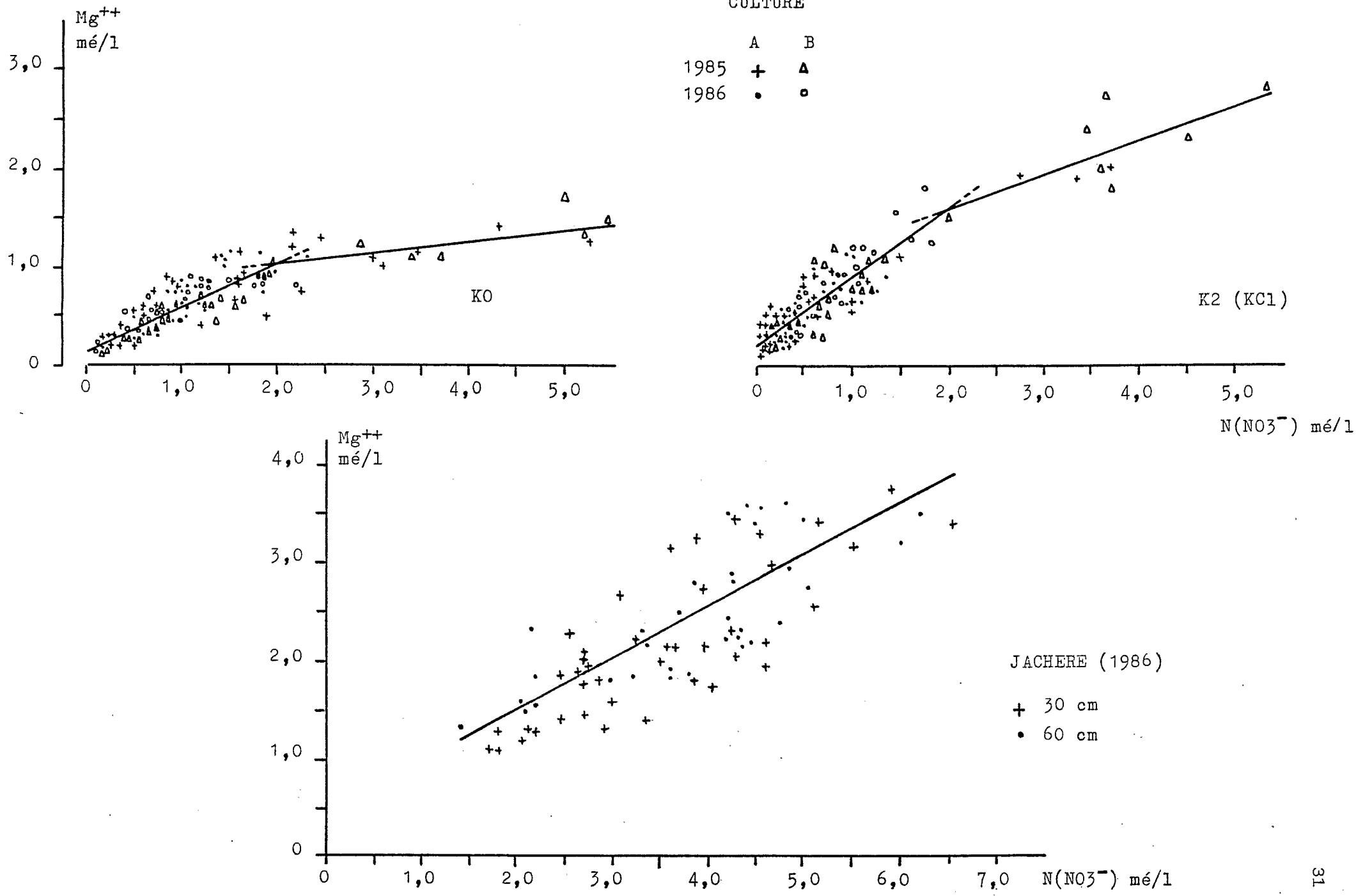

Figure 9 : Relations entre les teneurs en magnésium et nitrates de la solution du sol (Davié, horizons 30 et 60 cm).

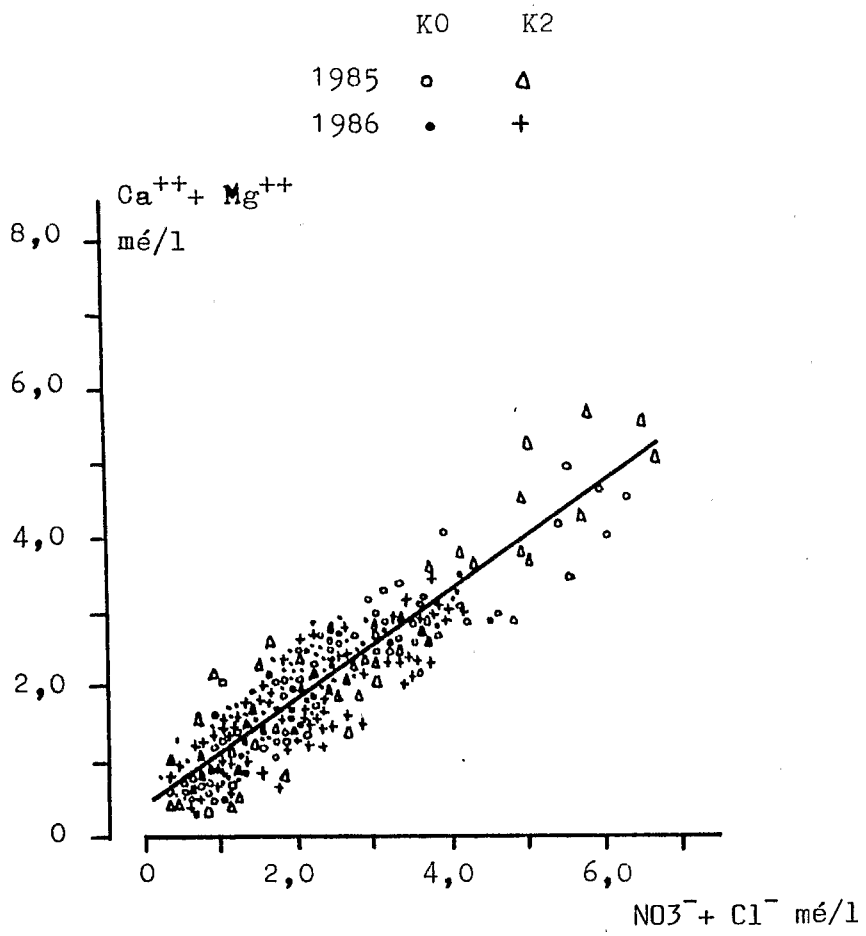

Figure 10 : Relation entre les teneurs en calcium + magnésium et nitrates + chlore de la solution du sol (Davié, culture, sous-traitements et horizons 30-60-120 cm confondus).

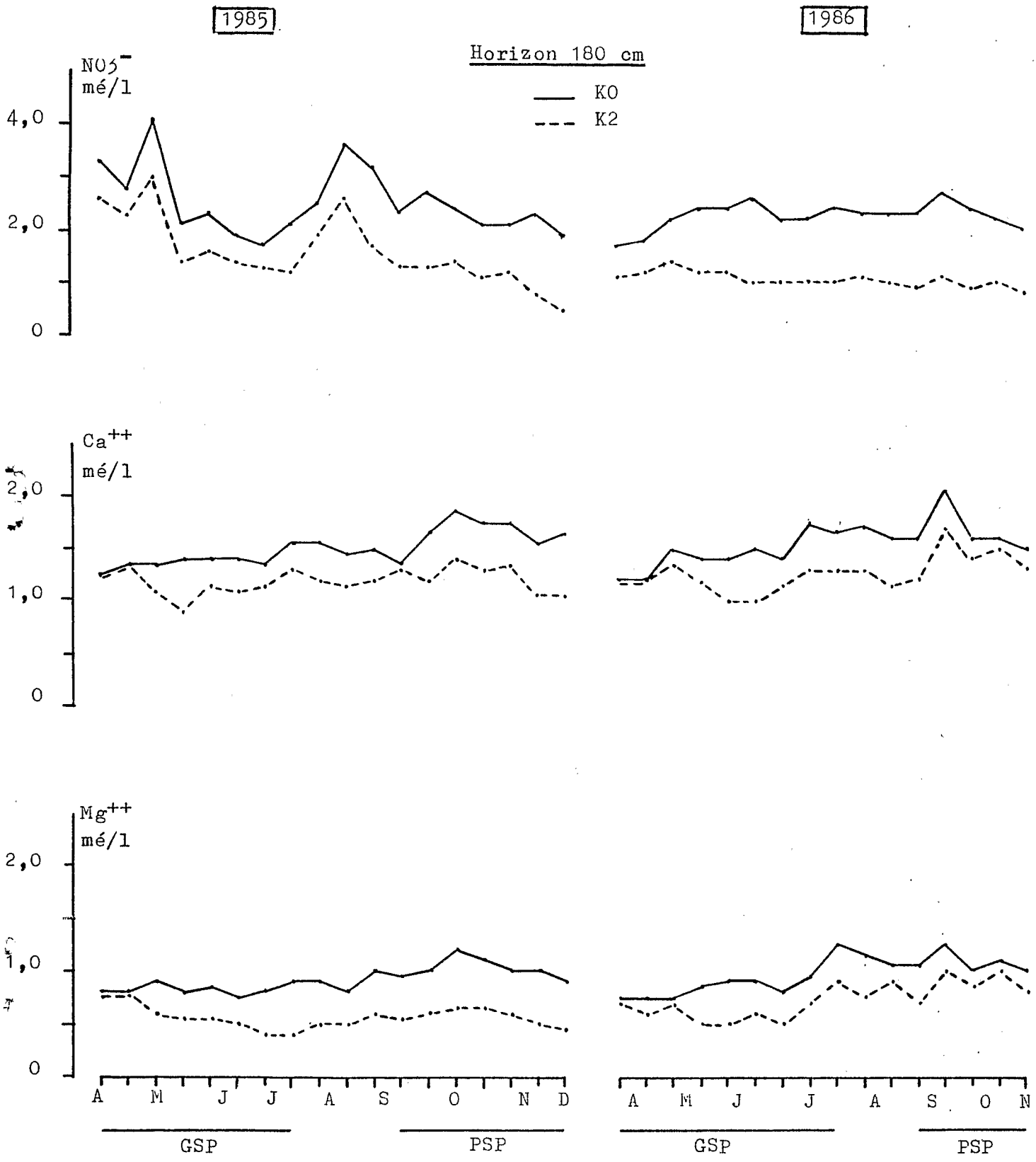

Figure 11 : Evolution de la concentration en $N(NO_3^-)$, Ca^{++} et Mg^{++} de la solution prélevée à 180 cm, dans un système cultural avec (K2) ou sans (KO) fertilisation potassique (Davié, sous-traitements confondus).

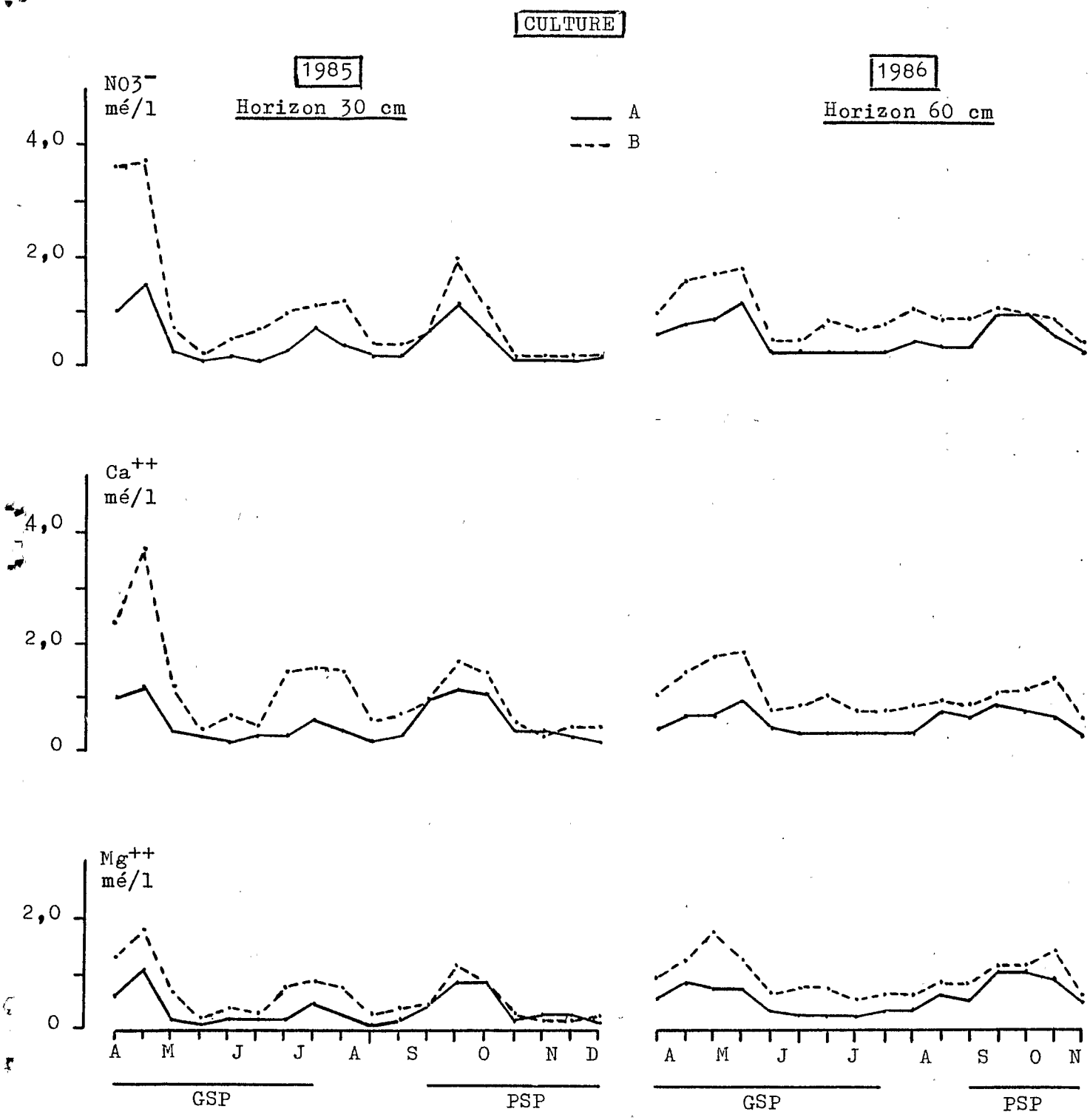

Figure 12 : Evolution de la concentration en $N(NO_3^-)$, Ca^{++} et Mg^{++} de la solution du sol sous culture continue de maïs (A) ou avec légumineuse (B) de petite saison des pluies (Davié, traitement K2).