

T H È S E

présentée

**A L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE
PARIS 6**

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

MUHAMMAD ISLAM-UL-HAQ

**DYNAMIQUE DES SELS SOLUBLES ALCALINS ET ALCALINO-TERREUX
ET DES COMPOSÉS PEU SOLUBLES DU CALCIUM (CARBONATES ET SULFATES)
DANS LES SOLS CALCAIRES, GYPSEUX, SALÉS,
SOUS IRRIGATION AVEC LES EAUX DIVERSEMENT MINÉRALISÉES**

Soutenu le 7 janvier 1976 devant la Commission d'Examen :

MM. A. JAUZEIN

Président

G. AUBERT

Examineurs

P. ROGNON

B. DABIN

C. CHEVERRY

O.R.S.T.O.M.

PARIS

1976

AVANT - P R O P O S

Grâce à l'accord qui m'en a été aimablement donné par Monsieur le Professeur G.CAMUS, Directeur Général de l'ORSTOM que je prie ici, d'accepter l'expression de mes sentiments respectueux.

Ce travail a pu être effectué au laboratoire de Pédologie appliquée du centre scientifique et technique de Bondy (O.R.S.T.O.M.) sous la direction de Monsieur le Professeur G.AUBERT. Il m'a accueilli dans son service et n'a cessé, et ne cesse, de suivre mes travaux, et malgré sa lourde charge, consacre beaucoup de temps à me conseiller et à diriger cette thèse. Ses critiques et conseils sont très précieux pour moi d'autant qu'ils s'appuient sur sa vaste expérience des sols salés du monde entier.

Je suis heureux de lui exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier vivement Monsieur le Professeur A.JAUZEIN qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

J'exprime ma sincère reconnaissance et je remercie Monsieur le Professeur R.ROGNON qui a bien voulu accepter de faire partie du jury.

Monsieur BLAVOUX m'a plusieurs fois reçu et aidé de ses conseils. Je lui en exprime une réelle gratitude.

Je tiens à remercier vivement Monsieur B.DABIN, Inspecteur général de recherches de l'O.R.S.T.O.M., et chef des laboratoires communs ainsi que du laboratoire de pédologie appliquée, qui m'a beaucoup encouragé et guidé dans mon travail et m'a aidé à mener à bien la réalisation de cette recherche. Il s'est dépensé sans compter pour moi. Je ne saurais trop reconnaître tout ce que je lui dois.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur C.CHEVERRY qui a aimablement accepté de faire partie de ce jury après s'être profondément intéressé à mon travail. Il a d'ailleurs une connaissance remarquable des problèmes que j'ai eu à traiter.

Je suis particulièrement reconnaissant à Monsieur A.COMBEAU, chef du laboratoire de physique des sols qui m'a souvent conseillé et à fait en tant que directeur adjoint des SSC de l'O.R.S.T.O.M. à BONDY, le maximum de ce qu'il pouvait pour m'aider à résoudre certaines de mes difficultés matérielles.

Je remercie également M.PINTA, chef de service de spectrographie et M.MOUREAUX, chef de la section de microbiologie du sol.

Je remercie spécialement leurs collaborateurs Melle FUSIL, Mme GUERIN, M.KOUKOUI, M.RAMBEAU.

Je remercie très vivement toutes les personnes du laboratoire de Pédologie de Bondy, en particulier M.PELLOUX, M.BRION, M.BELLIER, Mme NGUYEN TAN LOI, M.FILLMAN. Je n'oublierai pas l'excellente ambiance de ce laboratoire.

Je n'oublierai pas non plus l'amabilité de Monsieur P.SEGALEN (Ancien Directeur des S.S.C. Bondy), qui a bien voulu me permettre d'y poursuivre mes recherches.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur J.MOUCHET, Directeur actuel des services scientifiques centraux (S.S.C.) de l'O.R.S.T.O.M. qui a facilité l'exécution de mes travaux, en m'autorisant à y vivre et y travailler en me laissant utiliser le matériel et les locaux nécessaires.

Mes remerciements vont aussi aux bibliothécaires des SSC de Bondy pour leur amabilité et leur dévouement.

Enfin, c'est grâce à l'amabilité et à la compétence du service de publication de l'O.R.S.T.O.M. et en particulier de son bureau de dactylographie que cette thèse a pu être présentée.

Je tiens à assurer M.M. F.BONNET-DUPEYRON, directeur du service central de documentation et C.HIERNAUX, son adjoint, Mme CHAMBRE, M.BOUNIOL, de ma profonde reconnaissance et de mes sincères remerciements.

Beaucoup d'autres personnes aux S.S.C. de Bondy m'ont aidé où m'ont souvent manifesté leur sympathie à divers instants, parfois difficiles, des années que j'y ai vécues; je ne peux citer chacun ou chacune. Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Je remercie mon ami S.TRINH pour sa coopération.

I N T R O D U C T I O N

L'accumulation des sels est un problème important dans les régions arides et semi-arides du monde. Une grande partie du Pakistan rentre dans la zone semi-aride ; les sols y sont très fréquemment plus ou moins salés. Les chiffres présentés par MUBASHAR (1972) montrent que sur le total de 12 millions d'hectares de terres irriguées au Pakistan, 5,8 millions d'hectares sont affectés sérieusement par la salinité. Chaque année c'est environ 40.000 hectares supplémentaires touchés par ce phénomène, perte par ce pays, que l'on * peut chiffrer à peu près à 145 millions de francs français. L'amélioration et la récupération de ces sols ne peut se faire que par des irrigations abondantes. Les eaux disponibles pour cela au Pakistan sont toutes plus ou moins salées, aussi avons-nous pensé à étudier ce qui se produit dans un sol salé et calcaire lors de l'irrigation avec des eaux plus ou moins minéralisées.

A titre d'exemple nous avons étudié un certain nombre de profils de sols du Pakistan. Le prélèvement des échantillons a été fait par SIKANDARALI Pédologue de l'Institut de Recherches Nucléaires pour l'Agriculture et la Biologie à Lyallpur (Punjab). Il y a 12 échantillons (4 profils) provenant des différentes provinces du Pakistan notamment du Punjab et de Sind.

Ces sols analysés suivant les méthodes utilisées aux laboratoires des S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy, sont des sols sablo-limoneux, limoneux à limono-argileux, calcaires et fortement salés, surtout en surface avec des salures variables jusqu'à 50 et 90 millimhos.

C'est à la suite de ces analyses que nous avons choisi les sols sur lesquels nous avons réalisé les expériences décrites dans ce mémoire.

MUBASHAR (1972) Pakistan News digest v. 20 n° 8 Avril 1972, p. 8.

HUSSAIN M. * (1964) Reclamation of saline areas waterlogging ^{and} salinity
; supplement de Pakistan Times, Lahore, Nov., 22.

Comme nous ne disposons pas de grandes quantités d'échantillons de sols du Pakistan, nous avons travaillé sur des sols analogues, soit salés artificiellement dans le cas de sols calcaires de France, soit provenant de Tunisie où l'on observe les mêmes problèmes de salinité en même temps que les sols y sont riches en calcaire et en gypse.

Nous avons recherché dans nos expérimentations de laboratoire, à simuler l'irrigation de ces sols par des eaux diversement salées, en faisant percoler goutte à goutte diverses solutions sur des colonnes de terre reconstituées artificiellement. Nous avons suivi l'évolution des divers ions, en particulier, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- en fonction de divers traitements. Cette méthode de laboratoire, grâce au contrôle des conditions dans lesquelles l'expérimentation est réalisée permet de fixer au préalable les facteurs qui interviennent et de ne faire varier que ceux sur lesquels porte l'étude.

Dans le cas présent, nous avons fixé la nature du sol, sa densité apparente, sa salinité, la composition des solutions utilisées ainsi que leur concentration ; en ce qui concerne le lessivage nous avons fixé la vitesse de chute des gouttes d'eau et la quantité de solution utilisée.

Des études de même type ont déjà été réalisées dans d'autres régions notamment par : AHMAD (1972) ; ASGHAR (1961) ; BALBA (1968) ; BOWER (1961, 1965) ; CHEVERRY (1975) ; DURAND (1958) ; GRAS (1974) ; JABER (1970) LAMOUREUX (1970) ; MOUSTAFA (1973) ; OLLAT (1969) ; SERVAT (1970) ; SOMMERFELDT (1962) ; SZABOLCS (1967, 1969) ; WAHAB (1961).

Une expérience analogue a été également effectuée par YAALON (1965) mais en insistant particulièrement sur les différences dans les entraînements des chlorures et des sulfates dans le sol.

Nous reprendrons leurs conclusions à propos de la discussion des résultats obtenus au cours de nos expérimentations. Celles-ci ont été menées séparément et avec des solutions différentes, d'une part sur un sol brun calcaire limono-argileux de France (Feucherolles près de Grignon), artificiellement salé, et d'autre part sur un sol sodique, provenant des alluvions limoneuses, calcaires, du Centre Tunisien.

PREMIERE PARTIE

Evolution d'un échantillon de sol brun calcaire limono-argileux, artificiellement enrichi en sels, au cours de son lessivage par des eaux diversement minéralisées.

I - SCHEMA ET MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION.

A - ORIGINE DU SOL.

Comme nous voulions étudier les mouvements descendants des sels solubles en général et aussi du carbonate de calcium, nous avons choisi un sol calcaire. Il s'agit de l'horizon (B) d'un sol brun calcaire, situé à Feucherolles près de Grignon et formé à partir d'une marne oligocène en zone presque plane, faiblement vallonnée.

Dans ce sol le calcaire est principalement réparti dans la fraction granulométrique inférieure à 2μ , et, dans celle correspondant au sable grossier.

B - SALINISATION ARTIFICIELLE DU SOL DE FEUCHEROLLES.

Le sol de Feucherolles a été séché pendant un mois à l'air, à l'abri des rayons solaires directs et tamisé à 2 mm.

Deux prises de cinq Kg chacune ont été placées dans des bacs en plastique et artificiellement salées au moyen de 2,5 litres de chacune des deux solutions suivantes :

Solution I	Na_2CO_3	5 méq/l,
Solution II	NaCl	25 méq/l,
	Na_2SO_4	12,5 méq/l,
	MgSO_4	12,5 méq/l.

Ces solutions ont été additionnées séparément sur le même échantillon car il n'était pas possible de les mélanger au préalable (précipitation des carbonates).

Après addition des solutions, les échantillons ont été intimement mélangés, d'abord à l'état humide, puis à sec après rebroyage et retamplage.

C - COMPOSITIONS PHYSIQUE ET CHIMIQUE DE L'ECHANTILLON APRES TRAITEMENT.

Méthodes utilisées.

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode à la pipette de ROBINSON. La stabilité structurale par la méthode HENIN, pour l'analyse des agrégats, Tableau I.

Les sels solubles ont été déterminés sur l'extrait sol/eau = 1/2 et ensuite sur l'extrait sol/eau = 1/10 du culot, enfin les cations échangeables par extraction au nitrate d'ammonium N. à pH 7 sur le culot de l'extrait 1/10.

Les résultats du Tableau II montrent, après salinisation artificielle, une augmentation des sels solubles principalement NaCl ; en outre, les autres cations et anions HCO_3^- , SO_4^{--} , Mg^{++} et Ca^{++} sont présents et correspondent à un sol salé et alcalin normal, permettant de conduire un travail expérimental.

D - PREPARATION DES COLONNES DE SOLS.

Nous avons utilisé des tubes en matière plastique de diamètre intérieur 3,4 cm et de longueur 50 cm. La transparence des tubes nous a permis de vérifier visuellement l'homogénéité du remplissage et de suivre continuellement le mouvement des solutions salines et de l'eau.

Afin de récupérer facilement le sol après les lessivages, les tubes sont coupés en deux parties égales dans le sens de la longueur. Les deux parties sont assemblées avec de la parafine et de la cellophane adhésive. La base des tubes a été fermée par un bouchon en caoutchouc percé au milieu par une tige creuse de verre. Au-dessus du bouchon, nous avons placé une gaze en nylon recouverte par une rondelle de papier filtre destinée à empêcher les particules fines du sol de passer à travers les mailles de la gaze. Les cinq premiers centimètres ont été remplis par du sable fin, les quarante centimètres au-dessus par le sol préalablement séché et tamisé à 2 mm. Le sol a été introduit dans les tubes selon le procédé décrit par FELITSKIANT (1959) : nous avons d'abord rempli un autre tube d'un diamètre inférieur à celui du tube principal,

TABLEAU 1- ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SOL DE FEUCHEROLLES
SANS DECALIFICATION ET APRES DESTRUCTION DU
CALCAIRE

Pretraitement et dispersant	Hexameta phosphate de Sodium	H O + HCl 2 2 + NH ₄ OH
Humidité	3,3	3,30
Argile	30,0	15,44
Limon Fin	17,8	18,98
Limon Grossier	17,4	18,65
Sable Fin	14,8	16,37
Sable Grossier	12,7	5,05
M. O	4,0	4,00
Calcaire	-	18,21

TABLÉAU II - ANALYSE CHIMIQUE DU SOL DE FEUCHEROLLES
AVANT ET APRES SALINISATION ARTIFICIELLE

	après salinisation	état naturel
Cations échangeables meq/100 g		
Ca ⁺⁺	17,00	17,45
Mg ⁺⁺	2,40	1,75
K ⁺	0,20	0,20
Na ⁺	0,75	0,65
Sels solubles (extrait 1/2 + 1/10)		
Ca ⁺⁺ me./100 g	4,60	3,70
Mg ⁺⁺	0,60	0,40
K ⁺	0,30	0,25
Na ⁺	2,70	0,20
CO ₃ ⁻	0,09	0,00
HCO ₃ ⁻	3,04	3,30
Cl	1,74	0,20
SO ₄ ⁻	3,38	1,05
EC ₂	7,53	3,2
pH l'eau	7,2	7,0
(I = 2,5) Kcl	6,9	6,6
Co CO ₃ Total %		18,2
Ca CO ₃ actif -		5,4
Cap. d'échange - me/100 gr		20
Indice d'instabilité		0,8

et en introduisant le premier dans le deuxième, on a versé à chaque prise la quantité de sol nécessaire, en débouchant la base du petit tube à l'aide d'un clapet, ainsi l'homogénéité du sol est relativement constante. L'homogénéité de chaque colonne a été contrôlée visuellement, celles présentant une discontinuité ont été reconstituées jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant.

Dans certains essais nous avons ajouté au sol, 5 % en poids sec de matière organique constituée de feuilles de luzerne coupées très finement.

Pour faciliter la décomposition de la matière organique nous avons mélangé 50 mgm/l de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ avec la solution d'irrigation dans le cas d'apport de M.O.

II - NATURE ET CONCENTRATIONS DES SOLUTIONS UTILISEES.

Nous avons choisi des solutions de lessivage dont la composition soit comparable à celles de nappes phréatiques de nombreuses régions arides et semi-arides du monde. Pour la première expérience nous avons préparé six solutions salines dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau III.

L'eau distillée utilisée a été dégazée par ébullition, afin d'éviter une précipitation éventuelle de CaCO_3 dans les solutions riches en Ca^{++} .

L'utilisation du cation magnésium ne correspond pas à un but principal de notre étude, mais comme la solubilité de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est assez limitée (30 méq/l) nous avons utilisé autant de magnésium que de calcium pour pouvoir augmenter la concentration de la solution en cation bivalents. Nous avons ajusté la concentration totale des solutions à 25 méq/l ce qui est assez proche de la concentration des nappes salées de diverses régions du Pakistan.

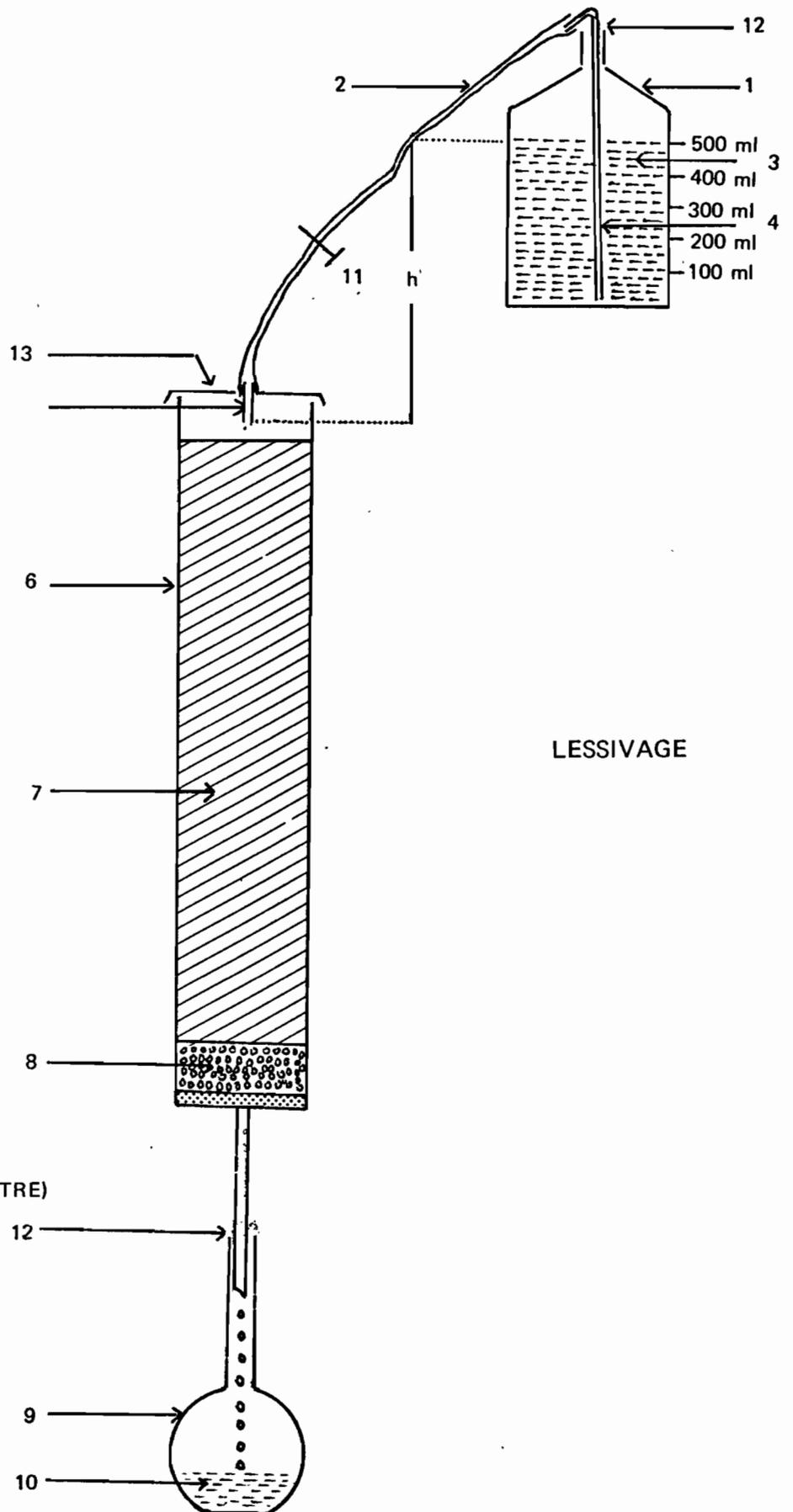
Nous avons rajouté le gypse comme amendement dans la solution d'irrigation, dont la concentration est augmentée d'autant, ce qui est plus efficace que le mélange avec le sol. Cette méthode est maintenant pratiquée au Pakistan ; on met le gypse dans le bassin de pompage et l'eau s'enrichit en cet élément avant d'irriguer les sols.

TABLEAU III - NATURE ET CONCENTRATIONS DES SOLUTIONS UTILISEES

Solutions des différents traitements	pH	Concentration totale	Na/T calculé (1) Boxwer	Na/T calculé (2) Cruesi	SAR
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5 me/l	6,7	25 me/l	15,3 14,8	12	12,6
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5 me/l + + gypse 15 me/l	7,2	40 me/l	7,4	5,6	6,3
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l	6,7	25 me/l	5,7	4,3	5,0
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + gypse 5 me/l	7,0	30 me/l	3,0	3,5	4,2
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l (+ 0,5% (NH ₄) ₂ SO ₄ 5 cmg /l)	6,8	25 me/l	6,0	4,3	5,0
NaCl 5 me/l + CaSO ₄ ·2H ₂ O 10 me/l + MgSO ₄ 10 me/l	7,0	25 me/l	9,0	0,97	1,6
ténoin l'eau distillée	7,2				

(1) Na/T calculé du sol sur lequel sont appliquées les solutions

Fig. 1 – Schéma des dispositifs utilisés dans nos expériences



- 1 BOUTEILLE DE VERRE
- 2 TUYAU EN CAOUTCHOUC
- 3 SOLUTION SALINE OU EAU
- 4 TUBE EN VERRE
- 5 CAPILLAIRE (DE THERMOMÈTRE)
- 6 COLONNE DE TERRE
- 7 SOL
- 8 SABLE
- 9 FIOLE
- 10 LESSIVAT
- 11 PINCES
- 12 COTON
- 13 COUVERCLE

III - MODE OPERATOIRE POUR LA RÉALISATION DU LESSIVAGE.

L'alimentation des colonnes est réalisée au moyen d'une bouteille ouverte contenant la solution et maintenue à une certaine hauteur (Fig.1). Elle se deverse par un tube en caoutchouc, plongeant dans le récipient à un bout grâce à un tube de verre, et se terminant à l'autre bout par un tube capillaire en verre placé au dessus de la colonne. Le mouvement de l'eau se fait par simple siphonnage. La régulation du débit est assurée par le capillaire et par une pince de Mohr à vis, placée sur le tuyau de caoutchouc. L'arrivée de l'eau a lieu goutte à goutte et est facile à régler.

Nous avons préféré cet apport d'eau goutte à goutte, à un plan d'eau à la surface du sol la première méthode étant considérée comme plus efficace dans le lessivage des sels. Le capillaire est disposé au-dessus des colonnes, et centré à une faible distance de la surface du sol. Pour empêcher les effets mécaniques de la goutte d'eau, nous avons placé à la surface de chaque colonne de terre une rondelle de papier filtre. Nous avons réglé la vitesse d'écoulement de telle sorte qu'il n'y ait pas de stagnation de l'eau et chaque goutte d'eau qui tombe pénètre en totalité. Le lessivat de la colonne est recueilli dans une fiole jaugée.

Pour limiter l'évaporation nous avons couvert les orifices des fioles, par un tampon de coton, et la colonne de terre par des couvercles en plastique percés d'un trou central, et permettant le passage du capillaire.

Nous avons fixé d'avance la quantité de lessivat à recevoir dans les flacons, après percolation à travers la colonne de terre.

Les lessivages sont réalisés en triple exemplaire avec des quantités croissantes de solution, soit respectivement ; 500 ml, 1000 ml, 1500 ml dans la première expérience. Les trois doses de lessivage ont été appliquées sur le sol artificiellement salé.

Traitement D1 : 500 ml à un rythme de 50 ml par jour.

Traitement D2 : (500 ml + 500 ml) = 1000 ml à un rythme de 50 ml par jour.

Traitement D3 : (500 ml + 500 ml + 500 ml) = 1500 ml à un rythme de 50 ml par jour.

À la fin du lessivage nous avons couvert les colonnes de façon à empêcher l'évaporation et nous les avons maintenues debout pendant 48 heures pour achever le ressuyage avant de les coucher en vue du prélèvement. Chaque colonne de terre est placée horizontalement, le ruban adhésif qui liait les deux parties de la colonne est enlevé permettant ainsi le détachement de la partie supérieure du tube en polyéthylène. Chaque colonne de terre est découpée en 4 tranches de 10 cm chacune que nous recueillons dans des béchers de 100 ml, tarés. Nous pesons immédiatement chaque bécher contenant la terre humide et nous le mettons à l'étuve à 105°C afin de déterminer l'humidité. L'ensemble des opérations pour chaque tube ne dépassant guère 20 mn; la perte par évaporation ne peut donc être élevée.

A. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFÉRENTES FORMES DU SODIUM DANS LE SOL.

Le sol contient 2,72 méq/100 g de Na^+ soluble et 0,75 méq de Na^+ échangeable pour 100 g de sol au début de l'expérience. Les solutions de lessivage lui ont été apportées par dose de 500 ml (D1) 1000 ml (D2) 1500 ml (D3). La pénétration de la solution et l'entraînement du sodium du sol sont particulièrement lents dans le cas de celles qui sont très chargées en chlorure de sodium.

Dans le cas de la solution la plus sodique (NaCl 20 méq/l $-\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} =$

4 SAR = 12,6) nous observons, après la percolation de la dose D1, un très léger enrichissement du sol à la surface (sur 10 cm) et un net appauvrissement en-dessous, les 3 niveaux suivants 10 à 20 cm, 20 à 30 cm, 30-40 cm, accusant une teneur en Na soluble légèrement au-dessus (niveau 1) ou en dessous (niveaux 2 et 3) de 2 méq/100 g de sol. En même temps, le sodium échangeable augmente nettement, passant à 0,9 méq/100 g de sol en surface. Il reste à 0,75 méq/100 g dans les 3 autres horizons.

Après la percolation de la deuxième dose D2, le sodium soluble baisse légèrement en surface, revenant à peu près à la teneur initiale (27 méq/100 g au lieu de 2,75), mais aux niveaux 1 et 2 les teneurs remontent à environ 2,4 méq et au dernier niveau l'accroissement est net mais faible.

Le sodium échangeable augmente aux trois premiers niveaux, surtout dans les deux supérieurs, seul le dernier niveau reste à la valeur initiale.

Après l'apport de la troisième dose D3, la teneur en sodium soluble augmente nettement à tous les niveaux ; elle devient supérieure à la teneur initiale en surface ; elle l'égalise au niveau 1 mais reste nettement inférieure au niveau 2 et surtout au niveau 3 (2,35 méq au lieu de 2,75 méq)

En même temps la teneur en Na^+ échangeable croît aux divers niveaux, surtout en surface où après la percolation de 1500 ml, elle atteint 1,35 méq/100 g ; c'est-à-dire 7 pourcent de la capacité totale d'échange de cations du sol. Pour une solution de SAR = 12,6 le pourcentage de sodium auquel on peut arriver dans ce sol avec suffisamment d'irrigation est de environ 11,8 d'après la formule du CRUESI (1970) si la solution du

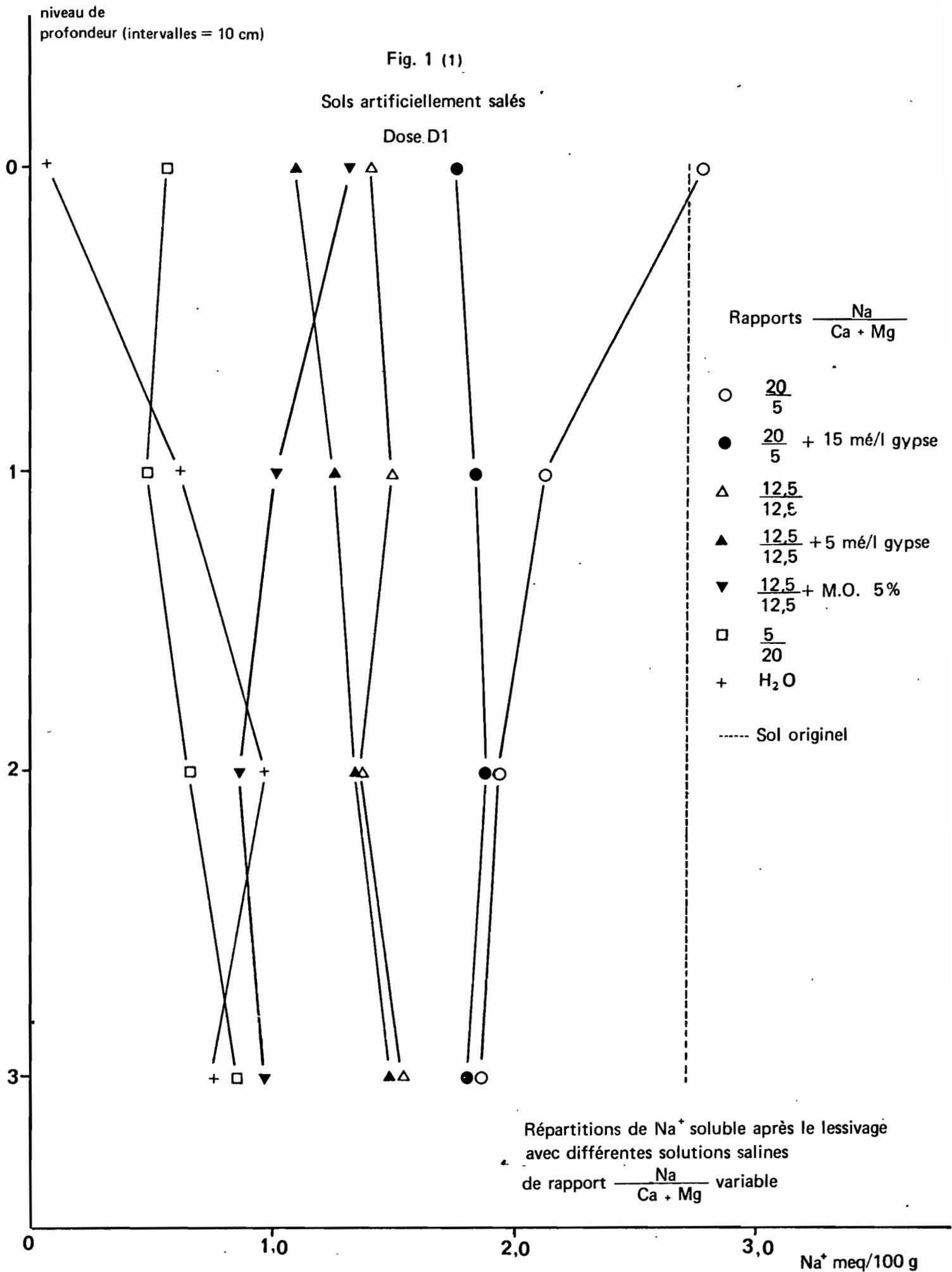
sol prend la composition de la solution de percolation, cette formule établie par l'équipe de chercheurs du Cruesi paraît pouvoir être appliquée dans le cas actuel puisque après la dose D3, le SAR du lessivat est de 8,1. Si l'on estime que sa composition est proche de celle de la solution du sol à la fin de l'expérience, cette formule indique que dans ces conditions le $\frac{\text{Na}}{\text{T}}$ du sol a du acquérir une valeur de 7,4 % ce qui est très proche de celle de 7 % obtenue à l'analyse.

Au total la solution utilisée pour la percolation a apporté au sol 30 méq de sodium et les 3 lessivats successifs n'en ont entraîné que 28,84 méq. Comme par ailleurs le sodium contenu dans la solution qui imprègne les 5 cm de sable et les billes de verre situées à la base de la colonne, représentent 0,6 méq, l'augmentation de teneur du sol en sodium soluble et échangeable est de 0,56 méq. L'opération se solde par une faible dégradation.

Il est aussi à noter que si la conductivité des lessivats successifs baisse sensiblement au deuxième lessivat et reste à peu près constante ensuite, par contre leur SAR augmente surtout à la suite de la percolation des 1500 ml ce qui correspond à l'alcalisation progressive du sol, précédemment indiqué.

L'enrichissement en gypse de la solution de lessivage de même salinité de base que précédemment permet un entraînement important du sodium du sol 11,95 méq dès la première dose D1 et 2,1 méq de sodium au total pour les 3 doses au lieu de 0,54 méq d'accumulation dans l'expérience précédente (soit 48,3 mg de sodium au lieu de 12,4 mg d'accumulation). Les deux premières doses ramènent la teneur du sol en sodium soluble à des valeurs à peu près identiques dans tout l'ensemble du profil. 1,8 méq/100 g dans un cas et 2 méq/100 g dans l'autre. A la suite de l'application de la 3ème dose cette teneur augmente un peu dans le seul horizon superficiel.

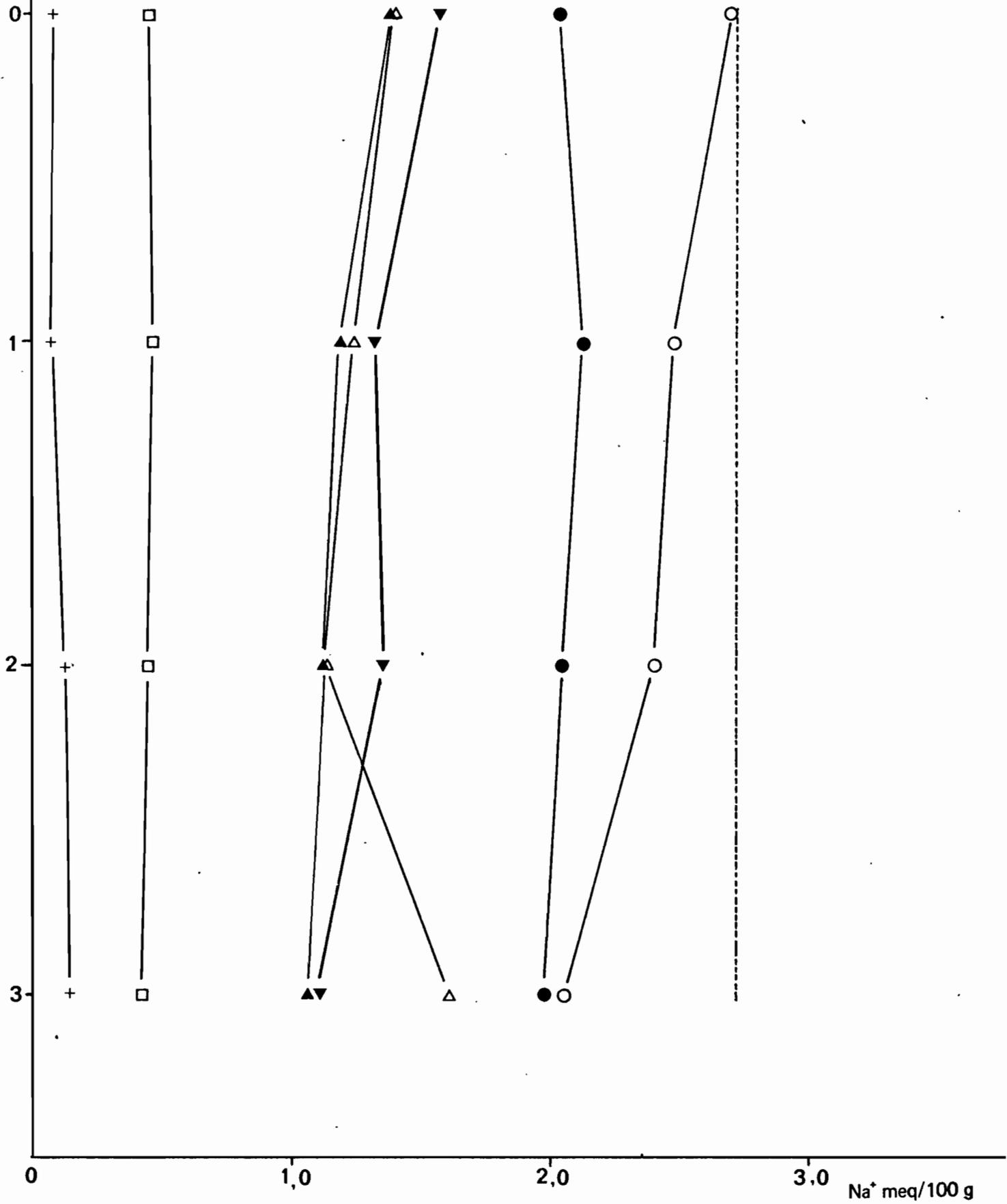
Le sodium échangeable du sol de cette colonne commence par diminuer à 0,5 méq/100 g, lors de l'application des deux premières doses, mais celle de la 3ème dose provoque une augmentation sensible (à 0,8 méq/100 g) dans les deux derniers niveaux. Il est intéressant de noter que l'apport du gypse supplémentaire renverse le "profil de sodium échangeable" de la colonne par rapport à ce qu'il est à la fin de l'expérimentation avec la première solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}} = 4$.



niveau de profondeur

Fig. 1 (2)

Dose D2



niveau de profondeur

Fig. 1 (3)
Dose D3

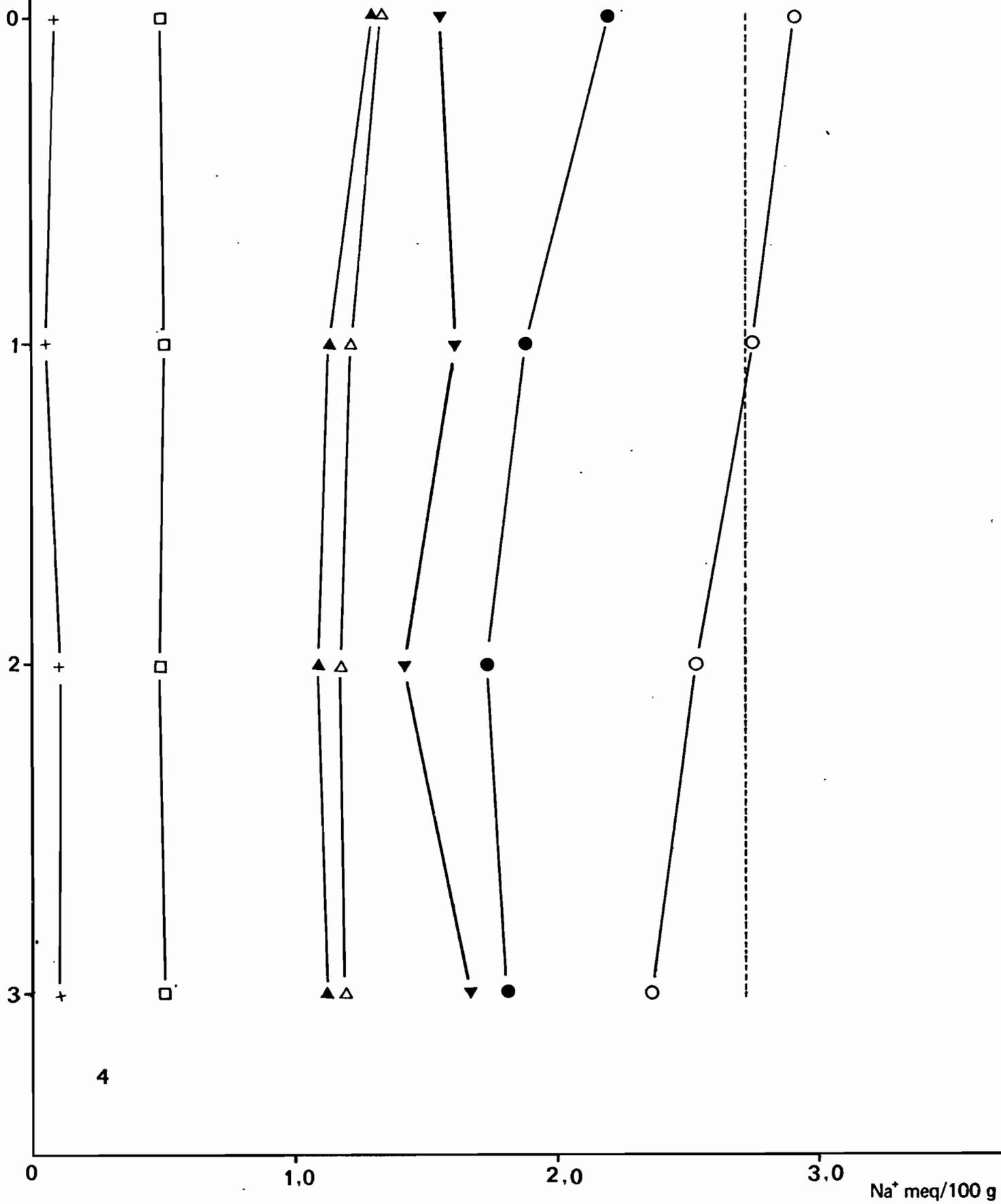
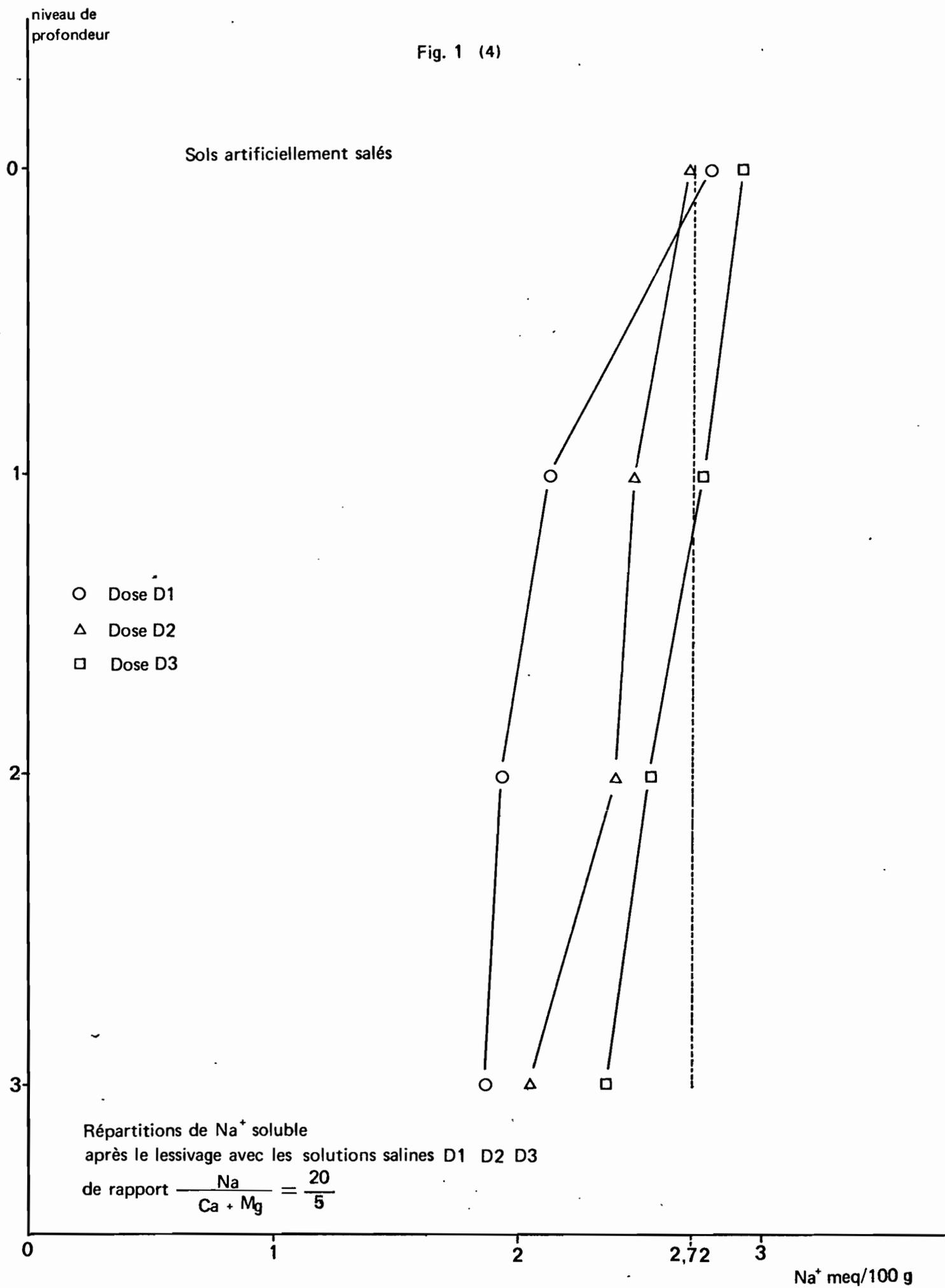


Fig. 1 (4)



Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en bases alcalines et alcalino-terreuses ($\text{Na} = 12,5 \text{ méq/l}$; $\text{Ca} + \text{Mg} = 12,5$, $\text{Na}/\text{Ca} + \text{Mg} = 1$, $\text{SAR} = 5$), dès l'application de la première dose la teneur en Na soluble baisse à $1,4 \text{ méq/100 g}$ sur toute l'épaisseur de la colonne, donc bien en-dessous de celle qui était maintenue dans le premier cas ($2,8 \text{ méq/100 g}$ en surface et autour de 2 méq/100 g aux 3 niveaux inférieurs). Après l'application des deuxième et troisième doses, les teneurs baissent encore un peu, à environ $1,2-1,3 \text{ méq/100 g}$ sauf en profondeur après la deuxième dose, où la teneur se maintient à $1,6 \text{ méq/100 g}$. Le sodium échangeable commence par baisser, surtout dans les deux horizons supérieurs, après les deux premières doses ; après la troisième dose il réaugmente à $0,7-0,8 \text{ méq/100 g}$ soit environ une valeur $\text{Na}/\text{T} = 3,3 \text{ p.100}$. La quantité de sodium extraite du sol lors de la percolation des 1500 cc atteint $5,98 \text{ méq}$ soit $121,24 \text{ mg}$.

Dans le cas de l'utilisation de cette solution, l'enrichissement en gypse ne provoque guère de changements dans les teneurs en sodium soluble. La dose D1 provoque un abaissement à $1,09 \text{ méq/100 g}$ en surface (au lieu de $1,4$) et $1,25$ (au lieu de $1,49$) au niveau suivant, et lors de l'apport de la dose D2, l'irrégularité d'accroissement observé au niveau le plus profond avec la solution précédente n'apparaît plus après l'enrichissement en gypse.

L'entraînement total de Na dans les lessivats reste pratiquement le même.

L'enrichissement en gypse de la solution ne modifie que très peu son SAR ($4,2$ au lieu de 5) ; l'effet sur le sodium échangeable du sol est à peu près le même que dans le cas précédent, sauf lors de la percolation de la première dose pour les deux premiers niveaux et en surface après l'apport de D3. Contrairement à ce qui pouvait être attendu, on observe alors en surface un accroissement de la teneur en Na échangeable même par rapport à la teneur initiale 1 méq/100 g au lieu de $0,75$. Après la dose D1 au niveau 1 la diminution de Na^+ échangeable est aussi moins forte qu'avec la même solution non-enrichie en gypse supplémentaire. On peut se demander si cette anomalie n'est pas partiellement due à l'accroissement, sous l'influence de l'apport du gypse dont l'effet sur les argiles est floculant, de la vitesse de percolation des gouttes d'eau qui imprègnent mal, alors, la couche supérieure de sol et dont l'action d'échange deviendrait ainsi moins efficace.

L'enfouissement de matière organique permet un entraînement plus important du sodium soluble par la première dose dès le niveau 1, et plus en profondeur. En surface, l'effet est très voisin de celui de la même solution mais sans enrichissement, ni du sol en matière organique ni de la solution en gypse supplémentaire.

La dose D2 provoque à peu près la même modification que précédemment, les teneurs étant cependant un peu plus élevées sauf tout à fait en profondeur.

L'effet de la troisième dose accuse le phénomène, les teneurs atteignant de 1,4 à 1,7 méq/l de sodium soluble, tandis que dans les traitements précédents, elles restaient à 1,1-1,3 méq/l.

La quantité de sodium enlevée au sol dans ce cas, atteint la valeur la plus élevée par rapport au traitement $\frac{20}{12,5}$, $\frac{20}{12,5} + 15$ méq/l gypse $\frac{12,5}{12,5}$, $\frac{12,5}{12,5} + 5$ méq gypse 6,86 méq soit 157,8⁵ m. soit à tous les traitements de SAR supérieur 4,2.

L'abaissement de la teneur en sodium échangeable après percolation de la dose D1, est particulièrement important aux deux premiers niveaux (0,2 méq/100 g) et un peu moins aux deux niveaux suivants (0,3 et 0,4 méq/100 g).

L'apport de la dose D2 ne modifie que peu ces valeurs ; celui de la dose D3 abaisse les teneurs des 2 niveaux extrêmes à 0,2 méq/100 g et remonte un peu celles des deux niveaux intermédiaires à 0,4 méq/100 g. Cette action particulière de la matière organique est à relier à la richesse des différents lessivats en bicarbonates solubles ; leur formation a permis en effet, comme nous le verrons plus loin la dissolution et l'entraînement de quantités de Ca et de Mg beaucoup plus importantes que dans les autres cas expérimentés.

Lorsque la solution de lessivage est riche en alcalino-terreux $(CaSO_4 \cdot 2H_2O + MgSO_4)$ 20 méq/l $\frac{Na}{Ca + Mg} = \frac{5}{20}$ SAR = 1,6 dès l'application de la première dose (D1) la teneur en sodium soluble baisse à 0,56 méq/100 g au niveau 0 à 0,48 méq au niveau 1 et remonte légèrement vers la profondeur (0,65 méq au niveau 2 et 0,85 méq/100 g au niveau 3).

On observe également une variation du Na⁺ échangeable aux divers niveaux du profil. Dans l'ensemble, il diminue nettement sauf au niveau 1 où il commence par augmenter.

Après l'application de la deuxième dose, les teneurs en Na^+ soluble baissent un peu, à environ 0,44 méq/100 g. Le Na^+ échangeable augmente légèrement au niveau 0 (0,6 méq/100 g) et niveau 2 (0,7 méq/100 g) mais il baisse à 0,5 méq/100 g aux niveaux 1 et 3.

Après l'apport de la troisième dose, les teneurs en sodium soluble se maintiennent très faibles (0,5 méq/100 g). Le sodium échangeable reprend en surface une valeur semblable à celles qui existait au début de l'expérience, mais reste aux autres niveaux à la valeur faible de 0,5 méq pour 100 g atteint au moins pour certains d'entre eux dès après l'application de la première dose.

La quantité de sodium extraite du sol par l'ensemble de la solution de percolation atteint 9,14 méq, soit 187,22 mg ce qui représente près de 27 % de plus que ce qui est enlevé dans le cas précédent solution $\frac{12,5}{12,5}$ ml / l et 61,8 % de maximum obtenu en utilisant l'eau distillée.

Quant au SAR des lessivats, après avoir augmenté d'abord par suite de la dissolution du sodium du sol, il diminue en même temps que leur condition et arrive à une valeur inférieure à celle qui présente ce rapport dans la solution de percolation.

Dans le cas de percolation du sol par l'eau distillée après le passage de la dose (D1) on observe un net appauvrissement de la teneur du sol en Na soluble au niveau 0 et un peu moindre aux niveaux 1 et 2 (0,62 méq/100 g et 0,97 méq/100 g) ainsi qu'au niveau 3 (0,73 méq/100g).

En même temps le sodium échangeable diminue nettement dans tout l'ensemble du profil ; il varie autour de 0,2 méq/100 g. C'est à dire 0,8 % de la capacité totale d'échange de cations du sol.

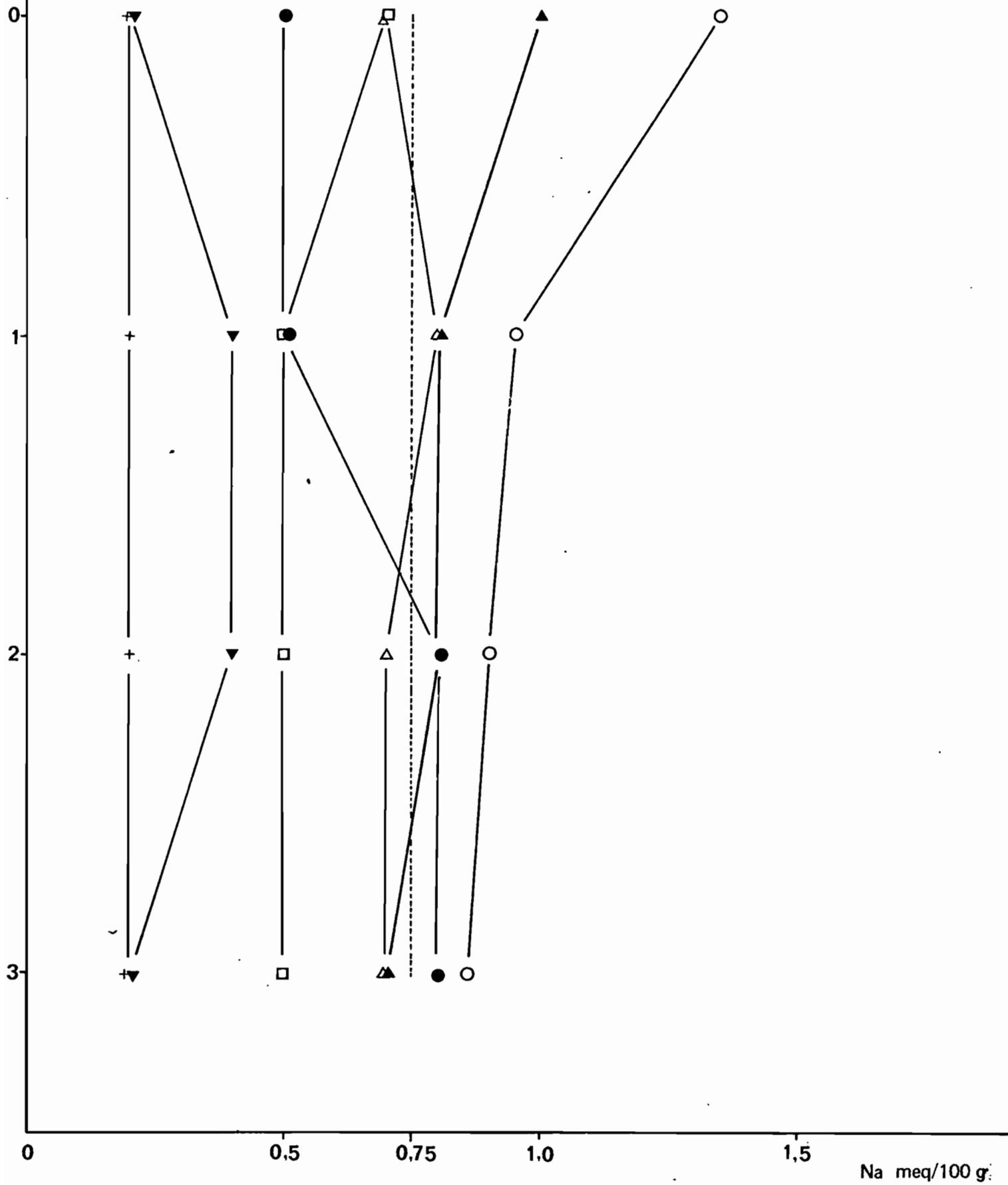
Après la percolation de la deuxième dose D2, le sodium soluble baisse nettement à tous les niveaux 0,08 méq/100 g à surface et 0,14 méq/100 g au niveau 3. Le lessivat contient 15,1 % de Na^+ soluble qui est entièrement fourni par le sol. Le Na^+ échangeable reste approximativement à 0,2 méq/100 g.

Après l'apport de la troisième dose D3, l'entraînement de Na^+ soluble devient très faible dans le lessivat. La teneur en Na^+ soluble diminue légèrement à tous les niveaux. La teneur en Na^+ échangeable reste constant 0,2 méq à tous les niveaux.

niveau de
profondeur

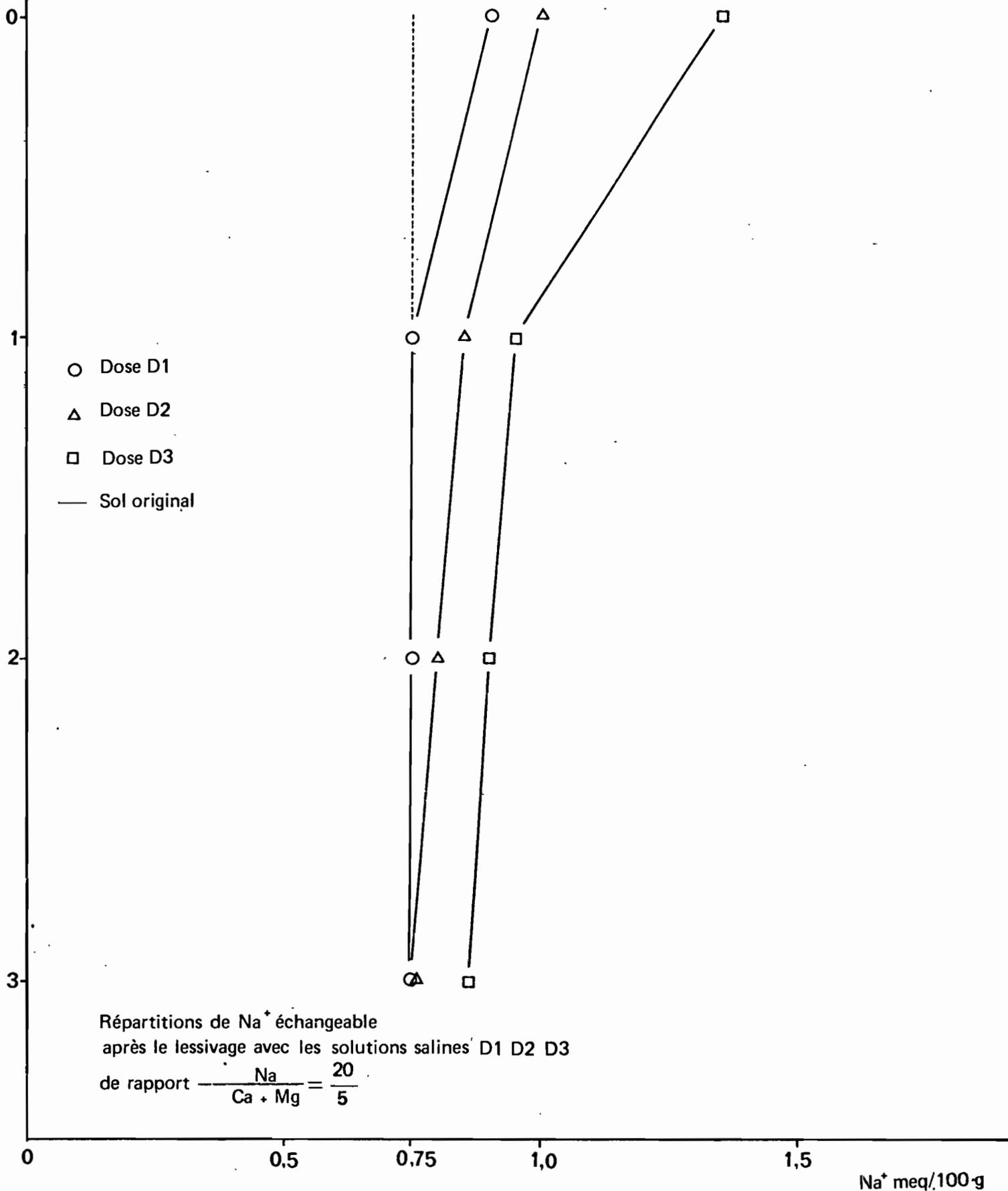
Fig. 2 (3)

Dose D3



niveau de
profondeur

Fig. 2 (4)
Sols artificiellement salés



L'appauvrissement du sol en sodium soluble et échangeable est, ici, le plus élevé de tous ceux obtenus par les divers traitements ; il l'est même 2 fois plus que celui qui résulte d'un apport de matière organique au sol et de la percolation d'une solution contenant 12,5 méq/100 g de Na⁺, et présentant un rapport $\frac{Na}{Ca + Mg} = 1$ sur l'ensemble du sodium exporté par les 1500 ml 303,14 mg Ca + Mg 62,3 % soit 189 mg sont déjà lessivé par la première dose de 500 ml. Les 1500 ml d'eau distillée ont donc enlevé 82,2 % du sodium soluble et échangeable du sol.

CONCLUSIONS PARTIELLES.

Les résultats des expérimentations que nous venons de décrire et de discuter nous permettent de tirer les conclusions partielles suivantes, sur l'évolution des diverses formes du sodium dans ce sol salé calcaire, sous l'effet de son "Irrigation" avec des eaux plus ou moins minéralisées, de rapport variable $\frac{Na}{Ca + Mg}$

1.- Dans tous les cas étudiés, seule la solution contenant 20 méq/l de Na pour 5 de Ca + Mg, a provoqué à la suite d'un apport de 1500 cm³ une augmentation du sodium soluble, faible mais nette, surtout en surface et du sodium échangeable principalement, aussi, en surface.

2.- La diminution du sodium ou l'augmentation du calcium (gypse) dans la solution de percolation permettent de renverser le phénomène et de faire baisser, par rapport aux valeurs de départ, les taux de sodium soluble ou de sodium échangeable dans le sol.

L'apport d'une dose supplémentaire de gypse a peu d'effet si le rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ est déjà peu élevé (12,5/12,5 me/l).

3.- L'eau distillée abaisse le plus les teneurs en Na soluble et en sodium échangeable. La solution comportant 5 me/l seulement de sel de Na et 20 de sels de magnésium et de calcium a un effet à peine moins efficace.

4.- L'apport de matière organique au sol ainsi traité permet une plus forte diminution non du sodium soluble, mais, probablement grâce à la production de sels suffisamment solubles de Ca et de Mg (bicarbonates), aussi du Na échangeable.

5.- Si l'on calcule l'évolution du sodium globalement contenu dans la colonne de sol expérimenté, selon le tableau ci-dessous, on voit que :

- . celui-ci augmente au cours de la percolation de la solution contenant 20 méq de Na et 5 de Ca + Mg ;
- . dans tous les autres cas, il diminue :
 - faiblement, lorsqu'à la solution précédente on ajoute une dose de gypse ;
 - un peu plus lorsque la solution ne contient plus que 12,5 méq de Na pour autant ou plus de sels de Ca et de Mg ; l'apport de matière organique dans ce cas améliore un peu ce résultat.
 - enfin, l'utilisation d'une solution ne contenant que 5 méq/l de Na pour 20 méq/l de sels de Ca + Mg, ou de l'eau distillée, permet d'entraîner des quantités bien plus élevées de sodium.

TABLEAU : IV- Teneur en Na⁺(me) dans des différents lessivats
Sol artificiellement salé

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
Nacl 20me/l + CaSO ₄ .2H ₂ O 2,5me/l + Mg SO ₄ 2,5 me/l	9,01		9,41		10,42	0,42
Nacl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l+ MgSO ₄ 2,5 me/l ⁻ + 15 me/l gypse	11,95	1,95	9,84		10,30	0,30
Nacl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l+ MgSO ₄ 6,25 me/l	11,16	4,91	7,13	0,88	6,44	0,19
Nacl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + 5 me/l gypse	11,02	4,77	6,96	0,71	6,76	0,51
Nacl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5 %	14,2	7,95	5,47		5,94	
Nacl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10me/l MgSO ₄ 10 me/l	9,72	7,22	3,47	0,97	2,45	
témoin l'eau distillée	8,21	8,21	1,99	1,99	2,98	2,98

TABLEAU V - REPARTITION DE SODIUM SOLUBLE APRES LESSIVAGE

(Sol Brun Calcaire Artificiellement Salé)

Na⁺ me/100 g

Dose de lessivage	Profondeur en cm	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20 me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + 15me/l gypse	NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + 5me/l gypse	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5,25 me/l MgSO ₄ 6,25 + 11.0 5 % + (NH ₄) ₂ SO ₄	NaCl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l MgSO ₄ 10 me/l	Témoin L'eau distillée
500 ml	0-10	2,78	1,75	1,40	1,09	1,52	0,56	0,06
	10-20	2,12	1,83	1,19	1,25	1,01	0,48	0,62
	20-30	1,93	1,88	1,36	1,35	0,86	0,65	0,97
	30-40	1,36	1,80	1,53	1,49	0,96	0,85	0,73
1000 ml	0-10	2,70	2,03	1,39	1,39	1,57	0,44	0,08
	10-20	2,47	2,12	1,23	1,19	1,32	0,46	0,07
	20-30	2,20	2,04	1,13	1,12	1,35	0,44	0,12
	30-40	2,05	1,97	1,61	1,06	1,09	0,42	0,14
1500 ml	0-10	2,91	2,20	1,33	1,30	1,55	0,49	0,08
	10-20	2,75	1,88	1,21	1,13	1,61	0,50	0,05
	20-30	2,53	1,73	1,17	1,09	1,42	0,48	0,10
	30-40	2,36	1,81	1,19	1,13	1,67	0,50	0,10

TABLEAU VI - REPARTITION DE Na⁺ ECHANGEABLE APRES LE LESSIVAGE

(Sol Brun Calcaire Artificiellement Salé)

Na⁺ me/100 g

Dose de lessivage	Profondeur en cm	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5 me/l + 15me/l gypse	NaCl 12,5me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l	NaCl 12,5me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + 5me/l gypse	NaCl 12,5me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l+ MgSO ₄ 6,25 me/l+ + M.O 5 %	NaCl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l MgSO ₄ 10 me/l	(témoin) l'eau distillée
500 ml	0-10	0,90	0,70	0,40	1,00	0,20	0,50	0,20
	10-20	0,75	0,50	0,40	0,60	0,20	1,00	0,30
	20-30	0,75	0,50	0,60	0,70	0,30	0,40	0,20
	30-40	0,75	0,50	0,70	0,50	0,40	0,50	0,05
1000 ml	0-10	1,00	0,50	0,50	0,40	0,50	0,60	0,20
	10-20	0,85	0,40	0,50	0,40	0,50	0,50	0,05
	20-30	0,80	0,50	0,50	0,60	0,30	0,70	0,20
	30-40	0,75	0,40	0,70	0,70	0,30	0,50	0,20
1500 ml	0-10	1,55	0,50	0,70	1,00	0,20	0,70	0,20
	10-20	0,95	0,50	0,80	0,80	0,40	0,50	0,20
	20-30	0,90	0,80	0,70	0,80	0,40	0,50	0,20
	30-40	0,86	0,80	0,70	0,70	0,20	0,50	0,20

INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFERENTES FORMES DE L'ENSEMBLE CALCIUM PLUS MAGNESIUM DANS LE SOL (Ca et Mg solubles, échangeables et facilement extractibles).

Le sol contient 5,21 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles au début de l'expérience dont 4,58 me/100 g sont du calcium soluble et 0,63 me/100g du magnésium soluble. L'entraînement du calcium dépend de la durée de contact sol et solution et de la vitesse de l'écoulement; plus il est lent plus fort est le lessivage du calcium; le degré de solubilité des carbonates et sulfates de calcium est beaucoup plus faible que celles des mêmes sels d'autres cations. Le lessivage de Mg est normalement très fort.

Au départ le sol est saturé en bases et contient 19,4 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables (17,0 me Ca et 2,4 me Mg) valeur légèrement inférieure à celle de la capacité totale d'échange de cations (20 me/100gr).

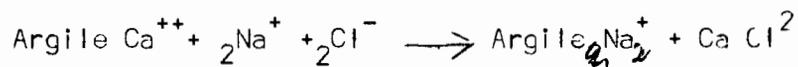
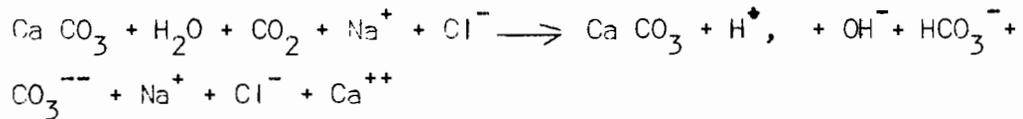
Après traitement du sol par les solutions salines, le dosage des sels solubles et des bases échangeables à été réalisé, d'une part dans un extrait à l'eau 1/10 éliminant les sels solubles et d'autre part dans un extrait $\text{NH}_4 \text{NO}_3$ du sol résiduel, contenant les bases échangeables et les sels en excès de ce qui était soluble à l'eau.

Les cations échangeables et facilement extractibles sont déterminés par la différence en milliéquivalents entre les taux de cations et les taux d'anions dans les différentes solutions. (Les taux d'anions représentant les sels solubles).

Lorsque la solution est la plus sodique (NaCl 20 me/l

$\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5} = 4$, SAR = 12,6 , au cours de la percolation de la dose D1, au niveau zéro; l'entraînement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles porte sur 0,5 me/100 gr. Au niveau 1, on observe encore une certaine diminution de ces éléments (0,15 me) et vers la profondeur il y a une augmentation progressive du lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles : niveau 2,0,65 me, niveau 3,0,88 me/100 g. L'analyse du lessivat montre 3,9 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol par rapport au lessivat de l'eau distillée.

On observe tout au long du profil un taux de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles, qui dépasse la capacité d'échange d'ailleurs déjà partiellement saturée par le sodium (0,75 à 0,9 me/100gr) et secondairement par le potassium. Il se produit vraisemblablement diverses réactions entre les sels en circulation dans le sol et ses constituants, principalement sur/complexe absorbant que l'on peut représenter, de manière très hypothétique, par les équations d'équilibre suivantes :



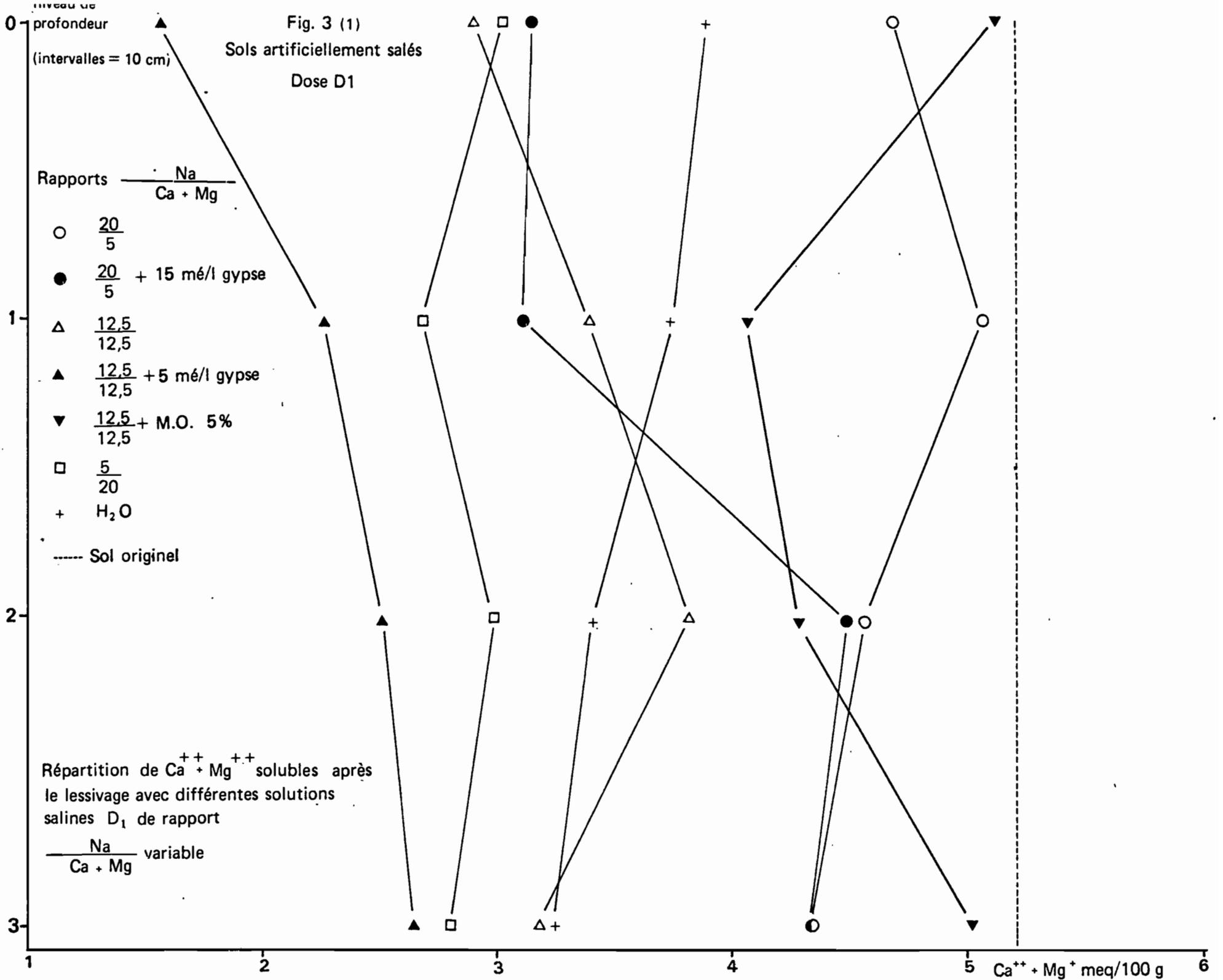
Au cours du passage d'un excès de NaCl dans le sol, il y a vraisemblablement dissolution de calcaire cristallisé avec formation de carbonates et chlorures solubles, on observe en particulier un fort accroissement des carbonates dans le lessivat.

Le chlorure de calcium formé peut par ailleurs resaturer l'argile sodique en Ca^{++} échangeable. On pourrait comprendre ainsi l'accroissement observé de Ca^{++} sous forme échangeable et sous forme facilement extractibles. Sous l'influence de cette resaturation une part des carbonates dessous peut demeurer dans le sol sous forme peu soluble à l'eau.

- Lors de l'extraction par $\text{NO}_3 \text{NH}_4$, au moment de l'analyse, le calcium fin fraîchement précipité est dissout plus facilement que le calcaire d'origine partiellement soluble mais dont le taux de solubilité varie en fonction des traitements.

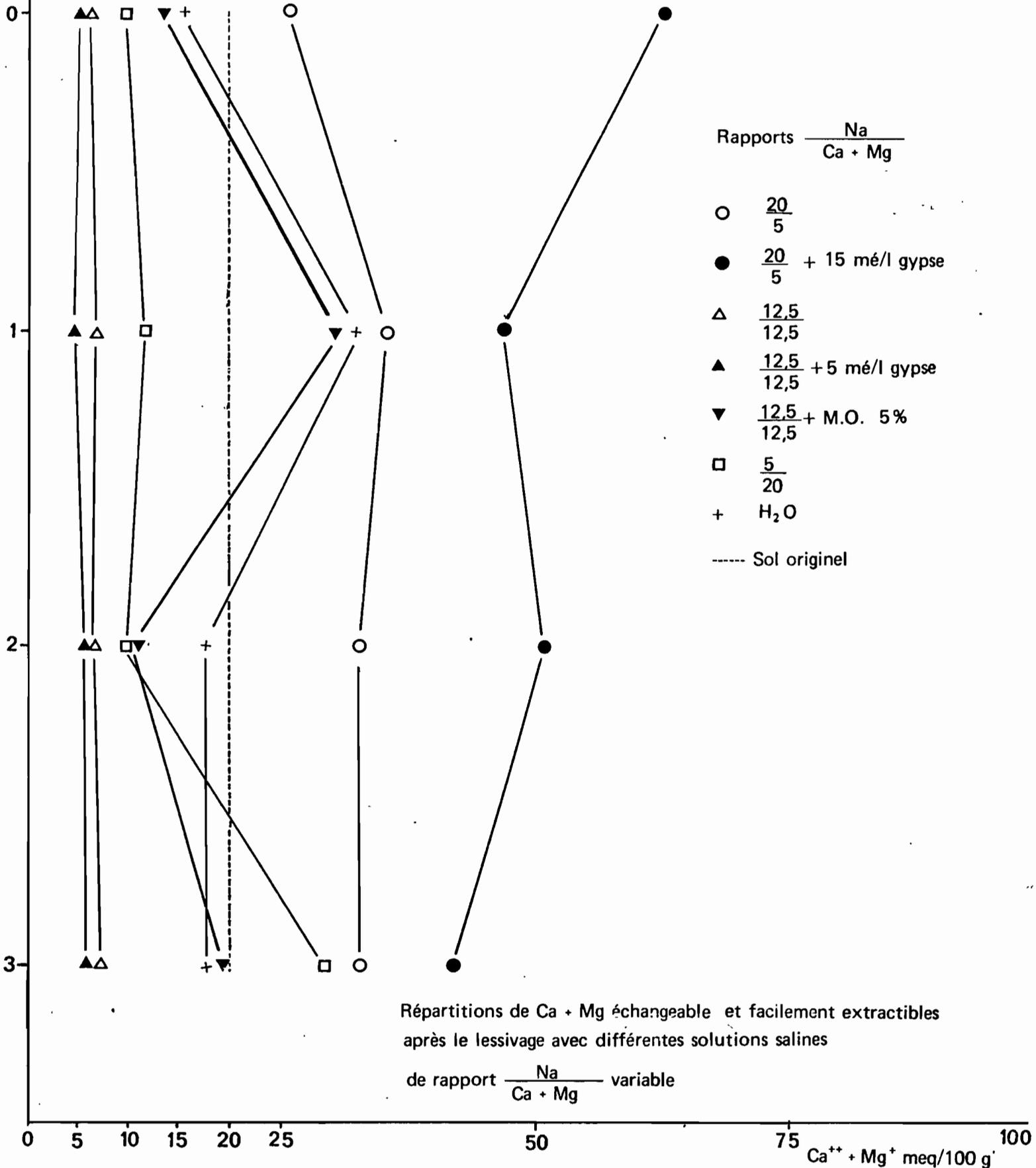
Avec les doses D2 et D3 l'apport continu de NaCl tend à dissoudre ce calcaire facilement extractible surtout en profondeur et diminue également le $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables. Il est intéressant de noter la progression de ce phénomène d'abord aux niveaux 1,2 et 3 avec la dose D3. Néanmoins au niveau zéro (surface) il y a toujours une légère dissolution du calcaire par NaCl qui accroît le Ca^{++} échangeable et facilement extractible.

Fig. 3 (1)
Sols artificiellement salés
Dose D1



niveau de
profondeur (intervalles = 10 cm)

Fig. 4 (1)
Sols artificiellement salés
Dose D1



Après percolation avec la dose D2 il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2; c'est à la surface que la diminution est la plus forte. Les teneurs sont 3,98 me, 4,58me, 4,11 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2.

Il y a aussi un net entraînement du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles vers la profondeur (niveaux 2,3), où Na^+ échangeable est au contraire un peu plus faible qu'en surface).

L'analyse du lessivat montre deux fois plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol par rapport à ce que l'on retrouve dans le lessivat du traitement à l'eau distillée.

Après percolation avec D3 la teneur en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles au niveau zéro, n'est pratiquement que très peu modifiée mais aux niveaux 1,2,3 on observe un très net lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles. Les teneurs sont 4,16 3,23 3,12 et 3,32 me/100 gr aux niveaux 0,1,2,3 respectivement.

La valeur de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles reste la même au niveau zéro; au niveau 1 se produit un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables avec léger dépôt vers la profondeur (niveaux 2 et 3) indiqué par la faible augmentation. Par rapport aux valeurs obtenues après la deuxième dose D2. $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles demeurent néanmoins en profondeur, légèrement inférieurs à la quantité qui en existe originellement dans le sol.

L'analyse du lessivat montre une légère augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ provenant du sol par rapport au résultat obtenu avec l'eau distillée.

Lorsque, à la solution précédente, de rapport $\text{Na}/\text{Ca}+\text{Mg} = 20/5$ on ajoute ¹⁵me/l du gypse (SAR définitif = 6,3) dès la dose D1 on observe une diminution du taux de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0 et 1, mais pas de modification aux niveaux 2 et 3 par rapport aux effets de la solution précédente. L'analyse du lessivat montre une augmentation de la quantité de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ entraînés mais inférieure aux 7,5 me Ca^{++} rajoutés sous forme de gypse dans les 500 ^{CC} de solution ajoutée.

La quantité de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ que l'on y trouve provenant du sol est donc moindre. Elle l'est aussi par rapport à ce que l'on obtient dans le lessivat après percolation à l'eau distillée.

Cette diminution des teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles correspond par contre à une forte augmentation au niveau 0 de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles, et moins forte dans le reste de la colonne, même au niveau 1, en même temps que, comme nous l'avons vu précédemment à une très nette diminution de Na^+ échangeables aux deux niveaux 0 et 1.

Rappelons d'ailleurs que les variations de Na^+ échangeable portent sur des dixièmes de me/100 gr. de sol; celles de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aussi sur des dixièmes ou 1 ou 2 unités de me; celles de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles sur des milliéquivalents et parfois - comme dans ce cas - sur des dizaines de m.e./100 gr. Enfin dans les lessivats, les différences observés correspondent à plusieurs milliéquivalents, parfois à plus de 10.

Après percolation avec la deuxième dose de lessivage (D2) se produit une forte augmentation par rapport aux teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles ^{précédentes} / assez forte aux niveaux 0 et 1, plus faible en profondeur (niveaux 2 et 3). Les diminutions obtenues, par rapport aux teneurs initiales, respectivement 0,5; 0,9; 0,25 et 0,65 me/100 gr paraissent irrégulières; elles le sont aussi par rapport aux effets de la même dose avec la première solution non enrichi en gypse.

L'analyse du lessivat montre moins de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol par rapport au lessivat de la solution simple 20/5 et aussi au lessivat de l'eau distillée.

Il y a diminution de 13,8 me et 9,6 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable et facilement extractibles aux niveaux 0 et 2 par rapport à la première dose. Au niveau 1 les teneurs sont les mêmes, mais en profondeur (niveau 3) il y a une augmentation de 18,3 me/100 g. Nous notons en outre qu'il est difficile de faire correspondre de telles variations à celles beaucoup plus faibles, sinon plus régulières du sodium échangeable après la même dose de la même solution.

Fig. 3 (2)

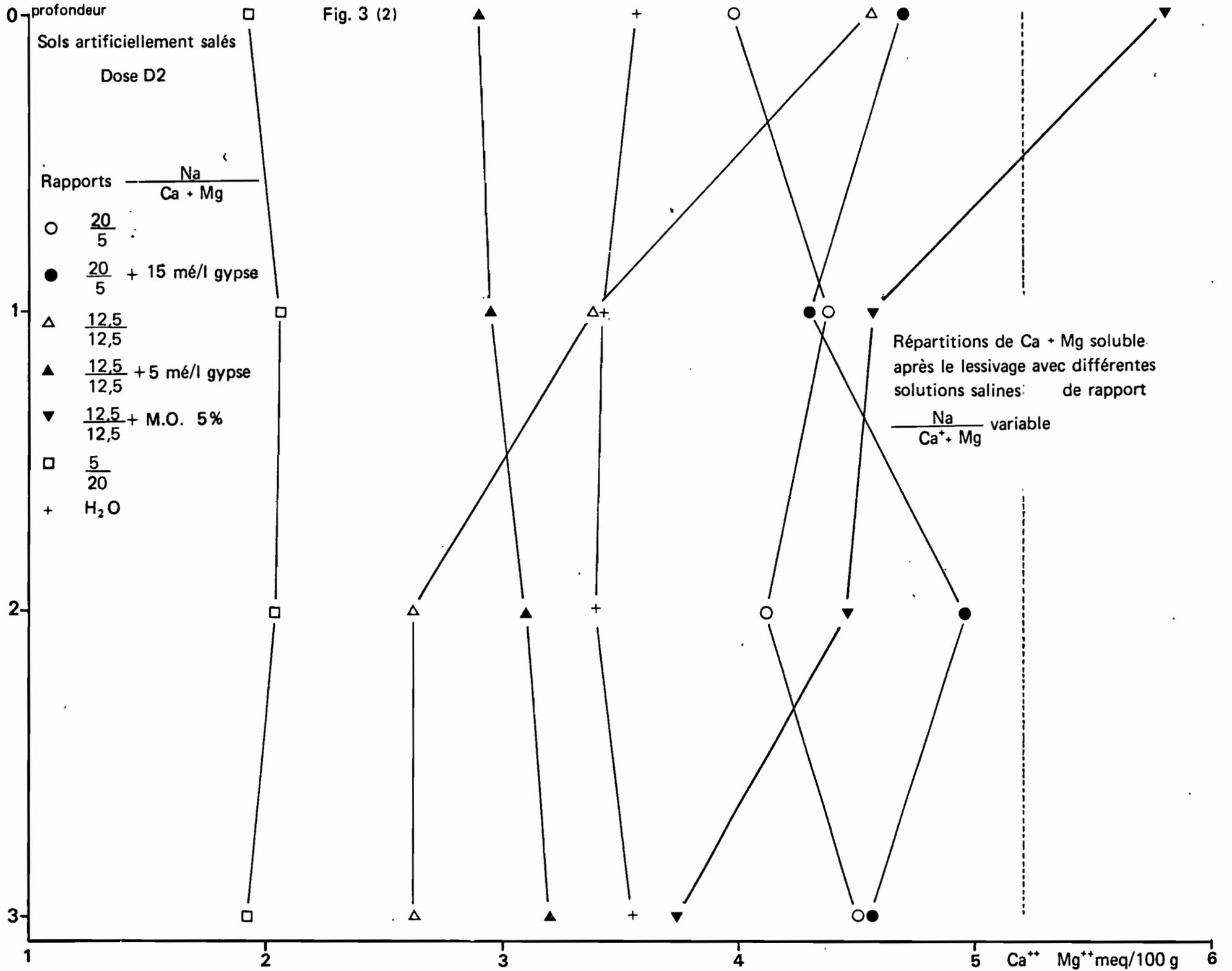
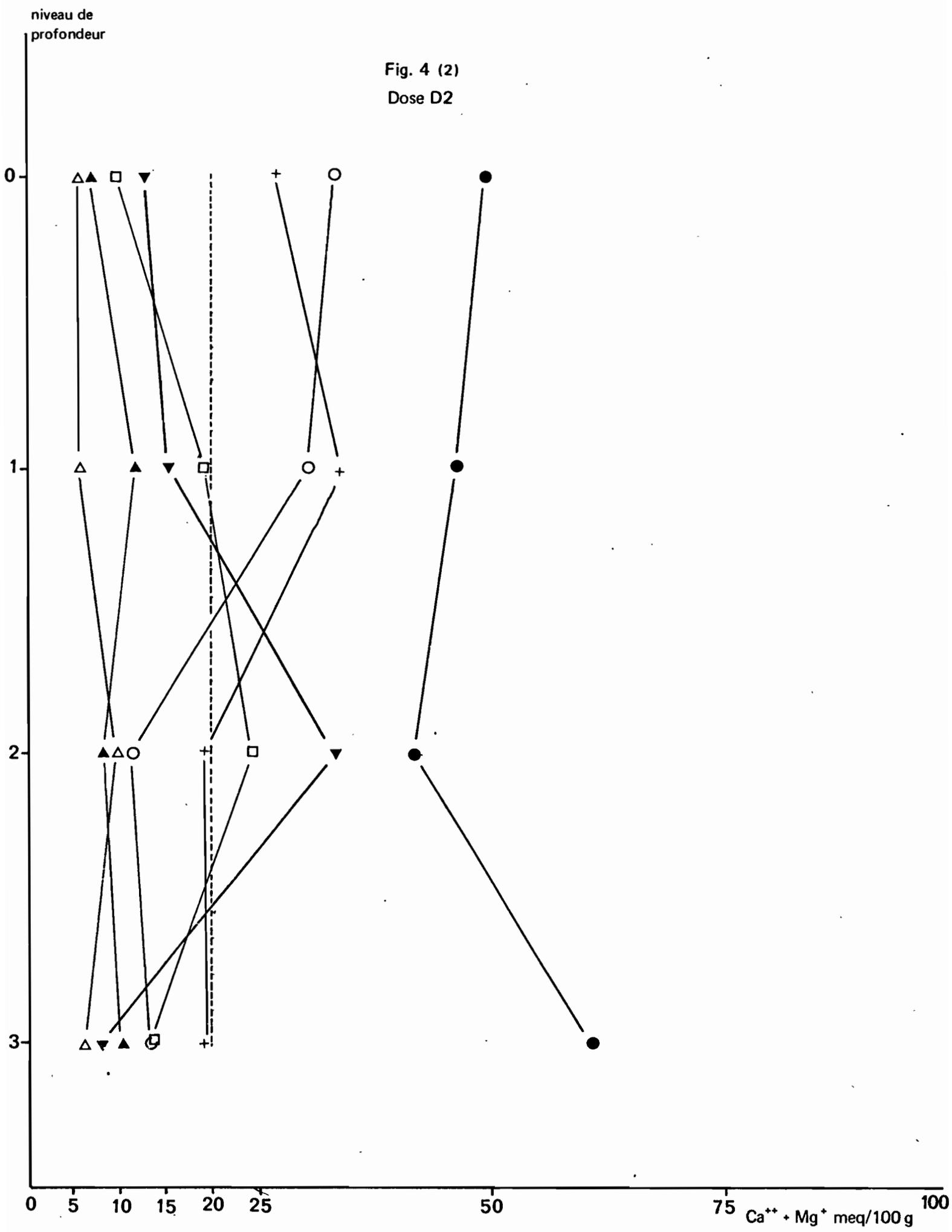


Fig. 4 (2)
Dose D2



Après percolation avec la 3^{ème} dose on obtient un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles accumulés par D2. Il y a 2,49 me 2,22 1,44 et 1,56 me/100 g de plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ aux niveaux 0,1,2,3 par rapport aux teneurs mesurées après la 2^{ème} dose. Tandis que par rapport au sol original il y a 2,99 3,12 et 2,21 me/100 g de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2,3. Le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles est plus important aux niveaux supérieurs (0 et 1). L'effet de la dose D3 est de même type que celui de D1.

L'analyse du lessivat montre 1,79 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol par rapport à la percolation de la dose D3 de la solution précédente ($\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = 20$) non enrichie en gypse. On obtient également 2,55 me de plus $\frac{\text{Ca}+\text{Mg}}{5}$ de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ que dans le lessivat de la dose D3 avec l'eau distillée.

Les valeurs de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles sont un peu constantes tout au long du profil et nettement supérieures à celles dues à la percolation de la même dose de la solution simple présentant un rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ de 20. Elles constituent le maximum d'accumulation par rapport aux valeurs d'origine.

Quand on percole le sol avec la solution dont le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ est égal à $\frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5) il y a un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles assez important tout le long du profil par rapport au sol original. Après percolation avec la 1^{ère} dose cet entraînement est de moins en moins fort depuis la surface jusqu'au niveau 2 (teneur allant de 2,9 me/100 gr à 3,82 me/100 gr) et au niveau 3 on retrouve une valeur plus faible : 3,18.

L'analyse du lessivat montre 9,45 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol. Ce qui nous montre que la diminution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ diminue aussi l'entraînement dans le lessivat de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ du sol.

En même temps se produit un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables assez important tout le long du profil par rapport aux teneurs initiales. Les valeurs varient entre 6,2 et 7,1 me/100 g. Comme nous le verrons plus loin, il y a en moyenne très peu de dissolution du calcaire (cf évolution des carbonates et bicarbonates).

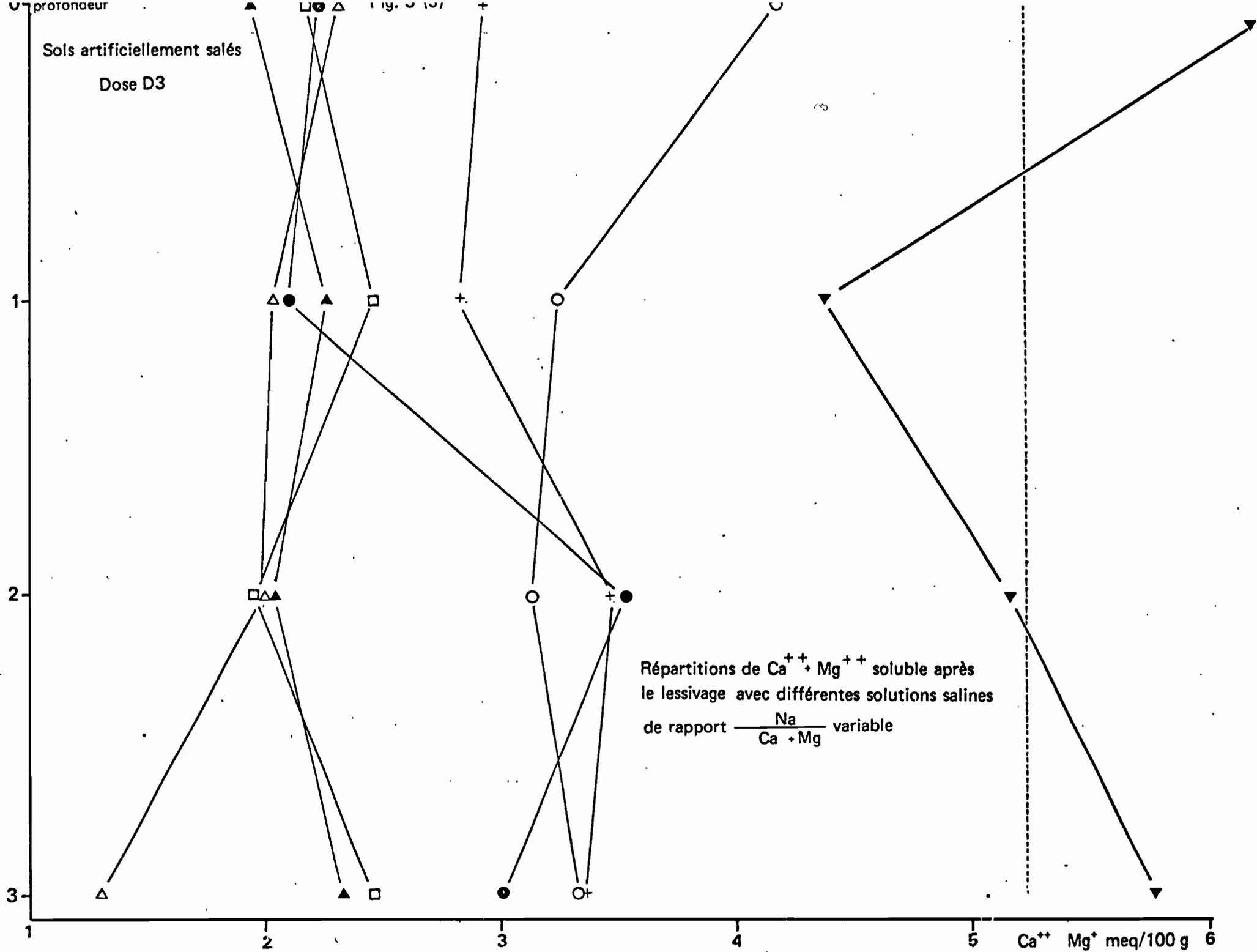
Après percolation avec la 2^{ème} dose de lessivage il y a brusque augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles au niveau 0 (4,57 me/100 g), maintien de la teneur au niveau 1 (3,4 me) et diminution plus en profondeur (niveaux 2 et 3). L'analyse du lessivat montre 2,12 me de moins d'entraînement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport au lessivat de solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$. En même temps les teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles varient peu. On observe une légère diminution en surface et une augmentation inverse au niveau 2.

Après percolation avec la 3^{ème} dose de lessivage il y a un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles très net à tous les niveaux par rapport aux deux premières doses. Au niveau 3 il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles par rapport à tous les autres traitements. Il y a respectivement 2,91 3,18 3,23 et 3,91 me/100 de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre moins d'entraînements de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol par rapport aux lessivats des traitements 20/5 + 15 me/l gypse et $\frac{12,5}{12,5} + 5$ me/l gypse mais il y a légèrement plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport au lessivat obtenu par percolations de l'eau distillée.

En même temps il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables assez net par rapport à D2. Il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables par rapport à tous les autres traitements. Il y a respectivement 17,7 17,3 11,9 et 16,9 me/100 de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable aux niveaux 0,1,2,3 respectivement. Il y a moins d'éléments dans les lessivats car il n'y a pas dissolution du calcaire mais il y a un maximum d'entraînement des éléments échangeables.

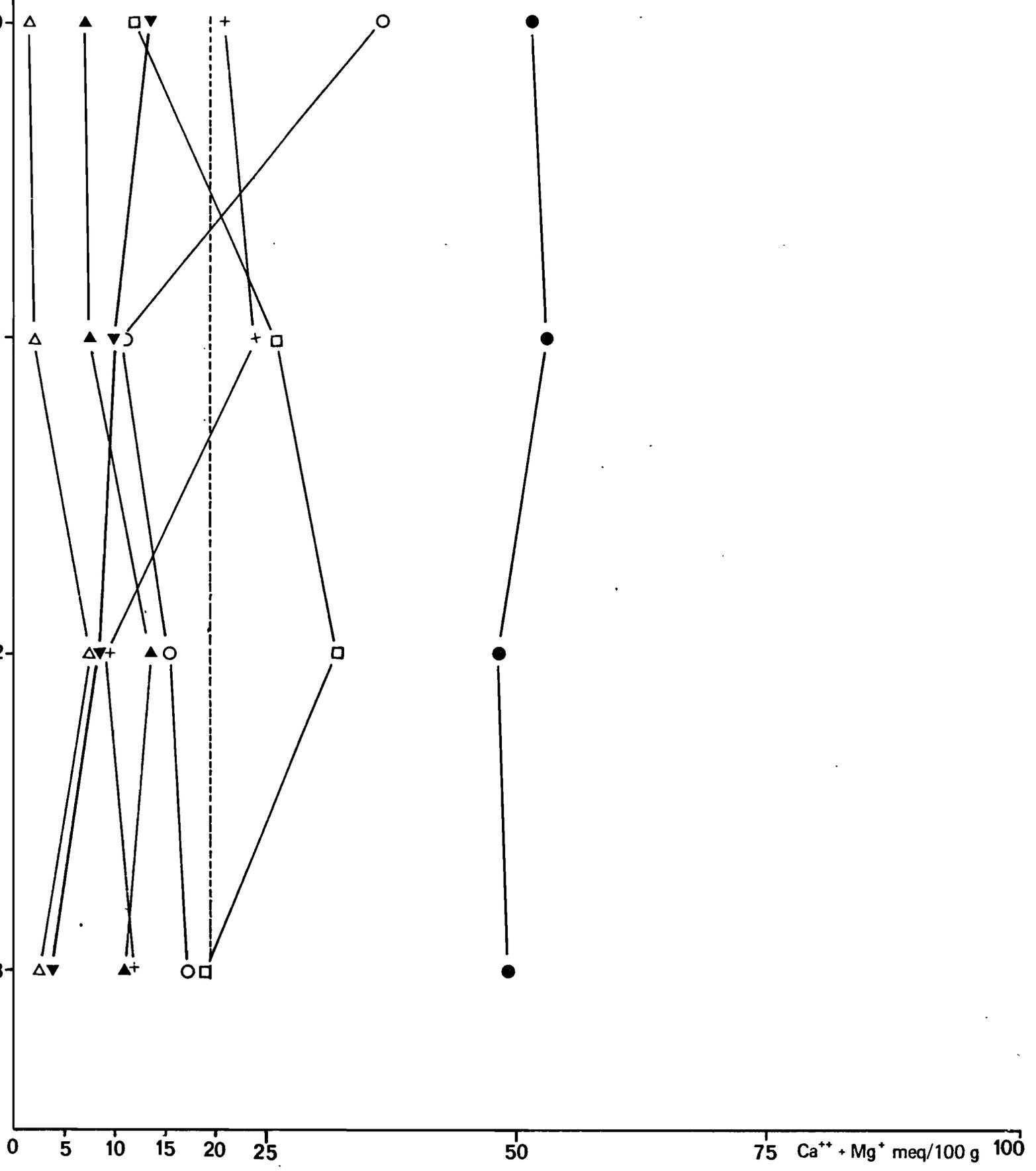
Les diminutions de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables que nous notions lors de l'utilisation de cette solution surtout avec la dose D3 comme nous l'avons vu précédemment commence aussi par baisser pour revenir à la valeur initiale 0,75 me/100 gr ou à peine au dessus (0,8 me au niveau 1) qu'à la dose D3.

Dans le cas de la solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ l'addition de 5 me/l de gypse diminue le taux de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dans le profil. Après percolation avec la première dose on observe davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles par rapport à tous les autres traitements. La



niveau de
profondeur

Fig. 4 (3)
Dose D3



diminution de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles est très nette à tous les niveaux par rapport à la solution simple $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$. Il y a 3,65 2,95 2,70 et 2,57 me/100 g de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol originel, et 1,34. 1,13, 1,31 0,54 me/100g de plus par rapport aux résultats obtenus avec la solution précédente cet accroissement de l'entraînement pourrait être dû à une amélioration de la perméabilité du sol grâce à l'apport de gypse; cependant la teneur en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables reste faible.

L'analyse du lessivat montre 1,02 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ de moins par rapport au lessivat de la solution précédente ce qui nous montre que l'apport de gypse diminue le $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dans le profil mais n'augmente pas le lessivage global en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le lessivat. Il y aurait très peu de mise en solution de calcaire facilement extractible provenant du sol mais il y a un maximum d'entraînement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles et échangeables.

Après percolation avec la 2ème dose le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles est régulier tout au long du profil. Il y a 2,3 2,26 2,11 et 2,02 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles lessivés par rapport au sol originel aux niveaux 0,1,2,3. Les teneurs augmentent par rapport à la première dose.

L'analyse du lessivat montre 2 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol par rapport au lessivat de la solution précédente de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$

Comme précédemment la diminution de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles est très forte par rapport au sol original mais moins cependant qu'avec la solution précédente; la cause de cette dernière modification peut être due à une fixation de Ca du gypse sur l'argile.

Après percolation avec la 3ème dose Il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles accumulés par la 2ème dose, l'analyse du lessivat montre un peu plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ provenant du sol par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$

Quand aux $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables, ils présentent une augmentation très nette aux niveaux 2 et 3 par rapport aux 1ère et 2ème doses. Les valeurs de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables sont supérieures à celles obtenues avec la solution précédente; Néanmoins elles restent très inférieures aux teneurs du sol originel et donc à la capacité d'échange du sol.

Quand on fait percoler la solution précédente non enrichie de gypse ($\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$) dans le sol après addition à celui-ci de 5% de matière organique. On obtient, dès le passage de la première dose des résultats très différents de ceux précédemment indiqués pour la percolation avec la même solution, sans addition de matière organique au sol : aux niveaux 0 et 3 les teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles restent très proches des teneurs initiales, soit un peu supérieures à 5 me/100 gr; aux niveaux 1 et 2, elles descendent respectivement à 4,06 et 4,28 me. Dans le cas de cette solution utilisée sur un sol non enrichi en matière organique rapidement fermentescibles les valeurs obtenues étaient beaucoup plus basses : respectivement 2,90-3,4-3,82-3,2 me/100 gr.

Par ailleurs la teneur en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ du lessivat atteint 60 me, dont près de 54 provenant du sol, alors que précédemment cette solution, en dose D1, n'avait entraîné du sol que 9,45 me.

L'accroissement considérable de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble est du à la dissolution de Ca^{++} à partir du calcaire du sol, par l'acide bicarbonique formé en quantité très notable, comme nous le verrons ultérieurement, par décomposition de la matière organique ajoutée au sol.

Après l'apport de la deuxième dose, il y a une accumulation et augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2 et lessivage au niveau 3 (1,29 me/100 g) il ya 0,7 0,51 et 0,18 me/100 g de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2 par rapport à la première dose. En surface le taux obtenu est supérieur à celui du sol initial- en outre $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ du lessivat restent assez élevés.

Après percolation avec la troisième dose il y a forte accumulation et augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,2,3 et léger lessivage au niveau 1 par rapport à la 2ème dose. Il y a 0,76 0,69 et 2,03 me/100 g de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ aux niveaux 0,2,3 dont les teneurs sont égales au niveau 2 ou nettement supérieures aux niveaux 0 et 3 à

celles du sol Initial. Il y a une forte augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles par rapport à la solution simple de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ et à toutes les autres solutions.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a augmentation ou accumulation du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles.

Quand on observe les répartitions de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable et facilement extractibles au cours de ce traitement on observe d'abord un lessivage en surface et une accumulation de ces cations au niveau 1 (dose D1) puis leur progression jusqu'au niveau 2 (Dose D2) et enfin leur entraînement au delà de la colonne. Cet effet remarquable est certainement dû à l'action des composés organiques, formés dans l'évolution des résidus végétaux ajoutés au sol.

Pour la troisième dose, on retrouve des valeurs nettement supérieures comme taux de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables aux niveaux 0 et 1 à ce qui avait été obtenu par percolation de la même solution à travers le sol original, mais bien inférieures encore aux valeurs initiales.

La matière organique augmente 4 fois la quantité de calcium plus magnésium entraîné dans le lessivat par la première dose, par rapport à la même solution sans addition de matière organique; celle-ci facilite le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ grâce à la formation de bicarbonates très solubles.

Après percolation avec la 2ème dose, l'analyse du lessivat montre 2,7 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ et après l'apport de la troisième dose 2,14 me de moins de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient de sol par rapport au lessivat de solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Au total la quantité de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ reçus dans les trois lessivats, et provenant du sol, est de 62,5 me contre 17,7 pour la même solution sans enrichissement du sol en matière organique.

Lorsque la solution de lessivage est riche en alcalino-terreux ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 = 20 \text{ me/l}$, $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{5}{20}$, SAR = 1,6) dès l'application de la première dose, il y a maximum de diminution de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles du sol par rapport à tous les traitements sauf $\frac{12,5}{12,5} + 5 \text{ me/l}$ gypse.

L'analyse du lessivat montre 6,5 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol.

En même temps $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables diminuent fortement aux niveaux 0,1,2 par rapport au sol original. En profondeur (niveau 3) il se produit une certaine augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ peut-être due à une moindre diminution de Na^+ soluble à ce niveau, ce qui pourrait favoriser la mobilisation de CO_3Ca du sol vers une forme plus facilement extractible.

Après l'apport de la deuxième dose on observe un maximum de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles par rapport à tous les autres traitements. Les valeurs sont pratiquement constantes (1,9 à 2,05 me/100 gr) aux différents niveaux.

L'analyse du lessivat montre 4,18 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol.

Quant aux $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables, ils subissent une augmentation de fixation sur l'argile par rapport à la 1ère dose. Les valeurs sont 9,6 me 19,2 me 24,0 me et 13,2 me /100 gr aux niveaux 0,1,2,3. Ils atteignent la valeur initiale au niveau 1 et la dépassent légèrement au niveau 2.

Après l'apport de la 3ème dose il se produit une certaine augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,3, où les valeurs obtenues sont supérieures à celles notées après la percolation de la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre 6,5 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol.

Quant aux $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables ou facilement extractibles ils montrent une augmentation par rapport aux 1ères et 2èmes doses de lessivage; en surface seulement leur valeur est inférieure à celle du sol d'expérience. Les doses successives accroissent $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables ou facilement extractibles.

Dans le cas de percolation du sol par l'eau distillée après le passage de la dose D1 on observe un lessivage important du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles. Il y a 1,32 1,46 1,8 et 1,97 me/100 g de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0,1,2,3. Les valeurs sont intermédiaires par rapport à celles obtenues avec les diverses solutions expérimentées.

Il y a diminution régulière de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble vers la profondeur. L'analyse du lessivat montre 10,2 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol. Il y a 3,67 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport au lessivat de traitement 5/20 ce qui montre que l'apport de gypse diminue l'entraînement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$.

Il y a diminution des $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables de surface (niveau 0) et accumulation au niveau 1, sous une forme facilement extractible (précipité de néoformation) et léger lessivage du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable en profondeur (à peu près 2me/100 g) par rapport au sol originel. Ce type de répartition ne paraît pas pouvoir être mis en relation avec celle de Na soluble; Il est par contre assez analogue, à celui de Na^+ échangeable.

Après percolation avec la 2ème dose il y a lessivage au niveau 0 et 1 (0,31 me/100 gr de plus) et faible augmentation au niveau 3 (0,32 me/100 gr de plus); au niveau 2 les valeurs de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles sont les mêmes qu'après la 1ère dose.

L'analyse du lessivat montre 2,8 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du lessivage du sol. Il y a minimum de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport à tous les autres lessivats.

Quant aux $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable ils augmentent légèrement tout au long du profil mais surtout en surface par rapport à la première dose. La cause en est probablement due à la diminution de sodium échangeable précédemment observée avec cette solution. Au niveau 0 il y a 11,3 me/100 gr de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables ou facilement extractibles, mais dans le reste du profil seulement entre 1,1 et 1,5 me/100 g.

La percolation de la 3ème dose provoque un lessivage assez important de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 0 et 1 par rapport à la 2ème dose. Il y a finalement 2,29 2,40 1,73 et 1,88 me/100 g de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble aux niveaux 0,1,2,3 par rapport aux teneurs initiales. L'analyse du lessivat montre 3,44 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui proviennent du sol.

Il y a 0,6 me 11,5 et 7,8 me/100 g de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles aux niveaux 1,2,3 par rapport au sol original. Le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles est important comparativement aux 1ères et 2èmes doses.

Conclusions.

A) Evolutions de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles (sol brun calcaire de Feucherolles enrichi en sels).

1- Les solutions riches en sodium et pauvres en gypse (SAR=12,6) provoquent un lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles. Ce lessivage assez faible au départ augmente avec les doses successives.

2- Les solutions riches en sodium et gypse (SAR = 6,3) provoquent un entraînement de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles beaucoup plus fort en surface qu'en profondeur (première et troisième doses), c'est du, pensons nous, à l'augmentation de perméabilité du sol en surface par l'apport de calcium supplémentaire. Le lessivage est ainsi accru en surface mais beaucoup moins en profondeur.

3- Les solutions également riches en NaCl et en sulfates alcalino-terreux de SAR=5 provoquent un fort lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles tout au long du profil, supérieur, à celui dû aux traitements précédents et qui augmente avec la dose.

4- L'addition de faible quantité de gypse dans les solutions de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} \frac{12,5}{12,5}$, SAR définitif = 4,3 provoque un maximum de lessivage de

$Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles dans le sol en améliorant la perméabilité.

5- L'apport de matière organique provoque d'abord un léger lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles mais avec les doses successives tend à maintenir ou même à accroître les teneurs du sol en $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles, une quantité souvent importante de ces éléments ayant été dissoutes sous l'influence de l'acide bicarbonique formé.

6- Les solutions riches en gypse et pauvres en sodium de SAR = 1,6 provoquent un lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles très important, maximum de tous les traitements avec la 2ème dose et qui reste proche de ces valeurs lors de la percolation de la 3ème dose.

7- L'eau distillée entraîne des quantités moyennes de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles. Avec les doses successives il y a augmentation de lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles à la surface et légère augmentation en profondeur. L'eau distillée entraîne moins de $Ca^{++} + Mg^{++}$ solubles dans le sol par rapport aux solutions $\frac{12,5}{12,5}$ et $\frac{12,5}{12,5} + me/l$ gypse.

B) Evolutions de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables et facilement extractibles.

Après l'extrait à l'eau 1/10, le résidu de sol est lessivé par le nitrate d'ammonium normal. Cette solution extrait les sels solubles restant, plus les cations échangeables déplacés par l'ion NH_4^+ .

Dans cette solution d'extraction on dose l'ion SO_4^{--} , l'ion Cl^- et l'ion CO_3^{--} , ce qui permet par différence entre cations et anions dosés d'obtenir, les cations échangeables. Or la somme $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui n'est pas liée aux anions Cl^- , SO_4^{--} ou CO_3^{--} dépasse souvent la capacité d'échange du sol, dans un certain nombre de traitements, en particulier pour les sols traités par la dose D1 de la solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ et surtout de la même solution enrichi de 15 me/l gypse. Il est montré par ailleurs que de telles solutions paraissent augmenter la solubilité du carbonate de calcium du sol, celui-ci facilement dissout, et resté assez longtemps en contact avec le nitrate d'ammonium a peut-être été décomposé sous forme de nitrate de calcium, et apparaît ainsi finalement dans la solution, au moment des dosages, comme du Ca^{++} non-lié aux anions dosés, donc du calcium en excès "facilement extractibles".

Après les divers traitements, il demeure ainsi dans le sol une forme de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, difficilement soluble dans l'eau, mais très soluble dans le nitrate d'ammonium.

Le calcaire du sol non modifié par les traitements est également solubilisé partiellement dans le nitrate d'ammonium mais dans ce cas on a pu le déterminer par le dosage des carbonates en solution; les résultats ainsi obtenus ne montrent que des variations faibles, de ce calcaire solubilisé, entre les différents traitements. Les solutions n'ayant pas donné lieu à des entraînements importants dans les lessivats, ne montrent pas de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ facilement extractibles; par contre les solutions de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$, montrent une certaine quantité de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ facilement extractibles en plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables; quant à la solution $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ enrichie en gypse elle montre un maximum de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ facilement extractibles, ce qui explique une certaine rétention de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le sol, par rapport à la solution précédente, provoquant une diminution de Ca^{++} dans le lessivat, malgré l'apport supplémentaire de calcium grâce au gypse ajouté.

Les solutions également riches en NaCl et sulfates alcalino terreux SAR = 5 provoquent un appauvrissement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables.

L'apport de 5 me/l de gypse, dans le cas de la solution précédente provoquent un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables puis, avec les doses successives, une légère augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables, mais les valeurs restent inférieures à celle du sol originel; les augmentations possibles de Na^+ échangeable sont très insuffisantes pour combler ce déficit. Un processus de désaturation du complexe absorbant joue donc dans ces cas. Cette désaturation correspond à une diminution des sels solubles (en particulier de Ca+Mg) en équilibre avec les cations échangeables. La matière organique provoque un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable surtout en surface avec les premières doses mais il y a tendance à la refixation à des profondeurs croissantes avec les doses successives, puis il y a un lessivage sur tout le profil avec la plus forte dose.

Les solutions riches en gypse et pauvres en sodium provoquent d'abord un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables puis avec les doses successives, il se produit une refixation (sauf en surface) du calcium de la solution ajoutée, dès le niveau 1 mais surtout au niveau 2.

L'eau distillée provoque un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables en profondeur alors que les valeurs obtenues aux niveaux 1 et 2 dépassent les valeurs initiales et la capacité d'échange (doses 2 et 3).

C) Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ dans les lessivats.

1- Les solutions riches en sodium et pauvres en gypse SAR = 12,6 provoquent un maximum d'entraînement de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ du sol dans le lessivat par rapport aux autres traitements mis à part celui comportant l'apport de matière organique.

Comme par ailleurs, la diminution dans le sol de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ solubles, n'est pas la plus élevée, loin de là, de tous les traitements nous sommes amenés à rechercher dans le sol une autre source de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ facilement solubilisable; c'est probablement le calcaire et le carbonate de magnésium très fin, qui s'y trouvent et qui sont d'ailleurs l'origine du calcaire et du carbonate de magnésium actifs. Ces carbonates de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ très fins et particulièrement actifs et mobilisables peuvent être accrus à la suite de diverses réactions développées dans le sol sous l'effet des solutions riches en sels de sodium qui le traversent.

2- L'apport de 15 me/l de gypse à la solution précédente de SAR = 12,6 (SAR définitif 6,3) diminue l'entraînement de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ provenant du sol dans le lessivat. Au total il y a 3 me de moins de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ du sol dans les lessivats par rapport aux lessivats de la solution $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$. Or l'entraînement de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ solubles total est plus fort. L'entraînement de calcaire solubilisé à partir du calcaire fin du sol serait donc plus faible dans ce second cas.

3- Les solutions également riches en gypse et NaCl (SAR=5) entraînent plus de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ dans le lessivat à la suite de la première dose par rapport aux lessivats des solutions de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5} + 15$ me/l gypse et $\frac{12,5}{12,5} + 5$ me/l gypse. Puis c'est l'inverse avec les doses successives D2 et D3. Il y a effectivement davantage d'entraînement des Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ solubles du sol, mais sans doute très peu de dissolution provenant de son calcaire fin.

4- Au fur et à mesure qu'on diminue le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ de la solution, la solubilisation de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ qui proviennent du sol diminue. L'ordre de lessivage de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ du sol dans les lessivats est suivante.

$$\frac{20}{5} > \frac{20}{5} + 15 \text{ me/l gypse} > \frac{12,5}{12,5} > \frac{5}{20}$$

Cet ordre n'est pas très différent de celui des valeurs de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ solubles restant dans le sol, ce que nous ne pensons pouvoir expliquer, que par une dissolution du calcaire du sol.

TABEAU VIII - TENEUR EN Ca^{++} + Mg^{++} (me) SOLUTIONS D'UNE DES DEUX DIFFÉRENTS LESSIVATS

Solution de lessivage	D1		D2		D3	
	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol
NaCl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	14,07	11,57	8,43	5,93	6,70	4,2
NaCl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 15 me/l	18,19	8,19	14,58	4,58	15,99	5,99
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	15,70	9,45	10,39	4,14	10,33	4,08
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l	17,18	8,43	14,89	6,14	12,90	4,15
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5 %	59,96	53,71	13,12	6,87	8,19	1,94
NaCl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l MgSO ₄ 10 me/l	16,50	6,50	14,18	4,18	16,50	6,50
(Témoin) l'eau distillée	10,17	10,17	2,77	2,77	3,44	3,44

5- La matière organique entraîne un maximum de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans les lessivats (62,52 me), à peu près 3 fois plus que le traitement sodique de SAR = 12,6; or la diminution de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles dans le sol reste faible dans ce cas. L'apport de matière organique paraît donc accroître très nettement la dissolution du calcaire du sol.

6- Les solutions riches en gypse de rapport $\frac{5}{20}$ entraînent avec la première desc un minimum de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le lessivat ; il se produit seulement un entraînement de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles et aussi échangeables mais pas de dissolution du calcaire.

7- Les teneurs en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans les lessivats sont toujours supérieures avec les solutions salines qu'avec l'eau distillée.

TABIEAU VIII- REPARTITION DE Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ SOLUBLES APRES LE LEISSIVAGE

Sol brun calcaire artificiellement salé

Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ me/100 g

Dose de lessivage	Prof. en cm	Nacl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	Nacl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l +15me/l gypse	Nacl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	Nacl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + 5me/l gypse	Nacl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5 %	Nacl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l MgSO ₄ 10 me/l	L'eau distillée
500 ml	0-10	4,69	3,15	2,90	1,56	5,12	3,03	3,89
	10-20	5,06	3,11	3,39	2,26	4,06	2,68	3,75
	20-30	4,56	4,49	3,82	2,51	4,28	2,98	3,41
	30-40	4,33	4,35	3,18	2,64	5,02	2,80	3,24
1000 ml	0-10	3,98	4,71	4,57	2,91	5,82	1,93	3,58
	10-20	4,38	4,31	3,39	2,95	4,57	2,06	3,43
	20-30	4,11	4,96	2,62	3,10	4,46	2,04	3,40
	30-40	4,50	4,56	2,63	3,19	3,73	1,91	3,55
1500 ml	0-10	4,16	2,22	2,30	1,93	6,58	2,17	2,92
	10-20	3,23	2,09	2,03	2,25	4,36	2,15	2,81
	20-30	3,12	3,52	1,98	2,03	5,15	1,97	3,48
	30-40	3,32	3,00	1,30	2,32	5,77	2,45	3,33

TABLEAU n° ... REPARTITION DE Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ ECHANGIABLES APRES LE LESSIVAGE
(SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE)

Ca + Mg me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/1 MgSO ₄ 2,5me/1	NaCl 20me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/1 MgSO ₄ 2,5me/1 + 15me/1 gypse	NaCl 12,5me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/1 MgSO ₄ 6,25me/1	NaCl 12,5me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/1 MgSO ₄ 6,25me/1 + 5 me/1 gypse	NaCl 12,5me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/1 MgSO ₄ 6,25me/1 + 1.05 %	NaCl 5me/1 CaSO ₄ 2H ₂ O 10me/1 MgSO ₄ 10me/1	témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	26,00	62,8	6,2	5,2	12,9	9,5	15,20
	10-20	35,50	46,8	6,8	4,3	30,5	11,6	32,65
	20-30	32,48	51,1	6,7	5,4	9,8	9,4	17,3
	30-40	32,80	42,1	7,1	5,6	19,1	29,2	17,8
1000ml	0-10	32,90	49,0	5,4	6,5	12,5	9,6	26,5
	10-20	30,00	46,2	5,7	11,5	15,2	19,2	33,75
	20-30	11,00	41,5	9,5	7,8	32,9	24,0	19,1
	30-40	13,00	60,4	6,1	9,8	7,8	13,2	19,4
1500ml	0-10	27,18	51,4	1,7	7,0	13,5	12,2	21,0
	10-20	10,30	53,2	1,8	7,5	10,1	26,0	18,8
	20-30	15,58	48,1	7,5	13,6	7,8	32,2	7,9
	30-40	17,26	49,2	2,5	11,2	3,6	18,8	11,6

C. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFERENTES FORMES DU POTASSIUM DANS LE SOL.

Le sol contient 0,33 me/ 100 g de K^+ soluble et 0,20 me/100 g de Potassium échangeable, (soit 1% de la capacité d'échange) au début de l'expérience. K^+ soluble est un élément qui est très facilement lixivié.

Le K^+ échangeable est très minoritaire dans ce sol. Il n'y a pas eu d'effet significatif des solutions de lessivage sur K^+ échangeable dans notre expérience , sauf dans le cas où nous avons ajoutée 5% de matière organique dans le sol ; il s'agit là de potassium apporté par la matière organique. L'ion potassium est plus mobile essentiellement parce qu'il est libéré de la matière organique à l'état de sel , et non sous forme complexée (DUCHAUFOUR). Le lessivage du Potassium Intervient donc beaucoup plus rapidement que celui des cations alcalino-terreux.

- Il y a un lessivage de K^+ soluble, entraîné par toutes les solutions salines utilisées au cours de l'expérimentation mais l'eau distillée entraîne le maximum de K^+ du sol. Il y a 80% et 95% de lessivage de potassium avec la première dose (D 1) et la 3ème dose D3 respectivement.

- Dans le cas de la solution de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg} = \frac{20}{5}$ après percolation avec la première dose, il y a plus de lessivage de K^+ soluble de sol par rapport au traitement analogue mais où la solution est additionnée de 15 me/l de gypse.

Après l'addition de matière organique la quantité totale de potassium dans le sol devient 30 me/100 g (sous formes solubles et échangeable (formes minérales) ou sous forme organique .

- Dans le cas de solution de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ M.O 5% après percolation avec la première dose (D1), on note un certain appauvrissement du sol en potassium solubles beaucoup moins marqué en profondeur qu'en surface.

Les teneurs mesurées de K^+ soluble sont respectivement au niveau zéro : 0,43 me K^+ / 100 g, au niveau 1 0,84 me, au niveau 2 0,88 me et au niveau 3 1,04 me / 100 g. L'analyse du lessivat montre qu'on entraîne 8 fois plus de potassium avec la matière organique par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Dans ce traitement avec la M. O. les teneurs en K^+ échangeable sont presque doubles par rapport au K^+ soluble. Les teneurs de K^+ échangeable sont 1,0 me, 1,8, 1,8 et 2,0 me / 100 g aux niveaux 0, 1, 2, 3 respectivement.

Avec la 2ème dose de lessivage il y a un net entraînement de K^+ soluble à tous les niveaux par rapport aux teneurs obtenus après la première dose. Le lessivat de D 2 montre 4,5 fois plus de K^+ par rapport au lessivat obtenu après percolation de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. En même temps il y a entraînement de K^+ échangeable mais plus important aux niveaux 0 et 1.

Avec la 3ème dose de lessivage, l'entraînement du potassium soluble paraît jouer surtout aux niveaux 1 et 2, les teneurs aux niveaux zéro et 3 restant très proches des valeurs obtenues après la percolation de la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre 3,5 fois plus de lessivage de potassium que lors de l'utilisation de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$ sans rapport de matière organique supplémentaire.

Après la dose D 3, le potassium échangeable reste à la même valeur au niveau 0 qu'après percolation de la dose D 2 mais en profondeur on observe un entraînement de cet élément. Au niveau 1 la valeur est 0,8 me au lieu de 1 me et au niveau 2 la valeur est 1,2 me au lieu de 1,8 me de K^+ / 100 g dans D 2.

La comparaison entre les effets des doses D 1, D 2 et D 3 nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage de K^+ soluble et échangeable.

Après percolation avec la 3ème dose, l'entraînement de K^+ devient très lent à la surface de la colonne. D'après CHAMINADE (1955) la matière organique apportée au sol (fumiers, engrais verts)

Fig. 5 (1)

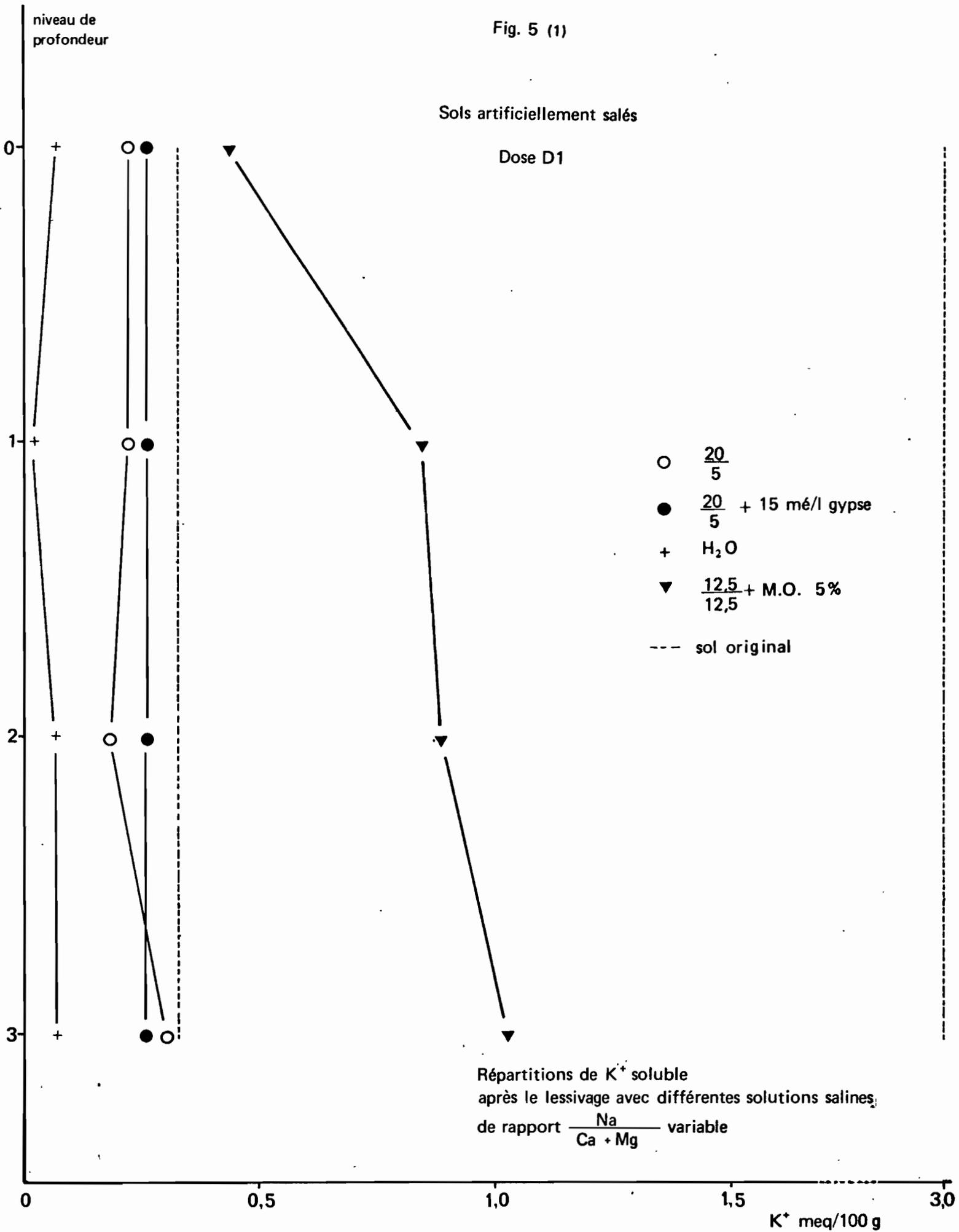


Fig. 5 (2)

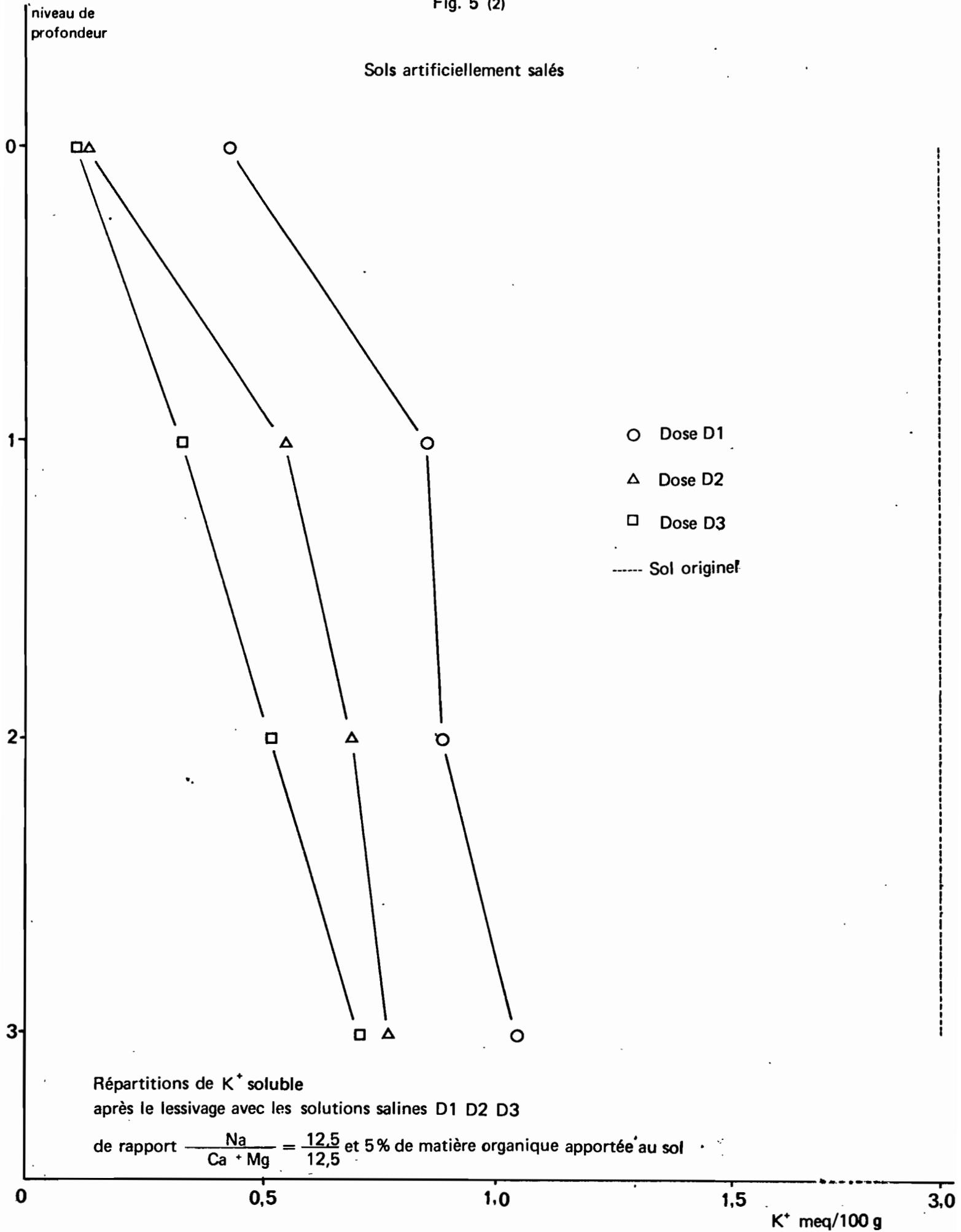
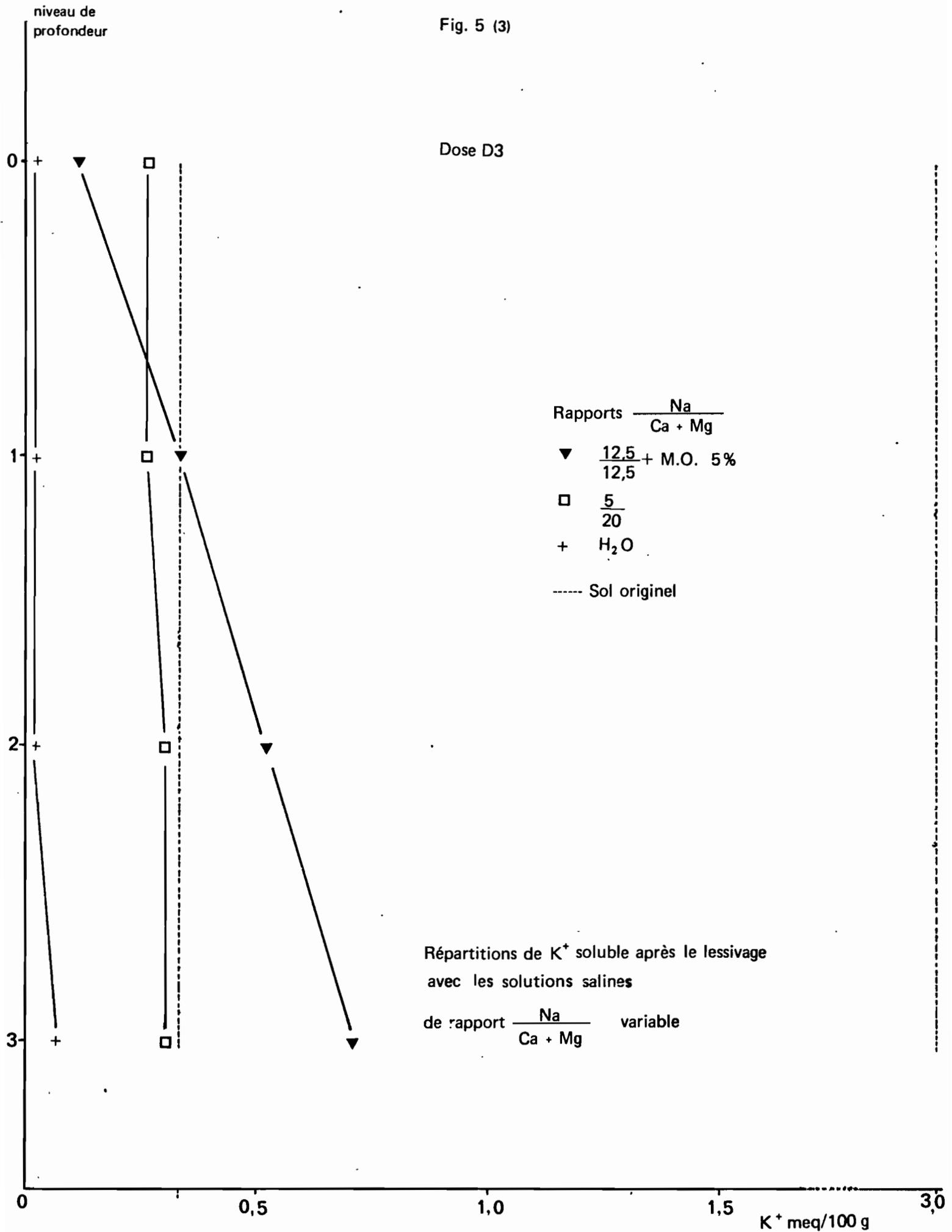


Fig. 5 (3)

Dose D3



renferme une certaine quantité de potassium (2,2% K^+ dans la luzerne dans notre expérience). Celui-ci est lié de façon peu énergique à la matière organique. Une fraction importante (de l'ordre des deux tiers) est directement soluble dans l'eau et mobilisée rapidement. Le reste (1/3 environ) est libéré (lessivé) à la suite de la minéralisation par voie microbienne de la matière organique.

D'après TYNER, ANDERSON, SWANBACK et STREET, MORRIS, le potassium présent chez les végétaux est, pour la majeure partie, sous des formes facilement solubles dans l'eau, on ne peut donc pas parler d'immobilisation du potassium sous forme de résidus organiques. Sans doute, la fraction des réserves potassiques directement soluble à l'eau s'élève-t-elle lorsque le sol est enrichi en matière organique; mais il est difficile de distinguer dans les sols le potassium soluble et le potassium échangeable.

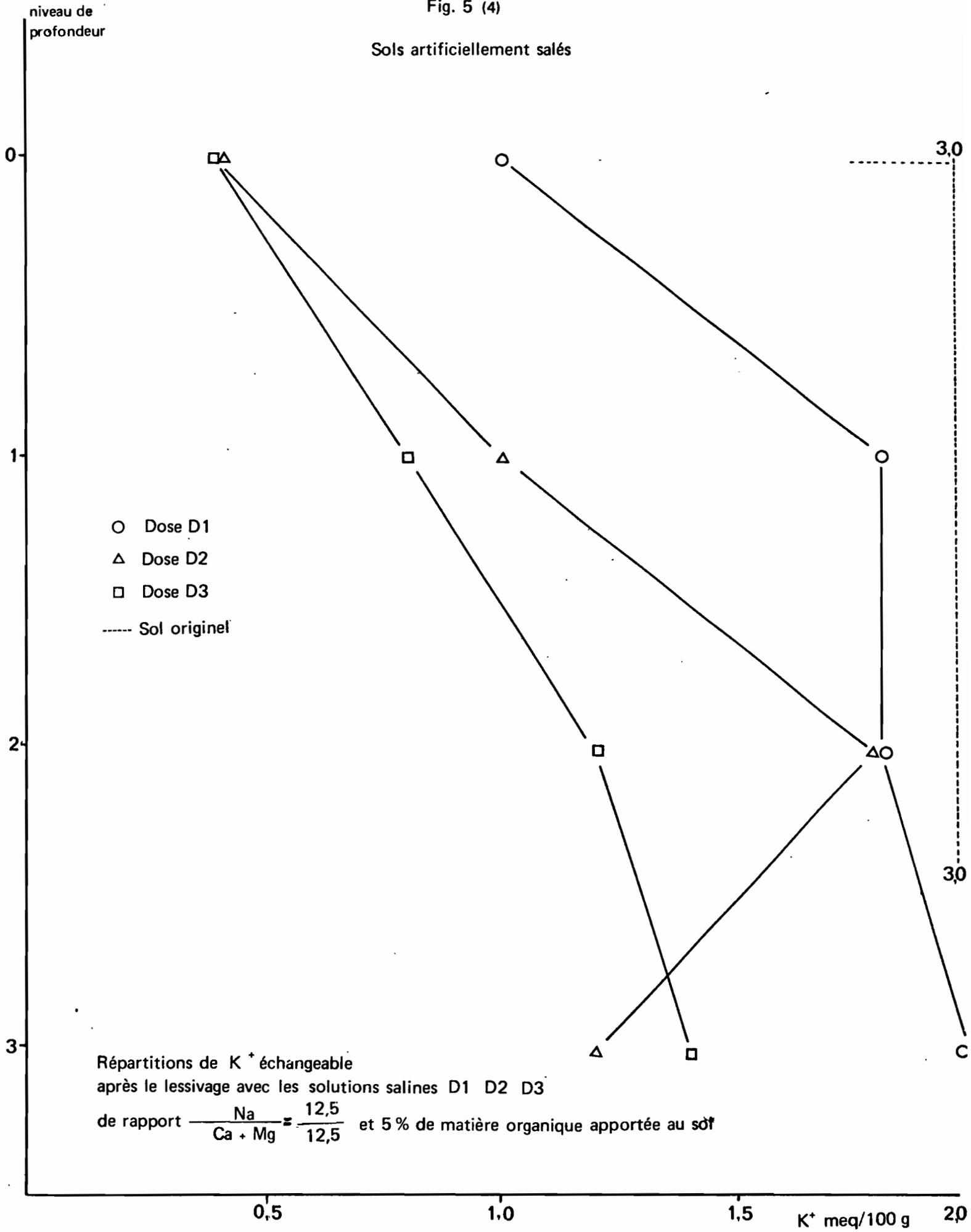
Tableau X - Répartitions de K^+ échangeable après le lessivage sol artificiellement salé.

Solution de traitement :	couche cm	D 1	D 2	D 3
Na Cl 12,5 me/l	0-10	0,20	0,20	0,20
Ca Sa 2 H 0,25me/1 2	10-20	0,20	0,20	0,20
Mg SO ₄ 6,25 me/l	20-30	0,20	0,20	0,20
+ gypse 5 me/l	30-40	0,20	0,20	0,20

Na Cl 12,5 me/l	0-10	1,00	0,40	0,40
Ca SO ₄ 2H 6,26me/ 2	10-20	1,80	1,00	0,80
Mg SO ₄ 6,25 me/l	20-30	1,80	1,80	1,20
+ M. O. 5%	30-40	2,00	1,20	1,40

Fig. 5 (4)

Sols artificiellement salés



Dans le cas de solution de rapport $\frac{12,5}{12,5} + 5$ me/l gypse
S A R = 4,2 après percolation avec la première dose, le gypse à
tendance à enlever K^+ soluble de la surface du profil et à l'accu-
muler vers la profondeur. L'analyse du lessivat D 1 montre plus de
 K^+ par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. On ob-
serve le même phénomène dans le cas de solution riche en alcalino-
terreux, (rapport $\frac{Na}{Ca + Mg} = \frac{5}{20}$) avec la première dose, mais la
quantité totale de K^+ enlevée dans les lessivats après la 3ième
dose reste à peu près la même.

La comparaison entre $\frac{12,5}{12,5} + M.O. 5\%$ et le traitement
 $\frac{5}{20}$ après l'apport de la 3ème dose nous montre que la matière
organique a plus de pouvoir lessivant pour K^+ soluble que le gypse
mais elle peut en accumuler temporairement dans le sol en particulier
en profondeur.

Conclusions :

- 1 - Une grande abondance des ions Ca^{++} en solution favorise un lessivage partiel de K^+ .
- 2 - La matière organique a le plus de pouvoir mobilisant de K^+ provoquant soit un lessivage soit une accumulation en profondeur.
- 3 - L'analyse du lessivat après traitement comportant l'apport de matière organique montre qu'une partie de K^+ contenue dans celle-ci est directement soluble dans des solutions salines.
- 4 - C'est l'eau distillée qui a le pouvoir lessivant le plus fort.

TABLEAU A1- REPARTITION DE K⁺ SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE (SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE)
K me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l+ CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5me/l + 15me/l gypse	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l + 5 me/l gypse	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25me/l+ MgSO ₄ 6,25me/l + N.05%	NaCl 5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 10me/l MgSO ₄ 10 me/l	H ₂ O témoin
500ml	0-10	0,22	0,26	0,22	0,22	0,43	0,22	0,07
	10-20	0,22	0,26	0,34	0,26	0,84	0,26	0,02
	20-30	0,18	0,26	0,29	0,26	0,88	0,26	0,07
	30-40	0,30	0,26	0,25	0,30	1,04	0,22	0,07
1000ml	0-10	0,26	0,26	0,25	0,26	0,13	0,22	0,05
	10-20	0,25	0,26	0,29	0,22	0,55	0,26	0,07
	20-30	0,22	0,30	0,29	0,26	0,69	0,26	0,00
	30-40	0,25	0,33	0,26	0,26	0,77	0,26	0,02
1500ml	0-10	0,26	0,26	0,26	0,26	0,11	0,26	0,02
	10-20	0,29	0,22	0,26	0,22	0,33	0,26	0,02
	20-30	0,26	0,25	0,26	0,26	0,52	0,30	0,02
	30-40	0,26	0,22	0,22	0,26	0,71	0,30	0,07

TABLEAU XII-TENEURS EN K^+ meq/l DANS LES LESSIVATS

Dose de lessivage Solution de traitement	D1	D2	D3
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5 me/l	0,60	0,60	0,80
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + Mg SO ₄ 2,5 me/l + 15 me/l gypse	0,80	0,60	0,80
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l	0,80	1,00	0,80
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l + 5 me/l gypse	1,00	0,60	0,60
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l + N. 0 5 %	6,80	2,80	2,20
NaCl 5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l + MgSO ₄ 10 me/l	0,60	0,60	0,80
(témoin) l'eau distillée	0,80	0,60	0,80

D. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES CHLORURES APRES LE LESSIVAGE...

Les six solutions employées dans notre expérience contiennent des chlorures.

- NaCl 20 me/l + CaSO₄.2H₂O 2,5 me/l + MgSO₄ 2,5 me/l
- NaCl 20 me/l + CaSO₄.2H₂O 2,5 me/l + MgSO₄ 2,5 me/l + gypse 15 me/l
- NaCl 12,5 me/l + CaSO₄.2H₂O 6,25 me/l + MgSO₄ 6,25 me/l
- NaCl 12,5 me/l + CaSO₄.2H₂O 6,25 me/l + MgSO₄ 6,25 me/l + gypse 5 me/l
- NaCl 12,5 me/l + CaSO₄.2H₂O 6,25 me/l + MgSO₄ 6,25 me/l + M.O 5% + (NH₄)₂ SO₄ 50 mg/l
- NaCl 5 me/l + CaSO₄.2H₂O 10 me/l + MgSO₄ 10 me/l

Au départ nous avons 1,74 me/100 g de chlorures dans le sol artificiellement salé.

Observation des résultats.

Le lessivage des chlorures est très rapide. Comme nous avons utilisé un contact goutte à goutte, le lessivage des chlorures a été très efficace. 92 % des chlorures sont lessivés en totalité avec la première dose de lessivage pour le traitement eau distillée. L'analyse des lessivats nous montre que tous les chlorures préexistants dans les différentes colonnes sont lessivés avec la première dose de lessivage pour tous les traitements. Après l'apport de la deuxième dose de lessivage, le sol s'équilibre en fonction de la composition des solutions de lessivage.

L'analyse du sol après percolation avec la première dose nous montre que le traitement $\frac{20}{5}$ + 15 me/l gypse contient un maximum de chlorures très légèrement supérieur à celui obtenu avec la même solution non additionnée de gypse, et le traitement $\frac{5}{20}$ contient un minimum de chlorures dans le sol. Un tel résultat correspond bien aux proportions relatives de chlorure dans les diverses solutions de lessivage ajoutées.

Dans le cas de la solution la plus sodique, de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 après percolation avec la première dose il y a 1,05 me 1,1 me 1,04 et 1,04 me/100 g d'entraînement des chlorures aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 1,24 me de chlorures qui proviennent du sol. Après percolation avec la deuxième dose il y a une légère augmentation des chlorures en profondeur, et on atteint l'équilibre après l'apport de la troisième dose de lessivage. L'analyse des lessivats D2 et D3 montre une légère rétention des chlorures.

Les traitements contenant beaucoup de chlorure de sodium sont plus rapidement équilibrés, que les traitements dont le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ est faible. Pour les fortes teneurs en chlorures les courbes D1, D2, D3 sont très proches les unes des autres.

Dans le cas de solution de rapport $\frac{20}{5} + 15$ me/l gypse SAR = 6,3 les teneurs en chlorure du sol restent analogues, quoique en moyenne légèrement supérieures à celles obtenues aux solutions précédentes.

Après l'apport de la première dose, il y a 1,04 me 1,04 me 1,02 et 1,0 me/100 g de lessivage de chlorures aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 2,35 me de chlorures qui proviennent du sol.

Après percolation avec la deuxième dose, il y a très peu d'augmentation de chlorures aux niveaux 0,1,2,3 par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat montre une légère rétention de chlorures de la solution ajoutée.

Le gypse équilibre très rapidement les teneurs avec une légère augmentation des chlorures au niveau 0, à la troisième dose de lessivage. Les teneurs en chlorures diminuent dans le 3ème lessivat, ce qui montre une légère rétention de chlorure par le sol.

Les courbes sont stables et régulières avec le gypse, qui floccule les colloïdes; l'entraînement est plus rapide ce qui accroît le volume total de lessivat (360 ml au lieu de 315 ml dans la première solution $\frac{20}{5}$), la différence étant restée dans la couche sableuse à la base des colonnes traitées avec la solution de rapport 20/5.

Fig. 6 (1)

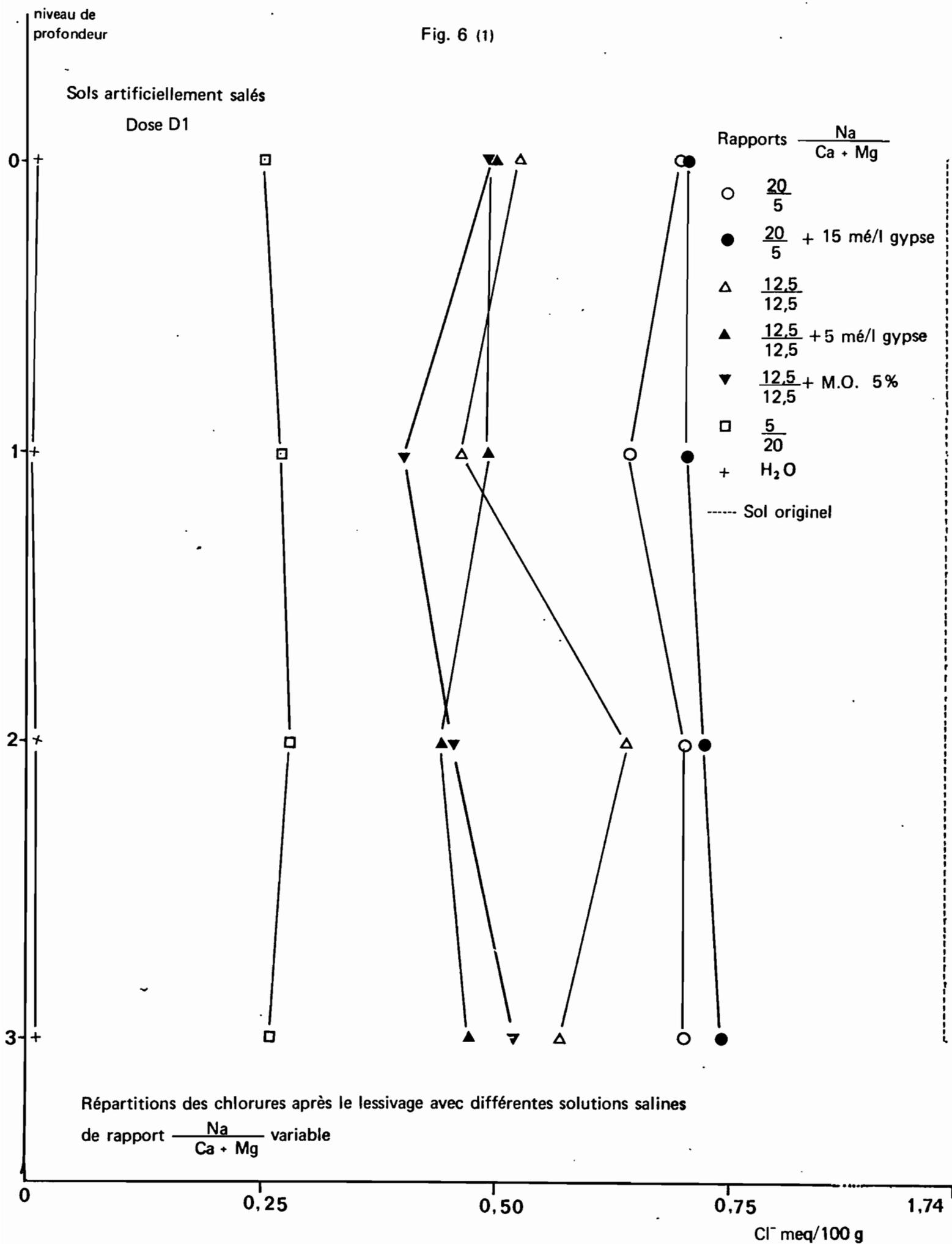


Fig. 6 (2)

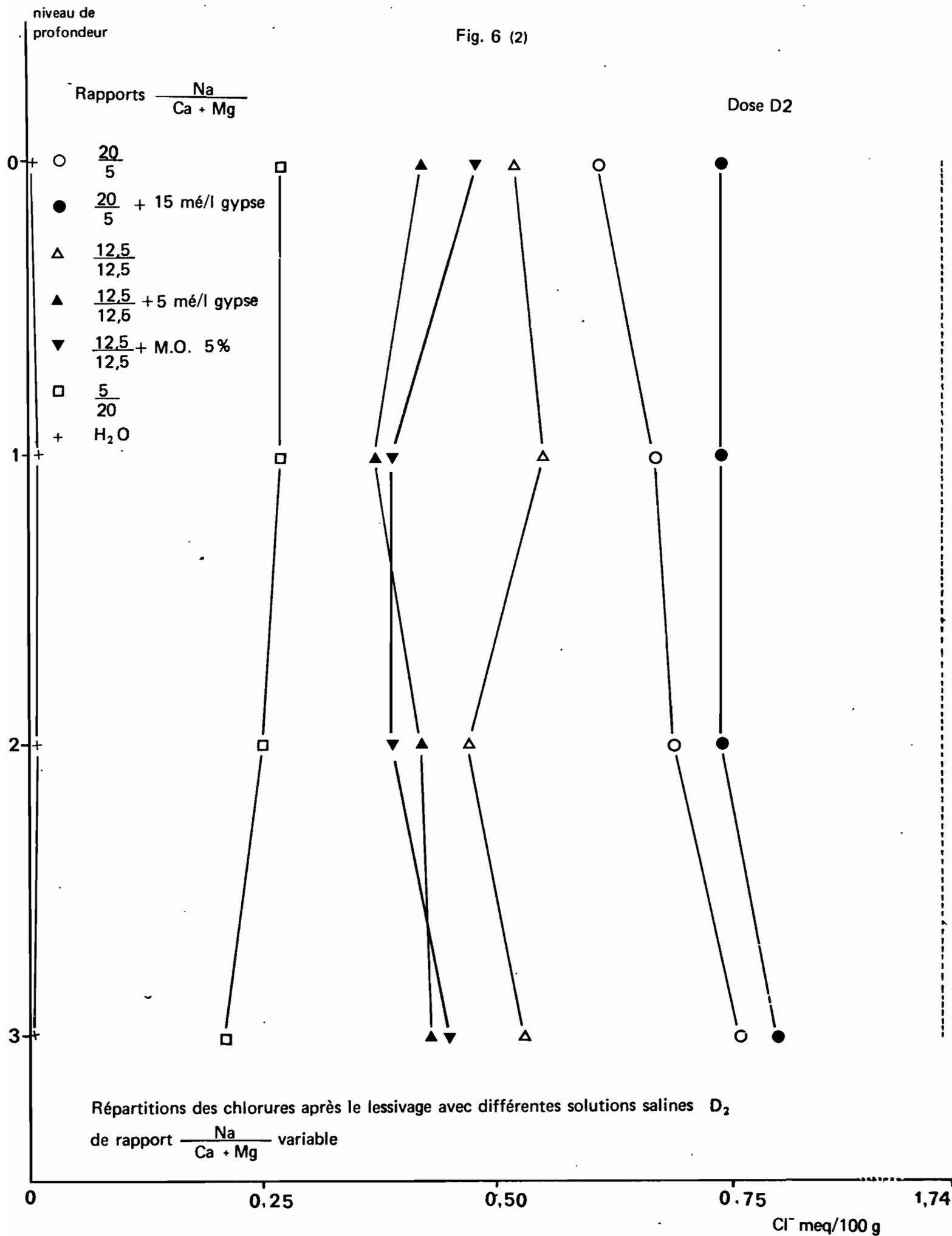
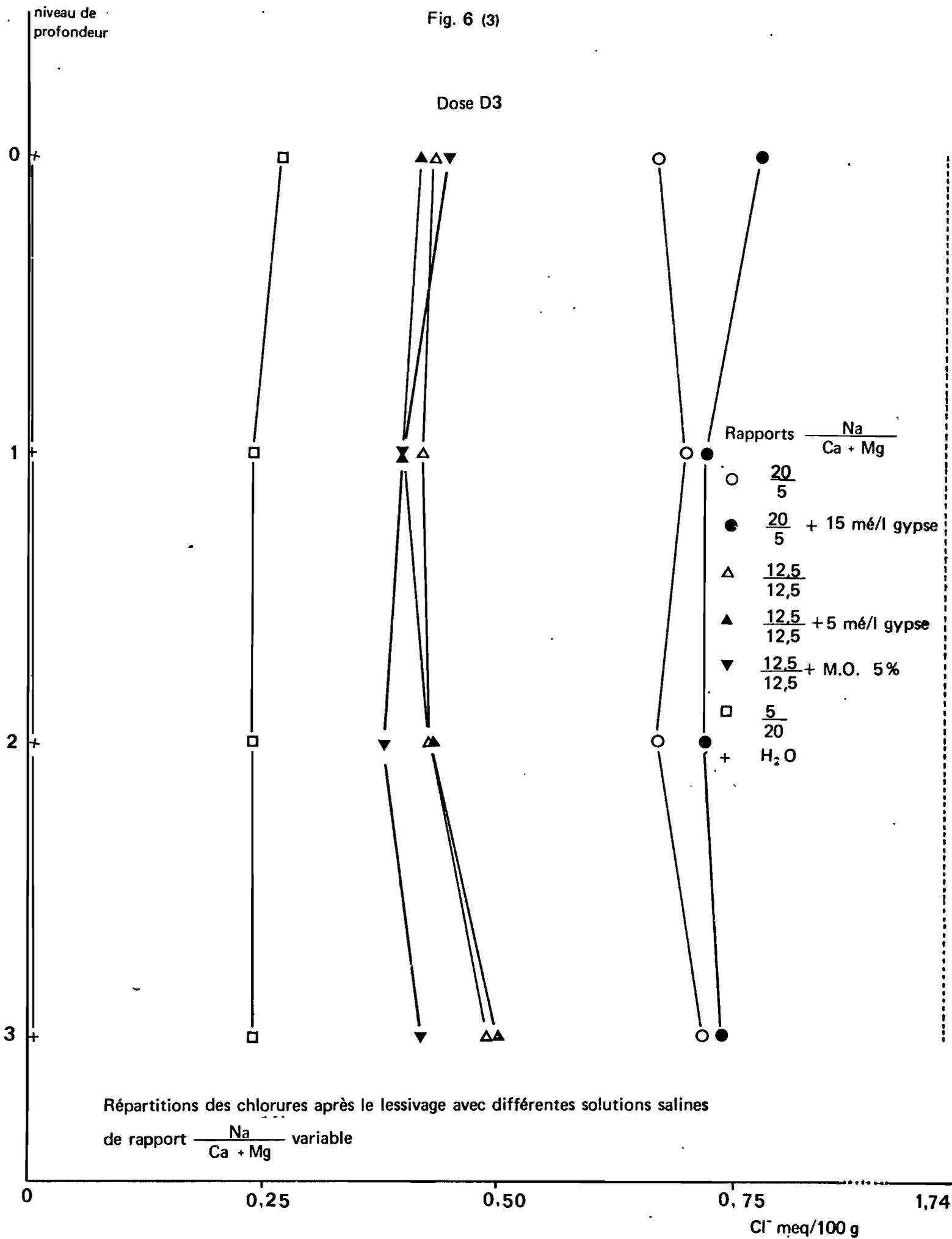


Fig. 6 (3)

Dose D3



Si l'on tient compte du Cl dans l'ensemble du liquide, il y a plus de Cl provenant de sol dans la première solution que dans la seconde mais la différence est très faible.

Dans l'équilibre sol/solution par suite du pouvoir tampon du sol le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ en solution tend à rester constant lorsque on modifie la concentration d'un des éléments.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en alcalin et alcalino-terreux ($Na^+ 12,5 \text{ me/l}$; $Ca^{++} + Mg^{++} = 12,5 \text{ me/l}$) $CI = 1 \text{ SAR} = 5$) dès l'application de la première dose, on observe un lessivage de $\frac{SO_4}{4}$ de 1,22 me 1,28 me 1,1 et 1,17 me/100 g de chlorure aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol originel donc plus qu'avec les solutions précédentes il y a un peu moins de lessivage de Cl^- vers la profondeur. L'analyse du lessivat montre 3,9 me de chlorure, qui proviennent du sol.

Après percolation avec la deuxième dose de lessivage, les teneurs restent majorées tout le long du profil par rapport aux traitements $\frac{12,5}{12,5} + 5 \text{ me/l}$ gypse et $\frac{12,5}{12,5} + 5\%$ matière organique et la répartition demeure irrégulière suivant les niveaux. L'analyse du lessivat montre 0,18 me de chlorure qui provient du sol.

Après percolation avec la troisième dose de lessivage, il y a un regroupement des teneurs aux différents niveaux avec celles du traitement $\frac{12,5}{12,5} + \text{me/l}$ gypse et également avec $\frac{12,5}{12,5} + \text{M.O.}$ sauf au niveau le plus profond. L'analyse du lessivat montre 0,68 me de chlorure qui provient du sol.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose, il y a tendance à un lessivage plus ou moins régulier des chlorures et surtout avec la 3ème dose .

L'addition de gypse à la solution précédente provoque une certaine stabilisation des teneurs en chlorures du sol principalement avec la deuxième et la troisième doses de lessivage. Les teneurs en chlorures se trouvent en moyenne inférieures à celles obtenues dans le traitement avec la même solution mais non additionnée de gypse.

Après percolation avec la première dose il y a 1,25 me 1,25 me 1,3 et 1,27 me/100 g de lessivage de chlorures aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol originel. L'analyse du lessivat montre 3,76 me de chlorures qui proviennent du sol.

Après percolation avec la 2ème dose, il y a un léger lessivage des chlorures par rapport à la première dose. Après l'apport de la troisième dose de lessivage, les teneurs de chlorures dans le sol sont très proches de ce qu'elles étaient sans addition de gypse. Avec le gypse l'équilibre est très rapide. En général on observe qu'avec le gypse, le lessivage est plus régulier en profondeur.

La matière organique joue également un rôle de stabilisant presque plus efficace encore que le gypse. L'effet de la matière organique dans la solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5, montre que le lessivage des chlorures augmente avec la matière organique. Après percolation avec la première dose, il y a 1,25 me 1,34 me 1,29 et 1,22 me/100 g de lessivage de chlorure aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original. Il y a un maximum d'entraînement des chlorures par rapport à toutes les solutions salines. L'analyse du lessivat montre 4,8 me de chlorure qui provient du sol.

Après percolation avec la deuxième dose de lessivage il y a un peu moins de lessivage des chlorures à la surface et plus en profondeur par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat montre 0,51 me de chlorure qui provient du sol.

Après percolation avec la troisième dose de lessivage, les teneurs en chlorures sont plus ou moins les mêmes qu'avec la 2ème dose.

La matière organique provoque un peu plus d'entraînement des chlorures par rapport aux solutions simples $\frac{12,5}{12,5}$ et $\frac{12,5}{12,5} + 5$ me/l gypse. Il s'effectue une certaine régularisation par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$, cette régularisation est moins nette dans le cas du gypse.

Dans le cas de la solution riche en alcalino-terreux ($CaSO_4 \cdot 2H_2O + MgSO_4$ 20 me/l $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{5}{20}$ SAR = 1,6), après l'apport de la première dose il y a 1,49 me, 1,47 me, 1,46 me et 1,48 me/100 g de lessivage de chlorure aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport

au sol originel. L'analyse du lessivat montre 4,74 me de chlorures qui proviennent du sol.

Le lessivage des chlorures est très régulier avec toutes les doses de lessivage; les teneurs s'équilibrent très rapidement avec la solution.

Conclusions.

1- Quelque soit le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ (et à part une légère augmentation relative de chlorure en surface et en profondeur), la teneur moyenne s'équilibre dans le sol en fonction de la richesse en chlorure dans la solution de lessivage. Les rapports $\frac{Na}{Ca+Mg}$ représentent en fait les rapports $\frac{Cl}{SO_4}$.

2- Les solutions riches en chlorure de sodium et pauvres en alcalino-terreux de SAR = 12,6 provoquent un minimum de lessivage des chlorures préexistants dans le sol. L'analyse du lessivat montre peu de chlorures seulement 0,92 me, provenant du sol (si l'on considère la totalité du liquide y compris celui retenu dans le sable à la base de la colonne). Avec les solutions riches en sodium l'équilibre dans le sol s'établit plus rapidement qu'avec les autres traitements.

3- Les solutions riches en NaCl et également riches en alcalino-terreux de SAR = 6,3 provoquent légèrement moins de lessivage de chlorures dans le sol que la solution de SAR = 12,6. On trouve également moins de chlorures provenant du sol dans les lessivats.

4- Les solutions également riches en NaCl et alcalino-terreux de SAR = 5 provoquent davantage de lessivage des chlorures qu'avec la solution de SAR = 12,6 ou de SAR = 6,3. L'entraînement dans les lessivats du chlorure provenant du sol est très important (4,76 me).

5- Quant à cette solution également riche en alcalino-terreux et NaCl on ajoute 5 me/l de gypse (SAR=4,2) le lessivage des chlorures (D1,D2) est plus important qu'avec la solution simple $\frac{12,5}{5}$, tandis que c'était le contraire dans le cas de la solution de SAR $\frac{12,5}{5}$ 6,3 ($\frac{20}{5}$ + 15 me/l sulfate).

6- La matière organique favorise un fort lessivage de chlorures. Les courbes de répartition des chlorures dans le sol après chaque dose de lessivage, sont plus régulières et moins décalées les unes par rapport aux autres qu'avec les autres traitements. On observe un maximum d'entraînement des chlorures dans le lessivat (4,87mé) rapport ce qui est obtenu avec tous les autres lessivats avec des solutions salines.

7- Les solutions riches en alcalino-terreux et pauvre en ClNa provoquent en fort lessivage des chlorures préexistant, et l'on observe un entraînement très important des chlorures (4,71 me) dans les lessivats.

8- L'eau distillée provoque un maximum de lessivage des chlorures du sol (100%) dès la première dose; on trouve également le maximum de chlorures dans le lessivat.

TABLEAU XIII-Teneur en Cl (me) dans des différents lessivats
Sol artificiellement salé

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	11,24	1,24	9,36		9,47	
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + gypse 15 me/l	12,35	2,35	9,11		9,41	
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	10,15	3,90	6,43	0,18	6,93	0,68
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + gypse 5 me/l	10,01	3,76	5,96		5,83	
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + N.O 5 %	11,05	4,30	6,76	0,51	5,81	
NaCl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10me/l MgSO ₄ 10 me/l	7,24	4,74	2,57	0,07	2,4	
témoin eau distillée	5,90	5,90	0,10	0,10	0,05	0,05

TABLEAU XIV- REPARTITIONS DES CHLORURES APRES LE LESSIVAGE
SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE

Cl⁻ me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l ² MgSO ₄ 2,5me/l +gypse 15me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l + 5 me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l +H ₂ O 5% + (NH) ₄ SO ₄ 50mg/l	NaCl 5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l ² MgSO ₄ 10me/l	témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	0,69	0,70	0,52	0,49	0,49	0,25	0,01
	10-20	0,64	0,70	0,46	0,49	0,40	0,27	0,00
	20-30	0,70	0,72	0,64	0,44	0,45	0,28	0,01
	30-40	0,70	0,74	0,57	0,47	0,52	0,26	0,01
1000ml	0-10	0,61	0,74	0,52	0,42	0,48	0,27	0,00
	10-20	0,67	0,74	0,55	0,37	0,39	0,27	0,01
	20-30	0,69	0,74	0,47	0,42	0,39	0,25	0,01
	30-40	0,76	0,80	0,53	0,43	0,45	0,21	0,04
1500 ml	0-10	0,67	0,78	0,43	0,42	0,44	0,27	0,00
	10-20	0,70	0,72	0,42	0,40	0,40	0,24	0,01
	20-30	0,67	0,72	0,43	0,43	0,38	0,24	0,01
	30-40	0,72	0,74	0,49	0,50	0,42	0,24	0,01

E. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES SULFATES APRES LE LESSIVAGE.

Le sol contient 3,38 me/100 g de $\text{SO}_4^{''}$ soluble au début de l'expérience ; le mouvement des sulfates est plus lent que celui des chlorures.

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6, après l'apport de la première dose, il y a lessivage de $\text{SO}_4^{''}$ du sol. (1,08 me 1,08 me 1,2 et 1,16 me/100 g aux niveaux 0,1,2,3) par rapport au sol originel. L'analyse du lessivat montre 3,64 me de $\text{SO}_4^{''}$ qui provient du sol. Après l'apport de la 2ème dose il y a encore un léger lessivage de $\text{SO}_4^{''}$, mais l'apport de la 3ème dose provoque une légère fixation de $\text{SO}_4^{''}$ tout le long du profil, et une faible augmentation vers la profondeur. L'analyse du lessivat démontre cette légère rétention des sulfates dans le sol, car il y a moins de $\text{SO}_4^{''}$ dans le lessivat que dans la solution ajoutée.

L'addition de 15 me/l de gypse, ou $\text{SO}_4^{''}$, par rapport à de la solution précédente (SAR définitif=6,3) montre moins d'entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ du sol par rapport au solution $\frac{20}{5}$ mais par rapport au sol originel il y a lessivage (0,74 me 0,78 0,6 et 0,64 me/100g aux niveaux 0,1,2, 3). L'analyse du lessivat (D1) montre 2 fois moins de $\text{SO}_4^{''}$ que le lessivat de la solution $\frac{20}{5}$ (moins riches en $\text{SO}_4^{''}$) $\frac{20}{5}$.

Après percolation avec la 2ème dose l'analyse du lessivat montre 0,8 me de rétention de $\text{SO}_4^{''}$. Avec D2 et D3 les valeurs de $\text{SO}_4^{''}$ dans le sol sont plus ou moins constantes. Dans le cas de l'apport de gypse les courbes de répartition des sulfates dans le sol sont très proches l'une de l'autre pour les différentes doses de lessivage, alors que sans apport de gypse ces courbes sont différentes.

En augmentant le $\text{SO}_4^{''}$ dans la solution de percolation, on diminue les sulfates provenant du sol dans le lessivat.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à l'unité ($\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5) dès l'apport de la première dose, on observe un lessivage des sulfates très important. (0,92 me 1,22 me 1,28 et 1,12 me/100 g aux niveaux 0,1,2,3) par rapport au sol originel. On observe plus de lessivage de $\text{SO}_4^{''}$ aux niveaux 1,2 par rapport au traitement $\frac{20}{5}$. L'analyse du lessivat montre 3,83 me de $\text{SO}_4^{''}$ qui provient du sol.

Après percolation avec la 2ème dose on observe une fixation des sulfates vers la profondeur par rapport à la première dose. L'apport de la 3ème dose montre les mêmes valeurs qu'avec la 2ème.

L'analyse des lessivats montre que, quelle que soit la dose (D1, D2 ou D3), il y a toujours entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ du sol. C'est le seul traitement salin où l'on observe des sulfates dans le lessivat (provenant du sol) avec les deuxième et troisième doses.

L'enrichissement en gypse (5me/l) de la solution de lessivage de même composition de base que la précédente ($\frac{12,5}{12,5}$ SAR définitif = 42, après percolation avec la première dose, fournit moins d'entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ par rapport à la solution précédente (0,26 me 0,62 me 0,78 me et 0,44 me/100 g aux niveaux 0,1,2,3). Après l'apport de la première dose, il y a maximum de fixation de $\text{SO}_4^{''}$ dans le sol par rapport à tous les traitements, sauf $\frac{20}{5}$. Mais il y a quand même lessivage de $\text{SO}_4^{''}$ par rapport au sol originel. Il y a plus de fixation de $\text{SO}_4^{''}$, que dans le traitement $\frac{20}{5}$ + 15 me/l gypse. Ce qui montre que les solutions de lessivage de même concentration en sulfate (20 me/l $\text{SO}_4^{''}$ ou 17,5 me/l $\text{SO}_4^{''}$) fixent plus de $\text{SO}_4^{''}$, quand on diminue la concentration en NaCl dans la solution de percolation ou inversement diminuent le $\text{SO}_4^{''}$ fixé lorsqu'on augmente le NaCl^- .

L'analyse du lessivat (D1) montre 1,06 me de moins de $\text{SO}_4^{''}$ qui provient du sol par rapport au lessivat de solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Après l'apport de la deuxième dose on observe un maximum de fixation de $\text{SO}_4^{''}$ au niveau 1 et 2 par rapport à tous les traitements. Il y a fixation de $\text{SO}_4^{''}$ vers la profondeur par rapport à la première dose.

Fig. 7 (2)

Sols artificiellement salés

Dose D2

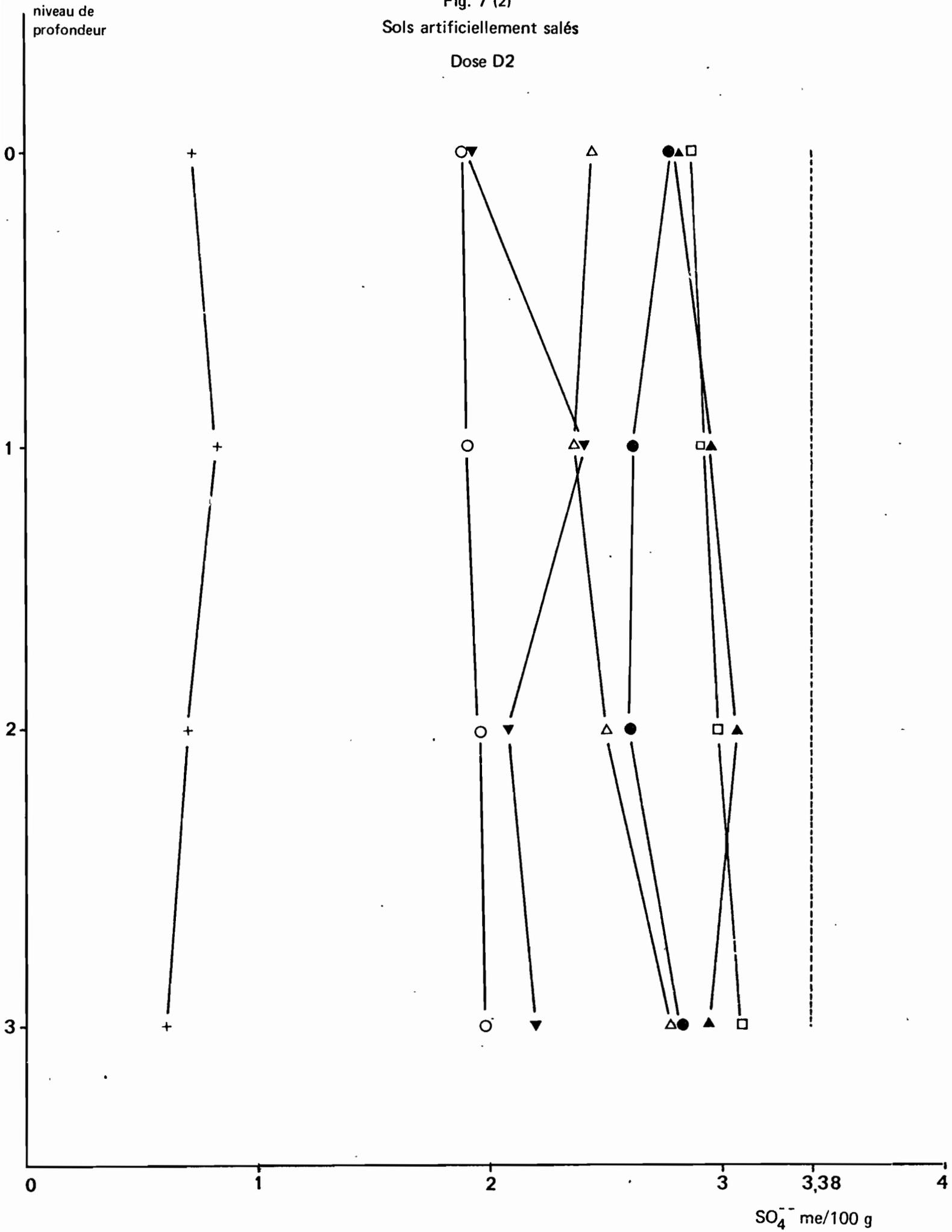
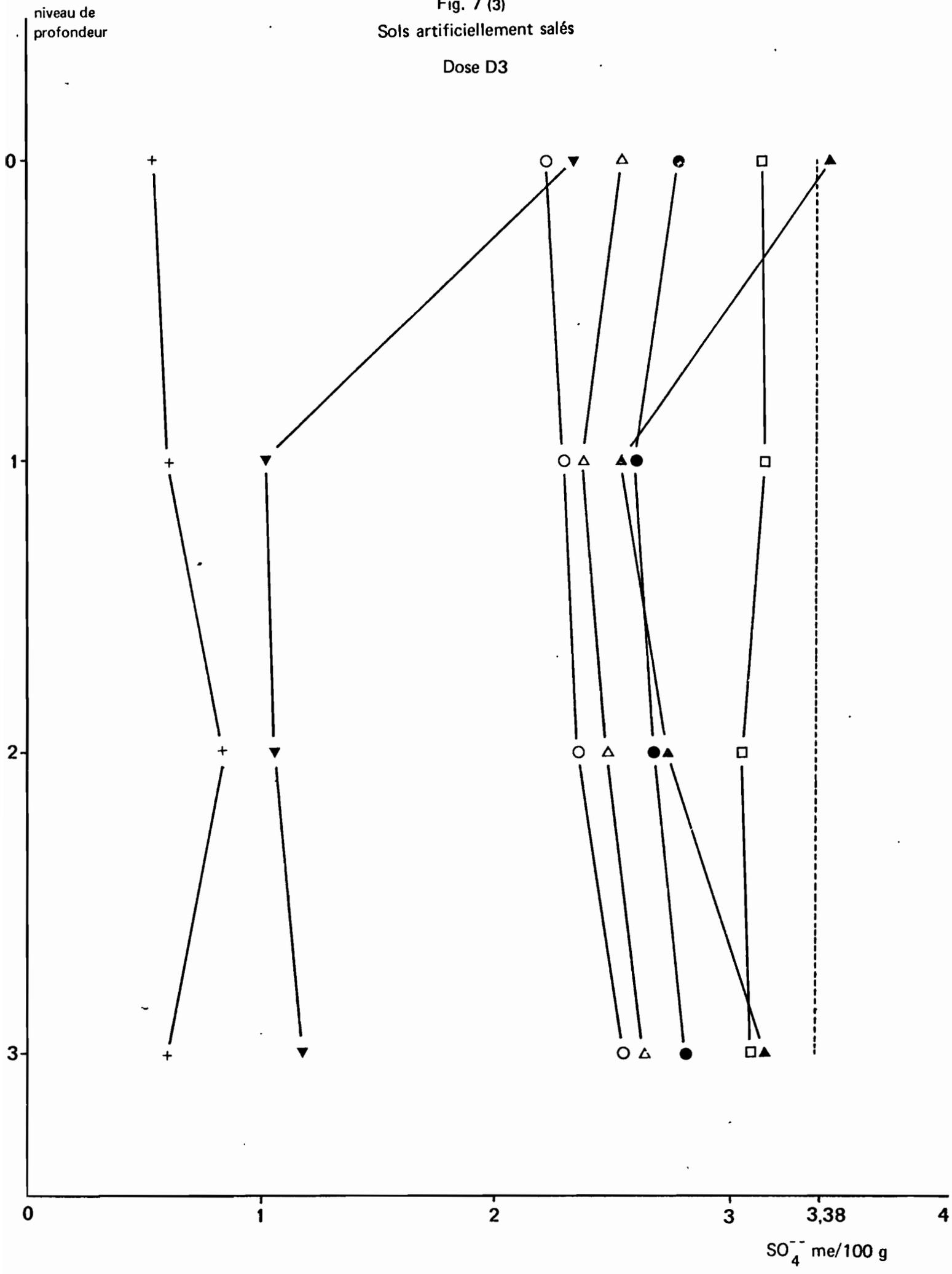


Fig. 7 (3)
Sols artificiellement salés
Dose D3



Après percolation avec la 3ème dose on observe un maximum de fixation et d'accumulation de $SO_4^{''}$ au niveau 0 et 3 par rapport à tous les autres traitements. On observe également 0,4 me et 0,32 me/100 g de lessivage de $SO_4^{''}$ au niveau 1 et 2 par rapport à la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre une faible quantité de $SO_4^{''}$ qui provient du sol.

En général l'analyse des lessivats montre moins de $SO_4^{''}$ qui provient du sol, pour toutes les doses de lessivage, par rapport aux lessivats de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. L'augmentation du rapport $\frac{SO_4^{''}}{Cl}$ provoque la fixation de $SO_4^{''}$ et diminue l'entraînement dans le lessivat.

L'apport de 5% de matière organique provoque davantage de lessivage de $SO_4^{''}$ par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Après percolation avec la première dose, on observe un lessivage de $SO_4^{''}$ important par rapport au sol originel (0,92 me, 1,52 me 1,63 et 1,77 me/100g aux niveaux 0,1,2,3 respectivement). Il y a une diminution progressive du sulfate vers la profondeur.

L'analyse du lessivat montre un maximum de sulfate (4,81 me) qui provient du sol par rapport à tous les autres traitements. Il y a plus de lessivage de sulfate par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$ (0,3 me, 0,35 me et 0,65 me/100 g aux niveaux 1,2,3 respectivement).

Après l'apport de la deuxième dose on observe un lessivage de $SO_4^{''}$ à la surface (0,56 me niveau 0) et une accumulation vers la profondeur. Par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat montre 0,78 me de rétention de $SO_4^{''}$. On observe toujours plus de lessivage de $SO_4^{''}$ par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Après percolation avec la 3ème dose, il y a refixation de $SO_4^{''}$ au niveau 0 (0,44 me/100 g) et lessivage vers la profondeur par rapport à la deuxième dose et également par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

L'ordre de lessivage de $SO_4^{''}$ dans le sol $\frac{est}{12,5} + M.05\% > \frac{12,5}{12,5} > \frac{12,5}{12,5} + 5 \text{ me/l gypse}$.

L'apport de matière organique favorise en moyenne le lessivage des sulfates mais pour une dose de percolation moyenne le calcium dissous tend à insolubiliser temporairement SO_4 . aux fortes doses au contraire, le sulfate est entraîné en même temps que les bicarbonates solubles.

Dans le cas de solutions riches en alcalino terreux ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 = 20 \text{ me/l}$) $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{5}{20}$ SAR = 1,6 après percolation avec les doses (D1, D2 et D3) on observe un minimum de lessivage de sulfate par rapport à tous les autres traitements. L'analyse de tous les lessivats montre moins de sulfates provenant du sol.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec la première dose il y a un lessivage par rapport au sol originel puis avec les doses successives il y a fixation de SO_4 sur l'argile.

La comparaison avec le traitement $\frac{20}{5} + 15 \text{ me/l}$ gypse (même teneur en SO_4) nous montre qu'avec la diminution de chlorure, il y a plus de rétention de SO_4 dans le sol.

Dans le cas de l'eau distillée après percolation avec les doses D1, D2, D3 on observe un maximum de lessivage de SO_4 par rapport à tous les autres traitements. L'analyse des lessivats montre un maximum d'entraînement des sulfates qui provient du sol.

La comparaison entre les doses (D1, D2 et D3) dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose, on observe un entraînement croissant des sulfates. Après percolation avec la troisième dose, le sulfate migré de la surface est accumulé au niveau 2.

Conclusions.

- 1- Pour les solutions riches en sodium et pauvres en $\text{SO}_4^{''}$ (SAR=12,6) on a un fort lessivage des sulfates préexistants et une faible fixation secondaire dans le sol qui augmente peu avec les doses croissantes.
- 2- Les solutions également riches en sodium et $\text{SO}_4^{''}$ de SAR = 6,3 montrent moins de lessivage de sulfate préexistant par rapport aux solutions de SAR = 12,6, par contre, il n'y a pas d'enrichissement secondaire.
- 3- Les solutions également riches en sodium et $\text{SO}_4^{''}$ de SAR=5 provoquent un fort lessivage de $\text{SO}_4^{''}$.
- 4- Le fait de rajouter du gypse dans la solution diminue le lessivage et provoque un enrichissement du sol en $\text{SO}_4^{''}$ avec les doses croissantes.
- 5- Au fur et à mesure qu'on diminue le rapport $\frac{\text{Cl}}{\text{SO}_4}$ dans la solution de percolation, il y a une tendance à la fixation de $\text{SO}_4^{''}$ qui s'accumule au maximum dans le sol. Au contraire l'augmentation du rapport $\frac{\text{Cl}}{\text{SO}_4}$ à tendance à accroître lessivage de $\text{SO}_4^{''}$.
- 6- L'apport de matière organique accroît le lessivage et diminue les sulfates dans le sol, surtout en profondeur. Il y a cependant une phase intermédiaire de insolubilisation due au Ca dissout.
- 7- Les solutions riches en alcalino-terreux et $\text{SO}_4^{''}$ provoquent un maximum de fixation et un minimum d'entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ dans le sol.
- 8 - C'est l'eau distillée qui a le pouvoir le plus lessivant en $\text{SO}_4^{''}$. Avec les doses successives on observe un lessivage croissant de $\text{SO}_4^{''}$.

D'une manière générale sauf pour les solutions de percolation particulièrement riches en gypse, on observe un fort lessivage relatif de $\text{SO}_4^{''}$ dans ces colonnes, en raison d'une modification importante des rapports ioniques, par les solutions de composition variable, en présence de quantités de sulfates peu élevées au départ.

En outre les sols sont à dominance de montmorillonite et contiennent peu d'oxydes métalliques amorphes d'où un faible pouvoir de rétention pour les sulfates, conformément à certaines études (TSUN-TIEN CHAO M,E, HARWARD et al). C'est donc la teneur relative dans le sol du calcium soluble et échangeable par rapport au sodium, et la concentration en $\text{SO}_4^{''}$ qui peuvent influencer sur la rétention ou le lessivage des sulfates.

L'apport de NaCl peut favoriser l'entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ sous forme de SO_4Na_2 (augmentation du Na soluble et échangeable et action d'échange $\text{Na} \rightarrow \text{Ca}$). Au contraire l'apport de $\text{SO}_4^{''}$ supplémentaire en présence du calcium du sol accroît la concentration en SO_4Ca et diminue sa solubilité.

L'apport de matière organique a une double action

1e) en accroissant le Ca^{++} soluble du sol elle diminue la solubilité de $\text{SO}_4^{''}$ (cas de la dose D2).

2e) En entraînant de fortes quantités de Ca dans les lessivats elle provoque en même temps le lessivage de $\text{SO}_4^{''}$ (cas de la dose D3).

L'eau distillée diminue, de toute façon, la concentration des $\text{SO}_4^{''}$ en solution et accroît leur lessivage.

TABLEAU XV - TENEUR EN SO_4 (me) DANS LES DIFFERENTES LESSIVATS

Dose de lessivage Sol ion de Traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l MgSO_4 2,5 me/l	6,14	3,64	2,21	-	1,98	-
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l MgSO_4 2,5 me/l + 15 me/l gypse	11,88	1,88	9,2	-	9,9	-
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l MgSO_4 6,25 me/l	10,08	3,83	6,44	0,19	6,93	0,68
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l MgSO_4 6,25 me/l + 5 me/l gypse	11,52	2,77	8,45	-	8,82	0,07
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l MgSO_4 6,25 me/l + M.O 5 ‰	11,06	4,81	5,47	-	2,93	-
NaCl 5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10 me/l MgSO_4 10 me/l	12,24	2,24	9,16	-	9,56	-
Témoin l'eau distillée	5,4	5,4	0,35	0,35	0,25	0,25

TABLEAU XVI- REPARTITIONS DES SULFATES APRES LE LESSIVAGE
SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE

SO_4 me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l+ CaSO ₄ 2HO 2,5me/l +MgSO ₄ 2,5 me/l	NaCl 20me/l CaSO ₄ 2HO 2,5me/l MgSO ₄ 2,5me/l +gypse 15me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2HO 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2HO 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l +gypse 5 me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2HO 6,25 MgSO ₄ 6,25me/l M.O 5% Nu ₄ SO ₄ 50mg/l	NaCl 5me/l CaSO ₄ 2HO 10me/l MgSO ₄ 10me/l	témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	2,30	2,64	2,46	2,72	2,46	2,98	0,70
	10-20	2,30	2,60	2,16	2,78	1,86	2,84	0,92
	20-30	2,18	2,78	2,10	2,88	1,75	2,88	0,72
	30-40	2,22	2,74	2,26	2,70	1,61	2,82	0,92
1000 ml	0-10	1,88	2,78	2,44	2,78	1,90	2,86	0,72
	10-20	1,90	2,62	2,36	2,94	2,40	2,92	0,82
	20-30	1,96	2,60	2,50	3,06	2,07	2,98	0,70
	30-40	1,98	2,82	2,78	2,94	2,20	3,08	0,60
1500 ml	0-10	2,22	2,78	2,54	3,44	2,34	3,14	0,54
	10-20	2,30	2,60	2,38	2,54	1,02	3,16	0,60
	20-30	2,36	2,68	2,48	2,74	1,06	3,06	0,84
	30-40	2,56	2,82	2,64	3,16	1,18	3,10	0,60

F. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES CARBONATES ET DES BICARBONATES APRES LE LESSIVAGE.

Le sol contient 3,11 me/100 g de carbonates et bicarbonates solubles au début de l'expérience. Par contre aucune solution de percolation n'en contient.

Dans le cas de la solution la plus sodique, de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$, SAR = 12,6, après l'apport de la première dose. L'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol originel, est respectivement, de 0,16 0,28 - 0,32 et 0,48 me/100 g.

L'analyse du lessivat montre un entraînement de 2,21 me de bicarbonates qui proviennent du sol. Après percolation avec la deuxième dose il y a dissolution des carbonates et lessivage. Le lessivage augmente progressivement de la surface vers le bas. Il y a 0,55 me 0,76 me 0,94 et 1,24 me/100 g d'entraînement de bicarbonates par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat indique un apport de 3,67 me de bicarbonates provenant du sol.

Après percolation avec la troisième dose, on observe une accumulation de 0,55 me 0,59 me 0,63 et 0,61 me/100 g de bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport à la deuxième dose. L'accumulation est un peu plus forte à la surface et progressivement plus faible vers la profondeur. L'analyse du lessivat montre 3,72 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

Dans ce traitement riche en NaCl, il semble donc se produire une dissolution particulière de $CaCO_3$ dont le mécanisme exact n'est pas parfaitement connu. Une certaine hydrolyse, un certain rôle de la force ionique peuvent être envisagés, outre la pression partielle de CO_2 . En même temps que l'argile enrichit en sodium les bicarbonates solubles formés peuvent suivant les cas être entraînés dans le lessivat ou restes dans le sol.

Quant à la solution précédente, de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ on ajoute 15 me/l de gypse (SAR définitif = 6,3), après percolation avec la première dose, on observe un entraînement de 0,69 me et 0,65 le/100 g de bicarbonates à la surface (aux niveaux 0 et 1) mais vers la profondeur, une forte accumulation des bicarbonates (niveau 2:0,31 me; niveau 3. 0,66 me/100 g). L'analyse du lessivat montre très peu de

dissolution du calcaire et donc d'entraînement des bicarbonates dans le lessivat (0,9 me) ; c'est 2,5 fois moins qu'avec le traitement $\frac{20}{5}$.

Cette dissolution du calcaire finit par se produire un peu plus que après l'apport de la deuxième dose on observe une accumulation de bicarbonates solubles à tous les niveaux, il y a 1,77 me 1,30 me 0,62 et 0,1 me/100 g d'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport à la première dose. Il y a 1,08 me 0,65 me 0,93 me et 0,76 me/100 g d'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre cependant 5,3 fois moins de bicarbonates entraînés par rapport au lessivat du traitement $\frac{20}{5}$.

Après percolation avec la troisième dose il y a un lessivage des bicarbonates croissant en profondeur 0,94 me/100 g niveau 2 1,03 me/100g niveau 3. Le lessivage des bicarbonates est très net avec la dose D3 par rapport à la dose D2, mais vers la surface (niveau 0) il y a plus de bicarbonates (0,13 me/100 g) que dans le sol original. L'analyse du lessivat montre 1,24 me de bicarbonates qui provient du sol (3 fois moins de traitement $\frac{20}{5}$).

En général l'analyse des lessivats montre de faibles quantités de bicarbonates. L'apport de gypse diminue la solubilisation du calcaire et la formation de carbonates solubles.

Dans le cas de solution de rapport égal $\frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5 après l'apport de la première dose, il y a un maximum de lessivage des bicarbonates (le bicarbonate de Na préexiste dans le sol) par rapport à tous les autres traitements. Il y a 0,93 me 0,78 me 0,85 et 0,77 me/100 g d'entraînement des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3. L'analyse du lessivat montre 0,72 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

Après percolation avec la deuxième dose il y a 0,83 me 0,60 me, 0,70 me et 0,67 me/100 g d'augmentation des bicarbonates aux niveaux 0,1, 2,3 respectivement dans le sol par rapport à la première dose. En même temps l'analyse du lessivat montre l'augmentation des bicarbonates qui proviennent du sol.

La réaction de dissolution du carbonate est la même que pour $\frac{20}{5}$ mais moins intense.

Fig. 8 (1)

Sols artificiellement salés

Dose D1

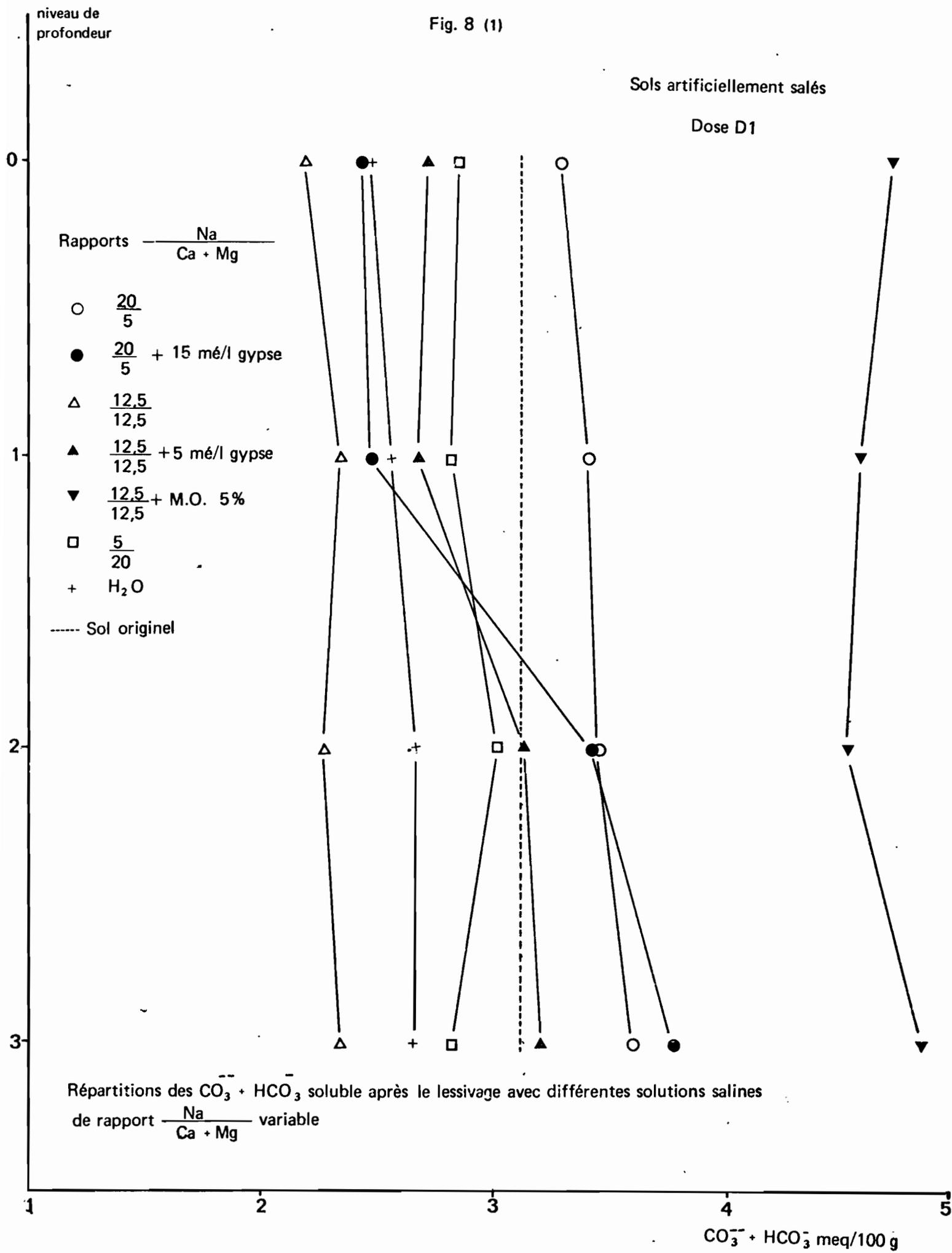


Fig. 8 (2)

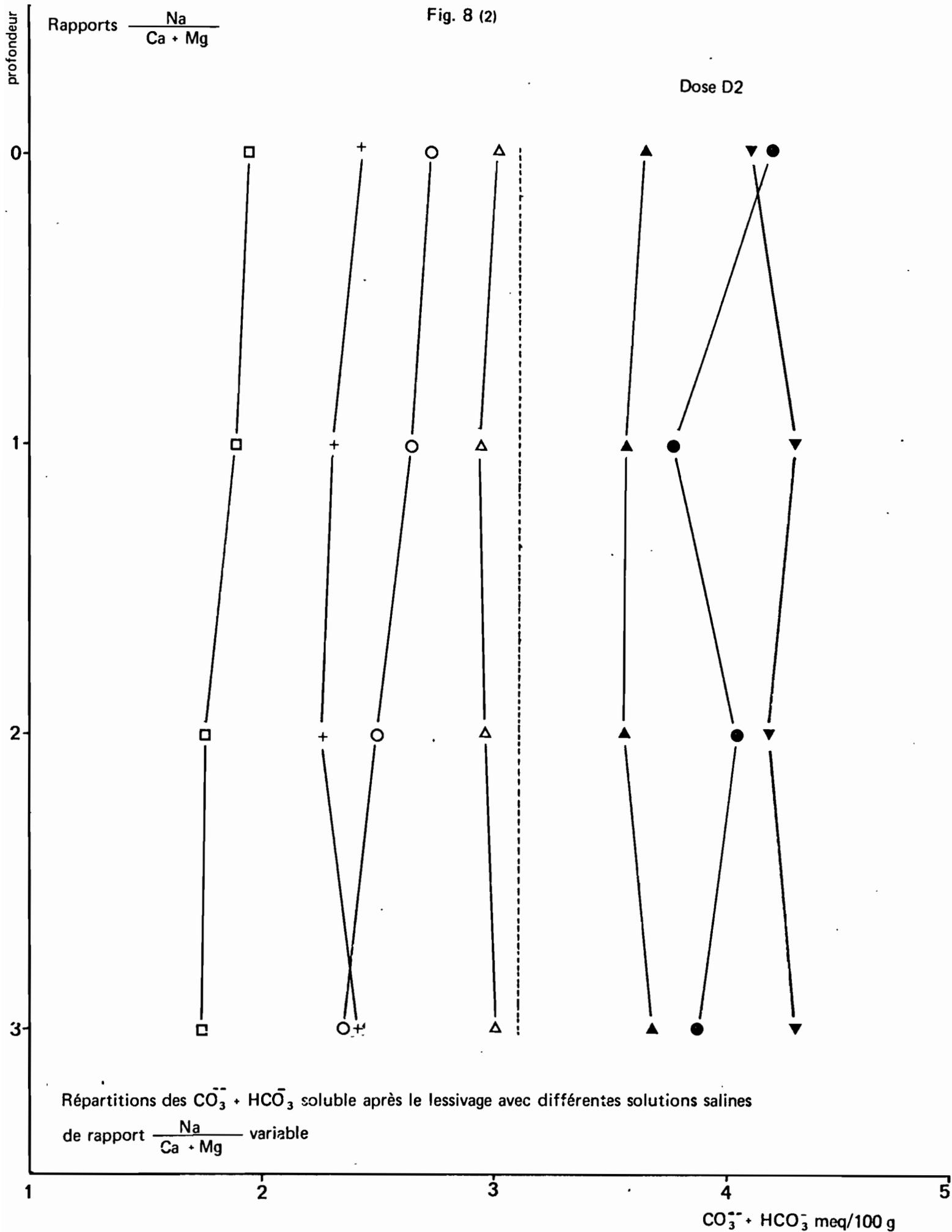
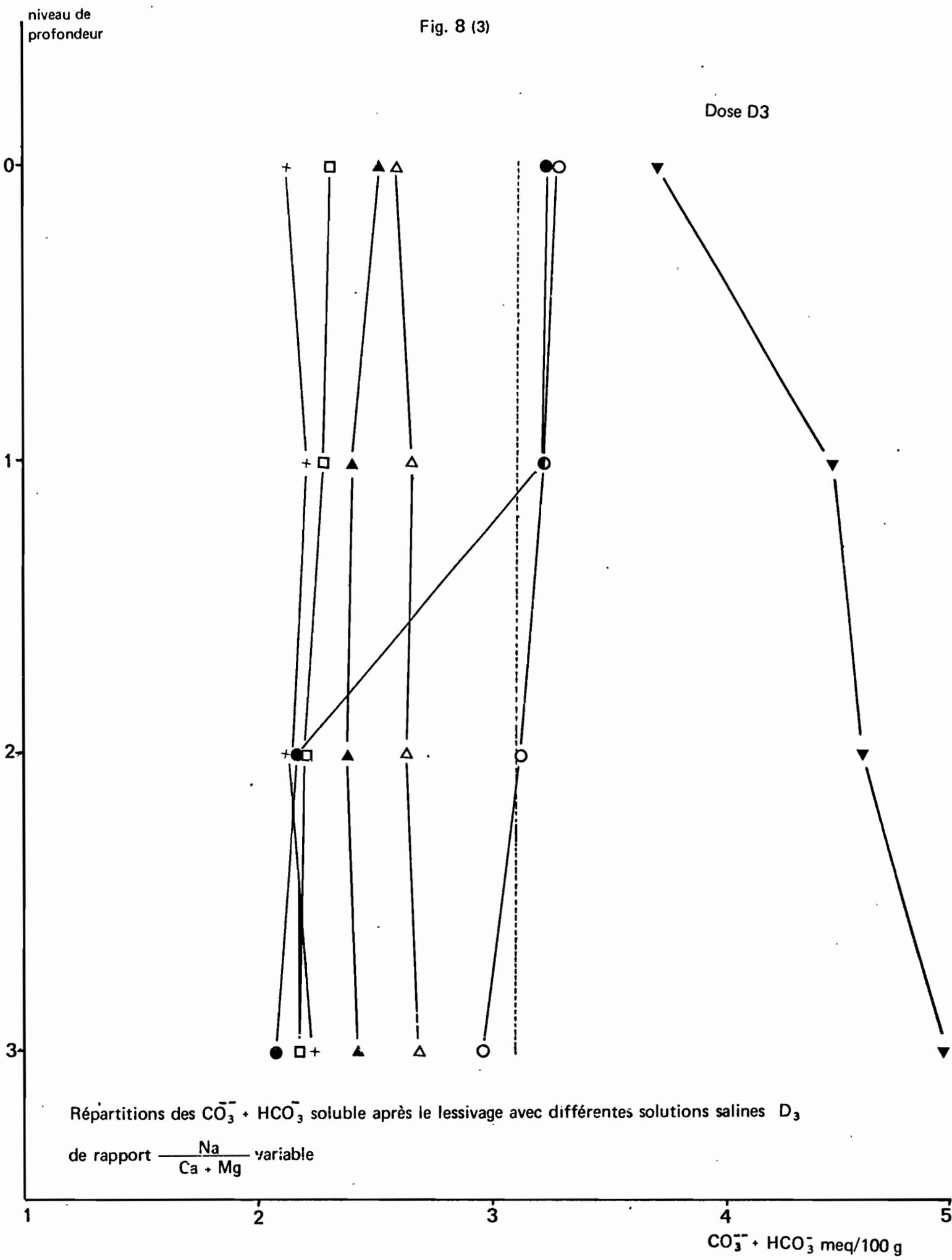


Fig. 8 (3)



Après l'apport de la troisième dose, il y a nouveau lessivage de bicarbonates, formés par l'apport de la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre 1,24 me de bicarbonates qui provient du sol.

On observe d'abord un lessivage du carbonate soluble préexistant (dose D1), puis il y a dissolution du calcaire (dose D2) et à la fin (dose D3) il y a lessivage des bicarbonates formés. L'analyse des lessivats montre 2,8 fois moins de bicarbonates par rapport au traitement $\frac{20}{5}$.

Dans le cas de la solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5} + 5$ me/l de gypse (SAR = 4,2) il y a dissolution des bicarbonates (préexistant) à la surface des colonnes (0,41 me/100 g niveau 0, 0,45 me/100 g niveau 1) et migration vers la profondeur où il y a accumulation des bicarbonates 0,09 me/100 g au niveau 3. L'analyse du lessivat montre 0,54 me de bicarbonate qui provient du sol.

Après l'apport de la deuxième dose il y a une accumulation des bicarbonates assez importante tout le long du profil. Il y a 0,53 me, 0,45 me 0,44 me et 0,57 me/100 g d'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original. En même temps l'analyse du lessivat montre 0,25 me de moins de bicarbonates par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Là aussi l'apport de calcium diminue la solubilité des carbonates provenant du calcaire.

La présence de la matière organique dans des colonnes se traduit par une augmentation importante de la teneur en bicarbonates dans le sol. Dans le cas de la solution de rapport $\frac{12,5}{12,5} + M.05\%$ après percolation avec la première dose il y a un maximum d'accumulation des bicarbonates dans le sol par rapport à tous les autres traitements. Il y a 1,59 me 1,45 me 1,40 me et 1,72 me/100g d'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 54,21 me de bicarbonates qui proviennent du sol. C'est 75,3 fois plus qu'avec le lessivat de solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Après percolation avec la deuxième dose, les teneurs en bicarbonates sont maximum aux niveaux 1,2,3 par rapport à tous les autres traitements mais un peu plus faible qu'après la percolation de la 1ère dose. On note 0,99 me 1,18 me 1,07 et 1,18 me/100g de plus de bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol originel. En même temps l'analyse du lessivat montre 6,26 me de plus de bicarbonate qui provient du sol par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Cependant après percolation avec la 3ème dose il y a un maximum d'accumulation des bicarbonates avec la matière organique par rapport à tous les autres traitements. Il y a 0,6 me 1,34 me 1,47 me et 1,82 me/100 g d'accumulation des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol originel. La présence de la matière organique se traduit par un enrichissement des niveaux situés en profondeur en ion bicarbonates en particulier avec la dose 3. Les bicarbonates formés migrent donc vers le bas. L'analyse du lessivat montre 6,62 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

La comparaison entre D1 et D2 dans le sol nous montre que lors de la percolation D2 les bicarbonates formés lors de l'apport de D1 sont entraînés; avec D3 cette dissolution croît en surface et les bicarbonates solubles s'accumulent en profondeur. L'analyse du lessivat (D1,D2,D3) montre respectivement 7,3 fois, 5,2 fois 5,3 fois plus de bicarbonates entraînés par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Lorsque la solution de lessivage est riche en alcalino-terreux ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Mg SO}_4$ 20 me/l $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{5}{20}$ SAR = 1,6) il y a dans D1 un peu de lessivage des bicarbonates. Après percolation avec cette première dose on note 0,27 me 0,30 me 0,09 et 0,29 me/100 g de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol originel.

L'analyse du lessivat montre que 0,9 me de bicarbonates ont été entraînés provenant du sol.

Après l'apport de la 2ème dose il y a un maximum de lessivage des bicarbonates par rapport à tous les autres traitements. Il y a 0,9 me 0,92 me 1,36 me et 1,08 me/100 g de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat montre 1,24 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

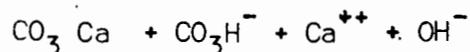
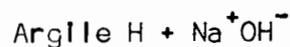
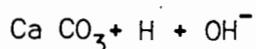
Après percolation avec la 3^{ème} dose, il y a un léger enrichissement en bicarbonates par rapport à dose D2. Il y a 0,8 me 0,83 me 0,91 me et 0,93 me/100 g de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 0,98 me de bicarbonate qui provient du sol. C'est le minimum d'entraînement des bicarbonates par rapport à tous les lessivats de dose 3. Contrairement aux solutions précédentes, il y a seulement lessivage du carbonate soluble préexistant mais pas d'attaque du calcaire du sol.

Dans le cas de percolation avec l'eau distillée, il y a un lessivage croissant des bicarbonates. Avec chaque nouvelle dose de lessivage il y a diminution des bicarbonates dans les profils. Après percolation avec la première dose, il y a 0,67 me 0,56 me 0,45 et 0,55 me/100 g de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 1,44 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

Après percolation avec la 2^{ème} dose de lessivage, il y a 0,68 me 0,81 me 0,85 me et 0,7 me/100 g de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 3,73 me de bicarbonates qui provient du sol.

Avec la dose D3 c'est l'eau distillée qui donne le maximum de lessivage des bicarbonates aux niveaux 0,1,2 par rapport à tous les autres traitements. L'analyse du lessivat montre 1,99 me de bicarbonates qui proviennent du sol.

Après l'apport de la première dose, les sels neutres sont entraînés et après percolation avec la deuxième dose, il y a hydrolyse des sels de Na, du sol avec formation d'hydroxyde de Na et aussi légèrement du calcaire



qu'il facilite l'entraînement des carbonates et l'augmentation du pH (le pH du lessivat avec l'eau distillée = 8,0) tandis que pH des lessivats avec les solutions salines = 7,0 ou moins.

L'analyse du sol montre plus de Ca + Mg échangeable aux niveaux 0 et 1 par rapport au sol original ce qui est conforme à cette réaction.

Conclusions.

1- Les solutions riches en sodium et pauvres en alcalino-terreux de SAR = 12,6 provoquent un lessivage des bicarbonates très important, provenant en majeure partie de la dissolution du calcaire et en même temps il y a formation de bicarbonate supplémentaire dans le sol, qui est entraîné avec les doses successives.

2- L'addition de 15 me/l de gypse dans le cas de solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ (SAR = 6,3 définitif) diminue la formation de bicarbonates par solubilisation de $CaCO_3$ et par là même diminue l'entraînement des bicarbonates dans les lessivats (en totalité 3-4 fois moins que précédemment). Dans le sol il y a également légère tendance de dépôt de bicarbonate suite de lessivage.

3- Les solutions également riches en NaCl et alcalino-terreux de SAR=5 entraînent à peu près 3 fois moins de bicarbonates dans les lessivats par rapport à ceux du traitement avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$. La dissolution du calcaire est plus faible, il n'y a aucune tendance d'accumulation de bicarbonate dans le sol mais au contraire lessivage par rapport au sol original.

4- L'addition de 5 me/l de gypse dans la solution de lessivage de SAR = 5 (SAR définitif = 4,2) diminue encore les teneurs en bicarbonates dans les lessivats par rapport au lessivat de solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Dans le sol en raison d'une perméabilité meilleure et d'une dissolution du calcaire plus faible le bicarbonate résiduel est plus faible, que dans le traitement précédent.

5- L'apport de 5% de matière organique dans la solution de lessivage de rapport $\frac{12,5}{12,5}$ provoque plus d'entraînement des bicarbonates de calcium provenant du calcaire dans les lessivats D1, D2, D3 (75,3 fois, 5,2 fois, 5,3 fois respectivement).

En même temps il reste le maximum de bicarbonates dans le sol qui dépasse la dose d'origine.

6- Les solutions riches en alcalino-terreux et pauvres en sodium de SAR = 1,6 diminuent considérablement les teneurs en bicarbonates dans les lessivats (ou il y a seulement entraînement des bicarbonates solubles préexistants) et ne provoquent pas de dissolution du calcaire. Dans le sol on ne note pas d'accumulation mais seulement un lessivage des bicarbonates préexistants¹.

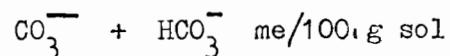
7- L'eau distillée provoque un lessivage des bicarbonates solubles préexistant mais également une légère dissolution des carbonates provenant du calcaire. Les teneurs en bicarbonates dans les lessivats sont intermédiaires entre les traitements riches en sodium d'une part et riches en alcalino-terreux d'autre part.

1- Fréquemment on peut noter des irrégularités dans le lessivage du bicarbonate du sol, en raison d'une légère dissolution du calcaire liée à l'action de la matière organique d'origine du sol (4%).

TABLEAU XVII- Teneurs en CO_3 et HCO_3 (me) soluble dans les lessivats - Sol artificiellement salé

Dose de lessivage Solution de traitement	D1	D2	D3
NaCl 20 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l + MgSO_4 2,5 me/l	2,21	3,67	3,72
NaCl 20 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l + MgSO_4 2,5 me/l + + gypse 15 me/l	0,90	0,69	1,24
NaCl 12,5 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l + MgSO_4 6,24 me/l	0,72	1,49	1,24
NaCl 12,5 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l + MgSO_4 6,25 me/l + + gypse 5 me/l	0,54	1,24	1,22
NaCl 12,5 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l + MgSO_4 6,25 me/l + M.O 5 %	54,21	7,75	6,62
NaCl 5 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10 me/l + MgSO_4 10 me/l	0,9	1,24	0,98
témoin l'eau distillée	1,44	3,73	1,99

PAPLEAU XVIII REPARTITION DES CARBONATES ET BICARBONATES SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE
SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE



Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	NaCl 20me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5 MgSO ₄ 2,5 +15 me/l gypse	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 MgSO ₄ 6,25	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 MgSO ₄ 6,25 +5me/l gypse	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25 MgSO ₄ 6,25me/l +M.O 5%	NaCl 5me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 10me/l MgSO ₄ 10me/l	témoin H ₂ O
500 ml	0-10	3,27	2,42	2,18	2,70	4,70	2,84	2,44
	10-20	3,39	2,46	2,33	2,66	4,56	2,81	2,55
	20-30	3,43	3,42	2,26	3,12	4,51	3,02	2,66
	30-40	3,59	3,77	2,34	3,20	4,83	2,82	2,66
1000 ml	0-10	2,72	4,19	3,01	3,64	4,10	1,94	2,43
	10-20	2,63	3,76	2,93	3,56	4,29	1,89	2,30
	20-30	2,49	4,04	2,96	3,55	4,18	1,76	2,26
	30-40	2,35	3,87	3,01	3,68	4,29	1,74	2,41
1500 ml	0-10	3,27	3,24	2,59	2,52	3,71	2,31	2,12
	10-20	3,22	3,12	2,66	2,40	4,45	2,28	2,22
	20-30	3,12	2,17	2,63	2,38	4,58	2,20	2,15
	30-40	2,96	2,08	2,69	2,53	4,93	2,18	2,24

G. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN CARBONE mgm/l DES ACIDES HUMIQUES ET DES ACIDES FULVIQUES DANS LES DIFFERENTS LESSIVATS.

Les lessivats que nous avons recueillis étaient jaunes en début de lessivage (D1). Après percolation avec les 2^e et 3^e doses il y avait une diminution progressive de la couleur jaune. Nous avons constaté que cette couleur est due à la présence d'acides fulviques.

Cependant dans le cas où nous avons ajouté de la matière organique au sol, la couleur du lessivat, jaune au début de l'expérience, est devenue ensuite plus brune, ce qui est dû, d'après l'analyse du lessivat, à la présence d'un mélange d'acides humiques et d'acides fulviques. On observe aussi dans les lessivats des complexes humo-fulviques, produits intermédiaires entre AF et AH, solubles dans les solutions alcalines, et non précipitables par les acides concentrés. On les appelle aussi précurseurs des acides humiques.

Dans la colonne contenant la matière organique, l'analyse du lessivat nous montre que très peu des acides humiques sont lessivés avec la première dose. Avec D2 et D3 il n'y a pas de lessivage des acides humiques. Par contre, les acides fulviques sont lessivés en grosse quantité avec D1, D2, D3.

En comparaison avec l'eau pure, les solutions de lessivage riches en sodium, diminuent le lessivage des acides fulviques pour D1 mais ces acides fulviques sont récupérés ensuite avec D2 et D3.

Les solutions riches en Ca^{++} diminuent la solubilité des acides fulviques D1 mais également dans D2 et D3.

Les solutions riches en Ca^{++} montrent une diminution en solubilité des A.F., par rapport aux solutions riches en Na^+ . C'est dans l'eau pure qu'il y a un maximum de lessivage des AF dans D1.

Dans les régions tropicales, en particulier pour l'humus formé sous forêt, les acides humiques relativement peu abondants sont localisés dans les couches superficielles du sol alors que les acides fulviques sont dominants et se retrouvent seuls, en profondeur (G.AUBERT).

lessivats

Fig. 9 Teneur en Carbone mg/l des acides fulviques dans les différents lessivats après lessivage avec solutions salines

D1, D2, D3 de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

(échelle 20 fois plus petite dans le cas de matière organique)

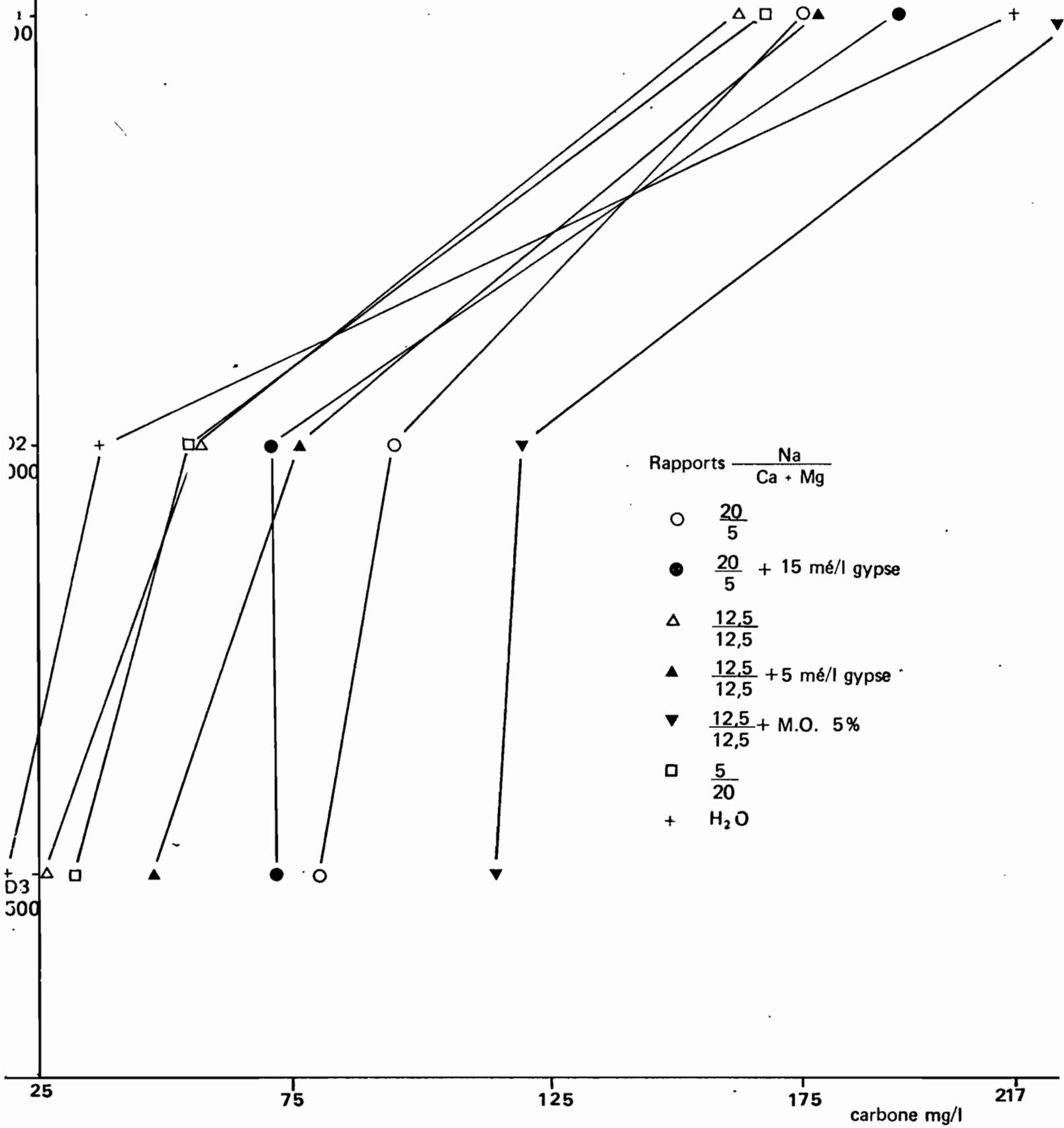


TABLEAU XIX - Teneurs en Carbone mgme/l des acides Humiques et des acides Fulviques dans les différents lessivats

Dose de lessivage	D1		D2		D3	
Matière Humique Solution de traitement	Carbone des AH	Carbone des AF	Carbone des AH	Carbone des AF	Carbone des AH	Carbone des AF
NaCl 20meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l	33,75	175,25		95,00	6,75	80,25
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l + 15 meq/l gypse	33,00	194,50		71,00		72,00
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25meq/l MgSO ₄ 6,25 meq/l	39,75	162,75		56,00		26,50
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25meq/l + MgSO ₄ 6,25meq/l + + 5 meq/l gypse	45,50	178,50		76,00		47,50
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25meq/l + MgSO ₄ 6,25 meq/l + M.O 5 %	597,00	2433,00	46,66	262,34	35,20	184,8
NaCl 5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 10meq/l + MgSO ₄ 10 meq/l	40,25	167,75		55,00		32,00
témoin l'eau distillée		217,00		38,50		19,00

DEUXIEME PARTIE

Evolution d'un échantillon de sol salin de Tunisie, au cours de son lessivage par des eaux diversement minéralisées.

I - SCHEMA ET MISE EN PLACE DE L'EXPERIMENTATION.

A - ORIGINE DU SOL.

Comme nous voulions étudier les mouvements descendant des sels solubles en général et la dynamique du carbonate de calcium en particulier, nous avons choisi un autre profil avec des quantités différentes de calcaire (9,2%) par rapport à celui de l'expérience précédente (18,2%). Il s'agit d'un sol très salé, de texture sablo-argileuse et contenant du gypse (10,3%). Il provient de Oum-el-Arnob, région de la Sebhet de Sidi-el-Hani, centre sud de Tunisie (*). C'est une région de dépression entourée de chaînes de collines.

L'eau de pluie venant des collines sur lesquelles le ruissellement est interne s'accumule dans cette zone basse provoquant des phénomènes d'hydromorphie temporaire.

La pluviométrie est de l'ordre de 200 à 250 mm et la température fraîche en hiver est très élevée (40 à 45°) pendant l'été qui est très sec.

B - COMPOSITIONS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DE L'ECHANTILLON.

L'échantillon qui nous a servi pour confectionner les colonnes de terre comme précédemment est celui de surface (0 à 30 cm).

Les méthodes d'analyse sont les mêmes que dans l'expérience précédente.

(*) - Ce sol nous a été fourni par M.P. Roederer, alors Chef de la mission ORSTOM en Tunisie. Nous le remercions vivement de son obligeance.

TABLEAU XX- Analyse granulométrique de sol de Tunisie

Humidité	3,97
Argile	19,45
Limon fin	14,04
Limon Grossier	9,06
Sable fin	43,08
Sable grossier	9,60
Analyse minéralogique	illite, kaolinite Montmorillonite calcite, gypse
M.O	0,8 ‰
Fer total	1,8 ‰
Fer libre	0,55 ‰
Gypse	10,3 ‰
Indice d'instabilité	6,6 ‰

TABLEAU XXI - Analyse chimique du sol de Tunisie

Cations échangeables		
me/100 g		
Ca ⁺⁺		15,75
Mg ⁺⁺		6,93
K ⁺		1,25
Na ⁺		2,00
T		24
S		25,91
Sels solubles Totaux		
me/100 g (extraits $\frac{1}{10}$ + NH ₄ NO ₃ N)		
Ca ⁺⁺		93,00
Mg ⁺⁺		6,60
K ⁺		0,77
Na ⁺		12,50
CO ₃ ⁻⁻		0,20
HCO ₃ ⁻		0,70
Cl ⁻		11,25
SO ₄ ⁻⁻		98,00
EC ₂		47,21
extr. saturé à partir de extr. $\frac{1}{2}$		
pH	l'eau	8,4
1 : 2,50	KCl	8,2
CaCO ₃	Total %	9,2
CaCO ₃	actif	5,3

Les résultats du tableau XXI montrent que le complexe est saturé en Ca et Mg. Le sol est riche en sulfates et chlorures solubles.

II - NATURE ET CONCENTRATIONS DES SOLUTIONS UTILISEES.

Nous avons choisi des solutions de lessivage dont la composition soit comparable à celles de nappes phréatiques de nombreuses régions de Tunisie. Pour la deuxième expérience nous avons préparé sept solutions dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau XXI.

L'eau distillée utilisée a été dégazée par ébullition, afin d'éviter une précipitation éventuelle de CaCO_3 dans les solutions riches en calcium.

Nous avons ajusté la concentration totale des solutions entre 25 me/l et 50 me/l ce qui est assez proche de la concentration des nappes salées de diverses régions de Tunisie.

Dans certains traitements nous avons ajouté au sol 5% de poids sec de matière organique constituée de feuilles de luzerne coupées très finement. Dans d'autres cas nous avons ajouté seulement 1% de M.O. Comme dans l'expérience précédente nous avons choisi cette matière organique facilement fermentescible qui fournit des acides organiques et du CO_2 agissant sur la dissolution du calcaire.

Pour faciliter la décomposition de la matière organique nous avons mélangé 50 mg/l de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ avec la solution d'irrigation, dans le cas d'apport de M.O.

III - MODE OPERATOIRE POUR LA REALISATION DU LESSIVAGE.

Le mode opératoire est le même que dans le cas précédent, mais il y a à la base des colonnes de 2 cm de sable au lieu de 5 cm.

Nous avons recueilli le filtrat dans des fioles jaugées que nous avons couvert par des feuilles d'aluminium pour empêcher la croissance d'algues qui risquent d'apparaître surtout dans les filtrats d'échantillons additionnés de matière organique.

TABLEAU xxii- Nature et concentrations des solutions utilisées

Solution des différents traitements	pH	Concentration totale	Degré d'alcalisation probable du sol		SAR
			$\frac{Na}{T}$ Bower	$\frac{Na}{T}$ CRUESI	
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l	6,3	25 me/l	15	12	12,6
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l + M.O 5 %	6,3	25 me/l	15	12	12,6
NaCl 40 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 5 meq/l + MgSO ₄ 5 meq/l	6,5	50 me/l	20,2	17,2	18,0
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 meq/l MgSO ₄ 6,25 meq/l	7,3	25 me/l	5,7	4,3	5,0
NaCl 12,5 meq/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 meq/l MgSO ₄ 6,25 meq/l + M.O 5 %	7,3	25 me/l	5,7	4,3	5,0
NaCl 25 meq/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 meq/l MgSO ₄ 12,5 meq/l	7,5	50 me/l	8,4	6,4	7,1
NaCl 25 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 meq/l MgSO ₄ 12,5 meq/l + M.O 5 %	7,5	50 me/l	8,4	6,4	7,1
témoin l'eau distillée	6,2				

A. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFÉRENTES FORMES DU SODIUM DANS LE SOL.

Le sol contient 12,5 me de sodium soluble et 2 me de sodium échangeable pour 100 g de sol au début de l'expérience.

Dans le cas de solution à dominance sodique, de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = 20$ (SAR = 12,6) après percolation avec la 1ère dose il y a un fort lessivage (90%) de sodium soluble tout le long du profil par rapport au sol originel. L'analyse du lessivat montre 57,24 me de sodium qui proviennent du sol. Il y a 1,88 me de plus de sodium par rapport au lessivat de l'eau distillée.

En même temps il y a un lessivage de Na^+ échangeable assez important, tout le long du profil par rapport au sol originel. Il y a 0,65 me/100 g de sodium échangeable aux niveaux 0 et 1 et des valeurs très voisines aux niveaux 2 et 3 soit un peu moins du tiers de la valeur d'origine.

Après l'apport de la 2ème dose, il y a une légère augmentation de Na^+ soluble (0,15 me/100 g) en surface (niveau 0) et léger lessivage de sodium vers la profondeur par rapport à la 1ère dose. L'analyse du lessivat montre 2 me de Na^+ qui proviennent du sol.

En même temps il y a une légère augmentation de Na^+ échangeable 0,10 me/100 g au niveau zéro et 1 par rapport à la 1ère dose. Aux niveaux 2 et 3 les valeurs de Na^+ échangeable ne sont pratiquement pas modifiées.

Après la percolation avec la 3ème dose, le sol pratiquement s'équilibre avec la solution de lessivage ajouté. Il y a très peu d'augmentation (0,05 me/100 g) de Na^+ soluble à niveau zéro. L'analyse du lessivat montre 2 me de Na^+ provenant du sol ce qui prouve que le lessivage de Na continu. Le Na^+ ici essentiellement sous forme de NaCl se lessive très vite.

L'enfouissement de matière organique (5 p.100) dans le cas de la solution précédente de SAR = 12,6 permet un entraînement plus important du sodium soluble par la 1ère dose, ceci dès le niveau 0 et il y a plus de Na⁺ lessivé aux niveaux 1 et 2. L'analyse du lessivat simple montre 3 me de plus de Na qui proviennent du sol par rapport au lessivat de solution simple $\frac{20}{5}$.

En même temps il y a davantage d'entraînement de Na⁺ échangeable tout le long du profil par rapport au cas précédent.

Après la percolation avec la 2ème dose on observe un lessivage supplémentaire à la surface (0,25 me/100 g) et une légère accumulation de Na⁺ soluble en profondeur par rapport à la 1ère dose. L'analyse du lessivat montre 2 me de Na⁺ comme dans le cas précédent.

En même temps il y a davantage d'entraînement de Na⁺ échangeable aux niveaux 0,1,2 par rapport à ce qui était obtenu avec la même solution mais sans enfouissement de matière organique.

Après percolation avec la 3ème dose il y a légère rétention (0,3 me/100 g) de Na⁺ soluble à la surface par rapport à la 2ème dose. L'analyse de lessivats montre 0,25 me de moins de Na⁺ par rapport au cas précédent.

Avec cette dose D3 on obtient aussi un entraînement plus poussé du profil par rapport au sol non enrichi en matière organique.

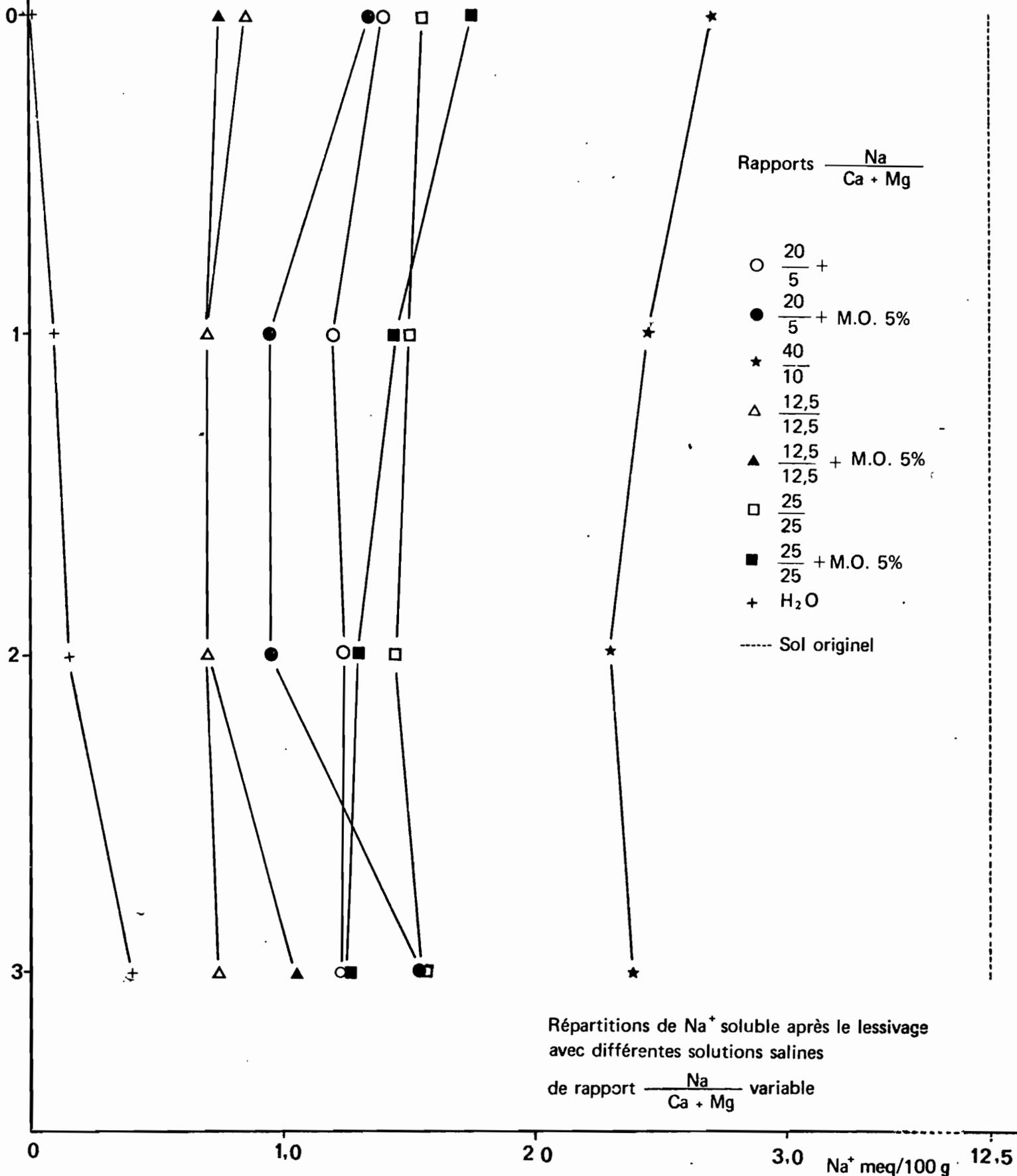
En moyenne avec la matière organique, il y a une différence peu importante sur le sodium soluble, par contre la diminution du Na échangeable est plus nette.

Dans le cas de solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 l'enfouissement de 1% de matière organique montre qu'après percolation avec la 1ère dose de 230 me, la teneur de sodium soluble au niveau 0 (1,40 me/100 g) est la même que celle obtenue avec la même solution mais sans apport de matière organique. La présence de matière organique provoque par contre un lessivage croissant de sodium soluble vers la profondeur (niveaux 1,2,3). Dans les sols gypseux, comme ceux de Tunisie on observe que l'addition de 1% de matière organique est plus intéressant que 5% M.O. L'addition de fortes quantités de matière organique provoque des phénomènes de sulfato-réduction qui ont

niveau de profondeur (intervalles = 10 cm)

Fig. 11 (1)
Sol très salé de Tunisie

Dose D1



niveau de
profondeur

Fig. 11 (2)

Dose D2

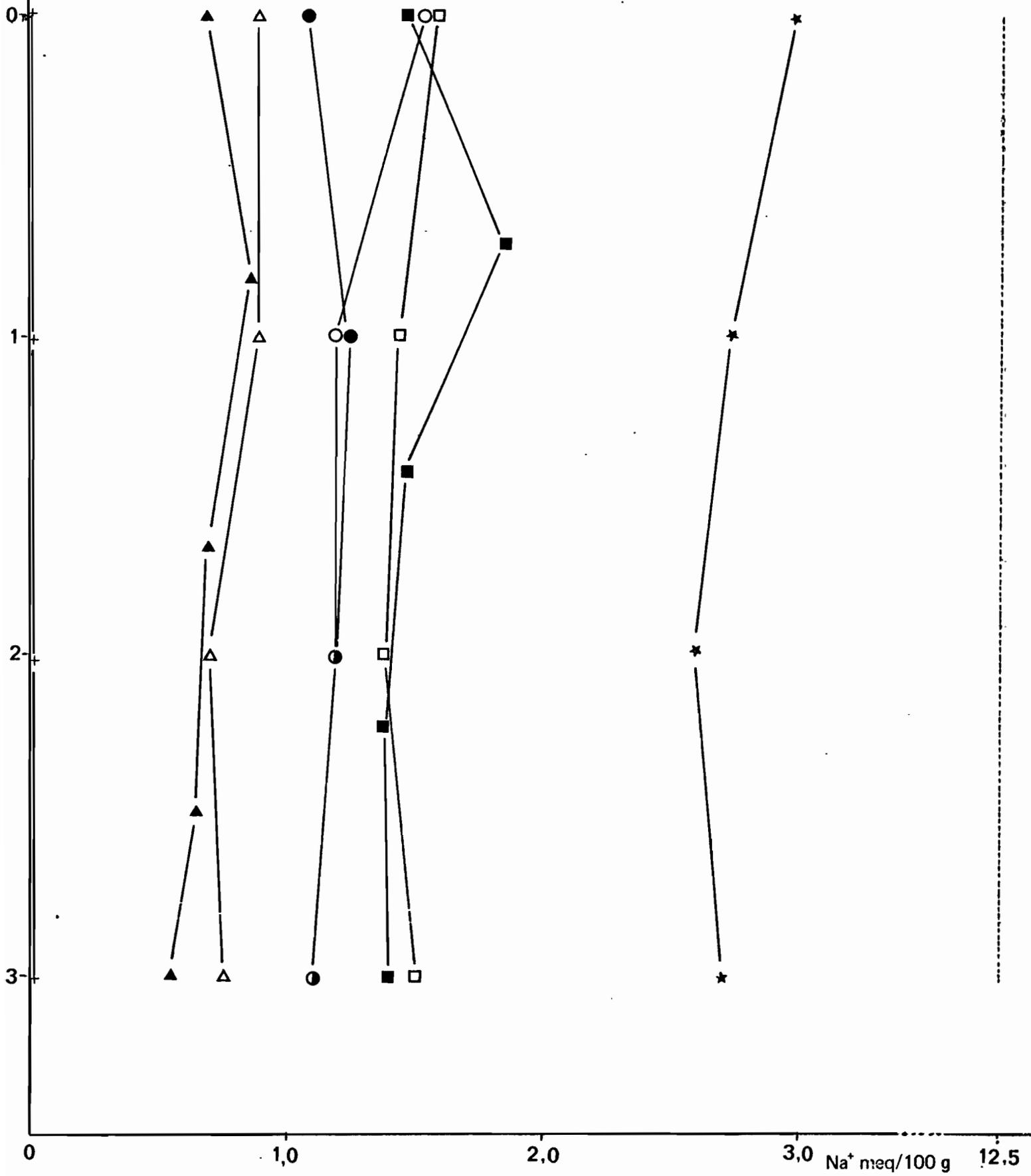
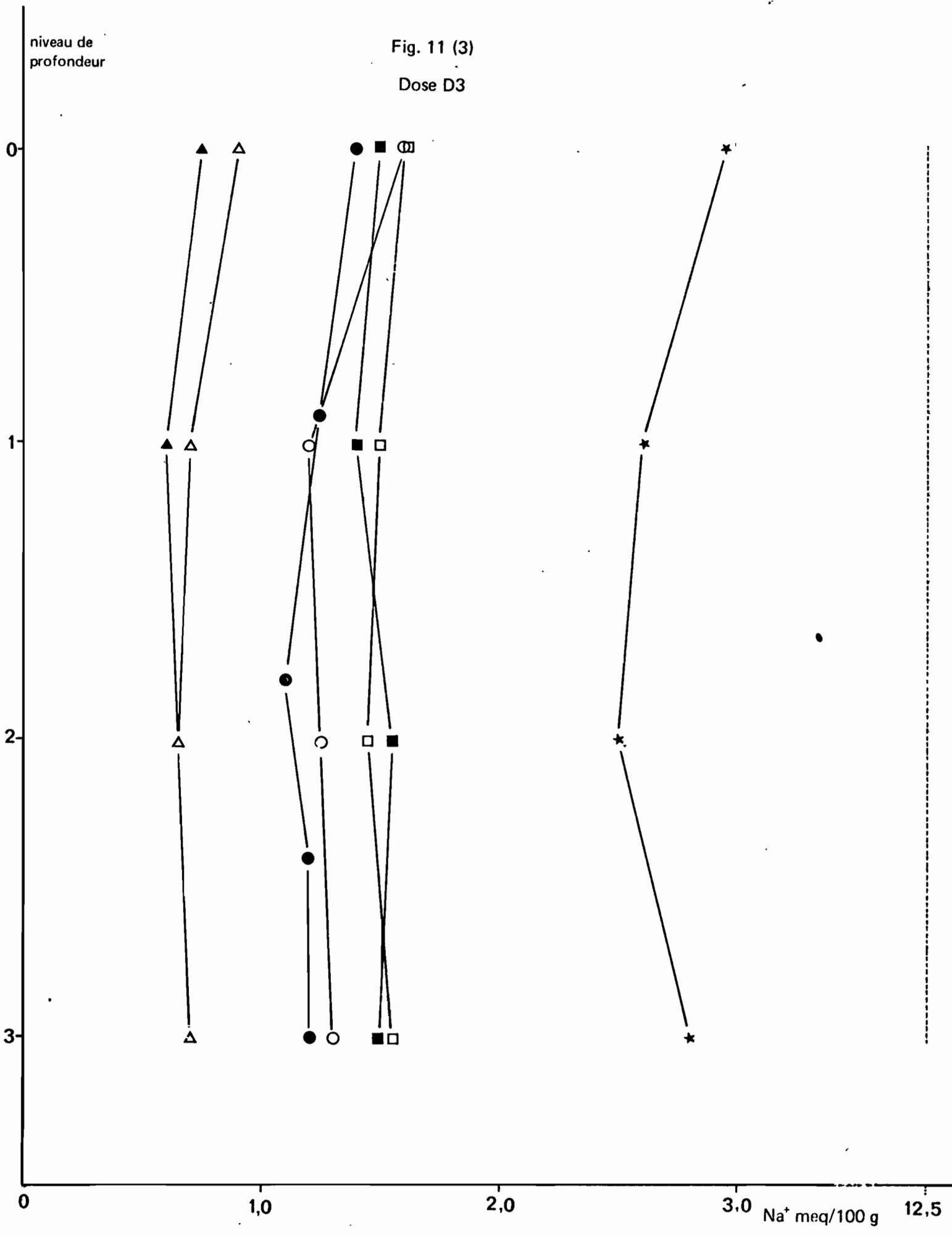


Fig. 11 (3)
Dose D3



un effet ralentissant et qui sont dangereux pour la culture parce qu'il y a apparition de sulfures de fer autour des racines (colonnes).

L'analyse des lessivats montre que les premières quantités recueillies sont très chargées en sodium, mais la 1ère dose (50 ml) n'est pas suffisante pour enlever tout le sodium soluble du profil.

En même temps il y a diminution de Na^+ échangeable tout le long du profil.

TABLEAU XIII - TENEUR EN Na^+ DANS LE SOL (D1) ET LES LESSIVATS PARTIELS DE SOLUTION DE RAPPORT $\frac{20}{5} + 1\%$ M.O.

Profondeur en cm	0 - 10 cm	10 - 20 cm	20 - 30 cm	30 - 40 cm
Na soluble me/100g	1,40	1,25	1,10	1,10
Na^+ échangeable me/100g	0,65	0,60	0,60	0,65
Solution de traitement	Teneur en Na^+ (mé) dans les différents lessivats			
Dose de lessivage	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml
NaCl 20 me/l+ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l+ MgSO_4 2,5me/l+ 1% M.O.	36,96	16,90	4,74	2,05

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ (SAR = 18) après percolation avec la première dose il y a encore un fort lessivage de sodium soluble par rapport à la teneur d'origine mais en même temps le sol retient 2 à 3 fois plus de sodium soluble par rapport aux autres traitements salins. L'analyse du lessivat montre 3,04 me de plus de Na^+ par rapport au lessivat de la solution $\frac{20}{5}$. C'est à dire que cette solution augmente le lessivage de Na^+ qui est associé avec les autres anions.

En même temps il y a fort lessivage de Na^+ échangeable mais le taux de Na^+ échangeable reste supérieur à celui de tous les autres traitements salins. C'est à dire qu'il y a moins de lessivage de sodium échangeable par rapport à toutes les solutions salines, les teneurs restant cependant peu différentes de celles de la solution $\frac{20}{5}$, malgré un SAR beaucoup plus élevé (18 au lieu de 12,6).

Les différentes doses ne modifient pas beaucoup les équilibres obtenus avec la première dose (Na^+ soluble et échangeable). Le sol demeure plus riche en sodium qu'avec les autres solutions.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en bases alcalines et alcalino-terreux de moyenne concentration $Na = 12,5 \text{ me/l}$; $Ca+Mg = 12,5 \text{ me/l}$ $\frac{Na}{Ca+Mg} = 1$ SAR = 5, la teneur en sodium soluble s'équilibre à un niveau plus faible dès l'application de la première dose, (0,75 me/100g en surface, 0,7 me/100g aux niveaux 1 et 2 et 0,75 me/100g au niveau 3). Il est bien inférieur à celui obtenu avec tous les autres traitements salins. L'analyse du lessivat montre un net entraînement supérieur de 4,83 me de Na qui provient du sol à celui obtenu avec le traitement $\frac{20}{5}$.

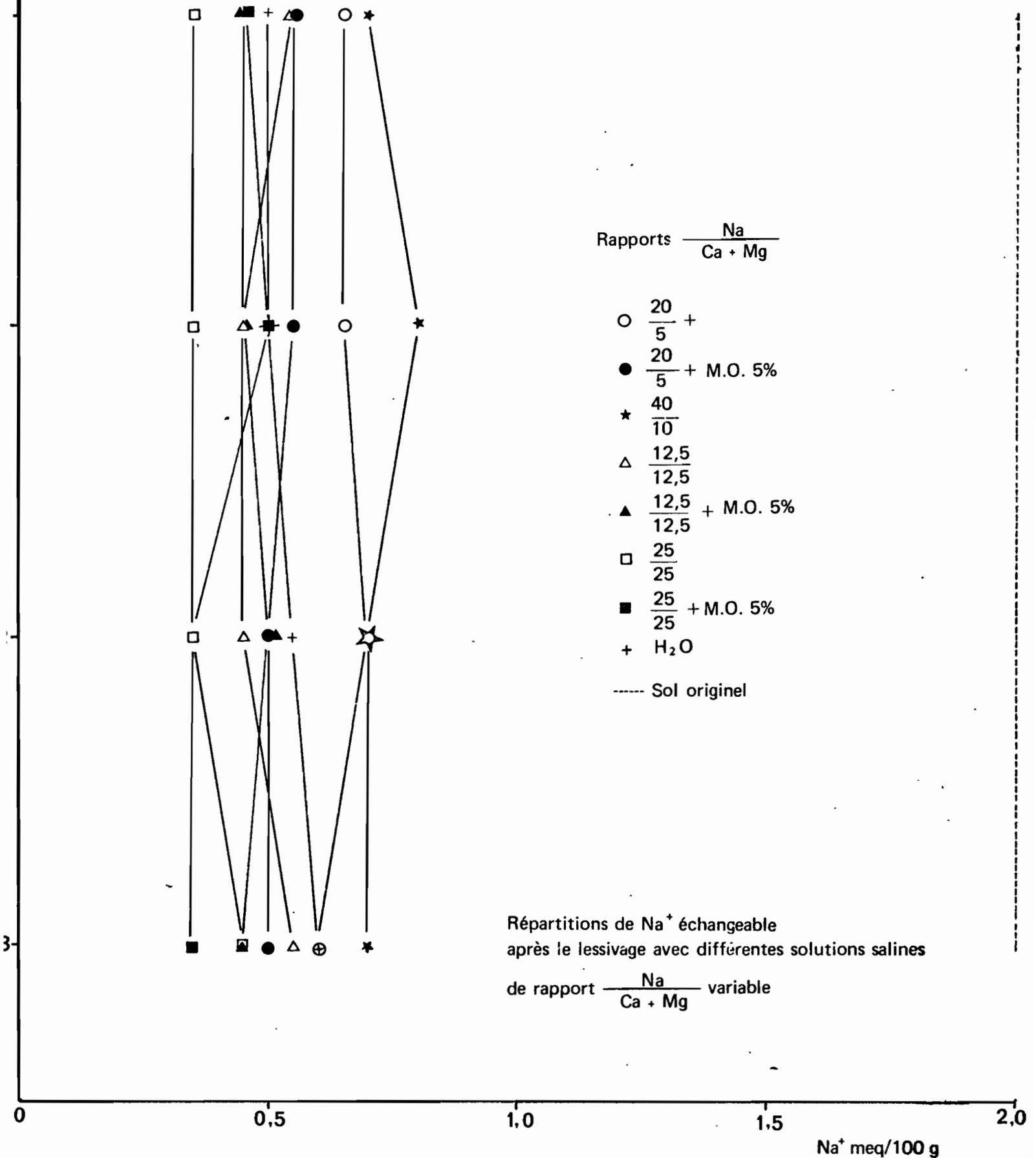
En même temps il y a plus de lessivage de Na^+ échangeable par rapport au traitement $\frac{20}{5}$.

Après percolation avec les 2ème et 3ème doses les courbes de Na^+ solubles sont très proches les unes des autres. L'analyse du lessivat montre 2,41 mé et 2,91 mé de Na^+ respectivement.

niveau de
profondeur

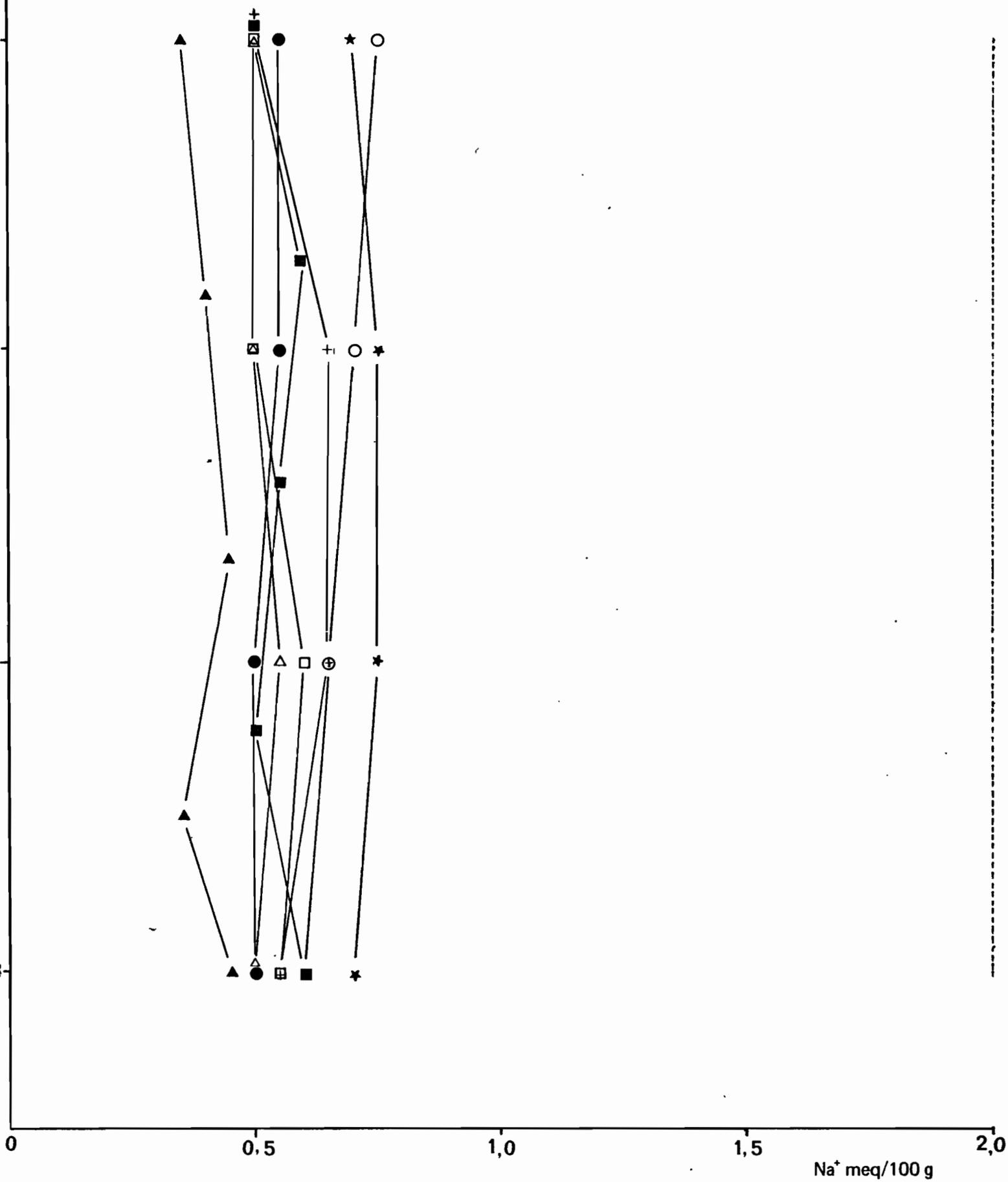
Fig. 12 (1)
Sol très salé de Tunisie

Dose D1



niveau de
profondeur

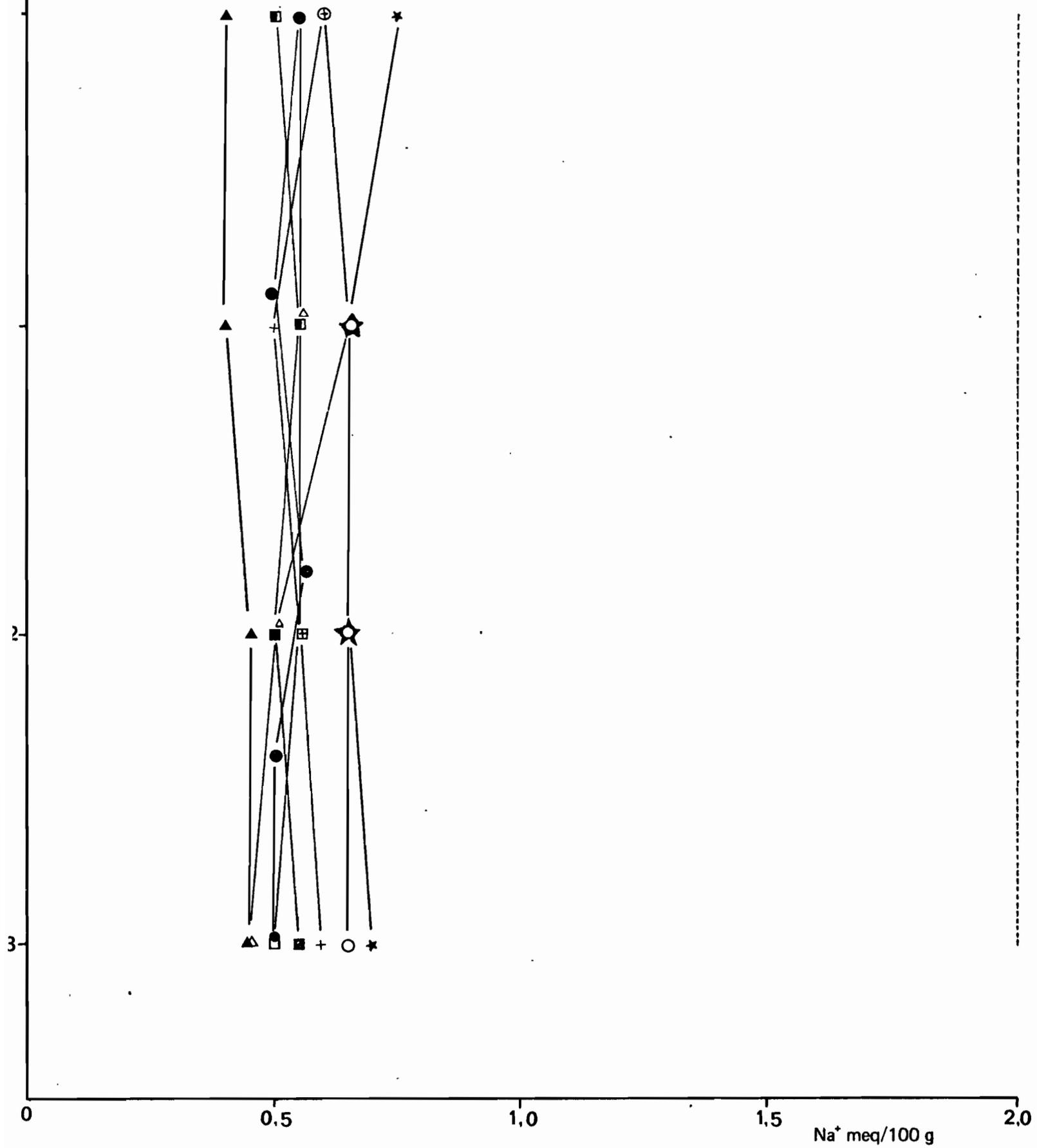
Fig. 12 (2)
Dose D2



niveau de
profondeur

Fig. 12 (3)

Dose D3



De même les teneurs en Na^+ échangeable restent les mêmes avec les 2ème et 3ème doses; elles sont aussi un peu plus faibles que dans les cas précédents.

L'enfouissement de matière organique permet plus d'entraînement de sodium soluble par rapport à toutes les autres solutions salines. Il y a un peu plus de lessivage de sodium soluble en surface (niveau 0) qu'avec la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$ et moins en profondeur. L'analyse du lessivat montre 8,37 mé de moins de Na^+ qui provient du sol que dans le lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. En même temps il y a lessivage important de Na échangeable.

Avec les autres solutions D2 et D3 les teneurs en Na^+ solubles restent voisins du traitement $\frac{12,5}{12,5}$, par contre les teneurs en Na^+ échangeable diminuent nettement à la suite de l'enfouissement de la matière organique.

En moyenne pour la solution $\frac{12,5}{12,5}$ l'addition de matière organique diminue un peu le sodium soluble mais plus nettement le Na^+ échangeable.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en bases alcalines et alcalino-terreux de forte concentration ($\text{Na} = 25 \text{ me/l}$; $\text{Ca} + \text{Mg} = 25 \text{ me/l}$) $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = 1 \text{ SAR} = 7$ dès l'application de la première dose le sol s'équilibre en sodium soluble mais à un niveau plus élevé que pour la solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$

Il y a maximum de lessivage de Na^+ échangeable aux niveaux 0, 1,2 par rapport à toutes les solutions.

Après percolation avec la 2ème dose il y a très peu de lessivage de Na^+ soluble par rapport à la première dose. Quant au sodium échangeable il présente une légère augmentation le long du profil par rapport aux valeurs obtenues après la première dose.

Après percolation avec la troisième dose, la valeur de sodium soluble reste la même qu'avec la première irrigation. Le Na^+ soluble demeure à un niveau assez élevé de la solution $\frac{20}{5}$.

Quant au Na^+ échangeable, ses valeurs demeurent intermédiaires et voisines de celles du traitement $\frac{12,5}{12,5}$.

L'analyse des lessivats est fonction des quantités de sodium introduit par les solutions de percolation. Quant au sodium lessivé provenant du sol il ne présente pas de variations très caractéristiques en fonction des traitements sauf pour l'eau distillée.

En définitive, pour la plus forte dose D3 les teneurs en sodium soluble dans le sol s'équilibrent en fonction de la richesse des solutions en Na^+ , indépendamment des rapports monovalents sur bivalents, par contre les teneurs en Na^+ échangeable tout en étant dans un ordre assez voisin varient peu d'un traitement à l'autre.

Ce résultat est du vraisemblablement à la très forte concentration en calcium soluble dans le sol.

Dans le cas de solution de rapport alcalin/alcalino-terreux égal et de forte concentration $\frac{25}{25}$ SAR = 7 avec addition de matière organique 5% après percolation avec la 1ère dose on observe un fort lessivage de Na^+ soluble par rapport au sol original. Aux niveaux 1,2,3 il y a plus de lessivage de Na^+ soluble par rapport à solution $\frac{25}{25}$.

En surface le Na^+ échangeable est plus fort que dans le cas précédent et il ne devient plus faible qu'en profondeur (niveau 3).

Néanmoins, ces différences restent très limitées et avec les 2ème et 3ème doses elles s'atténuent aussi bien pour le Na soluble que pour le Na échangeable par rapport à la solution sans matière organique. L'analyse des lessivats ne montre pas de différence.

Là encore, il y a un équilibre de sels solubles comme pour la solution précédente bien caractéristique.

Quant au Na^+ échangeable c'est surtout la force ionique des solutions et peut-être, la dissolution du calcaire qui aboutissent à une baisse importante de cet élément.

Dans le cas de l'eau distillée après percolation avec la première dose il y a 100% 99% 99/97% de lessivage de sodium soluble aux niveaux 0,1,2,3 respectivement. L'analyse du lessivat montre 55,36 me de sodium.

En même temps il y a respectivement 75% 72,5 72,5 et 70% de lessivage de Na^+ échangeable aux niveaux 0,1,2,3.

Avec les doses successives il y a peu de changement par rapport à la première dose.

L'eau distillée lessive complètement Na^+ soluble, provoque une très forte diminution du Na^+ échangeable du sol originel mais le maintient à un niveau moyen par rapport aux autres solutions salines.

Conclusions.

1- La percolation du sol par des solutions riches en sels de sodium et pauvres en alcalino-terreux de SAR = 12,6, réalise un fort lessivage de Na^+ soluble et une diminution importante du Na^+ échangeable par rapport au sol originel.

2- Les solutions riches en sels de sodium et pauvres en alcalino-terreux, en présence de 5% de matière organique provoquent un lessivage de Na^+ soluble à peine plus important que la solution précédente; le Na^+ échangeable résiduel est cependant un peu plus faible.

3- Les solutions riches en sels de sodium et pauvres en alcalino-terreux en présence de 1% de matière organique montrent que les premiers lessivats recueillis en petite quantité sont très chargés en sodium.

4- L'accroissement de concentration totale de ces solutions riches en sodium montre que plus les solutions sont riches en sodium (SAR = 18), plus après lessivage il y a rétention de sodium soluble par le sol. Le Na^+ échangeable ne montre que peu de variations par rapport aux solutions précédentes de SAR plus faible, mais il est néanmoins un peu plus élevé.

5 - Les solutions également riches en sels de sodium et en alcalino-terreux, de concentration moyenne, de SAR = 5 provoquent un maximum de lessivage de Na^+ soluble par rapport aux autres solutions salines sans matière organique. Le sodium échangeable diminue dans des proportions équivalentes aux autres solutions, mais est un peu plus faible.

6 - Dans le cas des solutions également riches en sels de sodium et en alcalino-terreux de concentration moyenne, de SAR = 5 l'apport de matière organique accroît légèrement le lessivage de Na^+ soluble dans le sol par rapport aux solutions sans matière organique. Le sodium échangeable est également le plus faible aux fortes doses. L'appauvrissement global en Na^+ est le plus fort de toutes les solutions salines.

7 - Les solutions également riches en sels de sodium et en alcalino-terreux, de forte concentration, de SAR = 7 montrent que l'augmentation du taux d'alcalino-terreux n'a pas d'action sur la diminution du taux de Na^+ soluble même en présence de matière organique. Au contraire ces taux augmentent en fonction de la teneur en Na^+ de la solution de percolation.

8 - C'est l'eau distillée qui a le pouvoir lessivant du sodium soluble, le plus fort.

En moyenne, toutes les solutions salines lessivent fortement le sodium soluble par rapport au taux d'origine. Les teneurs résiduelles dans le sol sont fonction de la teneur en Na^+ dans la solution de percolation mais indépendantes du rapport Na/bivalent.

Toutes les solutions salines diminuent également le Na échangeable dans de fortes proportions, mais les variations sont assez peu marquées en fonction des traitements; néanmoins l'ordre est voisin de celui du Na soluble. Il faut remarquer que l'apport de matière organique diminue peu le Na échangeable dans le cas de la solution équilibrée de SAR 7, par contre le diminue plus fortement dans le cas de la solution équilibrée de SAR 5.

TABLEAU XXIV- Teneur en Na (me) dans les différents lessivats
Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol	Total	Provient du sol
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5me/l MgSO_4 2,5 me/l	67,24	57,24	12,00	2,00	12,00	2,00
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5me/l MgSO_4 2,5 me/l M.O 5 %	70,24	60,24	12,00	2,00	11,75	1,75
NaCl 40 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5me/l MgSO_4 5 me/l	80,2	60,2	23,52	3,52	27,46	7,47
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25me/l MgSO_4 6,25 me/l	68,32	62,07	8,66	2,41	9,16	2,91
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25me/l MgSO_4 6,25 me/l M.O 5 %	59,95	53,7	10,5	4,25	9,00	2,75
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5me/l MgSO_4 12,5 me/l	71,56	59,06	17,32	4,82	18,07	5,57
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5me/l MgSO_4 12,5 me/l + M.O 5 %	65,54	53,04	16,96	4,46	17,64	5,14
témoin l'eau distillée	55,36	55,36	0,24	0,24	0,25	0,25

TABIEAU XAV REPARTITIONS DE Na⁺ SOLUBLE APRES LE LESSIVAGE - SOL TRÈS SALE DE TUNISIE

Na⁺ mé / 100 g de sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 20me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 40me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 25me/l CaSO ₄ 2H ₂ O	NaCl 25me/l CaSO ₄ 2H ₂ O	témoin l'eau distillée
		2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5me/l	2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + H ₂ O 5 %	5 me/l + MgSO ₄ 5me/l	6,25 me/l + MgSO ₄ 6,25 me/l	6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + H ₂ O 5 %	12,5 me/l + MgSO ₄ 12,5me/l	12,5 me/l + MgSO ₄ 12,5me/l + H ₂ O	
500 ml	0-10	1,40	1,35	2,70	0,85	0,75	1,55	1,75	0,00
	10-20	1,20	0,95	2,45	0,70	0,70	1,50	1,45	0,10
	20-30	1,25	0,95	2,30	0,70	0,70	1,45	1,30	0,15
	30-40	1,25	1,55	2,40	0,75	1,05	1,55	1,25	0,40
1000 ml	0-10	1,55	1,10	3,00	0,90	0,70	1,60	1,50	0,00
	10-20	1,20	1,25	2,75	0,90	0,90	1,45	1,85	0,00
	20-30	1,20	1,20	2,60	0,70	0,70	1,40	1,45	0,00
	30-40	1,10	1,10	2,70	0,75	0,65	1,50	1,40	0,00
						0,55		1,40	
1500 ml	0-10	1,60	1,40	2,95	0,90	0,75	1,60	1,50	0,00
	10-20	1,20	1,25	2,60	0,70	0,60	1,50	1,40	0,00
	20-30	1,25	1,10	2,50	0,65	0,65	1,45	1,55	0,00
	30-40	1,30	1,20	2,80	0,70	0,70	1,55	1,50	0,00
			1,20						

TABIEAU XXVI REPARTITIONS DE Na⁺ ECHANGEABLE APRES LE LESSIVAGE - SOL TRES SALE DE TUNISIE

Na⁺ me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l+	NaCl 20 me/l	NaCl 40 me/l	NaCl 12,5me/l+	NaCl 12,5me/l	NaCl 25 me/l+	NaCl 25me/l+	Témoins l'eau distillée
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	+CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + N. 05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l MgSO ₄ 5 me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + N. 0 5 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l + N. 0 5 %	
500 ml	0-10	0,65	0,55	0,70	0,55	0,45	0,35	0,45	0,50
	10-20	0,65	0,55	0,80	0,45	0,45	0,35	0,50	0,50
	20-30	0,70	0,50	0,70	0,45	0,50	0,35	0,45	0,55
	30-40	0,60	0,50	0,70	0,55	0,45	0,45	0,45	0,60
1000 ml	0-10	0,75	0,55	0,70	0,50	0,35	0,50	0,50	0,50
	10-20	0,70	0,55	0,75	0,50	0,40	0,50	0,60	0,65
	20-30	0,65	0,50	0,75	0,55	0,45	0,60	0,55	0,65
	30-40	0,60	0,50	0,70	0,50	0,35 0,45	0,55	0,50	0,55
1500 ml	0-10	0,60	0,55	0,75	0,55	0,40	0,50	0,50	0,60
	10-20	0,65	0,50	0,65	0,55	0,40	0,55	0,55	0,50
	20-30	0,65	0,55	0,65	0,50	0,45	0,55	0,50	0,55
	30-40	0,65	0,50 0,50	0,70	0,45	0,45	0,50	0,55	0,60

B. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFÉRENTES FORMES DE CALCIUM + MAGNÉSIUM DANS LE SOL.

Le sol contient 99,6 me/100 g de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dont 93 me/100 g de Ca^{++} soluble et 6,6 me/100g de Mg^{++} soluble. Il comporte aussi 22,7 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable pour 100 g de sol au début de l'expérience. Calcium et magnésium solubles sont liés avec le sulfate $\text{Ca Mg} (\text{SO}_4)_2$. Le sulfate de magnésium est très soluble (262g/l) ce qui est démontré par l'analyse des lessivats, tandis que $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est peu soluble (2gr/l). $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable représentent 94,6% du complexe absorbant.

- Première dose de lessivage.

Dans le cas des solutions sodiques, de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5} \text{ SAR} = 12,6$, après percolation avec la 1ère dose, il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble à la surface des colonnes (13,8 me/100g) où la solution s'enrichit en ces éléments que vers la profondeur (4,1 me/100g) où son pouvoir lessivant est devenu moindre.

La faible quantité de CaCO_3 dissout de la surface s'insolubilise à nouveau en profondeur. L'analyse du lessivat montre 55,1 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, dont 70% est représenté par le magnésium et 30% par le calcium. Cela représente 1,56 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol que dans le lessivat du traitement à l'eau distillée.

En même temps il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable en surface [au niveau 0 (5,5 me), et niveau 1 (5,2 me/100g)] par rapport à la profondeur (soit au niveau 2 : 2,3 me et au niveau 3 : 2,5 me/100 g).

- Deuxième dose de lessivage.

Après percolation avec la 2ème dose, le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble est plus important à tous les niveaux par rapport aux résultats obtenus avec la première dose. Les teneurs sont les plus faibles aux niveaux 1,2,3 par rapport à tous les autres traitements. Les sels CaCl_2 , MgCl_2 (solubilité 812 g/l) et MgSO_4 , accumulés vers la profondeur, après l'apport de la 1ère dose sont fortement lessivés

avec la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre 38,37 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol dont 34,3% est représenté par le magnésium et 65,7% par le calcium.

En même temps il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable en surface, et plus d'accumulation vers la profondeur par rapport à la première dose.

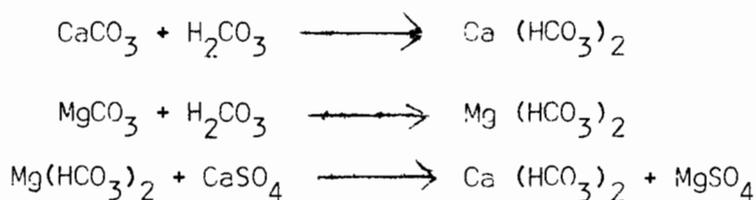
- Troisième dose de lessivage.

Après percolation avec la 3ème dose (D3) il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble au niveau 0 et son dépôt au niveau 1, mais au niveau 2 il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport à tous les autres traitements, et au niveau 3 on arrive à l'une des teneurs les plus basses.

L'analyse du lessivat montre 35,37 mé de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, qui provient du sol, dont 75% est représenté par le calcium (Inverse de ce qui se passe dans D1 pour le rapport Ca/Mg).

En même temps il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable tout le long du profil par rapport à la 2ème dose. En résumé dans la 1ère dose il y a d'abord départ du magnésium, puis le calcium est entraîné à son tour à faible profondeur, enfin le calcium est lessivé en profondeur.

Dans le cas de solution sodique, de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}} = 20$ (SAR=12,6) avec enfouissement de 5% de matière organique, après percolation avec la première dose, il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dans le sol à tous les niveaux par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. Il se produit les réactions suivantes :



L'analyse du lessivat montre que la matière organique a diminué de 6,52 mé le calcium dans le lessivat qui provient du sol par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{20}{5}$ (sans matière organique).

TABLÉAU XXVIII : Teneur en Ca^{++} + Mg^{++} (me) dans les différents lessivats
Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l MgSO_4 2,5 me/l	57,6	55,1	40,87	38,37	37,87	35,37
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5me/l MgSO_4 2,5 me/l + M.O 5 %	76,16	73,66	78,70	76,2	47,75	45,25
NaCl 40 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5me/l MgSO_4 5 me/l	56,07	51,07	39,69	34,69	34,65	29,65
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25me/l MgSO_4 6,25 me/l	56,16	49,91	42,32	36,07	35,89	29,64
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25me/l MgSO_4 6,25 me/l + M.O 5 %	80,52	74,27	85,00	78,75	52,00	45,75
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5me/l MgSO_4 12,5 me/l	56,88	44,38	45,04	32,54	42,57	30,07
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5me/l MgSO_4 12,5 me/l + M.O 5 %	67,67	55,17	58,72	46,22	47,53	35,03
témoin l'eau distillée	53,54	53,54	41,40	41,40	32,40	32,40

TABLÉAU XVIII : Le pourcentage de Mg * dans les différents lessivats
Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	70	70	35,2	34,3	27,5	25,9
NaCl 20 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + M.O 5 %	86	86,8	62,3	62,7	57,6	58
NaCl 40 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 5me/l MgSO ₄ 5 me/l	75	75,4	47,5	47,2	35	32,5
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l	74	76,1	50,3	50,3	34,5	31,3
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25me/l + M.O 5 %	79,7	81,3	64,1	65,2	58,2	59,3
NaCl 25 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5 me/l	72,5	76,7	47,3	46,2	41,3	37,7
NaCl 25 me/l CaSO ₄ ·2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5 me/l + M.O 5 %	86	91,2	76	81,8	50	50
témoin l'eau distillée	72	72	48	48	31	31,7

* Magnesium % = $\frac{Mg}{Ca + Mg} \times 100$ selon SZABOLCS et DARAB

TABLEAU XXX : Teneurs en Ca^{++} (me) dans les différents lessivats
Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l MgSO_4 2,5 me/l	17,28	16,03	26,46	25,21	27,22	25,97
NaCl 20 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l MgSO_4 2,5 me/l M.O 5 %	10,71	9,46	29,7	28,45	20,25	19,00
NaCl 40 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5 me/l MgSO_4 5 me/l	13,77	11,27	20,82	18,32	22,52	20,02
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l MgSO_4 6,25 me/l	14,58	11,45	21,04	17,91	23,51	20,38
NaCl 12,5 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l MgSO_4 6,25 me/l + M.O 5 %	16,33	13,20	30,5	27,37	21,75	18,62
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5 me/l MgSO_4 12,5 me/l	15,66	9,41	23,76	17,51	24,74	18,49
NaCl 25 me/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5 me/l MgSO_4 12,5 me/l + M.O 5 %	9,38	3,13	14,14	7,89	23,76	17,51
témoin l'eau distillée	15,01	15,01	21,56	21,56	22,12	22,12

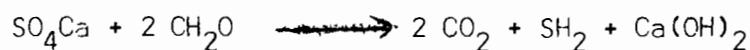
Par contre l'addition de matière organique à augmenté de 25,13 me ou 86,8% le magnésium qui provient du sol dans le lessivat. Le calcaire dissout lors de la décomposition de la matière organique en surface à tendance à se refixer en profondeur sous l'influence de l'excès de calcium soluble, le carbonate de magnésium et le sulfate de magnésium restent plus solubles.

En même temps il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable aux niveaux 1 et 2 par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. Vers la profondeur (niveau 3), il y a accumulation du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable.

Après percolation avec la 2ème dose (D2) au niveau 0 on observe plus de lessivage, et aux niveaux 1,2,3 il y a moins de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. L'analyse du lessivat montre 76,2 mé de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol dont le magnésium représente environ 63%.

L'apport de matière organique a augmenté de 37,83 mé la concentration de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le lessivat par rapport à celui du traitement $\frac{20}{5}$. Par rapport au premier lessivat la matière organique à augmenté le calcium de 19 me.

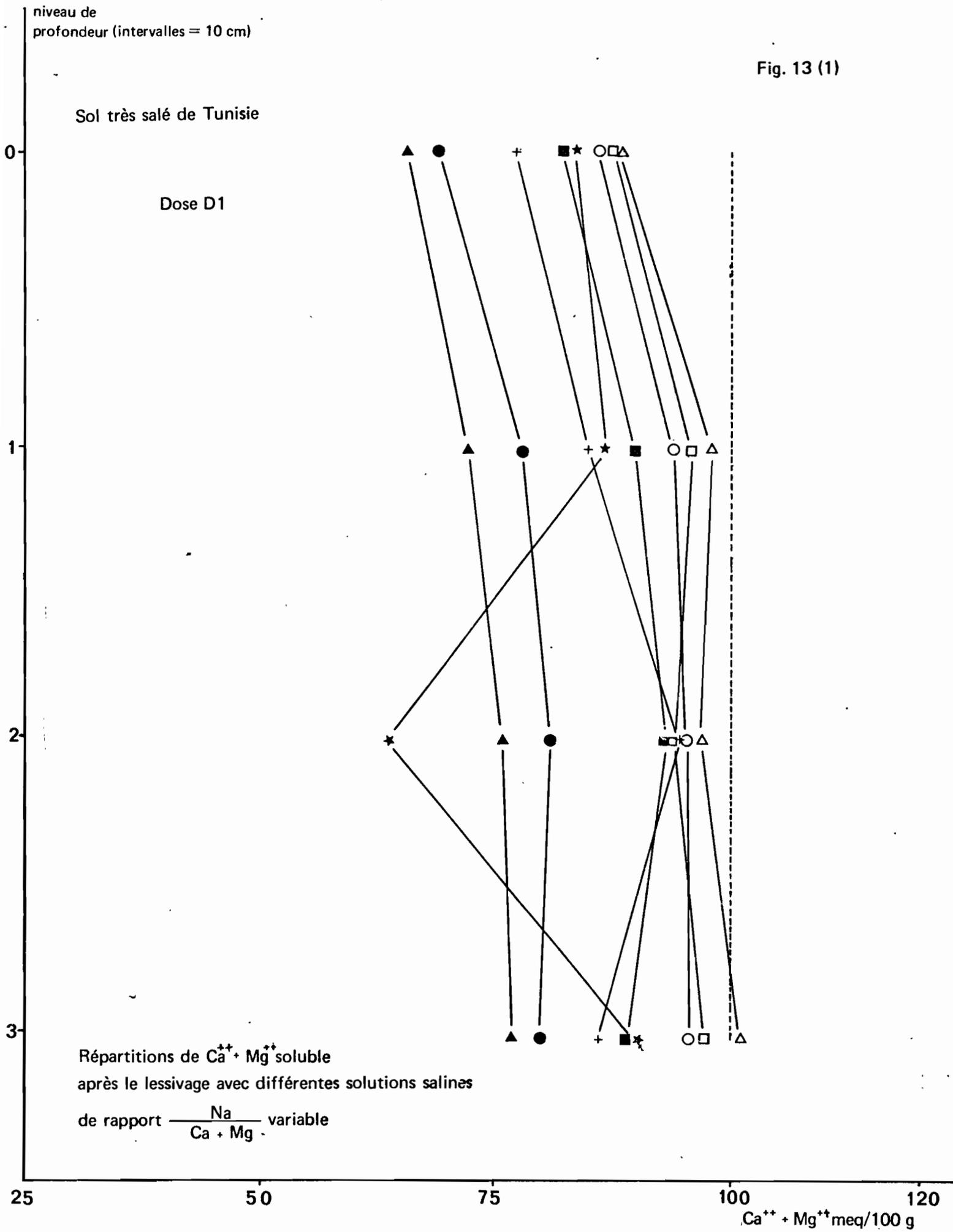
Quant au $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable il y a une accumulation aux niveaux 1,2,3 par rapport au sol originel et par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. C'est à cause du phénomène d'anacrobiose (qui entraîne par ailleurs $\frac{5}{5}$ la sulfato-réduction) et accroît la production de CO_2 .



Après percolation avec la 3ème dose aux niveaux 0 et 1 on observe davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble et aux niveaux 2 et 3 il y a moins de lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble dans le sol par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. L'analyse du lessivat montre 45,25 mé de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, qui provient du sol, dont Mg^{++} représente 58%.

En même temps il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$ à tous les niveaux. Les différents dépôts provoqués par la réduction des sulfates sont entraînés progressivement au fur et à mesure que la quantité de liquide augmente.

Fig. 13 (1)



niveau de
profondeur

Fig. 13 (2)

Dose D2

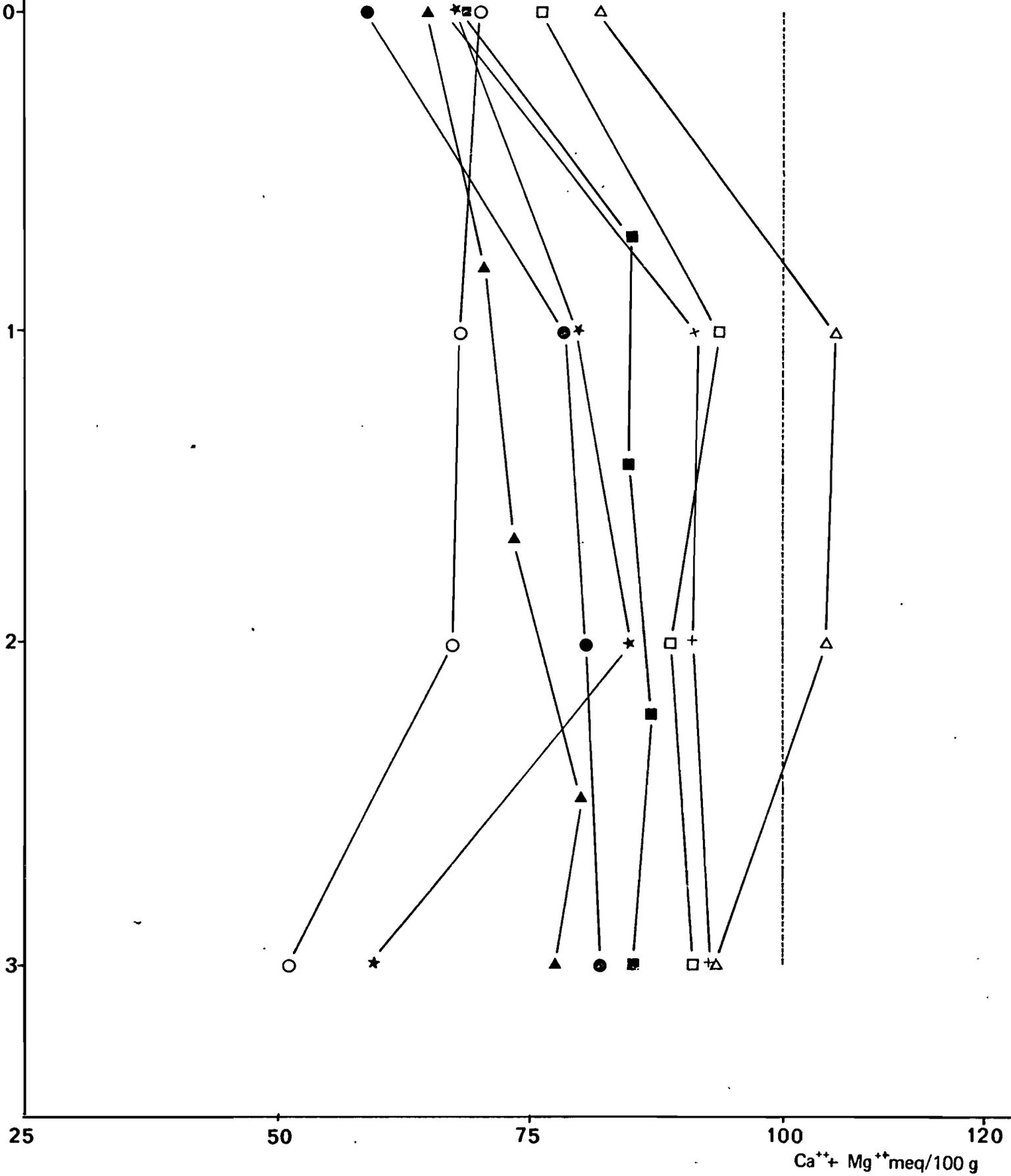
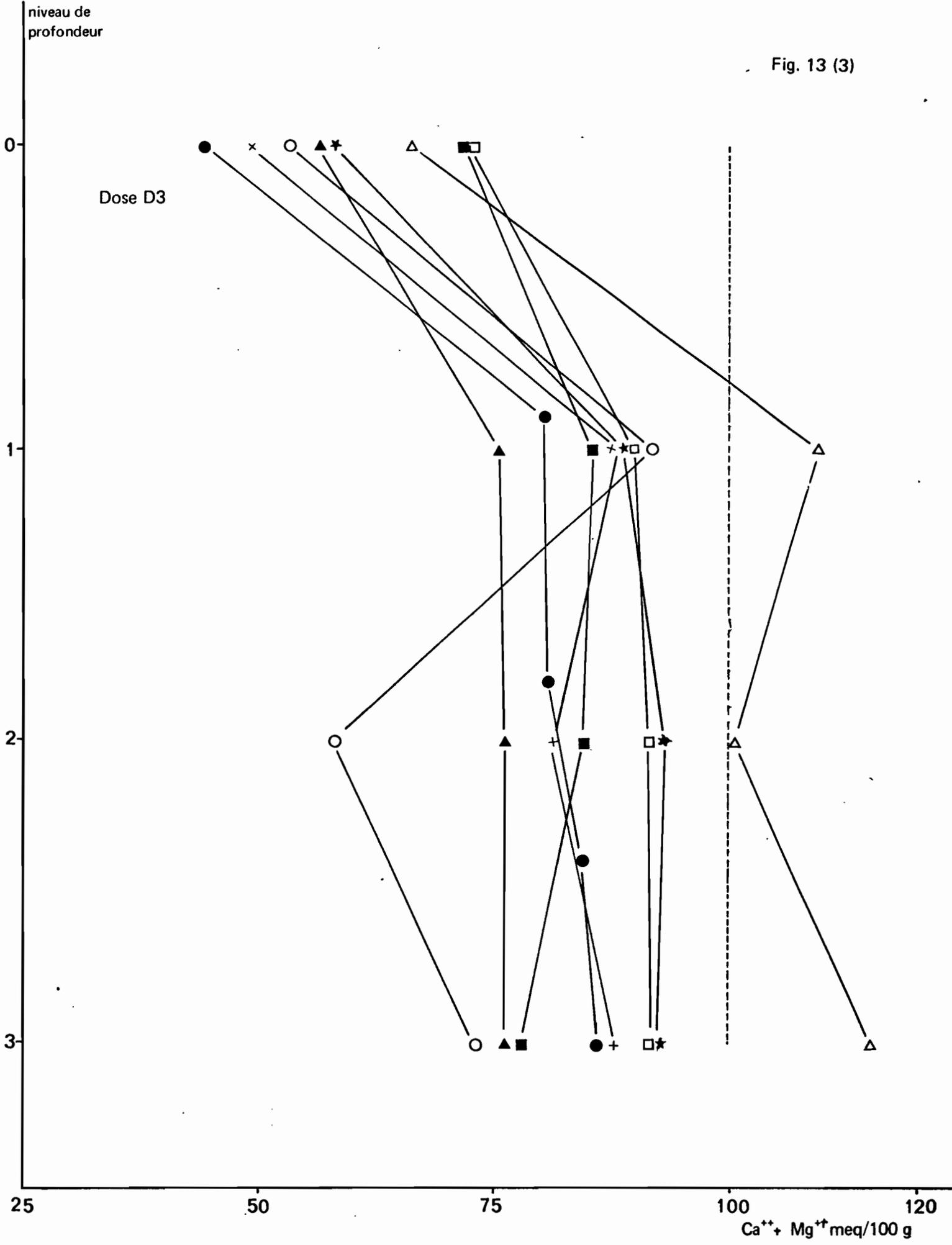


Fig. 13 (3)



La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble au niveau 0 et dans le reste du profil les valeurs sont plus ou moins les mêmes qu'avec D1. L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre 18,56 me 37,83 me et 9,88 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol par rapport aux lessivats de la solution simple $\frac{20}{5}$. L'ordre de lessivage de Mg^{++} est le suivant : (décroissant avec la $\frac{20}{5}$ dose)

D1 64,2 me > D2 47,75 me > D3 26,25 me.

Pour le calcium l'ordre est inverse D1 9,46 me > ^{D2} 28,45 me > ^{D3} 19,0 me.

Le magnésium se lessive le premier; la proportion de calcium devient plus élevée aux doses suivantes.

En ce qui concerne les éléments échangeables, si l'on compare les doses D1, D2, D3 on observe d'abord un fort lessivage de Ca + Mg dans les parties supérieures, et une accumulation en profondeur. Ensuite avec la deuxième dose, il y a une accumulation sur tout le profil sauf en surface; avec la 3ème dose il y a lessivage sur tout le profil mais plus fort en surface qu'en profondeur, la courbe de répartition de Ca + Mg diminue dans son ensemble en restant parallèle à celle de D2.

Le calcium provenant de la dissolution du calcaire par la matière organique se fixe sur l'argile en profondeur : puis se trouve lessivé progressivement avec les fortes doses de solution riches en sodium.

Dans le cas de solution sodique, de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ ou 4, (SAR = 12,6) avec 1% matière organique, après l'apport de la 1ère dose il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble au niveau 3 par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$, mais il reste plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dans le sol qu'après percolation avec la solution $\frac{20}{5} + \text{M.O.}5\%$.

TABLEAU 27- Teneur en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le sol et les lessivats
solution de rapport $\frac{20}{5} + \text{M.O } 1\%$

Profondeur en cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble mé/100g	86,33	91,78	95,43	91,51
$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable mé/100g	12,90	17,75	16,45	19,46

$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ (me) dans les lessivats

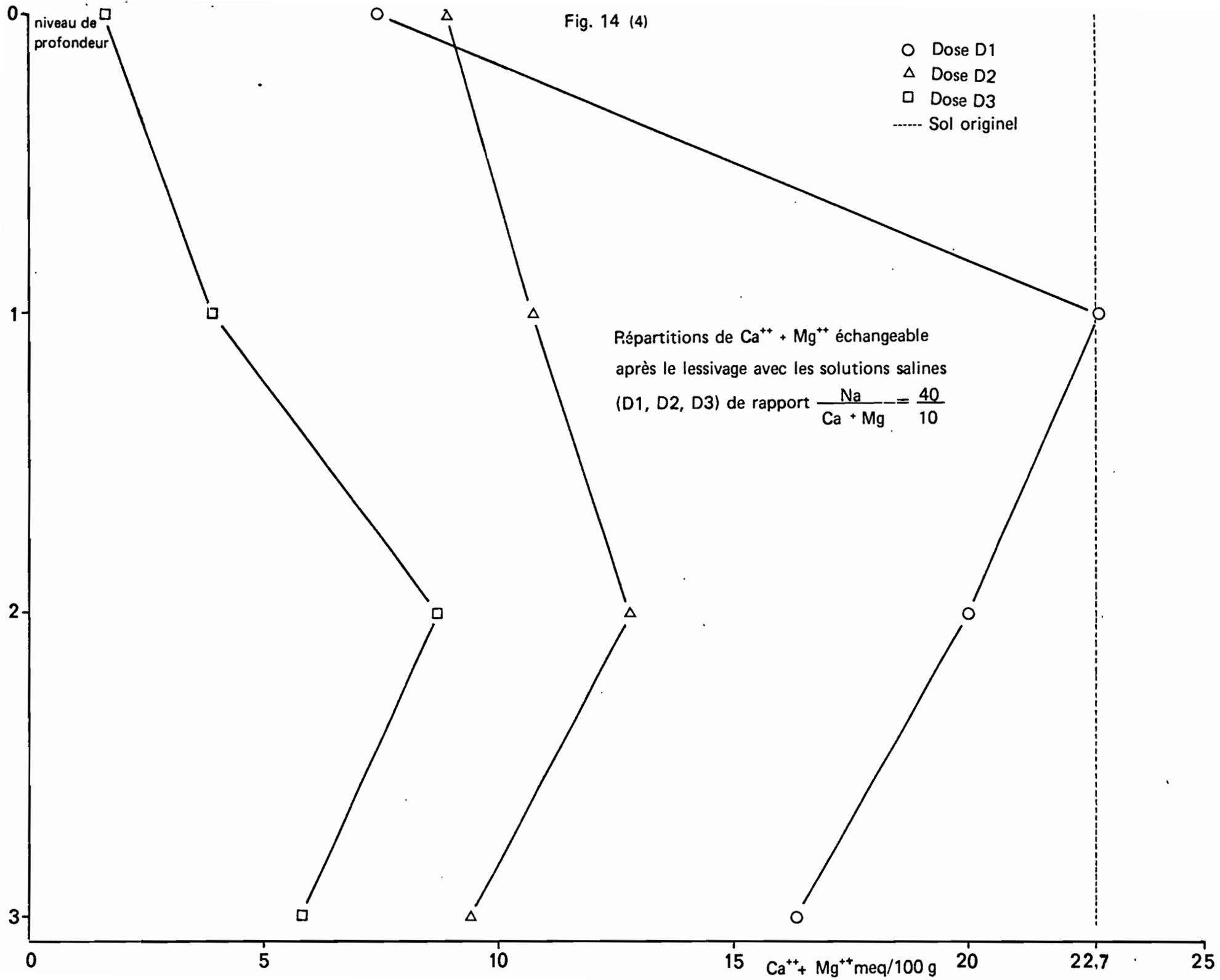
Dose de lessivage partiel	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml
Ca + Mg me dans les lessivats	32,71 me	17,46 me	11,97 me	9,27 me
Ca^{++} me dans les lessivats	5,80	2,52	2,43	1,80
				m.e. tot. 12.6

L'analyse des lessivats montre une augmentation de concentration de 30,21 17,46 11,97 et 9,27 mé de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble provenant du sol, et dont Mg représente respectivement 83% 87% 82% 83%.

Il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable important aux niveaux 0, 2, 3, et au niveau 1 les valeurs sont les mêmes par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$ par rapport à la solution $\frac{20}{5} + \text{M.O.} 0.5\%$. Il y a lessivage très important de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable aux niveaux 0 et 3 et aux niveaux 1 et 2 les valeurs de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable sont plus ou moins les mêmes.

Dans le cas de la solution la plus sodique, de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}} = \frac{40}{10}$ (SAR = 18) après percolation avec la 1ère dose il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble dans le sol, par rapport à toutes les autres solutions salines sans matières organiques. L'analyse du

Fig. 14 (4)



lessivat montre 51,07 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, dont 75% est du magnésium. Il y a une nette diminution de Ca^{++} provenant du sol (4,76 me) dans le lessivat par rapport au lessivat de solution $\frac{20}{5}$. Par contre l'accroissement de concentration de NaCl à augmenté Mg dans le lessivat.

En même temps il y a un très fort lessivage (69%) de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable au niveau 0 ; par contre au niveau 1 la valeur de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable est la même que dans le sol originel. Aux niveaux 2 et 3 il y a lessivage progressif par rapport au sol originel.

Après percolation avec la 2ème dose il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport aux traitements $\frac{12,5}{12,5}$ et $\frac{25}{25}$. L'analyse du lessivat montre 34,69 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, dont 47% est du magnésium. Il y a 7,05 me de plus de Ca^{++} par rapport à 1ère dose.

En même temps il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable très important tout le long du profil par rapport à la 1ère dose. Aux niveaux 1 et 3 il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable par rapport à tous les autres traitements.

Après percolation avec la 3ème dose; aux niveaux 0 et 1 il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport aux solutions $\frac{12,5}{12,5}$ et $\frac{25}{25}$ et aux niveaux 2 et 3 il y a moins de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport aux solutions $\frac{20}{5}$ et $\frac{25}{25}$, on a donc des valeurs moyennes.

L'analyse du lessivat montre 29,65 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, qui provient du sol, dont le magnésium est 32%. Il y a une augmentation de 1,7 me de Ca^{++} par rapport au lessivat de 2ème dose. Il y a 5,72 me de moins de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport au lessivat de la solution de rapport $\frac{20}{5}$.

En même temps il y a un maximum de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable par rapport à tous les autres traitements. Il y a respectivement 94% 83% 62% et 75% de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable aux niveaux 0,1,2,3.

La comparaison entre D1, D2, D3, dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose, il y a lessivage croissant de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble au niveau 0 et accumulation aux niveaux 1, 2, 3.

L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre respectivement 4,04 me, 3,68 et 5,72 me de moins de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, par rapport à la solution $\frac{20}{5}$. Ceci est dû à la dégradation de la structure.

L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre une nette augmentation des teneurs de Mg^{++} dans la solution 40/10, soit 75% 47% 35%, au lieu de 70% 35% et 27% dans les lessivats de $\frac{20}{5}$.

Avec chaque nouvelle dose (D1, D2, D3), il y a diminution de magnésium (39,8 avec D1, 16,36 avec D2 9,63 me avec D3) et augmentation de calcium qui provient du sol dans le lessivat (11,27 avec D1, 18,32 avec D2 et 20,02 avec D3).

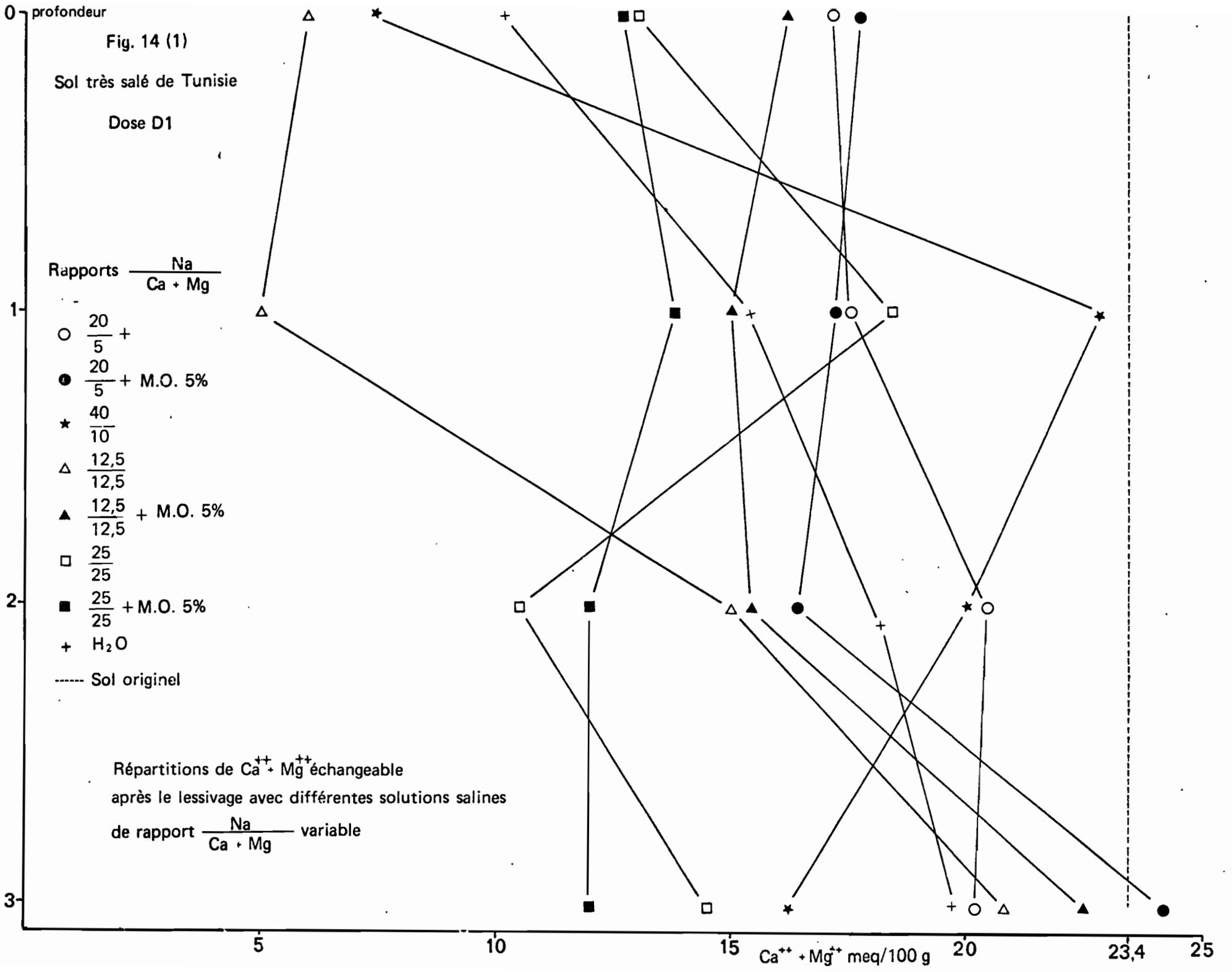
La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage croissant de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable.

Cette solution à forte concentration montre un lessivage moyen sur le calcium soluble, mais par contre un lessivage très important aux fortes doses pour le calcium échangeable.

La dissolution du calcaire est moyenne; mais le pouvoir d'échange du calcium par le sodium est très important.

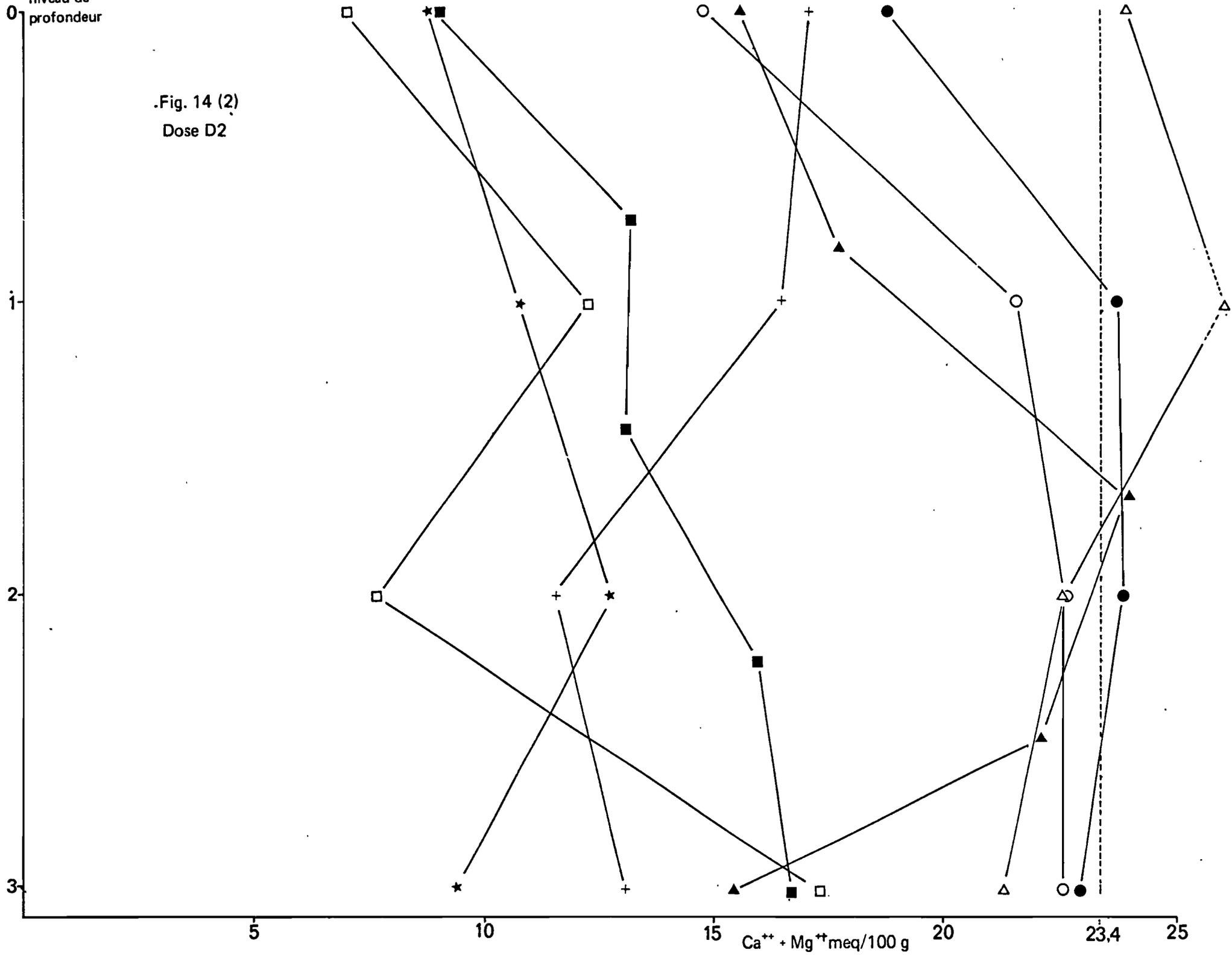
Cette augmentation du Na accroît l'alcalinité du sol ; elle diminue le lessivage du calcium, mais n'empêche pas celui du magnésium qui est très intense.

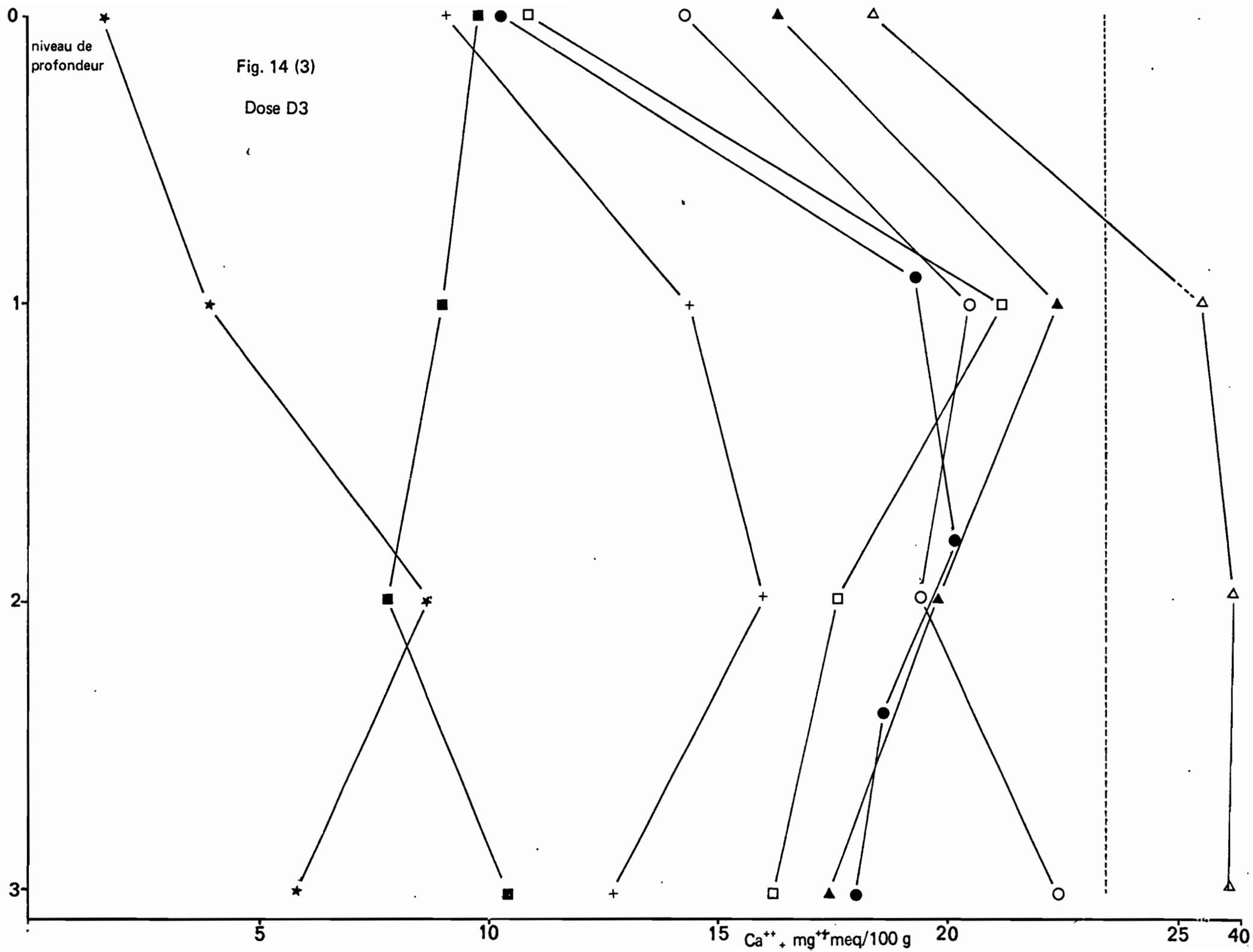
Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à l'unité, $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5 après percolation par les différentes doses (D1, D2 et D3) on observe un minimum de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport à toutes les autres solutions; il y a parfois accumulation ou dépôt de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ à certains niveaux. Ici il y a deux réactions; d'abord en surface, action de NaCl sur le calcaire et le gypse (dissolution du calcaire et du gypse avec entraînement d'une certaine quantité de calcium) comme dans le cas de la solution



niveau de
profondeur

.Fig. 14 (2)
Dose D2





de rapport des bases = $\frac{20}{5}$; plus en profondeur l'excès de sulfate de calcium resature l'argille sodique et le calcaire dissout entraîné de surface s'accumule plus en profondeur.

Au fur à mesure qu'on augmente le gypse, il y a redépôt de calcaire solubilisé dans le sol.

L'analyse du lessivat montre, moins de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport à tous les lessivats sauf 25 ; ce qui confirme l'accumulation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le sol. On observe une concentration de 49,91 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dans le lessivat qui provient du sol, dont 76% est magnésium. La teneur de Ca^{++} est la même que dans le lessivat $\frac{40}{10}$.

En même temps il y a maximum de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable au niveau 0 et 1 par rapport à tous les autres traitements ce qui est probablement dû au maintien d'une bonne perméabilité dans les horizons de surface lors de ce traitement et vers la profondeur le $\text{Ca} + \text{Mg}$ échangeable lessivé de surface est accumulé aux niveaux 2 et 3.

Après percolation avec la 2ème dose, aux niveaux 1 et 2 il y a accumulation de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble assez important, et aux niveaux 0 et 3 il y a lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble.

L'analyse du lessivat montre une augmentation de concentration de 36,07 me de $\text{Ca} + \text{Mg}$ provenant du sol, dont le magnésium représente 50,3%. Il y a une augmentation de 6,46 me de Ca qui provient du sol par rapport au 1ère dose.

En même temps il y a forte accumulation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dite échangeable aux niveaux 0 et 1 par rapport à la 1ère dose. Comparé au sol original il y a accumulation vers la surface (niveaux 0 et 1) et lessivage vers la profondeur (niveaux 2 et 3).

Après percolation avec la 3ème dose il y a accumulation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ solubles aux niveaux 1,2,3, plus important aux niveaux 1 et 3 qu'au niveau 2.

L'analyse du lessivat montre 29,64 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, dont 31,3% est du magnésium. Il y a une augmentation de 6 me/l de Ca^{++} dans le lessivat par rapport au lessivat de 2ème dose.

Il y a de nouveau lessivage au niveau 0 de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable qui a été accumulé par la 2ème dose mais il y a une très forte accumulation progressive de $\text{Ca} + \text{Mg}$ dit échangeable vers la profondeur (niveaux 1,2,3). La solution $\frac{12,5}{12,5}$ se comporte d'une façon inverse de la solution $\frac{40}{10}$; il y a là avec les fortes doses dépôt en profondeur de calcium "secondaire" qui, non soluble, est par contre dosé comme "échangeable" par suite des méthodes utilisées. La comparaison entre D1 D2 D3, dans le sol montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble au niveau 0 et accumulation dans le reste du profil. Le calcium dissous en surface s'accumule progressivement en profondeur, par contre la proportion de Na^{+} dans la solution de percolation est insuffisante pour déplacer le Ca échangeable fixé et ce dernier augmente en profondeur avec les doses successives.

Le calcaire solubilise en surface a également tendance à se redéposer en profondeur sous l'influence de la charge en calcium.

Dans le cas de solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5 mais avec enfoncement de 5% M.O, après percolation avec la 1ère dose il y a davantage de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble par rapport à tous les traitements.

L'analyse du lessivat montre une concentration de 74,27 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui est le maximum par rapport à tous les lessivats. Il y a 81,3% de magnésium dans ce lessivat il y a 24,36 me de plus en concentration de $\text{Ca}+\text{Mg}$ par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$

En même temps il y a un lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable assez important (31%) aux niveaux supérieurs 0,1,2 par rapport au sol originel mais en profondeur au niveau 3 la valeur de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable remonte et est la même, que dans le sol originel. En moyenne il y a nettement moins de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$, surtout en surface.

Après percolation avec la 2ème dose le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble resté relativement important par rapport aux autres solutions. Mais la couche obtenue de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble dans le sol est presque identique à celle réalisée par la percolation de D1.

L'analyse du lessivat montre le maximum de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ par rapport à tous les autres lessivats. Il y a 65% de Mg dans ce lessivat. Il y a 42,68 me de plus de quantité de $\text{Ca} + \text{Mg}$ entraîné du sol par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$.

Il y a une augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable aux niveaux 1,2,3 avec maximum au niveau 2, et lessivage au niveau 4 par rapport à la 1ère dose. Au niveau 2 le $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable migré de la surface s'accumule dans le sol.

Après percolation avec la 3ème dose il y a léger lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble au niveau 0 par rapport aux 1ère et 2ème doses, mais la répartition de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble en profondeur est identique à celle des doses précédentes. L'analyse du lessivat montre un accroissement de 45,75 me de $\text{Ca} + \text{Mg}$, qui provient du sol et qui est le plus élevé de tous ceux obtenus dans les lessivats après percolation de la 3ème dose. Il y a 16,11 me de plus en concentration de $\text{Ca} + \text{Mg}$ par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Il y a 59,3% de magnésium dans ce lessivat.

On observe une certaine accumulation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable par rapport aux doses précédentes au niveau 1, mais une diminution en profondeur. Les mouvements du Ca^{++} sont moins amples avec la matière organique que sans matière organique en raison des phénomènes de réduction qui ont tendance à bloquer le Ca^{++} sous forme peu soluble et aggraver l'action du sulfate de Ca.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble en surface, augmentation dans le milieu du profil et lessivage en profondeur.

Dans le cas d'une solution riche en sodium et également en alcalino-terreux de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ SAR = 7 après percolation avec les différentes doses D1 D2 D3, on observe un minimum de lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble par rapport aux autres traitements sauf par rapport à la solution $\frac{12,5}{12,5}$ de SAR = 5 dont l'effet sur $Ca+Mg$ soluble du sol est parfois un peu plus faible. La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage croissant de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble mais la teneur moyenne surtout en profondeur diminue peu et reste relativement élevée, moins cependant que lors de l'utilisation de la solution $\frac{12,5}{12,5}$ avec laquelle se présente une nette accumulation.

L'analyse des lessivats montre un minimum de $Ca^{++} + Mg^{++}$ qui provient du sol par rapport à tous les autres lessivats, même au total, ceux obtenus avec les solutions de rapport 40/10 et 12,5/12,5.

Quant au $Ca^{++} + Mg^{++}$ échangeable on observe dans D1 et D2 un fort lessivage assez irrégulier, mais croissant avec la dose par rapport au sol original sauf tout à fait en profondeur. Avec D3 il se produit de nouveau une certaine accumulation qui part de la surface, avec un maximum au niveau 1, sans cependant atteindre la valeur du sol original.

Le phénomène se produit en deux temps, d'abord lessivage dans le sol du magnésium, puis accumulation de calcium échangeable provenant du gypse contenu dans le sol.

L'action des différentes doses rappelle un peu celle du traitement $\frac{12,5}{12,5}$. On observe un peu moins de lessivage à la première dose et moins d'accumulation aux dernières. L'action de dissolution sur le calcaire est peut être moins forte, mais l'intensité du phénomène d'échange du calcium par le sodium est plus élevée.

L'enfouissement de 5% de matière organique dans le cas d'une solution riche en bases alcalines et alcalino-terreuses de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ Doses (D1, D2 et D3) provoque davantage de lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble par rapport à la solution simple $\frac{25}{25}$ (sans matière organique) mais la différence n'est pas considérable.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose le lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble est légèrement croissant.

L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre 10,8 me 13,68 4,96 me de plus de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol par rapport à la solution simple $\frac{25}{25}$ (sans M.O).

Quant au $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable, nous observons avec apport de matière organique un phénomène différent de ce qui se passe avec la même solution sans matière organique; le lessivage du calcium échangeable est croissant de la dose D1 jusqu'à la dose D3 qui ne provoque pas de réenrichissement du sol comme dans le cas précédent.

Lors de l'utilisation d'une solution de SAR élevé, la matière organique joue un rôle lessivant important contrairement aux solutions de faible SAR; le pouvoir dissolvant de la solution saline concentrée est plus important, en particulier sur tous les composés du calcium mobilisés par la matière organique, mais qui ont tendance à s'accumuler dans le sol avec les autres solutions, ou ne sont que peu lessivés.

Dans le cas de l'eau distillée après percolation avec la 1ère dose la comparaison entre les niveaux montre qu'il y a lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble important par rapport au sol original, mais davantage en surface (niveau 0 : 22,5 me/100g, niveau 1 : 14,65 me /100g) et au niveau 3 (13,9 me/100g).

L'analyse du lessivat montre une augmentation de concentration de 53,54 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ qui provient du sol, dont 72% est au magnésium. Le lessivat de l'eau distillée contient le maximum de $\text{Ca} + \text{Mg}$ par rapport à tous les lessivats des traitements sans matière organique excepté celui de la solution de rapport $\frac{20}{5}$ qui contient un peu plus. En même temps il y a fort lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}$ échangeable, plus important vers la surface et moindre vers la profondeur par rapport au sol original. Ce lessivage est progressif.

Après l'apport de la 2ème dose il y a plus de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble au niveau 0 (10,18 me/100) par rapport à la 1ère dose.

L'analyse du lessivat montre 41,4 me/l de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ dont 48% est magnésium. Il y a 6,55 me de plus de Ca^{++} par rapport au 1er lessivat.

Le calcium échangeable tend à augmenter en surface sous l'action du sulfate préexistant dans le sol.

Après percolation avec la 3ème dose, il y a lessivage de $\text{Ca} + \text{Mg}$ soluble surtout en surface, et moins en profondeur.

L'analyse du lessivat montre une augmentation de concentration de 32,4 me de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, qui provient du sol, dont 31,7% est du magnésium. Il y a une légère augmentation de Ca^{++} par rapport au lessivat de la 2ème dose.

En même temps il y a lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable tout le long du profil par rapport à la 1ère dose. L'accroissement du lessivage par l'eau tend à entraîner le calcium échangeable qui s'était fixé dans les horizons supérieurs sous l'action de la dose 2.

L'eau distillée lessive assez fortement les sels de calcium surtout en surface, dans un second temps le calcium soluble tend à passer à l'état échangeable, puis le calcium échangeable est lessivé à son tour.

Conclusions.- $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble et échangeable dans le sol de Tunisie.

1. Les solutions riches en sodium (SAR = 12,6) provoquent un lessivage croissant de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble (dont le magnésium représente 70%). Avec les doses successives, les répartitions des éléments dans les colonnes deviennent irrégulières en raison de dépôts secondaires en profondeur; de même les cations $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ lessivés de la surface s'accumulent en profondeur à l'état échangeable.

2. Les solutions riches en sodium (SAR = 12,6) en présence de matière organique provoquent un maximum de lessivage de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ soluble où le magnésium est dominant (86%). Il y a une forte augmentation de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable. Les phénomènes de réduction des sulfates qui se produisent jouent un rôle important dans cette immobilisation. Aux fortes doses on observe au contraire une diminution de ces cations.

3. L'accroissement de concentration totale de ces solutions SAR = 18 sans matière organique, provoque d'abord un lessivage important (qui joue sur le Mg^{++} pour 75%) puis une diminution de l'entraînement de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble à cause de la dégradation de la structure. Les répartitions d'éléments en profondeur sont irrégulières dès la première dose. Malgré l'irrégularité des variations des teneurs en calcium + magnésium soluble il se produit un fort lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ échangeable avec les doses successives en fonction de la forte charge en sodium de la solution utilisée.

4. Avec les solutions également riches en sels de sodium et sulfates alcalino-terreux, le lessivage de $Ca+Mg$ soluble est très faible avec la solution de SAR = 5 et modéré avec celle de SAR = 7; il conduit dans les deux cas à une répartition assez régulière des sels dans le profil, principalement avec la solution du rapport $\frac{25}{25}$ et de SAR = 7.

5. L'addition de 5% de matière organique au sol, avec ces solutions, augmente moyennement le lessivage de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble dans le cas de la solution de SAR = 7 mais l'augmente au maximum dans le cas de celle de SAR = 5 (12,5). On obtient dans tous ces traitements une diminution régulière de $Ca^{++} + Mg^{++}$ soluble dans tout le profil.

6. En ce qui concerne les éléments échangeables les solutions simples de SAR 5, provoquent aux faibles doses un entraînement de $Ca+Mg$, ceci en raison des sels de Na préexistants, mais une fois ce sodium lessivé il y a accumulation progressive et importante de $Ca+Mg$ échangeable dans le sol.

Pour les solutions de SAR 7, il se produit également fort lessivage de $Ca+Mg$ dû en particulier au départ du Mg , mais ensuite il y a à nouveau accumulation du Ca échangeable mais dans des proportions moindres que pour la précédente solution.

7. L'addition de 5% de MgO au sol dans le cas des solutions d'égale concentration alcalines/alcalino terreux de SAR 5, ne provoque qu'un faible lessivage de $Ca+Mg$ échangeable, et avec les doses successives il y a même accumulation de ces éléments; les phénomènes de réduction des sulfates sont en partie cause de ce blocage du calcium.

Les solutions d'égale concentration alcalins/alcalino-terreux de SAR7 en présence de matière organique provoquent au contraire un très fort lessivage de Ca+Mg échangeable, les phénomènes de blocage par réduction se produisent également, mais la solution de forte concentration montre un pouvoir dissolvant sur les produits de mobilisation du calcium par la matière organique.

En général dans les sols très gypseux de Tunisie les solutions riches en NaCl n'ont pas la forte action dissolvante sur le calcaire que l'on constate dans les sols de feucherolle (calcaires et peu gypseux), l'augmentation du calcium dans les solutions de percolation, diminue encore cette action dissolvante, mais accroît l'entraînement du magnésium; les différences relatives entre les solutions portent davantage sur le magnésium soluble surtout dans les premières doses.

Les phénomènes de sulfate-réduction semblent ne pas avoir d'effet sur l'entraînement du magnésium; par contre ils bloquent au moins temporairement la migration du calcium qui s'accumule sous forme échangeable; dans le cas de solution à forte concentration ionique l'insolubilisation temporaire du calcium par les phénomènes de réduction est plus faible et il y a lessivage maximum du calcium échangeable.

De même, dans ces sols riches en gypse, l'accroissement du sodium en valeur absolue augmente le lessivage du calcium échangeable. Par contre l'accroissement du gypse en valeur absolue diminue le lessivage du calcium soluble, d'où une certaine distorsion entre calcium soluble et échangeable.

L'eau distillée provoque un lessivage du calcium soluble puis échangeable.

En ce qui concerne l'analyse des lessivats, l'apport de matière organique augmente la somme Ca+Mg (provenant du sol) dans les lessivats, mais tend à diminuer le calcium seul (provenant du sol), ce qui trouve l'effet partiel de blocage sous l'influence de la sulfate réduction.

Dans le cas d'une forte réduction (5% Mo) le calcium dans les lessivats est minimum pour la première dose; lorsque la réduction est plus faible (1% Mo) le calcium au contraire est maximum dans le

premier lessivat partiel de 230 ml; la dose totale dans les 500 ml est de 12,6 me contre 9,4 me avec 5% de Mo (cas de la solution $\frac{20}{5}$)

Par contre, en ce qui concerne le magnésium, même avec la forte réduction (5% Mo) les quantités maximum provenant du sol se trouvent dans les premiers lessivats.

TABLEAU XXI- REPARTITIONS DE $Ca^{++} + Mg^{++}$ SOLUBLE APRES LE LESSIVAGE - SOL TRES SALE DE TUNISIE

$Ca^{++} + Mg^{++}$ me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l	NaCl 20me/l	NaCl 40me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 25me/l	NaCl 25me/l	Témoin l'eau distillée
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + N.O 5 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l MgSO ₄ 5 me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l + N.O 5 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l + N.O 5 %	
500 ml	0-10	85,78	68,80	83,43	87,98	65,58	87,63	82,20	76,93
	10-20	93,68	77,73	86,65	97,70	72,00	95,75	89,73	84,95
	20-30	55,13	80,75	63,50	96,65	75,71	93,96	93,71	94,83
	30-40	55,48	79,73	89,73	100,95	76,75	97,18	89,53	85,73
1000 ml	0-10	70,13	58,90	67,68	81,70	64,86	75,93	68,15	66,75
	10-20	69,01	78,53	89,65	105,35	70,43	93,60	84,83	91,30
	20-30	67,33	80,55	84,93	104,25	73,28	88,70	84,63	91,13
	30-40	51,23	81,90	59,35	93,28	80,01	91,13	86,9	92,85
1500 ml	0-10	55,13	44,30	58,03	66,23	56,35	72,40	72,28	49,16
	10-20	91,76	80,31	88,68	109,45	75,40	89,68	85,63	88,86
	20-30	51,98	80,86	93,13	100,50	76,03	91,41	84,48	81,81
	30-40	73,00	84,21	92,56	115,00	76,33	92,56	77,95	88,36

TABLEAU RÉSUMÉ PRINCIPALES PARTITIONS DES Ca^{++} + Mg^{++} ECHANGEABLES APRES LE LESSIVAGE
 SOL TYPES CADE DE FRANCE
 Ca^{++} + Mg^{++} me/100 g sol

Dose de lessive	Prof en Cm	NaCl 20me/l+ CaSO ₄ 2,5me/l+ MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20me/l +CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l +MgSO ₄ 2,5me/l +H ₂ O 5%	NaCl 40me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5me/l + MgSO ₄ 5me/l	NaCl 12,5me/l +CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l + MgSO ₄ 6,25me/l	NaCl 12,5me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l +MgSO ₄ 6,25me/l + H ₂ O 5%	NaCl 25me/l+ CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5me/l	NaCl 25me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5me/l +H ₂ O 5%	Terrain l'eau distillée
500ml	0-10	17,16	17,75	7,08	5,96	16,22	13,05	12,73	10,16
	10-20	17,52	17,22	22,58	5,00	14,96	18,36	13,79	15,44
	20-30	20,42	16,38	20,02	14,95	15,40	10,46	12,00	18,24
	30-40	20,18	24,26	16,04	20,80	22,53	14,49	11,97	19,80
1000 ml	0-10	14,82	18,65	8,73	24,00	15,60	7,03	13,24	17,08
	10-20	21,02	23,84	10,48	26,08	17,75	12,30	13,12	16,50
	20-30	22,62	23,87	12,63	22,58	24,00	7,73	15,98	11,48
	30-40	22,64	23,00	9,23	21,28	22,11 15,43	17,33	16,66	13,10
1500 ml	0-10	14,23	10,30	1,40	18,40	16,29	10,87	9,82	9,10
	10-20	20,48	19,26	3,77	27,52	22,41	21,17	8,96	14,40
	20-30	19,36	20,20	8,48	36,28	19,74	17,59	7,84	16,00
	30-40	22,36	18,64 18,00	5,60	35,80	17,43	16,25	10,44	12,68

C. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LES DIFFERENTES FORMES DU POTASSIUM DANS LE SOL.

Le sol contenait 0,77 me de potassium soluble et 0,87 me de K^+ échangeable pour 100 g de sol au début de l'expérience. Dans plusieurs traitements l'addition de 5% de matière organique est équivalente 2,85 me/100g de K^+ . Au total le K^+ soluble et organique devient 3,62 me/100 g, tandis que dans l'autre cas 1% de M.O correspond à peu près 0,6 me/100 g de K^+ sous forme organique.

Dans le cas d'une solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6, après l'apport de la première dose on observe plus de lessivage de K^+ à la surface qu'en profondeur. Après percolation avec la deuxième et troisième doses en surface (au niveau 0) le potassium est complètement lessivé. La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose le lessivage de K soluble croît. L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre respectivement 2,43 me 1,22 me 0,5 me de K^+ soluble et la comparaison avec les lessivats de l'eau distillée montre que la solution $\frac{20}{5}$ lessive davantage de K^+ , que ne le fait l'eau distillée.

Quant au K^+ échangeable on observe entre 75 et 87% de lessivage avec la forte dose (D3) il reste entre 0,1 me et 0,15 me/100 de K^+ échangeable dans le sol. Les travaux de TAHOUN et HAMDJ (1973) montrent que la percolation par une solution de teneur élevée de NaCl libère une quantité considérable de K^+ fixé du sol.

L'enfouissement de 5% de matière organique dans le cas de la solution précédente de SAR = 12,6 montre un lessivage de potassium au niveau 0; ce potassium migre de la surface (niveau zéro) plus en profondeur, est accumulé au niveau 1. Vers la profondeur (aux niveaux 2 et 3) on observe à nouveau un fort lessivage de K^+ soluble. Après percolation avec la deuxième et la troisième dose l'entraînement de K se produit tout au long du profil. Le potassium qui a migré des niveaux 0,1, et 2 s'accumule en profondeur (niveau 3). La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage croissant de potassium soluble aux niveaux 0,1, et 2. L'analyse des lessivats (D1= 18,19 me, D2 5,2 me D3 2,25 me) montre davantage de K^+ soluble par rapport aux lessivats de tous les autres traitements.

Quant au K^+ échangeable, la percolation avec la forte dose D3, en présence de matière organique, provoque plus de lessivage que sans matière organique.

Dans le cas de solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 en présence de 1% de matière organique après l'apport de la première dose il y a la même quantité de K^+ soluble dans le sol aux niveaux 0, 1, 2 qu'avec la solution $\frac{20}{5}$ sans addition de matière organique. En profondeur (niveau 3) on observe une légère augmentation de K^+ soluble avec 1% M.O. L'analyse des lessivats montre respectivement 2,11 me 0,95 me 0,76 et 0,61 me de K^+ lors de la percolation par les différentes doses fractionnées de lessivage 230 ml, 90 ml, 90 ml, 90 ml. Avec 500 ml tout le K^+ préexistant dans le sol n'est pas lessivé.

Il reste une réserve dans le sol. Le potassium est libéré lentement des composés organiques et surtout minéraux en contenant et préexistants dans le sol.

Les teneurs en K^+ échangeable sont les mêmes que dans le traitement par la solution de rapport $\frac{20}{5}$ mais sans apport de M.O.

Teneurs en K^+ (me) dans les lessivats de solution de rapport $\frac{20}{5}$ + 1% M.O.

Dose de lessivage Partiel	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml
K^+ (me) dans les lessivats	2,11	0,95	0,76	0,61

Dans le cas de la solution la plus sodique, de rapport $\frac{40}{5}$ SAR=18, après percolation avec la première dose, on observe davantage de lessivage de K^+ soluble par rapport à la solution de rapport $\frac{20}{5}$. L'apport de la 3ème dose, lessive complètement le K^+ de surface (niveau 0 et 1). La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol, nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage croissant de K^+ soluble.

Fig. 15 (1) Répartitions de K^+ soluble
après le lessivage avec différentes solutions salines
de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

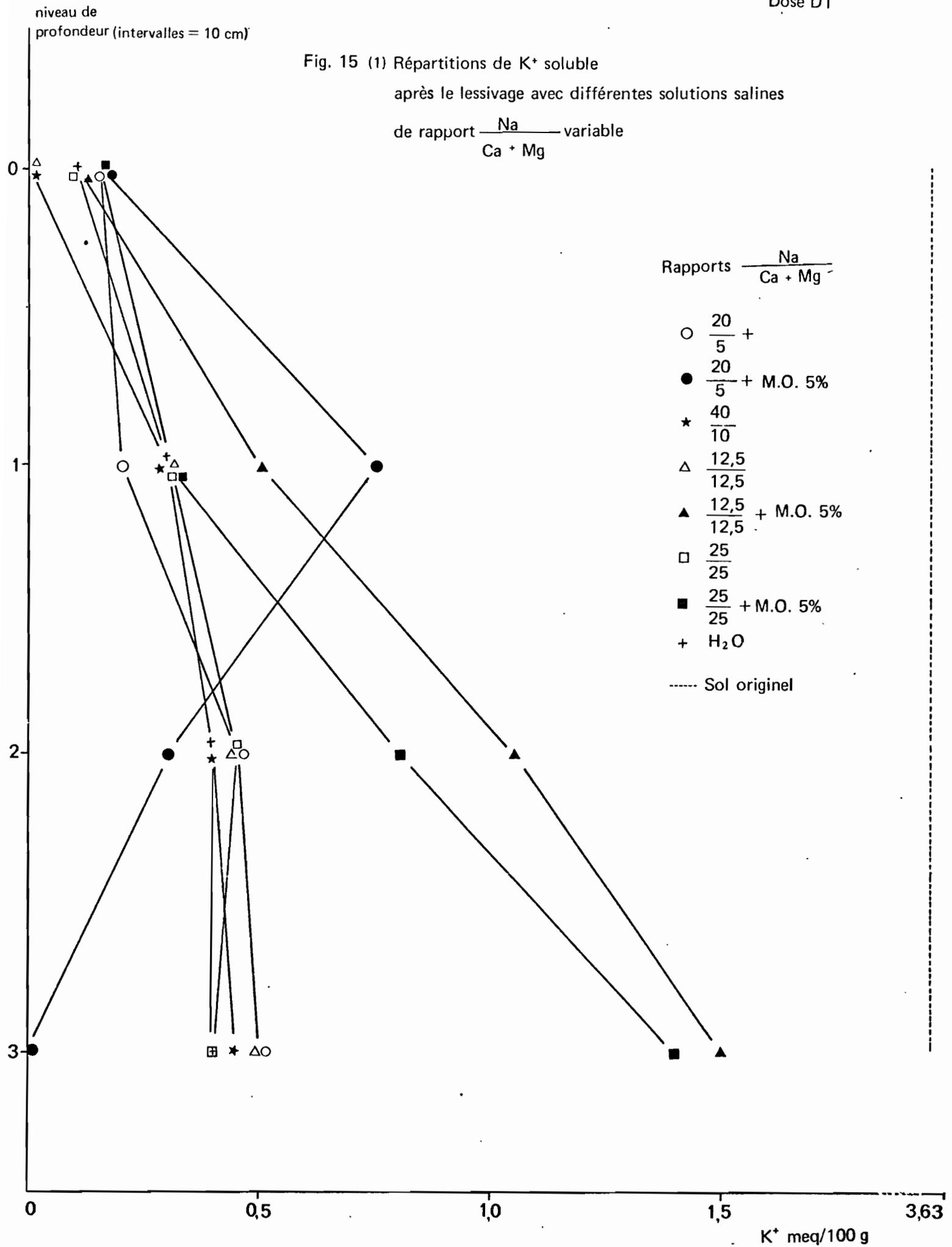


Fig. 15 (2)

Dose D2

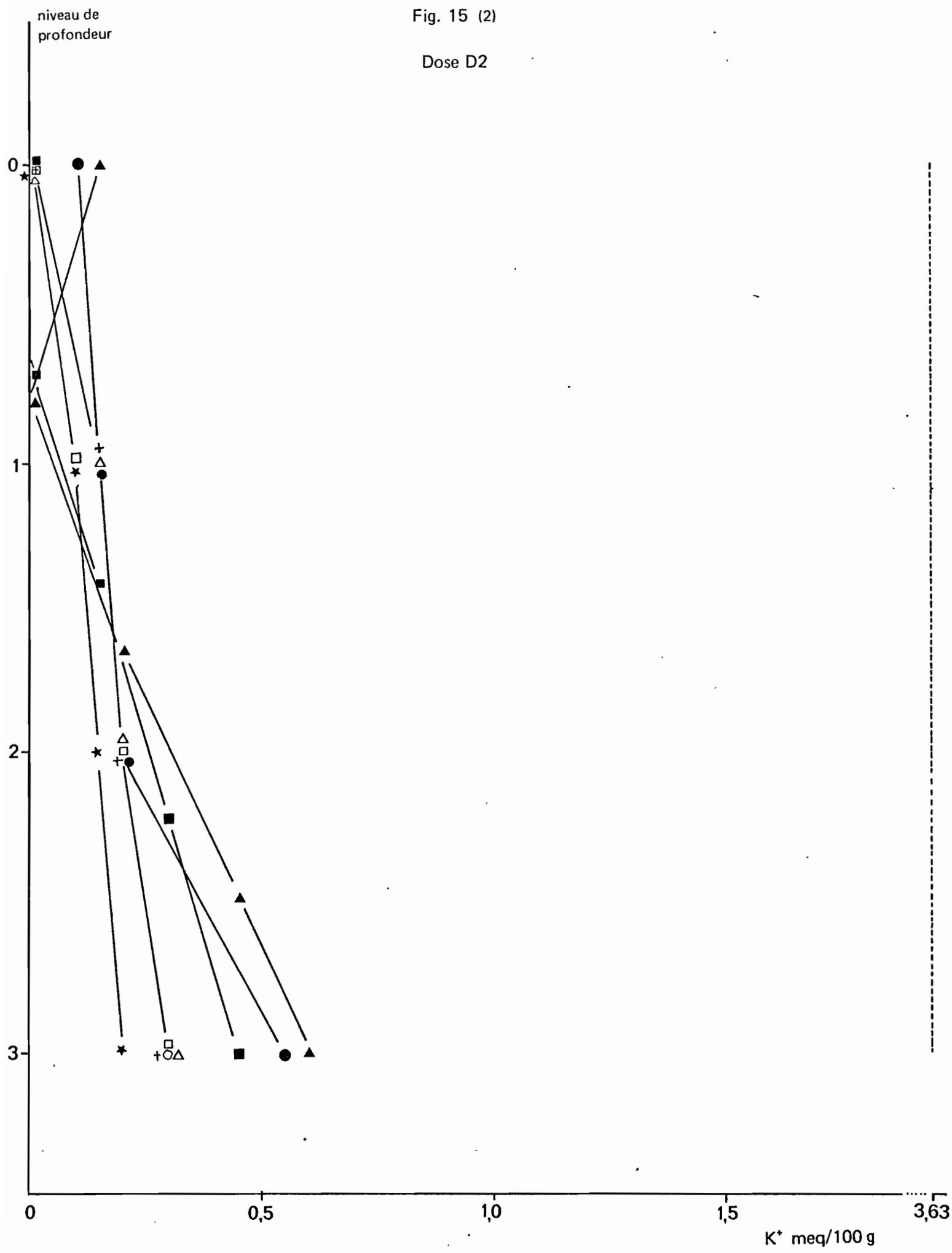
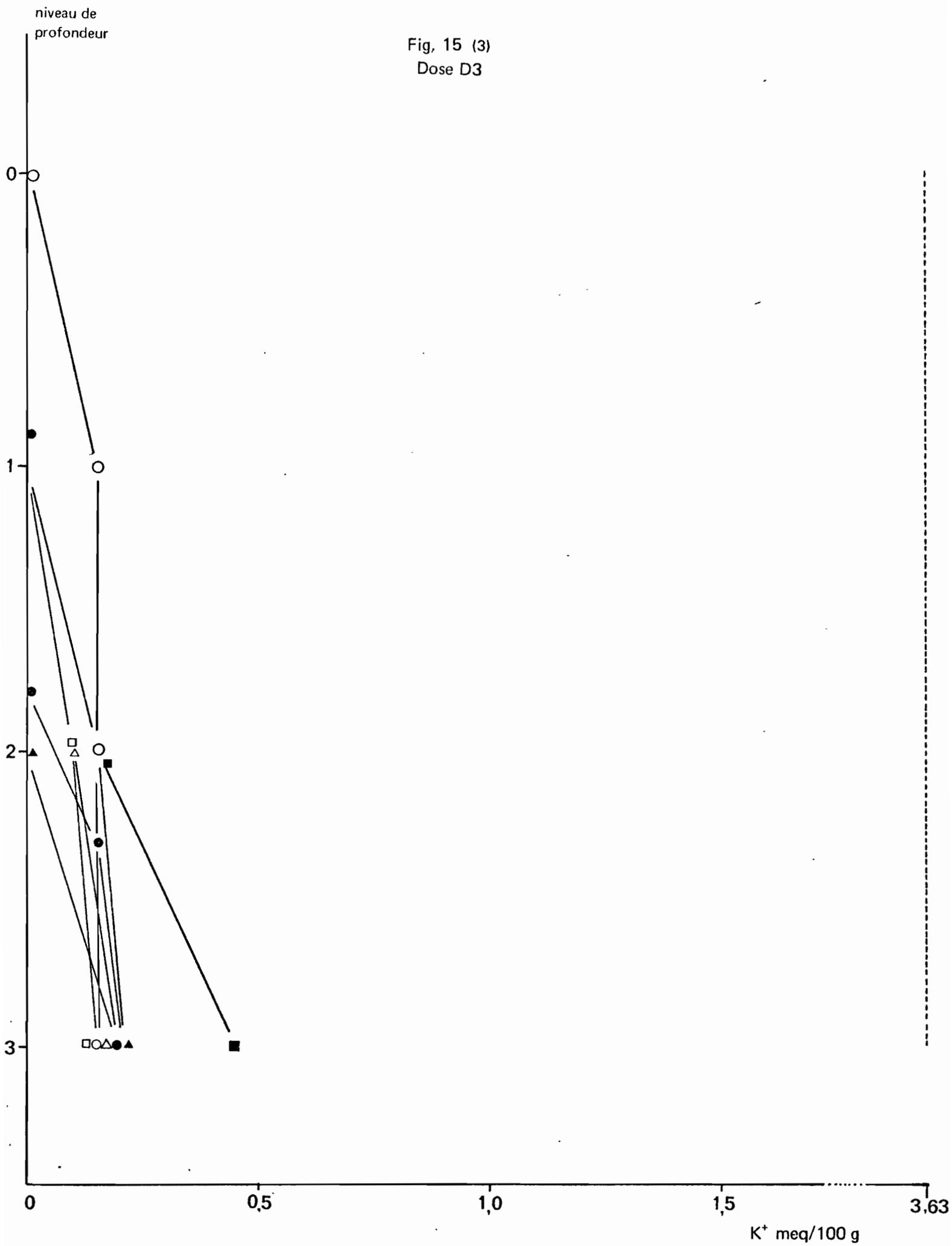
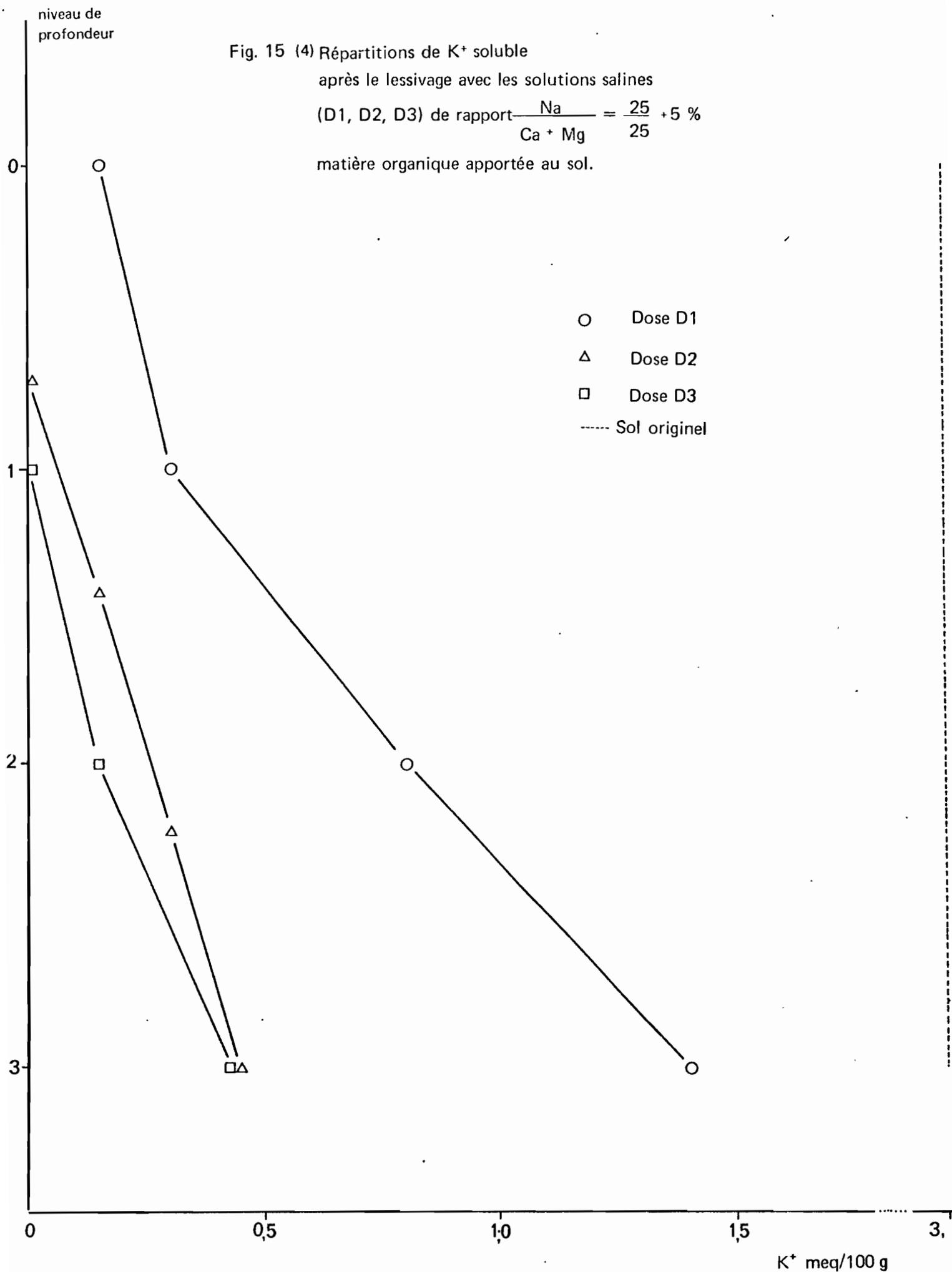


Fig. 15 (3)
Dose D3





L'analyse des lessivats D1, D2, D3 montre respectivement 2,16 me 1,22 me 0,74 me de K^+ soluble.

On observe un lessivage de K^+ échangeable avec chaque nouvelle dose, plus important vers la surface, que vers la profondeur.

Quand le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à l'unité $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR = 5, le lessivage du potassium soluble augmente avec chaque nouvelle dose.

L'enfouissement de matière organique provoque davantage de lessivage à la surface et une accumulation progressive de K^+ vers la profondeur (Doses D1 et D2). Après percolation avec la 3ème dose K^+ est complètement lessivé des niveaux 0,1,2. La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose le lessivage de K^+ soluble croît, atteignant progressivement la profondeur. L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre respectivement 16,17 me. 5,0 me 1,75 me, donc moins de K^+ entraîné par rapport à la solution $\frac{20}{5}$ M.O. 5%.

Quant au K^+ échangeable, après percolation avec la première dose, on observe une accumulation progressive vers la profondeur (0,1 0,15 0,2 et 0,3 me respectivement aux niveaux 0,1,2,3). Après l'apport de la forte dose (D3) on observe un lessivage complet de K^+ échangeable tout le long du profil.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en base alcalines et alcalino-terreuses mais de forte concentration, $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ SAR = 7, on observe l'entraînement de K^+ soluble et échangeable tout le long du profil de plus en plus poussé avec chaque nouvelle dose de lessivage.

L'enfouissement de 5% de matière organique en utilisant cette solution de SAR = 7 provoque avec chaque dose, un lessivage de plus en plus fort de potassium soluble, mais les teneurs sont plus élevées au départ (D1). L'évolution est assez parallèle à celle due au traitement $\frac{12,5}{12,5}$ avec apport de matière organique.

L'analyse des lessivats montre des valeurs intermédiaires, entre celles obtenues avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$ et apport de 5% de matière organique, et celles dues à l'utilisation de la solution de rapport $\frac{12,5}{12,5}$ en même temps que 5% de matière organique est apportée. Tout cela indique que le lessivage de K^+ soluble dépend d'une part de l'apport de la matière organique et d'autre part de l'activité de l'ion sodium dans la solution de lessivage (valeur des SAR). Par ailleurs la matière organique provoque plus de lessivage de K^+ échangeable.

Dans le cas de percolation avec l'eau distillée, avec chaque nouvelle dose, la diminution de K^+ soluble et de K^+ échangeable du sol augmente progressivement; cependant l'analyse des lessivats montre moins de K^+ entraîné par rapport à tous les autres lessivats (D1=1,62 me D2 = 0,74 me D3 = 0,5 me).

Conclusions.

1. L'augmentation de la concentration en NaCl accroît le lessivage de K^+ dans le sol.
2. Quelque soit le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ il y a lessivage croissant de K^+ avec les doses successives.
3. L'élévation de la concentration en sodium de la solution (conductivité) augmente le lessivage du potassium.
4. Au cours des percolations, le potassium paraît être libéré lentement, probablement du "pool intermédiaire" lié aux argiles (Illite en particulier) même avec de grandes quantités de solution de lessivage, tout le K^+ n'est pas lessivé.
5. La matière organique libère du potassium dans le sol mais la présence de sodium provoque un accroissement du lessivage du potassium. L'ordre de lessivage est fonction du SAR de la solution.

$$\frac{20}{5} + M.O \ 5\% \ SAR = 12,6 > \frac{25}{25} + M.O \ 5\% \ SAR \ 7 > \frac{12,5}{12,5} + M.O \ 5\% \ SAR \ 5$$

6. Les solutions salines lessivent davantage le potassium que l'eau distillée.
7. En général, l'entraînement du potassium échangeable est important, mais en présence de matière organique et avec une forte dose de lessivage (D3) il devient total.

TABLÉAU XXXIII- : teneurs en K^+ dans les lessivats - Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1	D2	D3
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l	2,43	1,22	0,50
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 meq/l + MgSO ₄ 2,5 meq/l + + M.O 5 %	18,19	5,20	2,25
NaCl 40 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 5 meq/l + MgSO ₄ 5 meq/l	2,16	1,22	0,50
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 meq/l + MgSO ₄ 6,25 meq/l	2,16	1,24	0,74
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 meq/l + MgSO ₄ 6,25 meq/l + + M.O 5 %	16,17	5,0	1,75
NaCl 25 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 meq/l + MgSO ₄ 12,5 meq/l	2,16	1,24	0,50
NaCl 25 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 meq/l + MgSO ₄ 12,5 meq/l + + M.O 5 %	17,08	4,57	1,47
témoin l'eau distillée	1,62	0,74	0,50

TABLAU XXXIV- REPARTITIONS DE K⁺ SOLUBLE APRES LE LESSIVAGE - SOL TRÈS SALE DE BUISIE

K⁺ me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5me/l	NaCl 20me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l + MgSO ₄ 2,5me/l + M.O 5 %	NaCl 40me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l + MgSO ₄ 5me/l	NaCl 12,5me/l+ CaSO ₄ 6,25me/l+ MgSO ₄ 6,25me/l	NaCl 12,5me/l+ CaSO ₄ 6,25me/l+ MgSO ₄ 6,25me/l + M.O 5 %	NaCl 25me/l+ CaSO ₄ 12,5me/l +MgSO ₄ 12,5me/l	NaCl 25me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l + MgSO ₄ 12,5me/l + L.O 5 %	Témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	0,15	0,15	0,00	0,00	0,10	0,10	0,15	0,10
	10-20	0,20	0,75	0,30	0,30	0,50	0,30	0,30	0,30
	20-30	0,45	0,30	0,40	0,45	1,05	0,45	0,80	0,40
	30-40	0,50	0,00	0,45	0,50	1,50	0,40	1,40	0,40
1000 ml	0-10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
	10-20	0,10	0,15	0,10	0,15	0,00	0,10	0,00	0,15
	20-30	0,20	0,20	0,15	0,20	0,20	0,20	0,15	0,20
	30-40	0,30	0,55	0,20	0,30	0,45 0,60	0,30	0,30 0,45	0,30
1500 ml	0-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10-20	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20-30	0,15	0,00	0,15	0,10	0,00	0,10	0,15	0,15
	30-40	0,15	0,15 0,20	0,20	0,20	0,20	0,15	0,45	0,20

- 128 -

TABLEAU N° 25 - REPARTITIONS DE K⁺ ECHANGABLE APRES LE LESSIVAGE - SOL TRES SALE DE TUNISIE .

K⁺ me/100 g de sol

Dose de lessivage	Profondeur de Cm	NaCl 20me/l+	NaCl 20me/l+	NaCl 40 me/l+	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l+	NaCl 25 me/l+	NaCl 25me/l	Témoin (H ₂ O)
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l+ + M.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l+ MgSO ₄ 5 me/l+	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 25 me/l+ MgSO ₄ 6,25me/l + M.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l + M.05 %	
500 ml	0-10	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,00	0,15
	10-20	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,20
	20-30	0,20	0,20	0,15	0,15	0,20	0,15	0,15	0,20
	30-40	0,20	0,20	0,15	0,15	0,30	0,15	0,20	0,20
1000 ml	0-10	0,10	0,15	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10
	10-20	0,15	0,10	0,10	0,15	0,00	0,10	0,00	0,15
	20-30	0,20	0,15	0,15	0,15	0,00	0,10	0,00	0,20
	30-40	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,20
1500 ml	0-10	0,15	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,15
	10-20	0,15	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10
	20-30	0,15	0,00	0,10	0,15	0,00	0,10	0,00	0,15
	30-40	0,10	0,10	0,10	0,15	0,00	0,10	0,10	0,15

D. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES CHLORURES APRES LE LESSIVAGE.

Les sept solutions employées dans notre expérience contiennent des chlorures.

- NaCl 20 me/l + CaSO₄.2H₂O 2,5 me/l + MgSO₄ 2,5 me/l
- NaCl 20 me/l + CaSO₄.2H₂O 2,5 me/l + MgSO₄ 2,5 me/l + M.O.5% (dans le sol)
- NaCl 40 me/l + CaSO₄.2H₂O 5 me/l + MgSO₄ 5 me/l
- NaCl 12,5 me/l + CaSO₄.2H₂O 6,25 me/l + MgSO₄ 6,25 me/l
- NaCl 12,5 me/l + CaSO₄.2H₂O 6,25 me/l + MgSO₄ 6,25 me/l + M.O.5% (dans le sol)
- NaCl 25 me/l + CaSO₄.2H₂O 12,5 me/l + MgSO₄ 12,5 me/l
- NaCl 25 me/l + CaSO₄.2H₂O 12,5 me/l + MgSO₄ 12,5 me/l + M.O.5% (dans le sol)

Nous avons une très forte teneur de chlorures (11,25me/100g) dans notre sol au début de l'expérience. Le lessivage des chlorures a été très rapide. Comme nous avons utilisé un contact goutte à goutte, le lessivage des chlorures a été très efficace.

Dans le cas de la solution sodique, de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 après l'apport de la première dose, on observe un lessivage des chlorures très important par rapport au sol originel (10,7 me 10,6 10,58 et 10,48 me/100 g respectivement aux niveaux 0,1,2,3). L'analyse du lessivat montre 41,12 me de chlorure provenant du sol. 95% des chlorures préexistants sont lessivés et le sol s'équilibre avec la solution ajoutée. On observe une légère accumulation des chlorures vers la profondeur. Après percolation avec la 2ème dose on observe une légère augmentation des chlorures vers la surface (aux niveaux 0,1 et 2). L'analyse du lessivat montre une faible rétention de Cl par le sol. Après percolation avec la 3ème dose les valeurs de chlorures sont les mêmes qu'avec D2.

L'enfouissement de 5% de matière organique dans le cas de la solution précédente de SAR = 12,6 provoque lors de la percolation avec la première dose, une légère augmentation du lessivage des chlorures par rapport au sol original (quantité un peu plus élevée dans le lessivat) mais en même temps il en reste un peu plus dans le sol qu'après percolation avec la même solution sans matière organique. Après les 2ème et 3ème doses, les résultats obtenus sont à peu près les mêmes que dans le cas précédent, qu'il s'agisse des chlorures restant dans le sol ou de ceux entraînés dans les lessivats. Seulement lors de l'utilisation de la forte dose, l'effet de la matière organique serait d'appauvrir un peu plus le sol en chlorure à certains niveaux (1 et 2).

La comparaison entre D1, D2 et D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage des chlorures préexistant. L'analyse des lessivats confirme l'analyse du sol.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6, l'addition de 1% de matière organique modifie quelque peu le phénomène. Après percolation avec 230 ml de solution, le lessivat partiel contient 67% de chlorure, ce qui prouve la vitesse de déplacement des ions chlorures. Après percolation, avec 320 ml 85% des chlorures sont lessivés; pour le lessivage complet des chlorures du profil, il est nécessaire d'utiliser de grandes quantités de solutions de lessivage.

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ SAR = 18 l'apport de la première dose provoque un lessivage des chlorures très important par rapport au sol original. (10,47 me et 10,55me 10,47 me et 10,39 me/100g respectivement aux niveaux 0,1,2,3), mais nettement moins qu'avec la solution précédente. Les teneurs en chlorures dans le sol restent presque doubles de ce qu'elles étaient avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$ à tous les niveaux et avec toutes les doses de lessivage. L'analyse du lessivat (D1) montre 2,26 me de moins de chlorure par rapport au lessivat de $\frac{20}{5}$, ce qui confirme l'analyse du sol. On observe une tendance à une faible accumulation des chlorures vers la profondeur avec toutes les doses. Après percolation avec la 2ème et 3ème doses. Les teneurs en chlorure du sol varient

niveau de profondeur (intervalles = 10 cm)

Fig. 16 (1)
Sol très salé de Tunisie

Dose D1

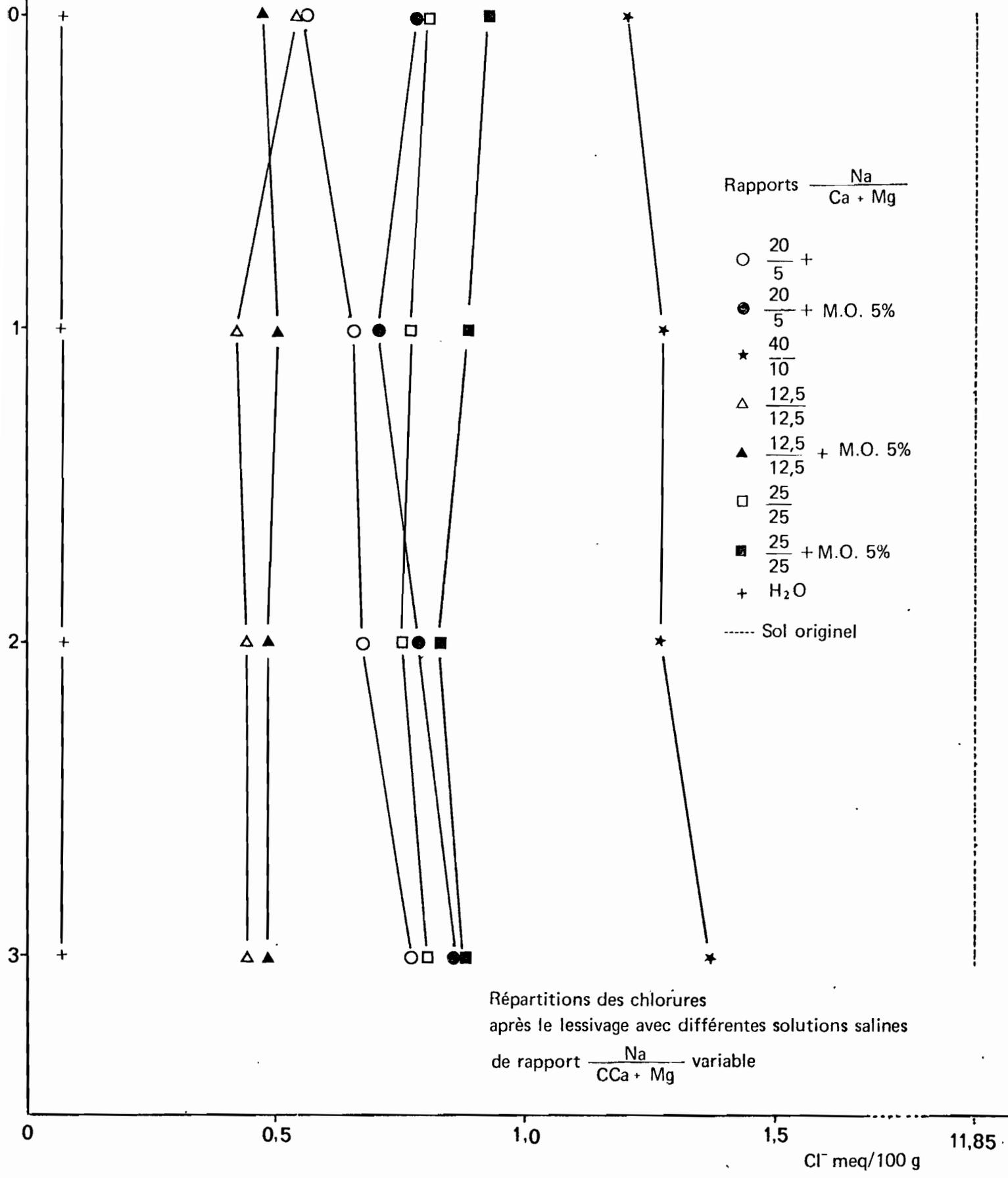


Fig. 16 (2)
Dose D2

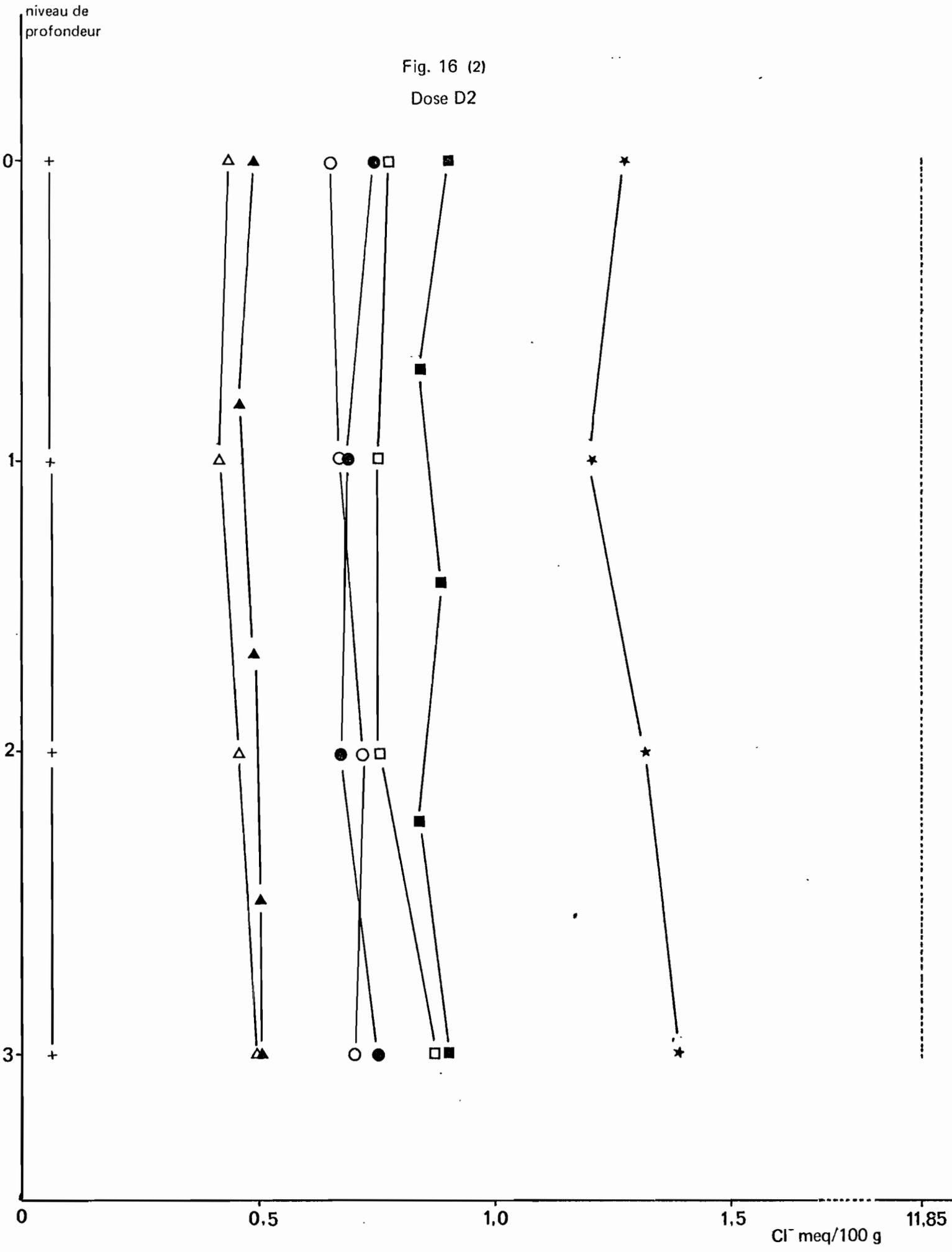
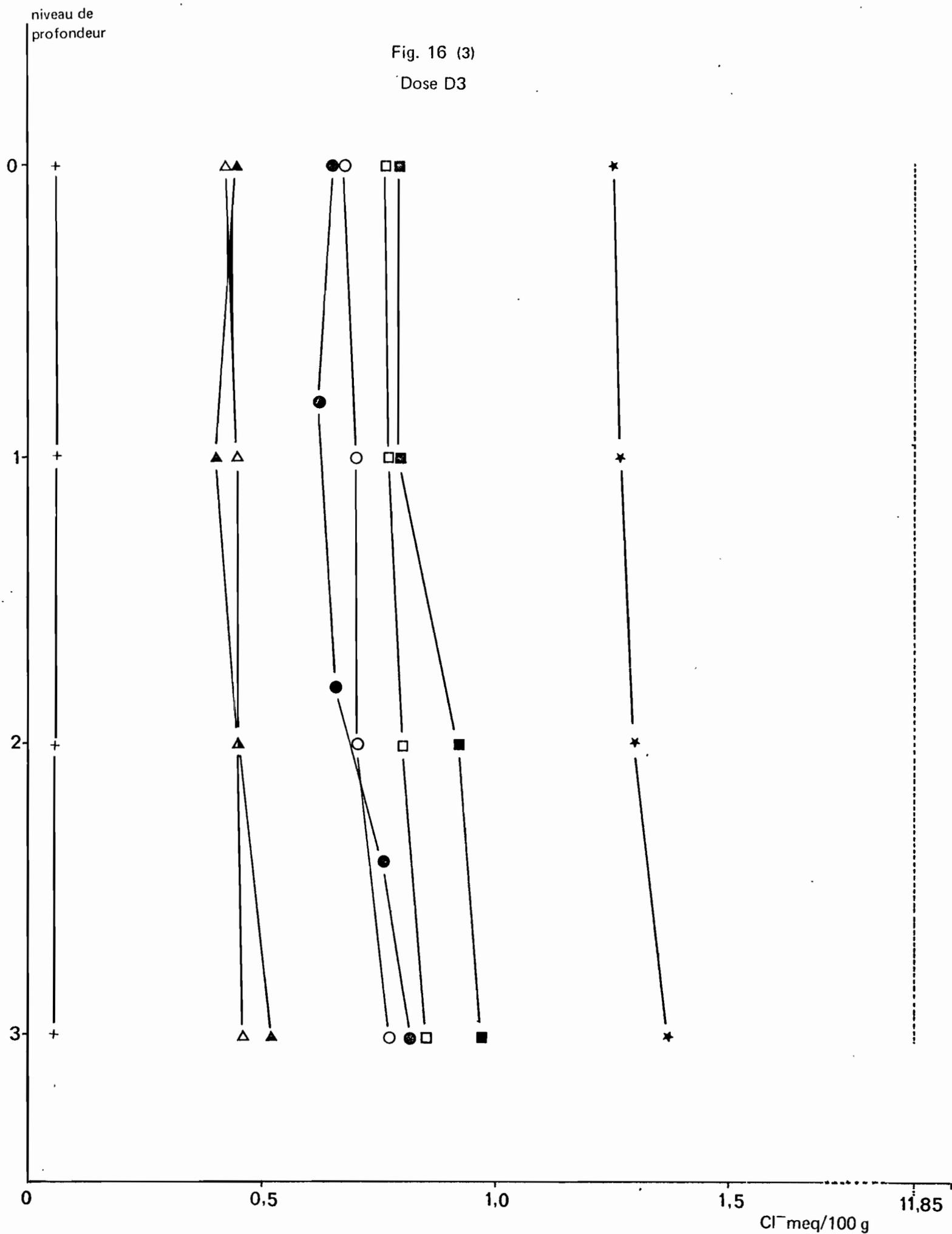


Fig. 16 (3)

Dose D3



très peu aux différents niveaux.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1 $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ SAR=5, après percolation avec la première dose on observe un maximum de lessivage des chlorures préexistants par rapport à toutes les solutions salines et le sol originel. L'analyse du lessivat confirme l'analyse du sol. Au niveau 0 le lessivage de Cl est un peu plus élevé aux 2ème et 3ème doses par rapport à la 1ère dose, mais aux niveaux 1,2,3 les valeurs sont constantes avec chaque nouvelle dose de lessivage. L'analyse des lessivats indique cependant encore une légère quantité de chlorure provenant du sol.

L'enfouissement de 5% de matière organique dans le cas de percolation avec la solution précédente de SAR 5 montre que, après percolation avec la première dose, il y a un peu plus de rétention des chlorures aux niveaux 1,2,3 par rapport à solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. On observe également après la 2ème dose une légère rétention des chlorures par le sol à tous les niveaux par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. Après percolation avec la 3ème dose, les valeurs de chlorures sont les mêmes avec ou sans matière organique; même aux deux premières doses, les différences dues à l'apport de matière organique sont très faibles.

Dans le cas de la solution dont le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1 et de forte concentration (rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ SAR = 7) après percolation avec la première dose il y a un fort lessivage des chlorures par rapport au sol originel. Il ne reste que 0,8 0,77 0,75 et 0,8 me/100 g de chlorures aux niveaux 0,1,2,3 respectivement. On observe un net accroissement des chlorures à tous les niveaux par rapport à la solution précédente. A chaque nouvelle dose de lessivage, les variations sont très faibles, indiquant cependant au niveau 0 une légère diminution progressive.

L'addition de 5% de matière organique dans le sol lors de la percolation avec la solution précédente de SAR 7 montre davantage de rétention des chlorures avec toutes les doses par rapport à la solution simple $\frac{25}{25}$. La comparaison entre D1, D2 et D3 dans le sol nous montre un léger lessivage des chlorures à la surface, et une légère

accumulation en profondeur (niveaux 2,3) avec D3.

Dans le cas de percolation avec l'eau distillée, dès la première dose 99,5% des chlorures sont lessivés.

Conclusion.

Quelle que soit la valeur du rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ de la solution, le lessivage des chlorures est très important dès la première dose. Les courbes de teneur du sol en chlorures sont très régulières en profondeur, dans ce sol très salé de Tunisie beaucoup plus que dans le cas du sol brun calcaire artificiellement salé.

Les teneurs absolues augmentent avec le taux de chlorure dans la solution de lessivage. La matière organique a un léger rôle de rétention. Le maximum de chlorure restant ^{dans} le sol s'observe après percolation par la solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ et le minimum après percolation par celle de rapport $\frac{12,5}{12,5}$. En définitive, on observe un fort lessivage des chlorures préexistants dans le sol. L'équilibre s'établit au même taux que la solution de percolation, et est légèrement accru dans certains cas (en général dose D1 et solution $\frac{25}{25}$) par la présence de matière organique.

TABLEAU XXXVI : Teneurs en Cl^- (me) dans les différents lessivats

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	51,12	41,12	9,3		10,15	0,15
NaCl 20 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + M.O 5 %	52,7	41,7	10,15	0,15	10,12	0,12
NaCl 40 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l + MgSO ₄ 5 me/l	58,86	38,86	19,6		19,92	
NaCl 12,5 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	50,4	44,15	6,93	0,68	6,93	0,68
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5 %	49,66	43,41	6,7	0,45	6,45	0,20
NaCl 25 me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5 me/l	53,46	40,96	13,12	0,62	13,12	0,62
NaCl 25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5 me/l + M.O 5 %	55,27	42,77	12,61	0,11	12,98	0,48
témoin l'eau distillée	43,38	43,38	0,15	0,15	0,10	0,10

TABLEAU N°VII - REPARTITIONS DES CHLORURES APRES LE LESSIVAGE DANS LE SOL DES OULES DE FUMIGES (1).

Dose de lessivage	Prof. en Cm	NaCl 20/5me/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	NaCl 20/5 CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l +MgSO ₄ 2,5me/l + M.01 % + (NH ₄) ₂ SO ₄ 50 mg/l	NaCl 20/5 CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l +MgSO ₄ 2,5me/l + M.01 % + (NH ₄) ₂ SO ₄ 50mg/l	NaCl 40 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O + .5 me/l +MgSO ₄ 5 me/l	NaCl 12,5me/+ CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 MgSO ₄ 6,25	NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l +M.05 % + (NH ₄) ₂ SO ₄ 5mg/l	NaCl 25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 MgSO ₄ 12,5 me/l	NaCl 25me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 MgSO ₄ 12,5me/l +M.05 % + (NH ₄) ₂ SO ₄ 50mg/l	Témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	0,55	0,78	0,80	1,20	0,54	0,47	0,80	0,92	0,07
	10-20	0,65	0,70	0,80	1,27	0,42	0,50	0,77	0,88	0,07
	20-30	0,67	0,78	0,80	1,27	0,44	0,48	0,75	0,82	0,07
	30-40	0,77	0,86	0,90	1,37	0,44	0,48	0,80	0,87	0,07
1000 ml	0-10	0,55	0,74	-	1,27	0,44	0,49	0,77	0,90	0,06
	10-20	0,67	0,68	-	1,20	0,42	0,46	0,75	0,84	0,06
	20-30	0,72	0,68	-	1,32	0,46	0,49	0,75	0,89	0,06
	30-40	0,70	0,75	-	1,39	0,50	0,50	0,87	0,84	0,06
1500 ml	0-10	0,61	0,65	-	1,25	0,42	0,44	0,76	0,79	0,05
	10-20	0,70	0,62	-	1,27	0,44	0,40	0,77	0,78	0,06
	20-30	0,70	0,66	-	1,30	0,45	0,45	0,80	0,92	0,06
	30-40	0,77	0,76	-	1,37	0,46	0,52	0,85	0,97	0,06

E. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES SULFATES SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE.

Le sol contient 98 me de sulfates au début de l'expérience pour 100 g de sol. L'ion sulfate existe dans notre sol l'état de sulfate de calcium et magnésium. Le sulfate de magnésium est très soluble tandis que le gypse est peu soluble. En général les courbes après percolation avec la première dose montrent davantage de migration de SO_4 au niveau 0 et moins dans le reste du profil. Après l'apport de la 2ème et la 3ème doses la migration des sulfates est encore plus importante vers la surface (niveau 0) que dans les niveaux 1,2,3.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{20}{5}$ SAR = 12,6 après percolation avec la première dose; on observe un lessivage important au niveau 0 (20 me/100g) et entre 9 et 10 me/100g aux niveaux 1,2,3. L'analyse du lessivat montre 40,7 me de sulfate provenant du sol. Après percolation avec la 2ème dose il y a davantage de lessivage de sulfate à tous les niveaux par rapport à la première dose. (19 me 10,8 me 8,6 et 15 me/100g aux niveaux 0,1,2,3 respectivement). L'analyse du lessivat montre 19,06 me de sulfate provenant du sol. Après percolation avec la 3ème dose il y a davantage de lessivage au niveau 0 (14,8 me/100g) et encore un léger lessivage des sulfates dans le reste du profil par rapport à la 2ème dose. L'analyse du lessivat montre 17,99 me de sulfate provenant du sol. La comparaison entre D1, D2, D3, dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage des sulfates.

L'analyse des lessivats D1, D2, D3 montre une diminution progressive des teneurs en sulfate provenant du sol.

L'enfouissement de matière organique (5%) dans le cas de la solution précédente de SAR = 12,6 après percolation avec les doses D1, D2, D3) montre qu'il y a davantage de lessivage des sulfates à tous les niveaux et avec toutes les doses de lessivage par rapport à tous les autres traitements. L'analyse des lessivats confirme l'analyse du sol.

- Après percolation avec la première dose on observe davantage de lessivage des sulfates par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. (41 me 35,4 me 36,2 et 37,2 me/100g d'entraînement aux niveaux 0,1, 2,3 par rapport au sol original). L'analyse du lessivat montre 9,16me

de plus de $\text{SO}_4^{''}$ provenant du sol par rapport au lessivat de solution simple $\frac{20}{5}$. On observe un léger noircissement des colonnes à cause de la sulfato-réduction.

Après percolation avec la 2ème dose, le phénomène de sulfato-réduction devient très intense tout le long du profil. On observe 10 me/100g de lessivage de sulfate au niveau 0 (milieu aérobie) et une légère accumulation vers les niveaux de profondeur par rapport à la première dose. L'analyse du lessivat montre légèrement plus de $\text{SO}_4^{''}$ provenant du sol que dans le lessivat de traitement simple $\frac{20}{5}$ sans matière organique. Lors du développement du phénomène de sulfato-réduction la présence de matière organique n'augmente qu'assez peu l'entraînement des sulfates. Ensuite le noircissement de la colonne disparaît aux 3/4 avec la percolation maximum (dose D3).

Après percolation avec la 3ème dose on observe 10,1 me/100 g de plus de lessivage de sulfate en surface par rapport à la dose D2. L'analyse du lessivat montre légèrement plus de sulfate (1,51 me) par rapport au lessivat de solution simple $\frac{20}{5}$. Ce qui montre à nouveau que la matière organique joue un rôle important dans l'entraînement de SO_4 en surface dans les conditions aérobies. La sulfato-réduction a eu un rôle de ralentissement en profondeur, mais relativement faible dans le cas de la solution riche en sodium.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose, il y a davantage de lessivage des sulfates au niveau 0 et un léger dépôt vers les niveaux de profondeur, là où se trouvent les conditions anaérobies, facilitant la sulfato-réduction.

L'enfouissement de 1% de matière organique dans le cas de solution de SAR 12,6 montre davantage de lessivage de $\text{SO}_4^{''}$ par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$ sans matière organique. L'apport de 1% de la matière organique provoque à peu près le même entraînement de $\text{SO}_4^{''}$ dans le sol que 5% de matière organique.

niveau de profondeur

Fig. 17 (1)

Sol très salé de Tunisie

Dose D1

Rapports $\frac{Na}{Ca + Mg}$

○ $\frac{20}{5} +$

● $\frac{20}{5} +$ M.O. 5%

★ $\frac{40}{10}$

△ $\frac{12,5}{12,5}$

▲ $\frac{12,5}{12,5} +$ M.O. 5%

□ $\frac{25}{25}$

■ $\frac{25}{25} +$ M.O. 5%

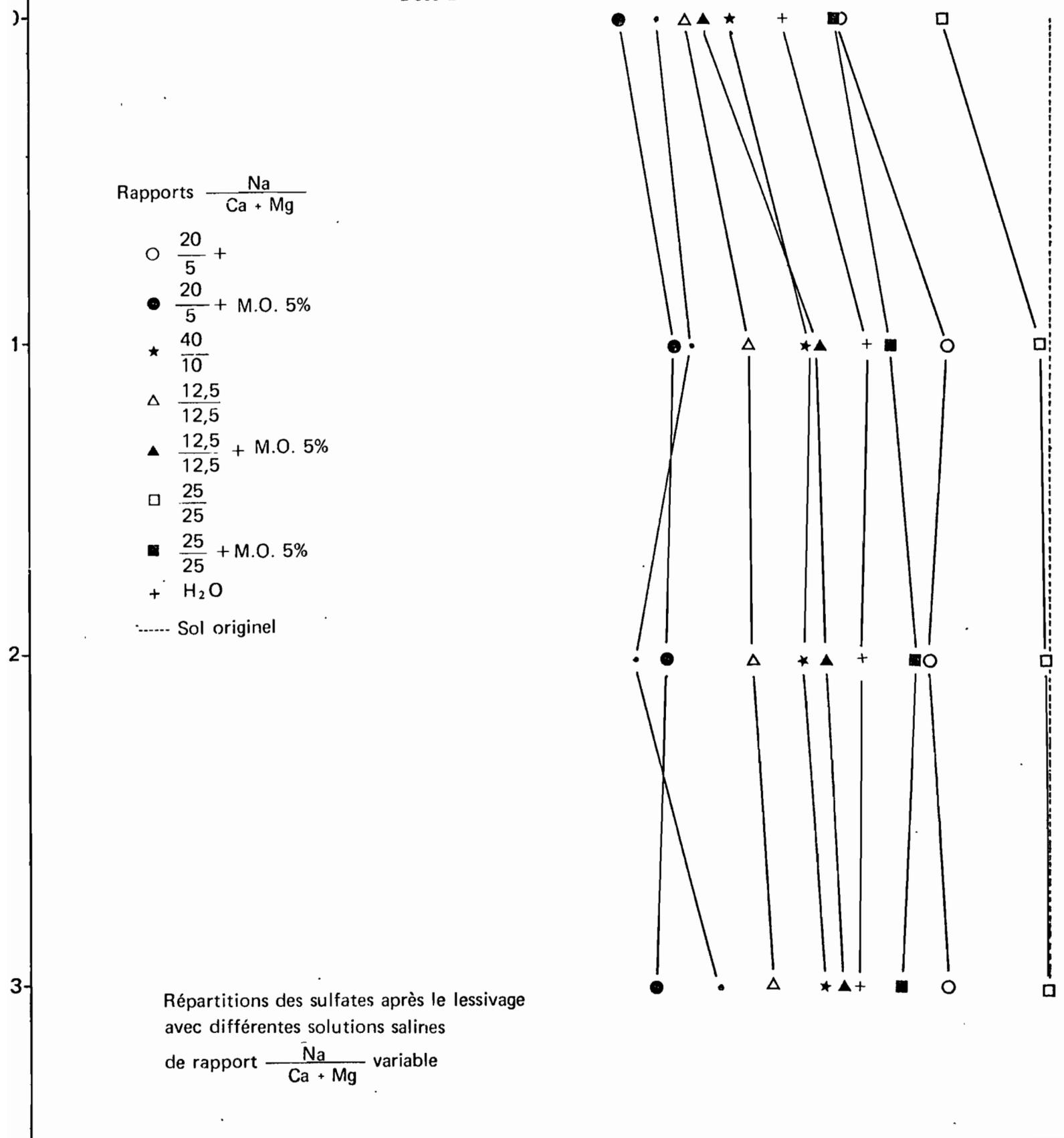
+ H₂O

----- Sol originel

Répartitions des sulfates après le lessivage
avec différentes solutions salines

de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

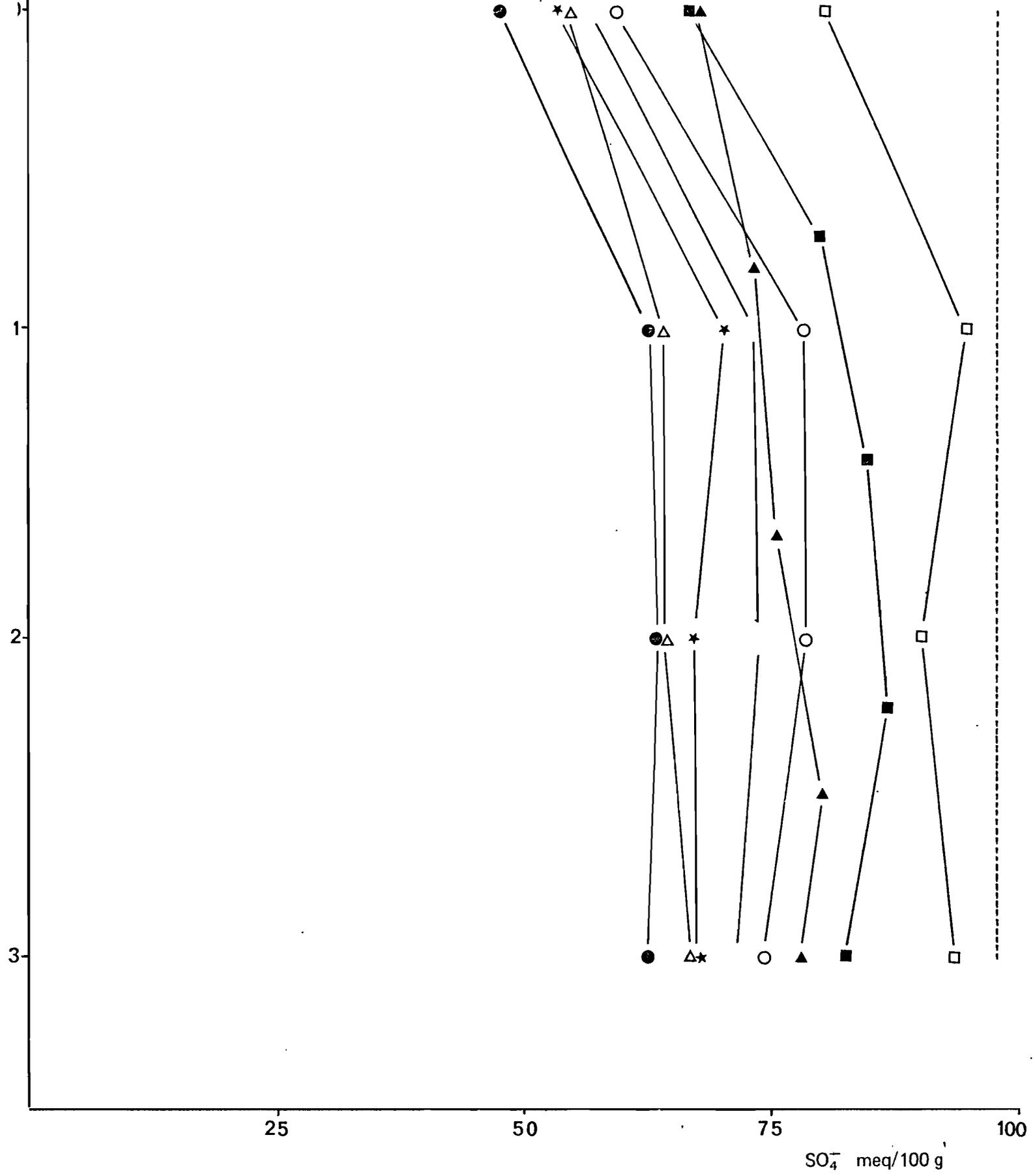
0 25 50 75 100 SO₄⁻ meq/100 g



niveau de
profondeur

Fig. 17 (2)

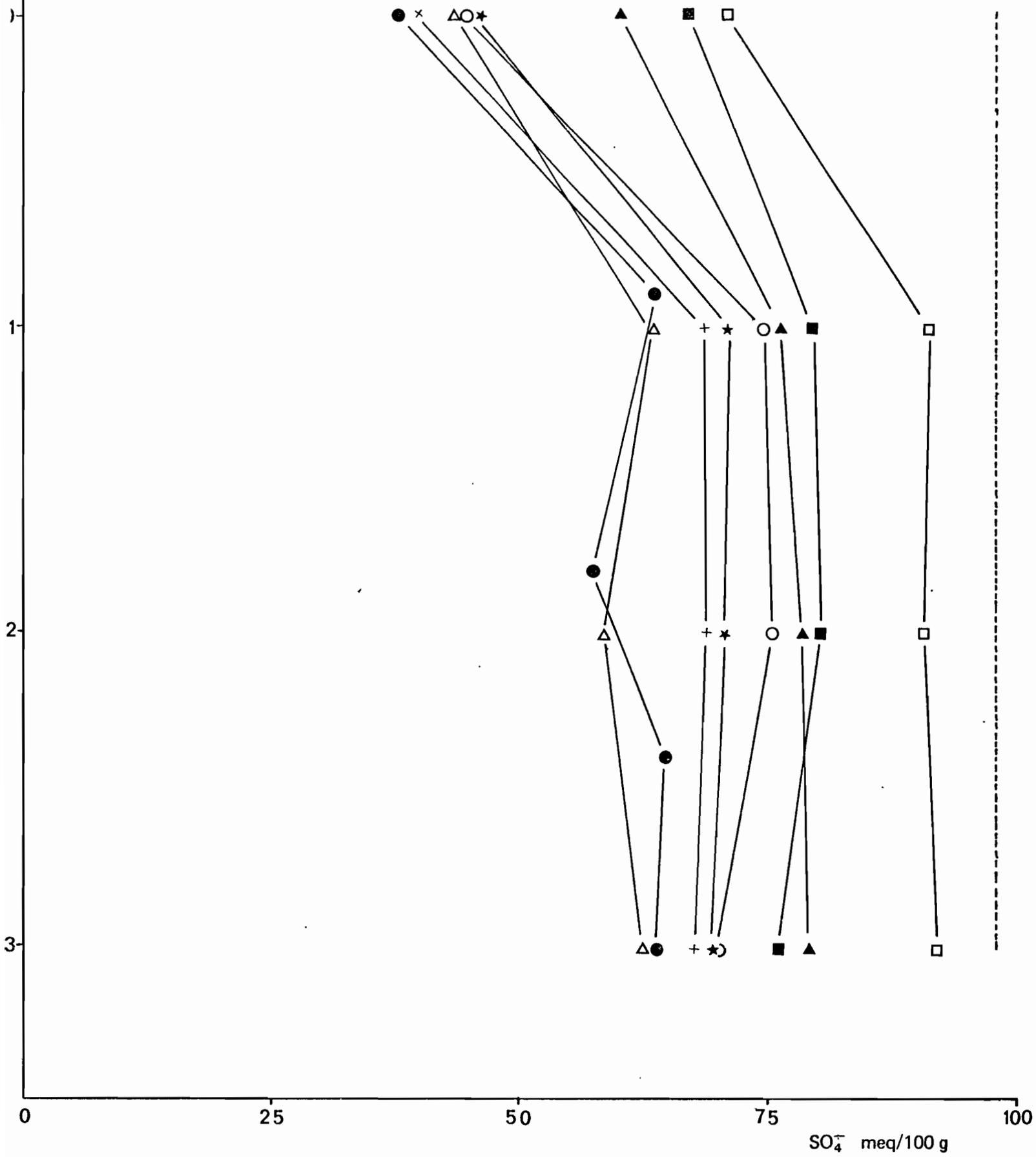
Dose D2



niveau de
profondeur

Fig. 17 (3)

Dose D3



L'analyse du lessivat montre 1,87 me de moins de sulfate que dans le lessivat de solution $\frac{20}{5}$ + M.O.5%. Ce qui indique que 1% de M.O. à la même efficacité pour l'entraînement des sulfates, que 5% M.O. L'addition de 1% matière organique provoque la sulfato-réduction, mais il y a plus de sulfato-réduction vers la partie centrale de la colonne (absence d'oxygène) mais moins vers l'extérieur ce qui permet l'entraînement de SO_4^{--} .

L'analyse du lessivat montre 48 me de SO_4^{--} provenant du sol avec la première dose.

TABLEAU 38

Teneur en SO_4^{--} (me) après lessivage avec solution de rapport $\frac{20}{5}$ + 1% M.O.

niveau de profondeur	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	-
SO_4^{--} me/100g dans le sol après lessivage de 500 ml	60,8	64,2	58,6	67,0	-
Dose de lessivage partiel	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml	Total 500 ml D1
SO_4 me dans les lessivats	19,27	14,04	9,36	6,66	50,49

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ SAR=18 après percolation avec la 1ère dose on observe davantage de lessivage des sulfates dans le sol par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$ sans matière organique. L'addition de NaCl augmente le lessivage des sulfates, phénomène déjà souvent étudié (Pouget). La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec D2 il y a lessivage important des sulfates tout le long du profil par rapport à la première dose (13,8 me 5,4 me 7,8 et 9,8 me/100 g aux niveaux 0,1,2,3 respectivement).

Après l'apport de la 3ème dose on observe un lessivage de sulfate au niveau 0 (8,4 me/100 g) et un dépôt de sulfate dans le reste du profil par rapport à la 2ème dose. L'augmentation de SO_4 en solution diminue le lessivage en profondeur par rapport à la solution $\frac{20}{5}$.

L'analyse des lessivats (D1,D2,D3), montre 41,76 me 24,5 et 21,98 me de sulfate.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1 et de moyenne concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5) après percolation avec les doses (D1,D2,D3) on observe davantage de lessivage de sulfate par rapport à tous les traitements sauf $\frac{20}{5} + M.O$ 5% on observe un lessivage décroissant de la surface vers la profondeur (D2 et D3). La comparaison entre D1,D2,D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage croissant des sulfates. L'analyse des lessivats (D1,D2,D3) montre respectivement 36,95 me 17,51 me 14,04me de sulfate provenant du sol.

L'enfouissement de matière organique 5% dans le cas de la solution précédente montre qu'après percolation avec les doses (D1,D2 et D3) il y a moins de lessivage des sulfates dans le sol par rapport à solution simple $\frac{12,5}{12,5}$. L'addition de matière organique est défavorable au lessivage des sulfates dans les conditions araéribues. Dans notre expérience après percolation avec la première dose il y a lessivage des sulfates mais à partir du moment où nous avons commencé la percolation avec la 2ème dose, le phénomène de sulfato-réduction s'est produit et la moitié inférieure de la colonne est devenue noire (absence d'oxygène). Après percolation avec la 3ème dose ce noircissement a commencé à se déplacer vers la profondeur. Le lessivat de (D1) était brun jaune tandis que les lessivats D2,D3 étaient noirs. A cause de la sulfato-réduction, il se forme du FeS, qui est un produit toxique pour les cultures.

La comparaison entre D1, D2 et D3 dans le sol nous montre qu'avec la première dose il y a lessivage de sulfate mais avec la 2ème dose et 3ème doses il y a seulement une légère diminution au niveau 0 et il n'y a pas d'effet de l'eau qui percole et de la matière organique sur le lessivage des sulfates dans le reste du profil.

En présence de matière organique la diminution des chlorures et l'augmentation des sulfates a fortement diminué le lessivage de ces derniers.

Lorsque la solution de percolation comporte des teneurs égales en bases alcalines et alcalino terreux, mais de forte concentration $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{25}{25}$ (SAR = 7) après percolation avec les doses (D1,D2,D3) le lessivage des sulfates dans le sol est minimum par rapport à celui provoqué par tous les autres traitements. Après percolation avec la première dose on observe un lessivage de sulfate au niveau 0 (9,5 me/100g) et une légère accumulation vers la profondeur. La comparaison entre D1,D2,D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose, il y a un lessivage des sulfates plus important vers les niveaux 0 et 1 par rapport aux niveaux 2 et 3 qui restent constants et proches des teneurs d'origine.

L'analyse des lessivats (D1,D2,D3) montre un minimum des sulfates provenant du sol par rapport à tous les autres lessivats; ce qui confirme l'analyse du sol. L'augmentation de concentration de gypse dans la solution de percolation empêche considérablement l'entraînement du sulfate provenant du sol.

Avec l'enfouissement de matière organique (5%) dans le cas de la solution précédente de SAR = 7 et après percolation avec les doses (D1,D2 et D3) on observe davantage de lessivage des sulfates dans le sol par rapport à la solution simple $\frac{25}{25}$. Le phénomène de sulfato-réduction se produit aussi à partir de la 2ème irrigation. La moitié des colonnes (20cm) est devenue noire (Anaérobiose). Ce noircissement a commencé à se déplacer vers la profondeur avec l'augmentation de percolation (Dose maximum D3). Après percolation avec la 3ème dose (D3) il est resté seulement 10 cm de tranche noire vers le bas des colonnes. L'analyse du lessivat (D1) montre 9,37 me supplémentaire de sulfate provenant du sol par rapport au lessivat de la solution simple $\frac{25}{25}$; mais avec la 2ème dose il y avait moins de sulfate dans le lessivat avec la M.O. (sulfato-réduction Intense).

La comparaison entre D1,D2,D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a un léger lessivage croissant des sulfates tout le long du profil. Dans ce cas l'augmentation de SO_4 tend à favoriser l'accumulation des sulfates mais l'augmentation NaCl tend à

faciliter la migration des produits de réduction des sulfates.

Dans le cas du traitement par l'eau distillée après percolation avec la première dose on observe un lessivage de sulfate assez important par rapport au sol original. (21,5 me/100g au niveau 0 et 18me/100 g de sulfate dans le reste du profil). L'analyse du lessivat montre 42,12 me de sulfate provenant du sol. La comparaison entre D1 D2 et D3 dans le sol, nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a un lessivage des sulfates plus important vers le niveau 0 que dans le reste du profil. L'analyse des lessivats D2 et D3 montre 22,73, 17,39 me de sulfate provenant du sol. L'eau distillée a aussi la même efficacité que les autres solutions salines sans matière organique dans ces dernières l'addition de petite quantité de $SO_4^{''}$ diminue considérablement l'entraînement de $SO_4^{''}$.

Conclusions.

1. Les solutions riches en sodium et pauvres en alcalino-terreux SAR= 12,6 provoquent un fort lessivage des sulfates qui augmente avec les doses successives.
2. L'accroissement de concentration de ces solutions riches en sodium SAR = 18 n'augmente pas lessivage des sulfates.
3. L'addition de la matière organique dans la solution précédente de SAR = 12,6 provoque un maximum de lessivage des sulfates pour la première dose d'irrigation et il n'y a pas d'accumulation ultérieure.

Lors de la percolation avec la 2ème dose, il y a accroissement du phénomène de réduction, la sulfato-réduction, qui provoque normalement une diminution de la perméabilité du milieu et donc un arrêt de l'entraînement des sulfates et surtout du gypse. Le phénomène de réduction provoque également une plus faible mobilité du calcium associé à l'ion sulfate.

4. L'apport de matière organique même à 1% provoque la sulfato-réduction aux niveaux moyens et profonds. Ce phénomène y est en effet plus important en profondeur qu'en surface.

5. Les solutions également riches en alcalino-terreux et sels de sodium ne lessivent que peu de sulfate, pour les fortes concentrations (SAR = 7), et davantage pour les faibles concentrations salines (SAR = 5).

La présence de matière organique dans ce cas provoque également le phénomène de sulfato-réduction qui est plus important vers la profondeur de la colonne qu'en surface. Cette sulfato-réduction diminue l'action lessivante de la matière organique sur les sulfates dans le cas de la solution de SAR = 5, mais elle n'empêche pas ce lessivage dans le cas de SAR = 7 en particulier aux fortes doses d'irrigation.

6. La sulfato-réduction est plus importante vers le centre de la colonne qu'à l'extérieur.

7. L'apport de gypse, même en faible quantité, même en présence d'une forte quantité de sodium (SAR = 18) diminue considérablement le lessivage des sulfates dans les profils gypseux et calcaires.

8. Les solutions riches en sels de sodium augmentent temporairement l'alcalisation du sol et sa dispersion. Mais ces phénomènes disparaissent rapidement avec l'augmentation des doses d'eau de percolation. Il se produit également une action de sulfato-réduction qui apparaît précocement dans ces traitements et qui est ensuite éliminée par lessivage.

9. Par contre dans les solutions plus pauvres en sels de sodium et contenant des sulfates à égalité la structure meilleure, retarde l'apparition de la sulfato-réduction, mais les produits formés ne sont éliminés que lentement.

L'augmentation de concentration de ces solutions, accroît à la fois la sulfato-réduction, mais aussi son élimination aux fortes doses.

10. L'action de la matière organique, sur le lessivage des sulfates dans les sols très gypseux n'est efficace que dans le cas de solutions riches en sels de sodium.

Dans le cas contraire il faut éviter les phénomènes de réduction en diminuant les doses de matière organique.

11. L'eau distillée provoque un lessivage très important des sulfates.

TABLÉAU XXXIX : Teneurs en SO_4 (me) dans les différents lessivats

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol	Total	Provenant du sol
NaCl 20me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	43,2	40,7	21,56	19,06	20,49	17,99
NaCl 20me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + M.O 5%	52,36	49,86	21,78	19,28	22,0	19,5
NaCl 40 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5me/l MgSO ₄ 5 me/l	41,76	36,76	24,5	19,5	21,98	16,98
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	43,2	36,95	23,76	17,51	20,29	14,04
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5%	46,86	40,61	24,2	17,95	20,5	14,35
NaCl 25me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5 me/l	42,12	29,62	24,75	12,25	22,77	10,27
NaCl 25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5me/l MgSO ₄ 12,5 me/l + M.O 5%	51,59	39,09	21,05	8,55	22,54	10,04
ténoin l'eau distillée	42,12	42,12	22,73	22,73	17,39	17,39

TABIEAU DE REPARTITIONS DES SO_4^{--} SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE EXTRAIT A L'EAU 1/10 + SO_4 DANS NC_3NH_4
 (SOLS DE LA SAIE DE TUNISIE)
 SO_4^{--} me/100 g sol

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2,5 me/l + MgSO_4 2,5 me/l	NaCl 20me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,5 me/l + MgSO_4 2,5 me/l + M.05%	NaCl 40me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 5 me/l + MgSO_4 5 me/l	NaCl 12,5me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l + MgSO_4 6,25 me/l	NaCl 12,5me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6,25 me/l + MgSO_4 6,25 me/l + M.05 %	NaCl 25 me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5 me/l + MgSO_4 12,5 me/l	NaCl 25me/l + $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12,5 me/l + MgSO_4 12,5 me/l + M.05 %	Témoin l'eau distillée
500 ml	0-10	78,20	57,00	67,4	63,60	65,20	88,50	78,17	72,8
	10-20	89,20	62,60	75,6	69,80	76,17	98,00	83,37	81,2
	20-30	87,20	61,80	75,0	70,20	77,33	98,50	86,20	80,4
	30-40	89,20	60,80	77,2	72,20	79,00	98,60	84,60	80,4
1000 ml	0-10	59,20	47,60	53,6	54,20	67,20	80,50	66,87	56,6
	10-20	73,20	62,40	70,2	64,00	73,20	94,83	80,00	73,8
	20-30	78,60	63,60	67,20	63,80	75,53	90,20	84,80	73,8
	30-40	74,20	62,40	67,40	67,20	80,17	93,67	86,70	71,4
1500 ml	0-10	44,40	37,70	45,2	43,40	60,00	70,70	67,03	39,2
	10-20	74,50	63,60	71,2	63,20	76,17	91,20	79,67	68,6
	20-30	75,40	57,40	70,8	58,40	78,50	90,67	80,37	68,8
	30-40	69,80	64,80	69,8	62,40	79,04	92,13	76,13	67,8

F. LA SULFATO-REDUCTION DANS LE SOL DE TUNISIE.

A. LE PHENOMENE ET SON MECANISME.

La sulfato-réduction est la réduction, par voie bactérienne et en conditions anaérobies, des sulfates présents dans les sols. Une fraction limitée de la matière organique (en particulier les acides aliphatiques en C_4 , quelques acides aminés et quelques sucres simples comme le lactose) constitue pour ces bactéries des substrats carbonés (et azotés pour les acides aminés) utilisables comme source d'énergie. L'oxydation anaérobie de l'hydrogène moléculaire peut aussi constituer une source d'énergie pour certains sulfato-réducteurs qui se comportent alors comme des semi-autotrophes, le carbone organique restant cependant indispensable. En outre la fixation d'azote atmosphérique a été démontrée dans le cas de certains sulfato-réducteurs. L'ion sulfate est utilisé comme accepteur final d'hydrogène. Une partie de l'hydrogène sulfuré produit, se dégage à l'état gazeux, et l'autre partie est transformée en sulfures, sulfure ferreux FES , (en particulier SENEZ 1962; ABDEL-MALEK et al 1963; TIMAR 1965, BLOOMFIELD 1969, DOMMERGUES 1970).

Le processus est diffus, les taches de sulfures restant cependant très distinctes. Si ce sol est mis en culture, en présence de matière organique, et irrigué, il y aura apparition de phénomène de toxicité, par production d'hydrogène sulfuré, non seulement dans l'ensemble de l'horizon réducteur, mais préférentiellement au voisinage des graines en cours de germination (sulfato-réduction spermosphérique) ou à la surface des racines (sulfato-réduction rhizosphérique), la sulfato-réduction étant favorisée par les composés organiques solubles diffusant dans le sol (DOMMERGUES, JACQ et BECK 1969 CHEVERRY 1974).

Le phénomène de sulfato réduction correspond à une forte diminution du potentiel d'oxydo-réduction. L'abaissement du potentiel redox, en présence de matière organique à d'autres conséquences, en particulier sur la valeur du pH qui décroît et sur la mobilité du fer qui est fortement augmenté. Cependant la dynamique de cet élément dans de telles conditions est assez variable du fait qu'au contraire le développement de la sulfato-réduction tend à provoquer son blocage.

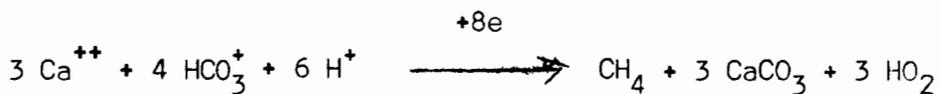
Ces mêmes phénomènes provoquent aussi une diminution de la mobilité des sels du calcium.

L'abaissement de pH peut s'expliquer par la présence de bicarbonate en profondeur (à cause de la matière organique) et probablement aussi par un début de sulfo-oxydation sous l'influence de l'aération (oxygène dissous dans la solution percolante).

D'après VIEILLEFON (1974) la valeur du Eh est liée non seulement aux proportions relatives des formes réduites et oxydés mais est également sous la dépendance du pH.

VIEILLEFON constate que les valeurs du pH sont liées aux importantes quantités de sulfates.

D'après DEELMANN (1975) quand le potentiel redox s'abaisse au-dessous de - 250 mv il y a décomposition du bicarbonate de calcium qui précipite en carbonate avec production de gaz methane.



toujours d'après DEELMAN (1975) l'abondance de l'ion Mg^{++} dans un sol calcaire abaisse le potentiel redox tandis que l'ion Fe^{++} l'élève. La sulfato-réduction conduit à la disparition du gypse, le soufre donnant des sulfures et le calcium du calcaire (précipitation).

Influence de l'alcalisation et dégradation de la structure.

Dans les colonnes où se produit la sulfato-réduction, on a constaté une dégradation de la structure. Elle est liée à la diminution du $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeable et augmentation de pourcentage de sodium échangeable dans le sol. Pendant la percolation avec la solution sodique (1ère dose) en présence de matière organique on a observé un gonflement des argiles et la perméabilité a diminué fortement. Ce gonflement s'est manifesté par un léger écartement de la colonne scellée latéralement à la paraffine que nous avons dû colmater. Ce phénomène apparaissait plus important dans les colonnes percolées par les solutions riches en sodium.

Le mécanisme expliquant la diminution de perméabilité dans les colonnes est la fermeture des pores par un gonflement des minéraux argileux (montmorillonite) et leur dispersion sous l'action du sodium. En particulier NORRISH (1954) ROWELL (1969), FINK et al 1964, 1972, BRIGDE et al (1973) ont montré que l'espacement inter-feuillets des montmorillonites sodiques pouvait atteindre 40 Å, alors que ce même espacement ne dépassait pas 19 Å dans le cas des montmorillonites calciques. D'après ROWELL plus les solutions de percolation sont diluées, plus l'argile va gonfler et plus il y aura diminution de perméabilité.

Les travaux récents (RHOADES, INGVALSON, 1969), montrent l'importance de la nature exacte du minéral argileux; ainsi, de par leur structure, des vermiculites résistent mieux que des montmorillonites à une même solution alcaline.

L'étude théorique du gonflement d'une argile dans un système mixte $\frac{Na}{Ca}$ suppose que l'on choisisse un "modèle" de distribution des ions sur les argiles : modèle des "ions mélangés" ou, au contraire des "ions non mélangés" (plages distinctes d'ions Na et d'ion Ca) ; Mc NEAL 1970; SHAINBERG et al 1971; FINK et al 1971. On se contentera ici de noter que :

- a) dans les sols différenciés par la voie "saline neutre, le gonflement du matériau est limité par les liaisons argile matière organique, avec parallèlement une certaine hydrophobie du matériau.
- b) dans les sols différenciés par la voie "alcaline" ces liaisons sont rompues, le matériau perd son hydrophobie et son pouvoir de gonflement est encore accentué par le caractère sodique du milieu. Ce mécanisme a déjà été envisagé par BAZILEVICH (1965).

Le fer est mis en mouvement dans la phase initiale de la sulfato-réduction; d'ailleurs de façon très variable. L'abaissement de potentiel amène son passage à l'état ferreux mobile (au-dessous de F voisin de 250 mv).

Lorsque l'intensité du processus de sulfato-réduction augmente, l'apparition de quantités plus importantes de H_2S (au dessous de E voisin de 0) tend dans certains cas à faire passer le fer à l'état de sulfure insoluble (FeS).

L'apport d'oxygène et l'épuisement relatif en matière organique rapidement utilisable (Dose D3) provoque la réoxydation du sulfure mais en fonction de chaque cas particulier et de l'évolution locale du phénomène, le fer soluble peut réaugmenter plus ou moins fortement ou au contraire diminuer.

D'après G. OGATA et BOWER (C.A.) (1965) la sulfato-réduction provoque la formation de quantités équivalentes de carbonates, qui après réaction avec le calcium soluble ou échangeable précipitent sous forme $CaCO_3$, ainsi qu'une diminution de la salinité du sol et une augmentation du pourcentage de sodium échangeable.

Cette action de la sulfato-réduction sur l'augmentation de ESP fait que ce phénomène à la fois est dû à une diminution de perméabilité du sol, par suite, ^{de} l'alcalisation, mais aussi accroît l'importance de cette dégradation de ses propriétés physiques. BOWER a également étudié l'intensité de la sulfato-réduction dans deux sols de textures différentes (1-sol sablo-argileux, 2- sol argileux) avec 3 amendements par apport de paille (0,25% 0,5% 1% . Il a observé que l'intensité de la sulfato-réduction est plus forte dans tous les cas dans le sol argileux que dans le sol sablo-limoneux.

Dans le sol argileux l'addition de 0,5% de paille est suffisante pour la réduction au bout de 60 jours de tout le $SO_4^{''}$ contenu dans le sol, tandis que dans le sol sablo-limoneux le même résultat n'est obtenu avec 1% de paille.

D'après TIMAR (1965), la production de H_2S , a principalement lieu à partir des composés inorganiques du soufre (gypse) et le taux de matière organique facilement fermentescible constitue un facteur prépondérant.

La quantité de Na_2SO_4 a un rôle dans les processus de sulfato-réduction biologique. Dans les échantillons sans matière organique il n'y a pas d'effet de sulfato-réduction. Avec 5 g de Na_2SO_4 le processus est faible. C'est très intéressant de noter que la production et dosage de H_2S est seulement possible en présence de

matière organique. Il y a également une diminution de redox potentiel.

D'après BLOOMFIELD les bactéries sulfato-réductrices ont besoin de l'anaérobie mais les conditions suffisamment favorables se développent quand un sol contient les résidus végétaux facilement décomposables. OGATA et BOWER ont montré que la vitesse d'augmentation de sulfato-réduction à un rapport positif avec la quantité de matière organique.

Tableau XLI- Fer dissout Fe_2O_3 (γ/ml) dans les différents lessivats.

Dose de lessivage	D1	D2		D3		
solution de traitement	500	500	500	500	500	500
$\frac{20}{5} + M.O\ 5\%$	3,57	6,25	1,79	2,98	11,60	1,19
$\frac{12,5}{12,5} + M.O\ 5\%$	8,63	5,95	1,49	5,06	1,79	9,82
$\frac{25}{25} + M.O\ 5\%$	3,27	3,57	1,49	3,27	1,19	2,38

Fer dissout Fe_2O_3 (γ/ml) dans le cas de solution $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5} + 1\% M.O$ apportée au sol.

Dose de lessivage	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml
γ/ml Fer dans le lessivat	2,38	1,49	0,60	0,60
	S- dans le sol (mg/100g) dosé comme H_2S			
couche	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm
S dans le sol (mg/100g)	0,8	0,6	0,4	5,3

Tableau XLII- Teneur, en soufre mg/100g (dose comme H₂S) de sol humide.

	Prof en cm	$\frac{20}{5} + M.O$	$\frac{12,5}{12,5} + M.O$	$\frac{25}{25} + M.O$
500 ml	0-10	20,6	-	-
	10-20	1,6	-	-
	20-30	14,9	-	-
	30-40	2,2	-	-
1000 ml	0-10	1,0	7,0 trace	5,3 5,8
	10-20	1,6	7,9	7,2
	20-30	1,4	14,3	12,8
	30-40	2,6	24,4	16,1
1500 ml	0-10	-	trace	-
	10-20	0,9	0,6	0,9
	20-30	0,8	trace	2,2
	30-40	-	3,0	2,3

Soufre mg/l dans les lessivats, dosé comme H₂S.

Dose de lessivage	D1	D2		D3			
Solution de traitement	500ml	500	1000	500	500+	500+	500
$\frac{20}{5} + M.O$ 5%	4,8	24,0		1,6	3,2	1,6	4,8
$\frac{12,5}{12,5} + M.O$	8,0	14,4		1,6	3,2	1,6	-
$\frac{25}{25} + M.O$	9,6	8,0		8,0	16,0	-	-

B. LES OBSERVATIONS SUR LE SOL DE TUNISIE.

Dans les différentes colonnes de sols étudiés, après lessivage avec différentes solutions salines, on observe que l'intensité de la sulfato-réduction ne se manifeste pas uniformément; elle est plus forte lors de l'enrichissement des solutions en sulfates, ainsi qu'en profondeur et dans le centre des colonnes.

Dans le cas de la plus forte percolation (D3), le noircissement s'étend vers la base des colonnes et se manifeste dans les fioles de percolat.

On a observé une sulfato-réduction vers le centre des colonnes et vers leur base, sous forme de taches noires de dimensions variables.

Dans les colonnes de terre traitées sans apport de matière organique, l'expérience montre qu'il n'y a pas d'effet visible de sulfato-réduction. Par ailleurs, dans les colonnes à perméabilité élevée ayant reçu la matière organique, et dans le cas de la percolation prolongée (D3), il y a disparition des taches de sulfato-réduction sous l'influence de l'oxygène dissous dans l'eau.

Nécessité de présence de matière organique facilement fermentescible.

Il est intéressant de noter que le sol original avec 0,8% de matière organique ne subit aucune sulfato-réduction. La production d'hydrogène sulfuré et de sulfures de fer n'apparaît que dans les colonnes où l'on a ajouté la matière organique facilement fermentescible. La quantité et la nature de cette matière organique influençant les phénomènes.

Influence des divers traitements.

Dans le cas de percolation avec une solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 et en présence de 5% de matière organique, dose D3, nous avons déterminé les valeurs de (potentiel redox) 204 mv à la surface de la colonne (niveau 0) + 65 mv vers le bas de la colonne au niveau 3 et -40 mv au niveau 4.

Le pH était de 7,6 au niveau 0, s'abaisse vers la profondeur à 7,42 (niveau 3) et 7,45 (niveau 4); cependant après 2 jours le pH diminue (7,3 7,0 7,2) aux niveaux respectifs (0,3,4) et le potentiel redox s'abaisse en surface et monte en profondeur. + 100 mv + 60 mv et + 20 mv aux niveaux 0,3,4 (au lieu de + 204 + 65 et -40 mv).

Dans le cas de percolation avec la solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = 20$ SAR = 12,6 et après enfouissement de matière organique on a observé que le lessivage est très lent par rapport à tous les autres traitements. La solution ajoutée s'accumule en haut des colonnes et ne pénètre que très lentement. Il y a une forte dispersion des argiles et un écoulement latéral des solutions salines tend à se produire sur le côté fermé par de la parafine et ruban adhésif. Après 7 jours il y avait apparition de sulfato-réduction dans toute la longueur du profil.

Après percolation avec la première dose, on a observé dans l'une des répétitions mais pas dans les autres le développement d'une intense sulfato-réduction (dans les autres répétitions le phénomène a joué un peu plus tardivement). Le dosage d'hydrogène sulfure dans le sol montre qu'il y a 20,6 mg de soufre (H_2S) au niveau 0 et 14,9 mg au niveau 1. L'analyse du lessivat montre 4,8 mg de soufre dosé comme gaz H_2S . En même temps on trouve 3,68/ml de fer dans le lessivat, alors que sans matière organique la teneur en fer est nulle. SWEENEY et KAPLAN (1973) ont démontré que la réduction des sulfates en ion H_2S en présence de métal, comme le cation (Fe^{+++}), conduit à la précipitation de métal mono-sulfure. L'hydrogène sulfuré réagit sur le fer du sol amenant la formation de sulfure de fer insoluble (ou presque) donc très peu toxique par rapport à l'hydrogène sulfuré.

Le pH des premières 20 ml recueillis de lessivat, montre que la présence de matière organique et sa rapide évolution augmentent l'alcalinité pH 10 à 11 (méthode colorimétrique au papier) probablement par formation de carbonate de soude. Ensuite le pH baisse à 7,2, à cause de "l'effet de sels" dû aux sels neutres $MgSO_4$ et $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

Les valeurs de soufre dosé comme gaz H_2S ne sont pas très constantes d'une colonne à l'autre, cependant on note en moyenne une diminution des teneurs dans le sol au cours des percolations successives; de même les teneurs en H_2S paraissent plus élevées dans les

premières fractions des lessivats.

On note également un passage important de fer dans les premiers lessivats; par contre dans les derniers lessivats les teneurs en fer paraissent beaucoup plus réduites.

La diminution de la sulfato-réduction, qui démarre à partir de la surface, est due à l'appauvrissement en sodium du sol permettant une meilleure perméabilité (perte environ de 2/3 du sodium échangeable qui était de 8me au début dans ce sol très gypseux provoque par l'apport continu des solutions de NaCl (augmentant également la disponibilité en O_2). Le noircissement ne s'observe plus qu'en profondeur.

L'activation de la sulfato-réduction se traduit par une formation intense d'hydrogène sulfuré, qui réagit sur le fer contenu dans le sol, d'où l'apparition à l'intérieur des colonnes autour des racines et débris de matière organique et en quelque point privilégié d'une gaine de sulfure de fer très nettement visible pendant l'opération de fractionnement des colonnes.

Dans le cas des solutions sodiques, de même rapport SAR = 12,6, l'addition de 1% de matière organique (au lieu de 5% dans le cas précédent) montre qu'après 7 jours il y a apparition des phénomènes de sulfato-réduction qui sont intenses au centre de la colonne (absence d'oxygène) mais il n'y a pas de taches noires à l'extérieur de la colonne.

L'analyse du sol montre 0,8 0,6 0,4 mg de S (dosés sous forme H_2S) aux niveaux 0,1,2 mais vers la profondeur, on observe une forte accumulation de H_2S (5,3 mg S).

La diminution d'intensité de la sulfato-réduction par rapport au cas précédent (seulement 2 mgS sous forme H_2S dans le lessivat) est à relier au taux plus faible de matière organique ajoutée.

Parallèlement il y a 2,38 γ/ml 1,49 0,6 et 0,6 γ/ml de fer dans les 4 petites fractions de lessivat (90 ml chacune) recueillies.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en bases alcalines et alcalino-terreux ($\text{Na} = 12,5 \text{ me/l}$; $\text{Ca} + \text{Mg} = 12,5 \text{ me/l}$) $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = 1 \text{ SAR} = 5$ après l'apport de la première dose sur la colonne du sol enrichi en matière organique, on n'observe pas les taches noires de sulfato-réduction, mais l'analyse du lessivat indique déjà la présence de 8 mg de S (H_2S) ce qui montre d'après STRASCHUK (1972) que la sulfato-réduction commence dans un milieu oxydant. Il y a alors une meilleure percolation que pour la solution précédente de rapport $\frac{20}{5}$ ce qui provoque l'entraînement de tout le H_2S formé. En même temps il y a 8,63 γ/ml de fer dans le lessivat. Tandis que le même traitement sans matière organique n'entraîne pas de fer dans le lessivat.

Après percolation avec la 2ème dose, on observe que l'intensité de sulfato-réduction est maximum par rapport aux premières et 3ème doses. L'analyse du sol indique donc une augmentation progressive de H_2S vers la profondeur. L'analyse du lessivat montre également des quantités importantes de H_2S dosé en tant que gaz (14,4 mgS (sous forme H_2S)). En même temps il y a lessivage de fer mais moins qu'avec la solution sodique $\frac{20}{5}$ puisqu'on n'en dose que 5,95 γ/l au lieu de 8,63 dans le lessivat.

Après percolation avec la 3ème dose on observe une disparition de la sulfato-réduction; mais au centre de la colonne il reste une ligne noire de sulfato-réduction de 0,5 cm en surface, qui augmente vers la profondeur, 2 cm de zone noire au centre de la colonne, et 3 cm vers le bas de la colonne où il y a une forte sulfato-réduction. L'analyse du sol montre la présence de traces de H_2S aux niveaux 0,1,2 et 3 mgS (H_2S) au niveau 3, donc une accumulation de profondeur. L'analyse des lessivats montre également un entraînement de H_2S ; en même temps il y a réduction et mobilisation du fer que l'on retrouve en quantité assez importante dans les lessivats.

Dans le cas de la solution également riche en bases alcalines et alcalino-terreuses ($\text{Na} 25 \text{ me/l} + (\text{Ca}+\text{Mg}) = 25 \text{ me/l}$) $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = 1 \text{ SAR} = 7$ après percolation de la première dose sur le sol enrichi en matière organique, on n'observe pas de taches de sulfato-réduction mais

l'analyse du lessivat montre 9,6 mgS (H_2S) et en même temps on y dose aussi 3,27 γ/ml de fer. Cette solution provoque donc un fort entraînement.

Après percolation avec la 2ème dose on observe 5,3 mg 5,8 mg 7,2 mg 12,8 et 16,1 mg de soufre (dosé sous forme d'hydrogène sulfuré) respectivement aux niveaux 0,1,2,3,4. L'hydrogène sulfuré augmente progressivement vers la profondeur. L'analyse des lessivats montre 8 mgS (sous forme hydrogène sulfuré) avec les premières et 2èmes doses de 500 ml de D2.

Après percolation avec la 3ème dose, l'entraînement de H_2S est complet au niveau 0 et il reste encore assez important aux niveaux 1,2, et 3. Dans le lessivat on dose 16 mgS (H_2S) avec la première dose de 500 ml.

Il y a 3,27 1,19 et 2,38 γ/ml de fer dans les différentes fractions de 500 ml du lessivat.

Il n'y a pas de parallélisme étroit entre les teneurs en fer et les teneurs en H_2S du fait que les phénomènes de sulfato-réduction, et de réoxydation se produisent côte à côte dans la colonne.

G. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA REPARTITION DES CARBONATES ET BICARBONATES SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE.

Le sol contient 0,9 me de carbonates et bicarbonates solubles pour 100 g de sol au début de l'expérience.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 après percolation avec la première dose on observe un léger entraînement des bicarbonates par rapport au sol original. L'analyse du lessivat montre 1,04 me de bicarbonates provenant du sol. Il y a formation de carbonates solubles en présence de NaCl. Cet accroissement de dissolution des carbonates est faible par rapport à celui dans le cas du sol de Feucherolles avec la même solution. C'est sans doute à cause de la présence de grandes quantités de gypse qui ralentissent l'action dissolvante de NaCl sur le calcaire.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a un lessivage croissant des bicarbonates dont la teneur diminue notablement entre la première et la troisième dose. L'analyse des lessivats (D2, D3) montre 0,71 et 0,79 me de bicarbonate.

L'enfouissement de matière organique 5% dans le cas de la solution précédente de SAR = 12,6 après l'apport de la première dose permet un très fort entraînement des bicarbonates dans les lessivats et on observe également une très forte accumulation dans le sol, des quantités de bicarbonates, avec accumulation progressive vers la profondeur. L'analyse du lessivat montre le maximum de bicarbonate provenant du sol par rapport à tous les autres traitements.

Après la percolation de la 2ème dose on observe une forte accumulation de bicarbonate à la surface (niveau 0) et un lessivage vers la profondeur par rapport à la première dose. L'apport de la 3ème dose montre davantage de lessivage des bicarbonates sur l'ensemble de la colonne. L'analyse du lessivat montre 5,5 me de bicarbonate et confirme l'analyse du sol.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 l'apport de la première dose avec 1% de matière organique

dans le sol provoque un lessivage de bicarbonate du sol (0,2 me, 0,2 me 0,16 et 0,26 me/100 g aux niveaux 0,1,2,3 respectivement par rapport au sol original). L'analyse des lessivats montre des fortes teneurs en bicarbonate dans les premières fractions partielles.

Teneur en bicarbonate (me) dans les lessivats de solution
de rapport $\frac{20}{5}$ + M.O. 1%

Dose de lessivage partiel	230 ml	90 ml	90 ml	90 ml
Bicarbonate me dans les lessivats	3,76	3,20	1,64	0,47

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ SAR = 18 après percolation avec la première dose on observe une augmentation légère de formation des bicarbonates par rapport au traitement $\frac{20}{5}$. L'analyse du lessivat montre un maximum de bicarbonates par rapport à tous les traitements sans matière organique. La comparaison entre D1, D2 et D3 dans le sol nous montre qu'avec la première et la deuxième dose il y a lessivage très léger sur le premier, un peu plus important ensuite, et augmentation même au delà des teneurs originales aux niveaux 1 et 2 qui s'enrichissent aussi le plus en sodium échangeable. La 3ème dose provoque ^{la} réaccumulation des bicarbonates dans le sol. L'analyse du 3ème lessivat montre 0,4 me de bicarbonate.

Quant on percole le sol avec la solution dont le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ est égal à $\frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5) on observe qu'il y a très peu de variation de teneur en bicarbonate par rapport au sol original avec toutes les doses (D1, D2, D3). Il y a très peu de formation de bicarbonate. L'analyse des lessivats (D1, D2, D3) montre 0,94 me 1,01 me 0,12 me de bicarbonate provenant du sol. La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec la première dose il y a légère accumulation des bicarbonates par rapport au sol original. C'est à cause du sodium (58me)

préexistant dans le sol. Avec la 2ème et la 3ème dose on observe un léger lessivage de bicarbonate.

L'enfouissement de matière organique (5%) dans le cas de la solution précédente de SAR = 5 montre un très fort entraînement des bicarbonates, et une très forte accumulation dans le sol. Après percolation avec la première dose on observe plus d'accumulation des bicarbonates dans le sol que lors du traitement avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$ et en présence d'un apport de M.O.5% (2,02 me 1,36 me 2,0 et 3,86 me/100 g respectivement aux niveaux 0,1,2,3).

Après percolation avec la 2ème dose on observe un lessivage de bicarbonates dans le sol où l'augmentation par rapport aux valeurs originelles diminue surtout aux niveaux 0,1,2 et moins fortement aux niveaux 3 et 4.

L'analyse du lessivat montré également plus d'entraînement de bicarbonate par rapport au lessivat obtenu après traitement avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$ et en présence de 5% de matière organique supplémentaire.

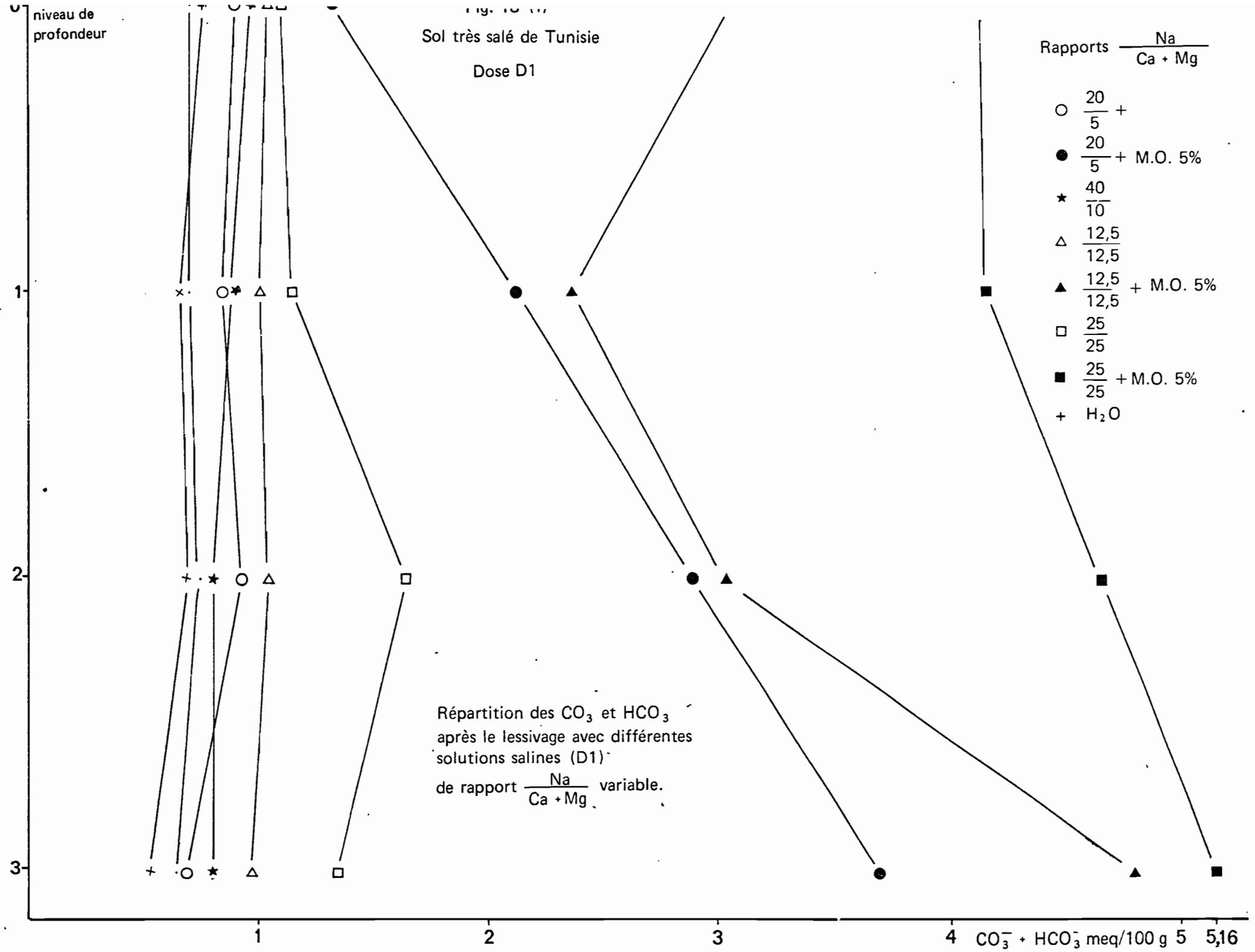
Après percolation avec la 3ème dose il y a plus de bicarbonates dans le sol aux niveaux 0,1,2 par rapport au traitement avec la solution de rapport $\frac{20}{5}$ et en présence de M.05%. L'analyse du lessivat montre 4me de bicarbonate.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre que le lessivage le plus important est avec la 2ème dose, puis avec la 3ème dose, il y a légère accumulation de bicarbonate à la surface et lessivage vers la profondeur par rapport à la 2ème dose, et avec D1 accumulation en surface et en profondeur, et lessivage plus faible.

Lorsque la solution de lessivage comporte des teneurs égales en cations alcalin et alcalino-terreux de forte concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ SAR = 7 après percolation avec la première dose on observe plus d'accumulation de bicarbonate soluble dans le sol par rapport à tous les traitements sans matière organique. L'analyse du lessivat montre 0,99 me de bicarbonate. Après percolation avec la 2ème dose il y a plus d'accumulation de bicarbonate soluble aux niveaux 0 et 2 par rapport aux autres

Fig. 10 (17)

Sol très salé de Tunisie
Dose D1



4 $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ meq/100 g 5 5,16

0 niveau de profondeur

1

2

3

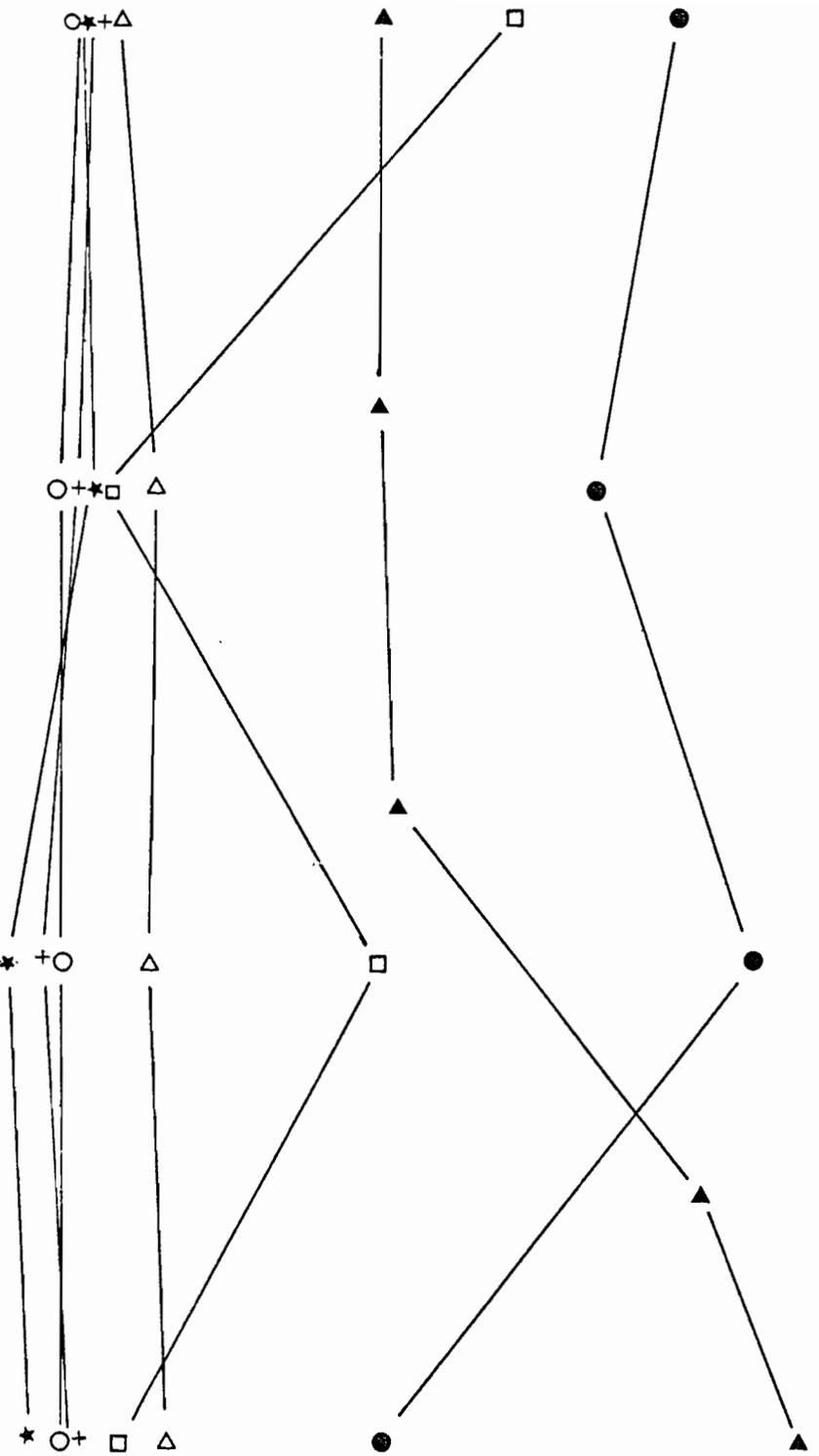


Fig. 18 (2)

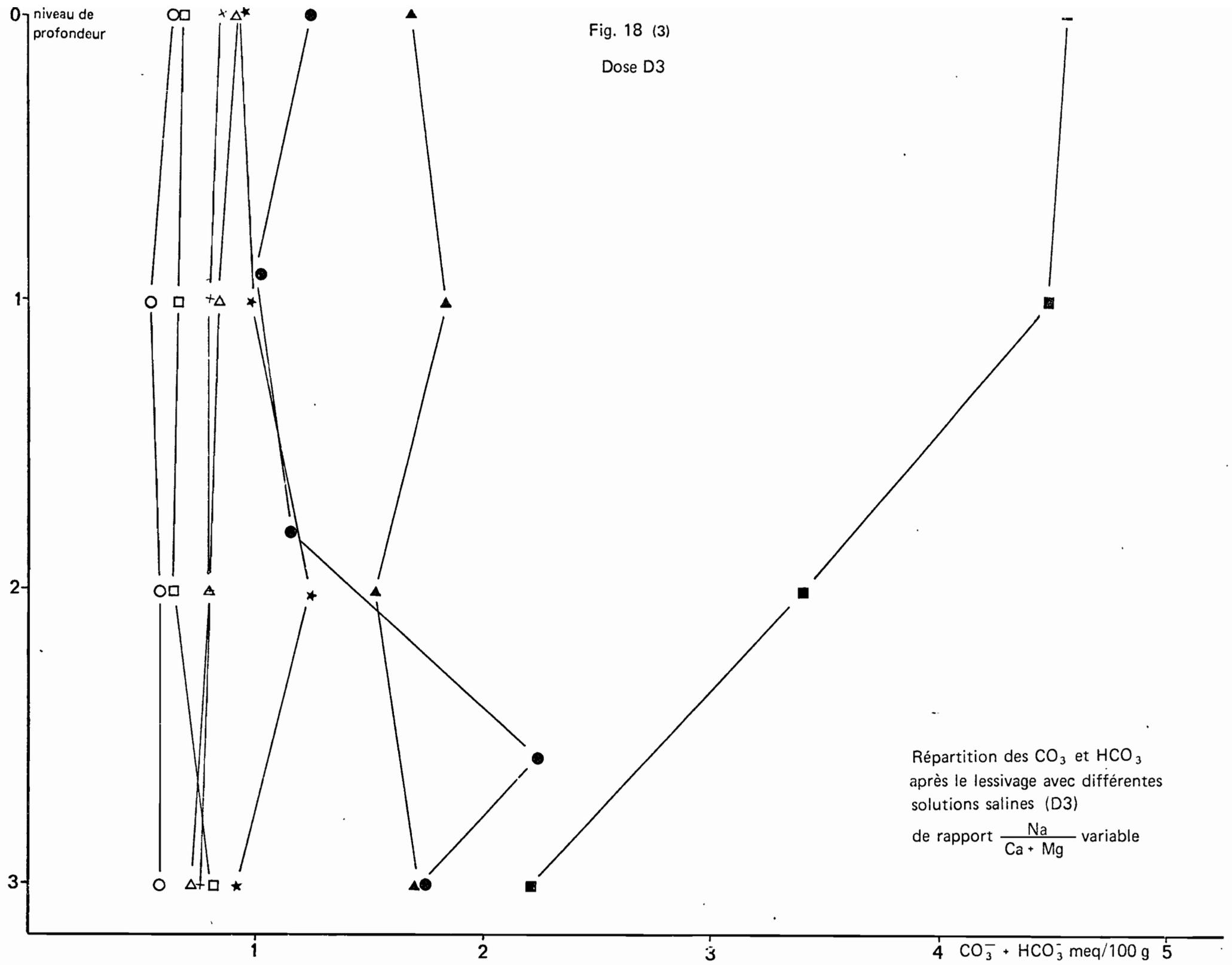
Dose D2

Répartition des CO_3 et HCO_3
 après le lessivage avec différentes
 solutions salines (D2)
 de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$ variable

4 $\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-$ meq/100 g 5

Fig. 18 (3)

Dose D3



traitements sans matière organique. L'analyse du lessivat montre 0,99me de bicarbonate. Après percolation avec la 3ème dose il y a lessivage de bicarbonate soluble, assez important par rapport au sol original et par rapport au résultat obtenu après percolation par la 2ème dose.

L'analyse du lessivat montre 0,52 me de plus de bicarbonate par rapport au lessivat (D2).

La comparaison entre D1, D2, et D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a lessivage de bicarbonate soluble sauf avec la 2ème dose, en surface, (niveau 0) où se produit une accumulation de bicarbonate.

L'enfouissement de matière organique (5%) dans le cas de solution précédente de SAR =7 après percolation avec les différentes doses (D1,D2,D3) permet un maximum d'accumulation des teneurs en bicarbonate dans le sol par rapport à tous les autres traitements. Il y a quatre fois plus d'addumulation des bicarbonates dans le sol enrichi de matière organique par rapport à l'utilisation de la même solution mais sans enfouissement préalable de matière organique supplémentaire dans le sol. L'analyse des lessivats (D1,D2,D3) montre respectivement 12,86 me 7,05 me et 1,08 me bicarbonate.

La comparaison entre D1, D2,D3 dans le sol nous montre qu'après percolation avec la 1ère dose il y a une forte accumulation des bicarbonates dans le sol. Après percolation avec la 2ème dose il y a un lessivage assez important des bicarbonates solubles accumulés par la 1ère dose tout le long du profil. Avec l'apport de 3ème dose une réaccumulation se produit en surface aux niveaux 0 et 1 alors qu'au niveau 2 la teneur reste constante par rapport à celle obtenue après percolation de la 2ème dose, et qu'à la base de la colonne (niveau 3) la teneur en bicarbonates solubles diminue très notablement. Dans le cas d'utilisation d'eau distillée, après percolation avec la 1ère dose il y a un maximum de lessivage des bicarbonates solubles dans le sol par rapport à tous les autres traitements.

Après percolation avec la 2ème dose les valeurs de carbonate soluble ne varient pas.

L'apport de la 3ème dose augmente légèrement les bicarbonates solubles dans le sol par rapport à la 1ère et à la 2ème dose.

Conclusions - bicarbonate.

1. Les solutions riches en sodium SAR = 12,6 provoquent un lessivage des bicarbonates solubles. On observe deux fois plus de bicarbonates dans le lessivat par rapport à l'eau distillée. Néanmoins cet entraînement est beaucoup plus faible que dans le cas de Feucherolles (environ 4 fois) moins de calcaire et plus de gypse.

2. L'accroissement de concentration de ces solutions riches en sodium SAR = 18 provoque d'abord un lessivage important des bicarbonates solubles et ensuite une accumulation dans le sol. On observe plus de bicarbonate dans le lessivat par rapport au lessivat de la solution $\frac{20}{5}$ (SAR 12) ce qui nous montre qu'une augmentation de NaCl favorise la dissolution du calcaire et la formation des bicarbonates solubles.

3. Les solutions riches en sodium SAR = 12,6 en présence de 5% de matière organique provoquent une forte accumulation des bicarbonates solubles dans le sol. L'apport de matière organique facilement fermentable augmente de 6 fois l'accumulation des bicarbonates solubles dans le sol par rapport aux autres sols non enrichis en matière organique.

On observe également 28 fois 19 fois et 7 fois plus de bicarbonate dans les lessivats soit le maximum de toutes les solutions. (D1, D2, D3) par rapport à la même solution en l'absence d'un apport de matière organique. Les solutions sodiques provoquent une dispersion d'argile et augmentent le lessivage des bicarbonates. En outre, il y a dissolution du calcaire et néoformation des bicarbonates par action de matière organique.

4. Les solutions riches en sodium (SAR = 12,6) en présence de 1% de matière organique provoquent un lessivage des bicarbonates solubles assez important.

On observe des fortes teneurs en bicarbonate avec le premier lessivat.

5. Les solutions également riches en sulfates alcalino-terreux et sels de sodium de concentration moyenne (SAR = 5) provoquent d'abord une légère accumulation des bicarbonates solubles puis avec les doses successives, un lessivage, mais faible se produit dans le sol.

Il y a moins de bicarbonates dans le lessivat par rapport au lessivat de solutions riches en sodium. Ce qui indique que la formation des bicarbonates ou le lessivage des bicarbonates dépend de la quantité de NaCl dans la solution de percolation.

6. Les solutions également riches en sulfates alcalino-terreux et sels de sodium de concentration moyenne SAR = 5 en présence de matière organique provoquent une accumulation très importante des bicarbonates solubles. On observe plus de bicarbonates dans les lessivats par rapport aux lessivats de même solution en l'absence de matière organique; ces derniers ne contiennent d'ailleurs que de faibles quantités de bicarbonate. Il y a une action importante de la production de CO₂ dans la formation de bicarbonate soluble qui reste en grande partie dans le sol.

7. Les solutions également riches en sulfates alcalino-terreux et sels de sodium de concentration forte (SAR = 7) provoquent une accumulation importante, puis avec les doses successives il y a lessivage de bicarbonate soluble. Il y a plus de bicarbonate dans le lessivat de la dose D3 par rapport aux solutions de SAR 5 mais sont identiques pour les doses D1 et D2. L'augmentation de NaCl accroît le lessivage des bicarbonates, que diminue par contre l'augmentation de sulfates, la néoformation de bicarbonates est accentuée en présence de solution riche en NaCl par suite de leur action sur le complexe absorbant. On en voit les conséquences dans les chiffres obtenus des teneurs des lessivats en bicarbonates, après percolation de la dose D3.

8. Les solutions également riches en sulfates alcalino-terreux et sels de sodium de concentration forte (SAR = 7) en présence de matière organique provoquent davantage d'accumulation des bicarbonates dans le sol par rapport à tous les autres traitements. L'action de sulfato-réduction accroît encore cette accumulation $2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4 \rightarrow 2\text{HCO}_3 + \text{H}_2\text{S}$. L'analyse des lessivats montre respectivement plus de bicarbonate par rapport à la solution simple $\frac{25}{25}$, néanmoins cette

augmentation est la plus faible dans les différentes solutions, ceci est dû à l'action des sulfates.

9. L'eau distillée provoque d'abord le lessivage des bicarbonates solubles puis réaugmente légèrement leurs teneurs dans le sol.

10. Au fur et à mesure qu'on augmente les alcalino-terreux dans la solution de percolation en présence de 5% de matière organique supplémentaire, on observe qu'il y a plus de rétention de bicarbonate soluble dans le sol et moins de lessivage (D1, D3). L'analyse des lessivats confirme cette rétention sauf avec la dose D2 de la solution de rapport $\frac{12,5}{5}$ qui a tendance à lessiver plus de bicarbonate.

11. L'ordre de lessivage des bicarbonates dans les sols avec les traitements de matière organique est le suivant :

$$\frac{20}{5} + M.O.5\% > \frac{12,5}{12,5} + M.O.5\% > \frac{25}{25} + M.O.5\%$$

L'ordre d'accumulation des bicarbonates est inverse.

12. L'ordre de lessivage des bicarbonates dans les sols sans matière organique est le suivant.

$$\frac{40}{10} > \frac{20}{5} > \frac{25}{25} > \frac{12,5}{12,5} > H_2O$$

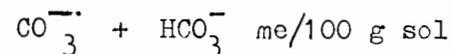
13. L'augmentation des sulfates de la solution de percolation riche en sodium, diminue le lessivage des bicarbonates spécialement si les sols sont déjà gypseux.

La comparaison entre les sols de Feucherolles et de Tunisie nous montre qu'avec le même traitement $\frac{20}{5}$ il y a plus des bicarbonates dans les lessivats de Feucherolles (seulement calcaire) que dans ceux de Tunisie (calcaire et gypseux).

TABLEAU XLIII : Teneurs en Carbonates et bicarbonates (me) dans les lessivats - Sol très salé de Tunisie

Dose de lessivage Solution de traitement	D1	D2	D3
NaCl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l	1,04	0,71	0,79
NaCl 20 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5 me/l + M.O 5 %	29,58	13,86	5,5
NaCl 40 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l MgSO ₄ 5 me/l	1,19	0,69	0,40
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l	0,94	1,01	0,12
NaCl 12,5 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25 me/l + M.O 5 %	16,43	14,6	4,0
NaCl 25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5 me/l	0,99	0,99	1,51
NaCl 25 me/l CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5 me/l + M.O 5 %	12,86	7,05	1,08
témoin l'eau distillée	0,45	1,47	0,97

TABLEAU XLIV - REPARTITIONS DES CARBONATES ET BICARBONATES SOLUBLES APRES LE LESSIVAGE
SOLUTIONS SALES DE TUNISIE



Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l	NaCl 20me/l	NaCl 40me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 25me/l	NaCl 25me/l	Témoin l'eau distillée
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + M.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l MgSO ₄ 5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l + M.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5 me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l + M.05 %	
500 ml	0-10	0,90	1,32	0,96	1,04	3,06	1,10	4,14	0,76
	10-20	0,84	2,12	0,88	1,00	2,36	1,14	4,16	0,66
	20-30	0,92	2,88	0,80	1,04	3,04	1,64	4,66	0,68
	30-40	0,68	3,70	0,80	0,96	4,82	1,34	5,16	0,52
1000 ml	0-10	0,70	2,30	0,70	0,80	1,50	1,86	3,92	0,72
	10-20	0,64	2,08	0,72	0,90	1,50	0,76	3,56	0,70
	20-30	0,64	2,50	0,50	0,88	1,54	1,50	3,40	0,60
	30-40	0,64	1,50	0,54	0,92	2,36	0,80	3,46	0,66
1500 ml	0-10	0,64	1,24	0,92	0,92	1,68	0,68	4,56	0,84
	10-20	0,54	1,00	1,00	0,84	1,84	0,66	4,48	0,80
	20-30	0,58	1,16	1,24	0,80	1,52	0,64	3,40	0,80
	30-40	0,58	2,24	0,92	0,72	1,72	0,80	2,20	0,76

H. REPARTITIONS DU CALCAIRE TOTAL APRES LIXIVIATION.

Le sol contient 9,21% de calcaire total au début de l'expérience. Le calcaire total du sol est mesuré sur 3 à 5 répétitions par une attaque à l'acide phosphorique au 1/2 et à l'ébullition, suivi d'un dosage coulométrique très précis du CO_2 dégagé ⁽¹⁾. Par attaque à froid on trouve 8,82% de calcaire, la différence environ 0,33% à chaud est vraisemblablement due au calcaire magnésien qui n'est pas attaqué à froid. L'entraînement du calcaire dans le sol est très lent. Le maximum de lessivage est obtenu avec le maximum de quantité de solution $\frac{25}{25}$ dose D3 et est de l'ordre de 0,56% de calcaire. Le maximum d'accumulation du calcaire est obtenu avec la solution $\frac{12,5}{12,5}$ dose D3 et est de l'ordre de 0,69% de calcaire.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{20}{5}$ (SAR = 12,6) après percolation avec la première dose, il y a une légère formation de calcaire en surface, dissolution et lessivage du calcaire dans tout le reste du profil. Après percolation avec les 2ème et 3ème doses il y a réaccumulation du calcaire tout le long du profil. L'excès de sodium déplace du Ca^{++} échangeable en surface qui en milieu alcalin précipite sous forme de CaCO_3 .

Il y a un fort lessivage de calcaire aux niveaux 1,2,3 avec la 1ère dose parce que le Na^+ préexistant dans le sol (50 me) s'ajoute à l'action de la solution et provoque la dissolution du calcaire et son entraînement.

L'enfouissement de matière organique 5% dans le cas de solution précédente de SAR 12,6 après percolation avec les doses (D1,D2,D3) provoque davantage de formation des carbonates tout le long du profil qu'avec la solution simple du rapport $\frac{20}{5}$.

1- Laboratoires des SSC; ORSTOM, Bondy Mme VERDONI.

Après percolation avec la 1ère dose il y a accumulation du calcaire aux niveaux 0 (0,1%) et 2 (0,2%) et léger lessivage aux niveaux 1 et 3 (0,04 et 0,11%). Après percolation avec la 2ème dose il y a une très forte accumulation des carbonates comparativement à la solution simple de rapport $\frac{20}{5}$ (0,46 0,24 0,08 0,18% d'accumulation aux niveaux 0,1,2,3 respectivement). Aux niveaux 0 et 3 l'accumulation des carbonates est beaucoup plus importante qu'avec tous les autres traitements. Après percolation avec la 3ème dose il y a dissolution et lessivage du calcaire à tous les niveaux par rapport à la 2ème dose.

Dans ces solutions riches en sodium des phénomènes de remplacement s'opèrent sur le complexe absorbant, qui fixe préférentiellement le sodium, libérant les ions calcium, ces derniers précipitent sous forme de CaCO_3 en se combinant au CO_2 dégagé de la matière organique par l'activité biologique (décomposition de M.O). La dissolution et l'entraînement du calcaire à lieu ^{lorsque++} le Ca^{++} échangeable a été pour une large part éliminé c'est à dire avec la 3ème dose de cette solution riche en sodium.

L'apport de 1% de matière organique, avec la solution de rapport précédent $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = 4$ provoque entraînement des variations limitées irrégulières de calcaire à la surface 0,1 et 0,2%; accumulation plus en profondeur 0,11% ^{au} niveau 2, et lessivage 0,15% au niveau 3, à la base de la colonne.

Dans le cas de la solution la plus sodique, de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{40}{10}$ (SAR =18) il y a toujours plus d'accumulation de calcaire à tous les niveaux et avec toutes les doses de lessivage par rapport à la solution simple $\frac{20}{5}$. Après percolation avec la 1ère dose il y a formation de calcaire au niveau 0 et lessivage dans le reste du profil. Après percolation avec la 2ème dose il y a accumulation du calcaire aux niveaux 0 et 1 et léger lessivage vers la profondeur.

Après percolation avec la 3ème dose il y a accumulation du calcaire tout le long du profil-sauf au niveau 1- par rapport au sol originel. Elle est assez forte en surface mais nulle (niveau 1) ou très limitée ailleurs. L'importance de l'échange des cations Na contre Ca Mg n'est pas supérieur à ce qui se produit lors de la

niveau de
profondeur (intervalles = 10 cm)

Fig. 19 (1)
Sol très salé de Tunisie
Dose D1

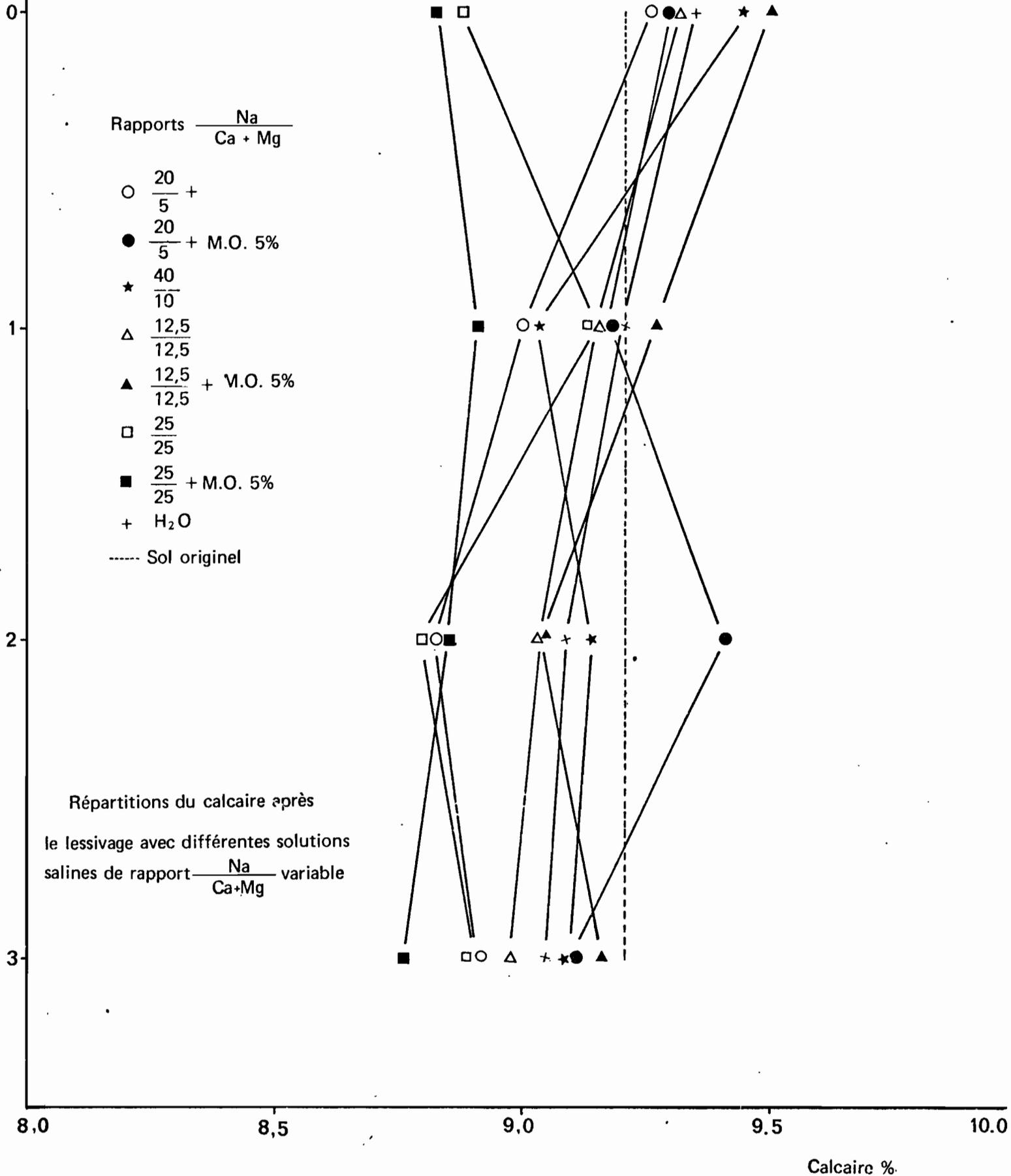


Fig. 19 (2)
Sol très salé de Tunisie
Dose D2

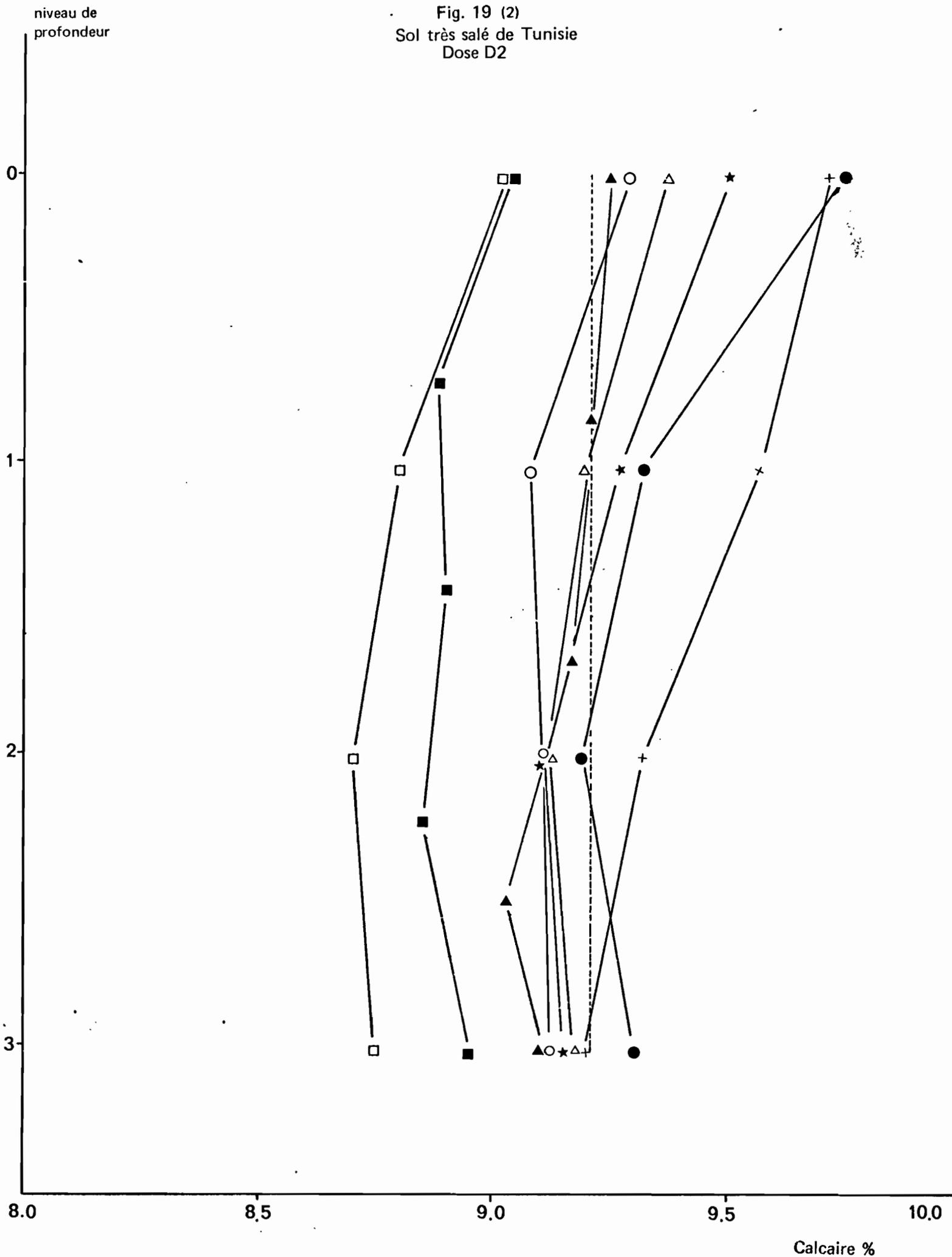
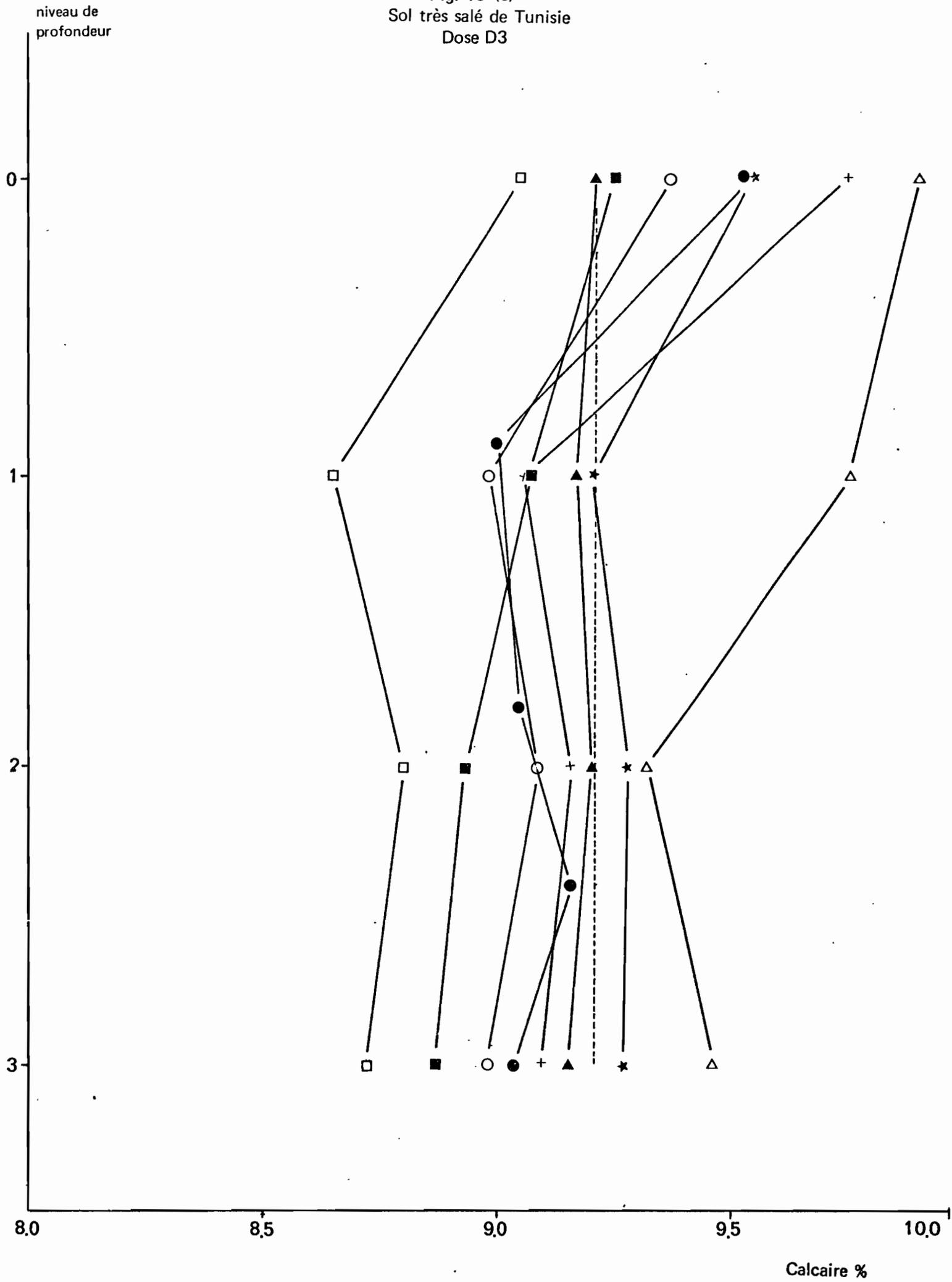
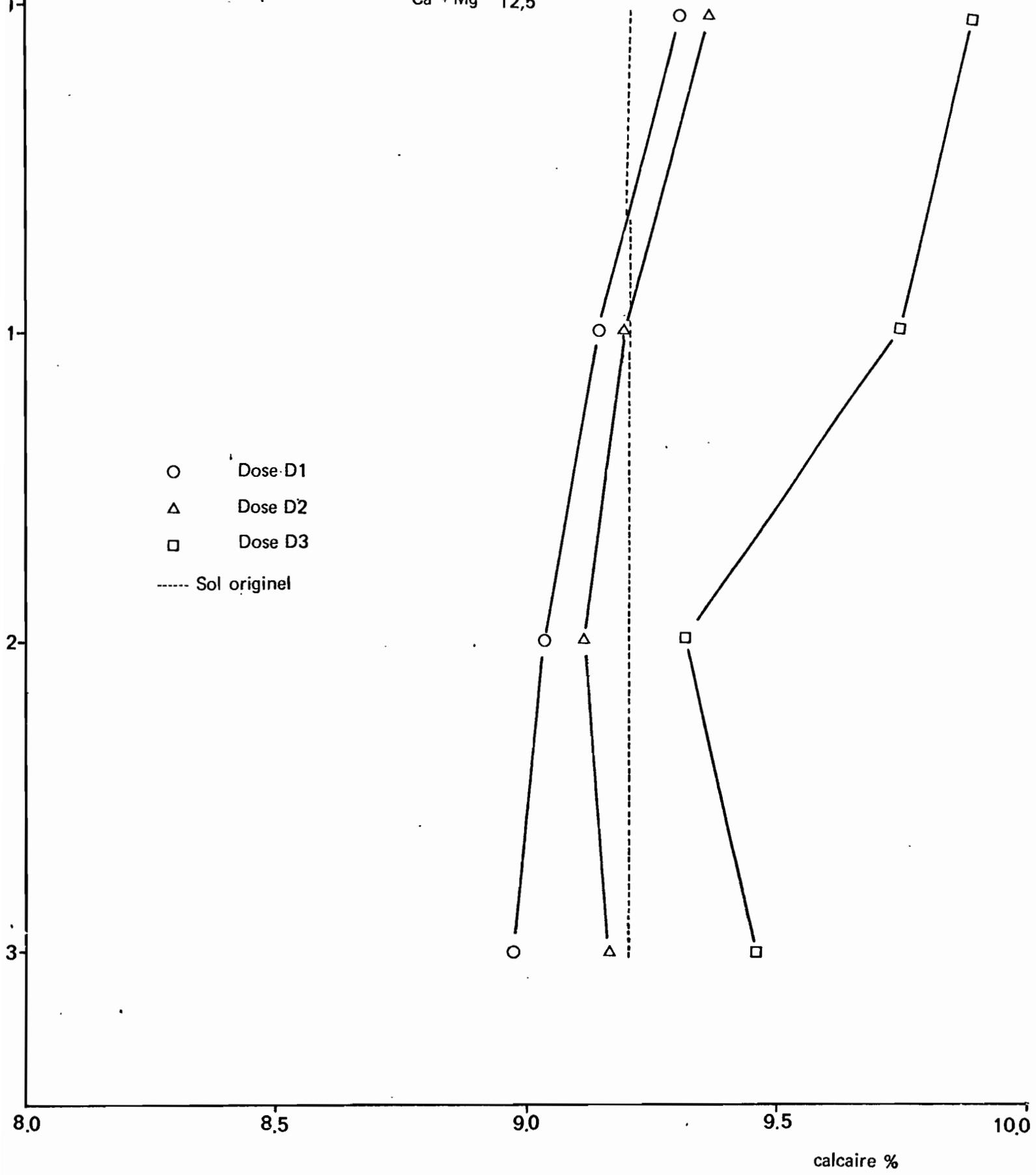


Fig. 19 (3)
Sol très salé de Tunisie
Dose D3



niveau de
profondeur

Fig. 19 (4) Répartitions du calcaire après le lessivage avec les
solutions salines D1 D2 D3 de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg} : \frac{12,5}{12,5}$



percolation de la solution $\frac{20}{5}$ par suite, probablement de la richesse en gypse du sol. Par contre, il y a un large apport de Ca qui favorise la formation de calcaire.

La comparaison entre D1, D2, D3 nous montre qu'avec D1 il y a accumulation en surface et léger entraînement aux autres niveaux. La dose D2 de percolation provoque un réenrichissement en calcaire à tous les niveaux dû à l'effet de l'excès de sodium sur le Ca⁺⁺ échangeable du sol. Ce dernier, libéré en milieu alcalin, précipité sous forme de CaCO₃.

L'effet de la 3ème dose est faible aux 2 premiers niveaux; il concourt à l'augmentation de CaCO₃ total aux deux niveaux les plus profonds.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, et de moyenne concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ (SAR=5) il se produit d'abord un léger entraînement sauf en surface qui diminue les carbonates à tous les niveaux avec la dose D2; quant à la dose D3, elle produit un accroissement à tous les niveaux supérieurs aux résultats obtenus avec les autres traitements, et en particulier avec la solution de rapport cationique $\frac{20}{5}$. Après percolation avec la 1ère dose il y a accumulation du calcaire à la surface (niveau 0) et lessivage progressif vers la profondeur; par rapport au sol original. L'apport de la 2ème dose provoque un léger réenrichissement en calcaire.

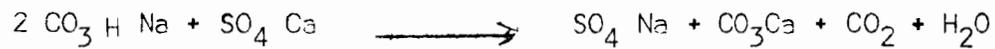
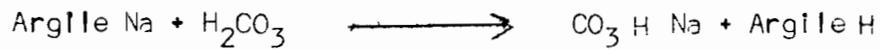
Après percolation avec la 3ème dose l'accumulation du calcaire est beaucoup plus importante qu'avec les autres traitements. Il y a respectivement 0,7% 0,55 0,11 et 0,25% de plus de calcaire aux niveaux 0,1,2,3 par rapport au sol original.

La comparaison entre D1, D2, D3 dans le sol nous montre qu'avec chaque nouvelle dose il y a accumulation du calcaire dans le sol.

L'addition de 5% de matière organique dans le cas de la solution précédente de SAR = 5 après percolation avec la première dose montre davantage d'accumulation de calcaire en surface par rapport à l'effet de la même solution sans apport de matière organique, puis, au niveau 1, un léger accroissement de teneur en calcaire contre un léger entraînement et aux niveaux plus profonds (2 et 3) une dimi-

nution plus faible de la teneur en calcium du sol. L'apport de cette matière organique facilement fermentescible modifie la teneur en carbonate de calcium de ce sol gypseux, à la fois par la production de CO_2 au cours de son évolution, et par le développement qu'elle permet de phénomène de sulfato-réduction.

Après percolation avec la 1ère dose l'accumulation de calcaire aux niveaux 0 et 1 est beaucoup plus importante qu'avec tous les autres traitements et aux niveaux 2 et 3 il y a un léger lessivage du calcaire. Il se produit les réactions suivantes en milieu aérobie en surface.



Il y a formation de calcaire.

Après percolation avec la 2ème dose il y a lessivage important de calcaire en surface et léger lessivage vers la profondeur. Après percolation avec la 3ème dose il y a un léger lessivage du calcaire fixé par D1 (ou resté après D2) en surface et dépôt vers la profondeur. Il se produit les réactions suivantes; le milieu devient anaérobie (absence d'oxygène) en profondeur, riche en gypse et Na_2SO_4 aux niveaux 1,2,3. Il y a un léger lessivage du calcaire et production de H_2S gaz dû à une sulfato-réduction.

La production de CO_2 au cours des premières doses accroît la formation de calcaire aux dépens du calcium échangeable et du gypse, puis l'augmentation de concentration en CO_2 dans les doses suivantes amène une redissolution du calcaire formé. La sulfato-réduction reste très forte.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à un, de forte concentration de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{25}{25}$ (SAR = 7) après percolation avec la 1ère dose on observe un lessivage du calcaire assez important à tous les niveaux, sauf au niveau 1 par rapport au sol original.

Après percolation avec les 2ème et 3ème doses, le lessivage du calcaire est beaucoup plus important qu'avec tous les autres traitements. Le lessivage du calcaire est progressif.

La comparaison entre D1, D2, D3 nous montre qu'il y a une légère augmentation de calcaire à la surface avec D2 et D3 et lessivage progressif vers la profondeur par rapport à D1; cet entraînement n'est en fait, un peu important qu'au niveau 1.

L'enfouissement de 5% de matière organique dans le cas de percolation avec la solution précédente de SAR = 7 provoque lors de l'apport de la première dose un lessivage du calcaire beaucoup plus important qu'avec tous les autres traitements. Après percolation avec la 2ème dose on observe davantage de lessivage du calcaire qu'avec tous les traitements sauf avec la solution simple $\frac{25}{25}$ mais la surface se réenrichit en ce composé. Après percolation avec la 3ème dose tout le profil redevenant aérobie, se réenrichit en CaCO_3 sauf tout à fait en profondeur.

La comparaison entre le calcaire du sol originel et le calcaire après percolation avec la première dose montre un lessivage initial important (milieu aérobie), puis avec les doses successives il y a réaccumulation croissante de calcaire (milieu anaérobie).

On observe avec la première dose un fort échange de Ca^{++} , mais en raison de la teneur élevée en sels de sodium il y a dissolution du calcaire. Avec les autres doses D2, D3 l'échange de calcium continue à augmenter un peu mais la richesse en sodium est moindre, et l'apport de CO_2 tend à réaccumuler le calcaire (la sulfato-réduction est plus faible dans D3).

Dans le cas de traitement du sol par l'eau distillée, l'apport de la première dose provoque une légère accumulation en surface et un faible lessivage progressif vers la profondeur. Après la percolation de la 2ème dose, tout l'ensemble du profil est enrichi en calcaire, qui lors de l'utilisation de la 3ème dose se maintient en surface, mais revient à peu près aux valeurs obtenues après la 1ère dose et très proches des valeurs originelles, aux autres profondeurs.

Conclusions. Calcaire total Tunisie.

1- Les solutions riches en sodium (SAR=12,6) provoquent une faible accumulation de calcaire à la surface de la colonne. (par échange de sodium contre le calcium et précipitation du calcaire en milieu alcalin).

2- Les solutions riches en sodium en présence de matière organique provoquent une accumulation plus forte de calcaire que les mêmes solutions en l'absence d'un apport de matière organique facilement fermentescible.

3- L'accroissement de concentration de ces solutions riches en sodium (SAR=18) augmente l'accumulation du calcaire.

4- Les solutions également riches en sodium et gypse à concentration moyenne (SAR =5) favorisent une accumulation maximum de calcaire.

5- Les solutions également riches en sodium et gypse à concentration moyenne (SAR = 5) en présence de matière organique, provoquent d'abord tant que le milieu est aérobie, un maximum d'accumulation de calcaire mais avec les doses d'irrigation successives, en milieu anaérobie, il se produit une dissolution et un léger lessivage du calcaire.

6- Les solutions riches en sodium et gypse à forte concentration (SAR=7) provoquent un maximum de lessivage du calcaire. Il y a moins de lessivage du calcaire en surface et augmentation de lessivage de calcaire en profondeur avec les doses successives.

7- Les solutions riches en sodium et gypse à forte concentration (SAR= 7) en présence de matière organique, provoquent un maximum de lessivage du calcaire tant que le milieu reste aérobie, mais dès qu'il devient anaérobie, lors de la percolation des doses suivantes, la teneur en calcaire réaugmente tout le long du profil tant en restant inférieure à celle d'origine.

8- L'eau distillée en dissolvant une partie des sels sodiques du sol originel agit comme une solution plus ou moins sodique et provoque un déplacement de calcium échangeable puis grâce à la présence de CO₂ du sol, la formation d'abord de carbonate de calcium qui précipite puis se redissout sous forme de bicarbonate lors de la percolation de la dose la plus forte (D3).

TABLEAU XIV - REPARTITIONS DES CARBONATES TOTALS APRES LE LESSIVAGE - SOL TRES SALE DE TUNISIE, 1961

CO₃ % de sol

Dose de lessive	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l	NaCl 20me/l	NaCl 40me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 25me/l	NaCl 25me/l	Témoins l'eau distillée
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + N.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 5 me/l MgSO ₄ 5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l + N.05 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5 me/l MgSO ₄ 12,5me/l	
500 ml	0-10	9,26	9,30	9,45	9,31	9,50	8,88	8,83	9,35
	10-20	9,00	9,17	9,03	9,15	9,27	9,15	8,91	9,20
	20-30	8,83	9,41	9,14	9,04	9,04	8,79	8,85	9,09
	30-40	8,91	9,10	9,10	8,98	9,16	8,91	8,76	9,05
1000 ml	0-10	9,29	9,75	9,51	9,37	9,25	9,03	9,04	9,72
	10-20	9,03	9,32	9,27	9,20	9,21	8,80	8,88	9,57
	20-30	9,11	9,19	9,11	9,12	9,17	8,70	8,90	9,32
	30-40	9,12	9,30	9,15	9,17	9,03 9,11	8,75	8,85 8,95	9,20
1500 ml	0-10	9,37	9,54	9,54	9,90	9,21	9,05	9,25	9,75
	10-20	8,98	8,99	9,20	9,75	9,17	8,65	9,07	9,06
	20-30	9,09	9,05	9,28	9,32	9,20	8,80	8,93	9,16
	30-40	8,93	9,16 9,04	9,27	9,46	9,15	8,72	8,87	9,10

TABLÉAU XLVI : Teneurs en Carbone mgms/l des acides Humiques et des acides Fulviques dans les différents lessivats (Sol très salé de Tunisie)

Dose de lessivage Solution de traitement	D1		D2		D3	
	Carbone des AH	Carbone des AF	Carbone des AH	Carbone des AF	Carbone des AH	Carbone des AF
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5meq/l+ MgSO ₄ 2,5 meq/l		44,83		23,00		24,50
NaCl 20 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 meq/l+ MgSO ₄ 2,5 meq/l + + M.O 5%	161,44	1099,81	34,58	868,42	16,42	171,08
NaCl 40 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 5 meq/l+ MgSO ₄ 5 meq/l		52,75		73,75		32,12
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25meq/l + MgSO ₄ 6,25 meq/l		87,0		70,75		141,75
NaCl 12,5 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25meq/l + MgSO ₄ 6,25 meq/l + M.O 5%	35,22	1812,18	13,74	1123,76	4,78	148,72
NaCl 25 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5meq/l + MgSO ₄ 12,5 meq/l		68,75		97,75		63,75
NaCl 25 meq/l + CaSO ₄ 2H ₂ O 12,5meq/l + MgSO ₄ 12,5 meq/l + M.O 5%	239,56	777,94	31,54	613,46	3,84	167,16
témoin l'eau distillée		117,75		51,5		33,5

I. INFLUENCE DES DIVERS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN ACIDES HUMIQUES ET EN ACIDES FULVIQUES DANS LES DIFFERENTS LESSIVATS.

Les lessivats que nous avons recueillis étaient très jaunes en début de lessivage (D1) après percolation avec les deuxièmes et troisièmes doses la couleur jaune a diminué progressivement. Nous avons constaté que cette couleur est due à la présence d'acides fulviques.

Cependant dans le cas où nous avons ajouté de la matière organique au sol, la couleur du lessivat, jaune au début de l'expérience, est devenue ensuite plus brun rouge, ce qui est dû à la présence de complexes organiques du fer. L'analyse du lessivat prouve l'entraînement de quantités importantes d'acides fulviques et beaucoup plus faiblement d'acides humiques et de fer. On observe aussi pendant la percolation avec la 2ème dose un léger noircissement dans les fioles.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, de moyenne concentration $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5) en présence de 5% de matière organique on observe un maximum de lessivage des acides fulviques (D1, D2). Au contraire il y a un minimum de lessivage des acides humiques, il y a 20 fois plus d'acides fulviques lors du traitement comportant une addition de matière organique facilement fermentescible que dans le même traitement dans cet apport.

Dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 + 5% M.O (dose D1, dose D2) les valeurs d'acides fulviques et aussi d'acides humiques sont intermédiaires par rapport aux autres traitements avec la matière organique. Il y a alors 22 fois plus d'acides fulviques entraînés lorsque le sol est enrichi en matière organique que lorsqu'il ne l'est pas.

Quand le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, de forte concentration $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{25}{25}$ (SAR=7) en présence de 5% de matière organique supplémentaire, on observe lors de la percolation des doses D1 et D2 un minimum d'entraînement des acides fulviques par rapport aux autres valeurs d'acides fulviques. Mais au contraire il y a un maximum de lessivage des acides humiques.

En général les acides fulviques sont 20 fois plus lessivés que les acides humiques.

Dans le cas des traitements sans apport de matière organique il y a un léger lessivage des acides fulviques.

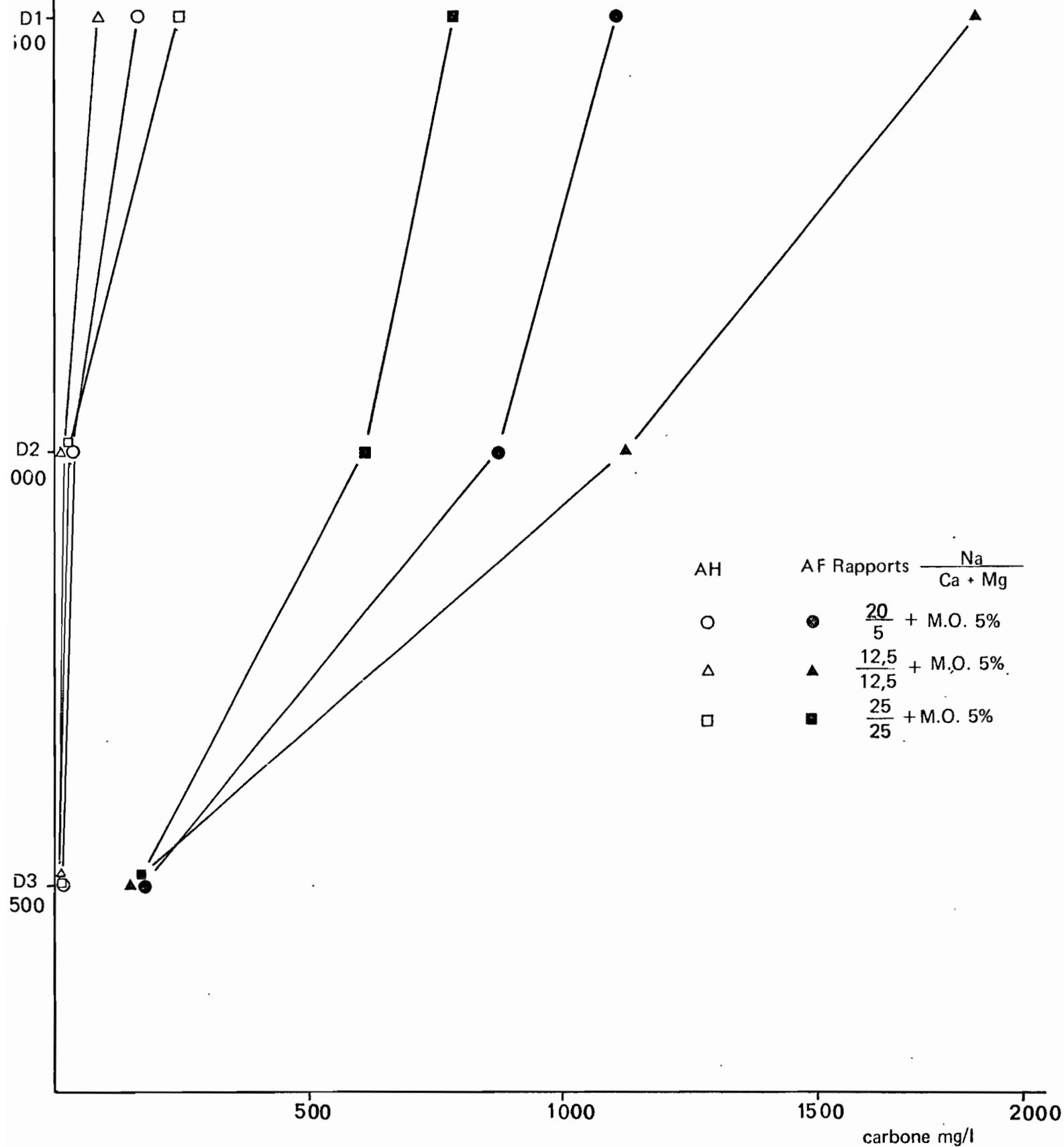
L'eau distillée lessive le maximum des acides fulviques avec la première dose par rapport aux autres traitements sans apport de matière organique.

La vitesse d'entraînement des acides fulviques est le résultat de deux actions antagonistes, d'une part l'effet du calcium sur l'augmentation de la perméabilité du sol, et au contraire, l'action du sodium sur sa diminution, d'autre part l'effet de solubilisation croissante des produits organiques par le sodium, et au contraire l'effet d'insolubilisation par le calcium.

Cet effet d'insolubilisation partielle du Ca sur les acides fulviques semble jouer principalement avec la solution de rapport alcalin-alcalino-ferreux $\frac{25}{25}$. Dans le cas de $\frac{12,5}{12,5}$ c'est la perméabilité qui est le facteur principal d'entraînement d'acides fulviques. La solution plus sodique du rapport $\frac{20}{5}$ à un rôle intermédiaire du fait qu'elle provoque une diminution de perméabilité du sol mais/une meilleure aussi solubilisation des produits organiques.

lessivats

Fig. 20 Teneurs des acides fulviques et des acides humiques dans les différents lessivats après lessivage avec solution salines D1, D2, D3 de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable.



TROISIEME PARTIE

I- REPARTITIONS DE L'HUMIDITE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR APRES LE LESSIVAGE AVEC DIFFERENTES SOLUTIONS SALINES.

Nos colonnes ont reçu trois quantités différentes de solution de lessivage 50 cm, 100 cm, 150 cm respectivement. Ce sont les quantités de solutions, minimum, moyenne et maximum, qu'en général on utilise pour dessaler le sol dans la zone semi-aride où les sols salés sont souvent très étendus. Le lessivage a été effectué au moyen du dispositif décrit au chapitre 1 (Fig.1). Après l'arrêt de l'alimentation en eau, les colonnes sont couvertes pour les préserver contre l'évaporation et mises à ressuyer pendant 48 heures en position verticale. La quantité d'eau retenue dans ces conditions correspond grosso-modo à la capacité maximum de rétention qui est définie comme "la quantité d'eau capable d'être conservée par un sol en place qui a été saturé et qui a subi un drainage qui s'est exercé librement" (DEMOLON).

Les mouvements de l'eau dans un sol déterminent les migrations et l'accumulation des substances et jouent un rôle important dans la pédogenèse. La nature et l'allure de ces phénomènes sont étroitement liés à la structure et la texture du sol dans lequel ils prennent place. Dans le cas présent, certains sels diminuent largement les mouvements des solutions dans le sol, soit à cause de la forte dégradation de la structure, qui devient asphyxiante, soit à cause de la diminution de porosité due semble-t-il à la migration de certains éléments (gypse, argile, matière organique etc..).

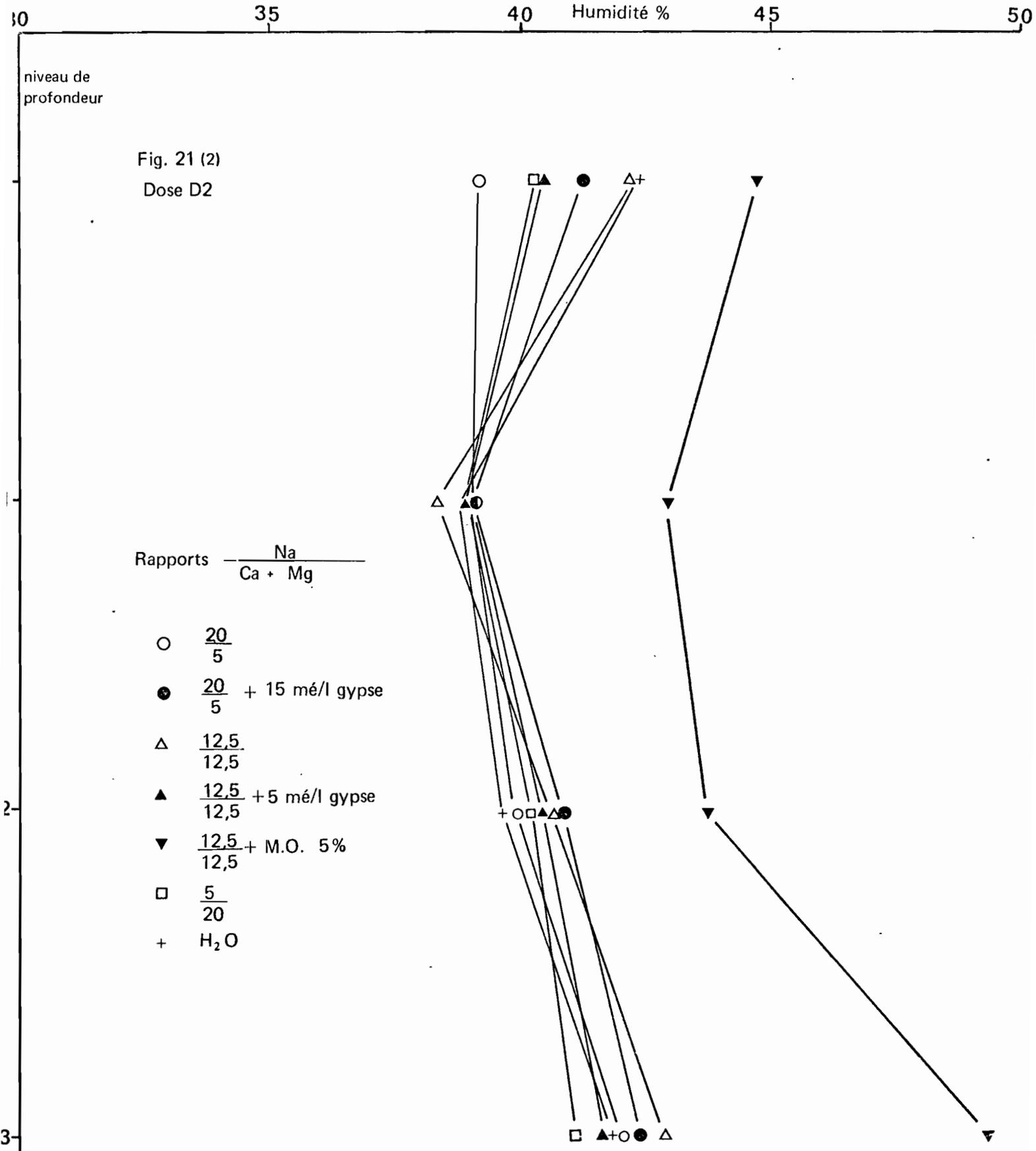
Nous allons dans ce chapitre voir à l'aide des courbes donnant la répartition de l'humidité en fonction de la profondeur quels sont les comportements des différentes colonnes des 2 sols étudiés en fonction de la nature des sels, de leur concentration et de la présence possible de matière organique et des caractères de texture et de structure.

TABLEAU XLVII-

REPARTITION DE L'HUMIDITE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR APRES LE LESSIVAGE AVEC DIFFERENTES SOLUTIONS SALINES DE RAPPORT $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$ VARIABLE

SOL BRUN CALCAIRE ARTIFICIELLEMENT SALE

Dose de lessivage	Profondeur en Cm	NaCl 20me/l	NaCl 20me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 12,5me/l	NaCl 5 me/l	témoin l'eau distillée
		CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 2,5 me/l MgSO ₄ 2,5me/l + 15me/l gypse	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l + 5 me/l	CaSO ₄ 2H ₂ O 6,25 me/l MgSO ₄ 6,25me/l + M.O 5 %	CaSO ₄ 2H ₂ O 10 me/l MgSO ₄ 10 me/l	
500 ml	0-10	43,06	39,33	41,19	41,19	47,56	39,94	39,66
	10-20	39,06	39,38	37,94	40,64	42,43	38,67	40,34
	20-30	38,44	40,44	38,54	41,18	43,02	39,28	40,04
	30-40	38,93	41,27	41,11	40,82	48,88	39,85	40,42
1000 ml	0-10	39,17	41,30	42,33	40,52	44,84	40,43	42,44
	10-20	39,09	39,12	38,43	39,99	43,03	39,02	38,91
	20-30	39,97	40,87	40,74	40,58	43,76	40,34	39,69
	30-40	42,06	42,49	43,00	41,77	49,46	41,22	42,03
1500 ml	0-10	41,51	41,67	39,65	41,73	44,03	41,69	42,24
	10-20	40,27	40,87	38,78	40,65	40,29	39,03	41,17
	20-30	41,96	41,08	40,21	41,54	42,17	39,77	41,47
	30-40	42,50	42,37	42,79	41,90	45,75	40,84	41,71



Répartitions de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines D₂ de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

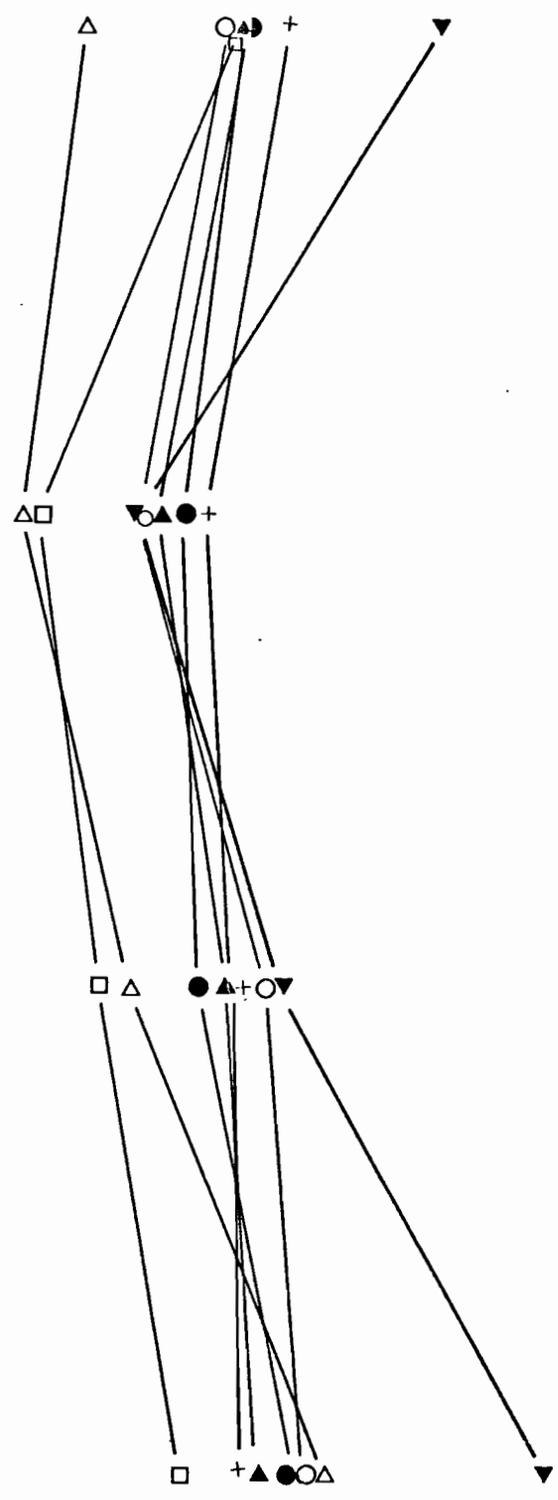
niveau de profondeur

Fig. 21 (3)

Dose D3

Rapports $\frac{Na}{Ca + Mg}$

- $\frac{20}{5}$
- $\frac{20}{5}$ + 15 mé/l gypse
- △ $\frac{12,5}{12,5}$
- ▲ $\frac{12,5}{12,5}$ + 5 mé/l gypse
- ▼ $\frac{12,5}{12,5}$ + M.O. 5%
- $\frac{5}{20}$
- + H₂O



Répartitions de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines D₃ de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ variable

a) Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur et des divers traitements dans les différentes colonnes du sol brun calcaire artificiellement salé.

La comparaison des différentes courbes obtenues, fait ressortir l'influence particulière de la matière organique ajoutée qui détermine un fort accroissement de l'humidité restant dans le sol après les 2 jours de drainage libre. Le phénomène est particulièrement net après la 1ère dose malgré certaines irrégularités constituées par des teneurs un peu plus faibles aux niveaux 1 et 2. Les teneurs moins élevées à la suite de l'application des doses D2 et surtout D3 sont probablement à relier à l'entraînement de matière organique par la solution utilisée, phénomène prouvé par les teneurs en matière organique des lessivats correspondants. Les autres courbes sont assez analogues et voisines, la différence n'étant en général que de 1 à 2 p. 100 autour de 40 p.100 dans le cas de la dose D1 et légèrement au dessus pour les deux autres doses.

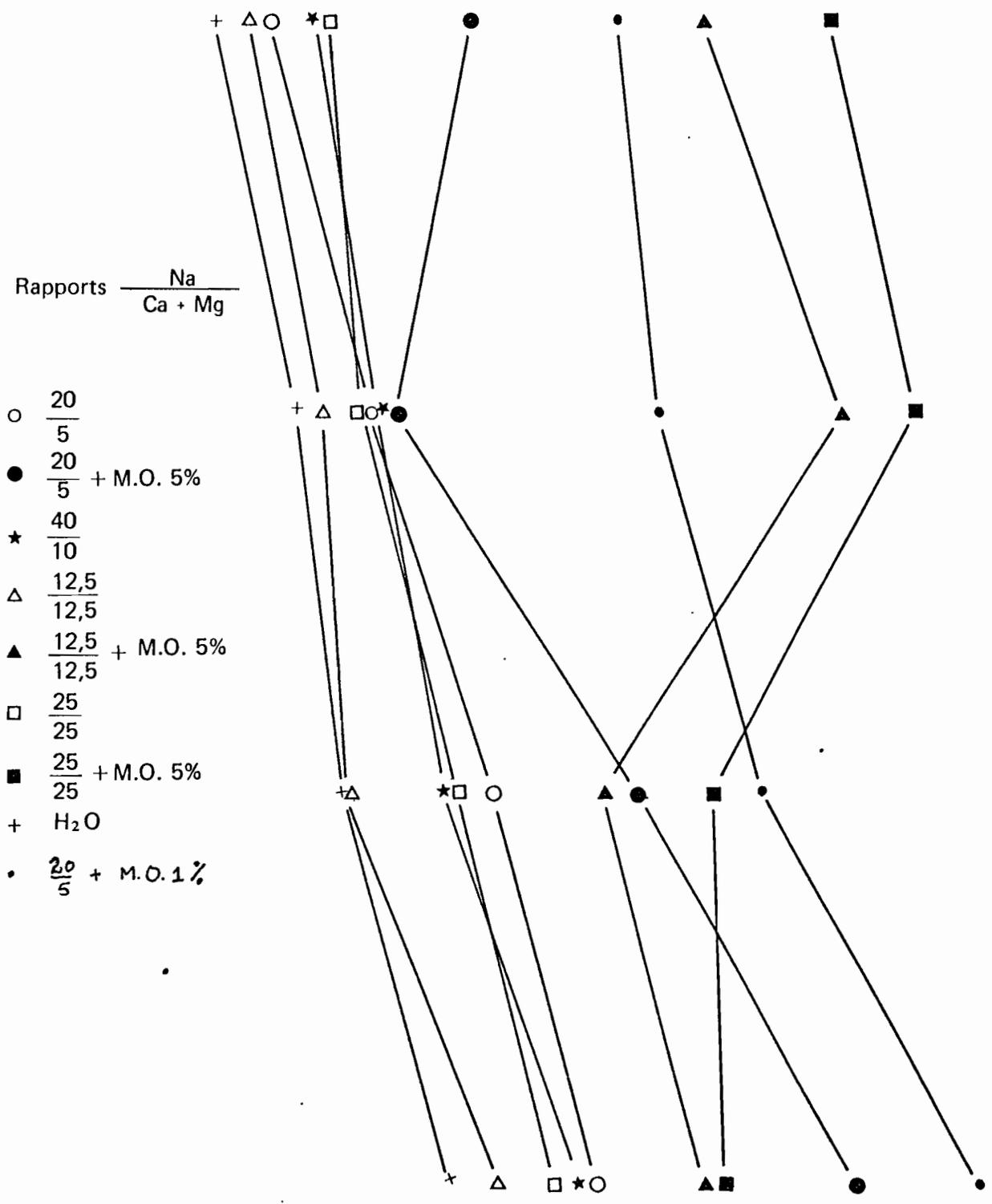
On peut cependant remarquer que les courbes correspondent aux solutions riches en sodium, et sans apport supplémentaire de gypse, présentent plus de variations dans les teneurs en eau que celles qui correspondent aux solutions pauvres en sodium ou ayant reçu un supplément de gypse.

Cette différence est probablement due à l'action du sodium échangeable dont s'est enrichi le sol au cours des traitements du premier groupe.

Dans le cas des sols traités par des solutions suffisamment riches en gypse les courbes sont régulières et très proches les unes des autres.

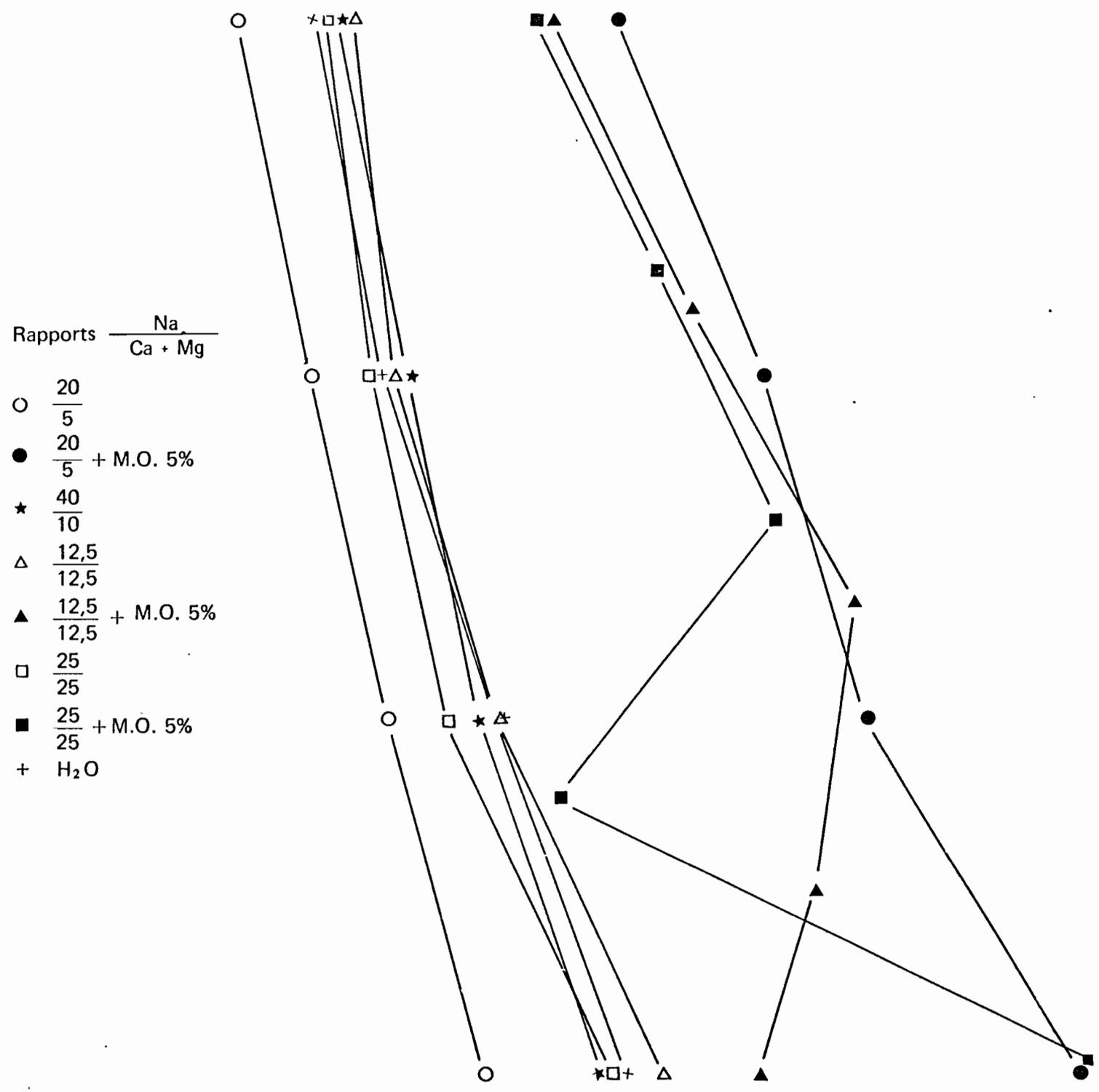
Les teneurs légèrement plus élevées en surface et tout à fait à la base que l'on observe parfois (en dehors du sol enrichi en matière organique) peuvent être dues, semble-t-il, dans le premier cas à quelques actions capillaires qui n'ont pu être évitées et à la formation de ménisque dans le second cas.

Fig. 22 (1)
Sol très salé de Tunisie
Dose D1



Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines D₁ de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg}}$ variable

Fig. 22 (2)
Sol très salé de Tunisie
Dose D2



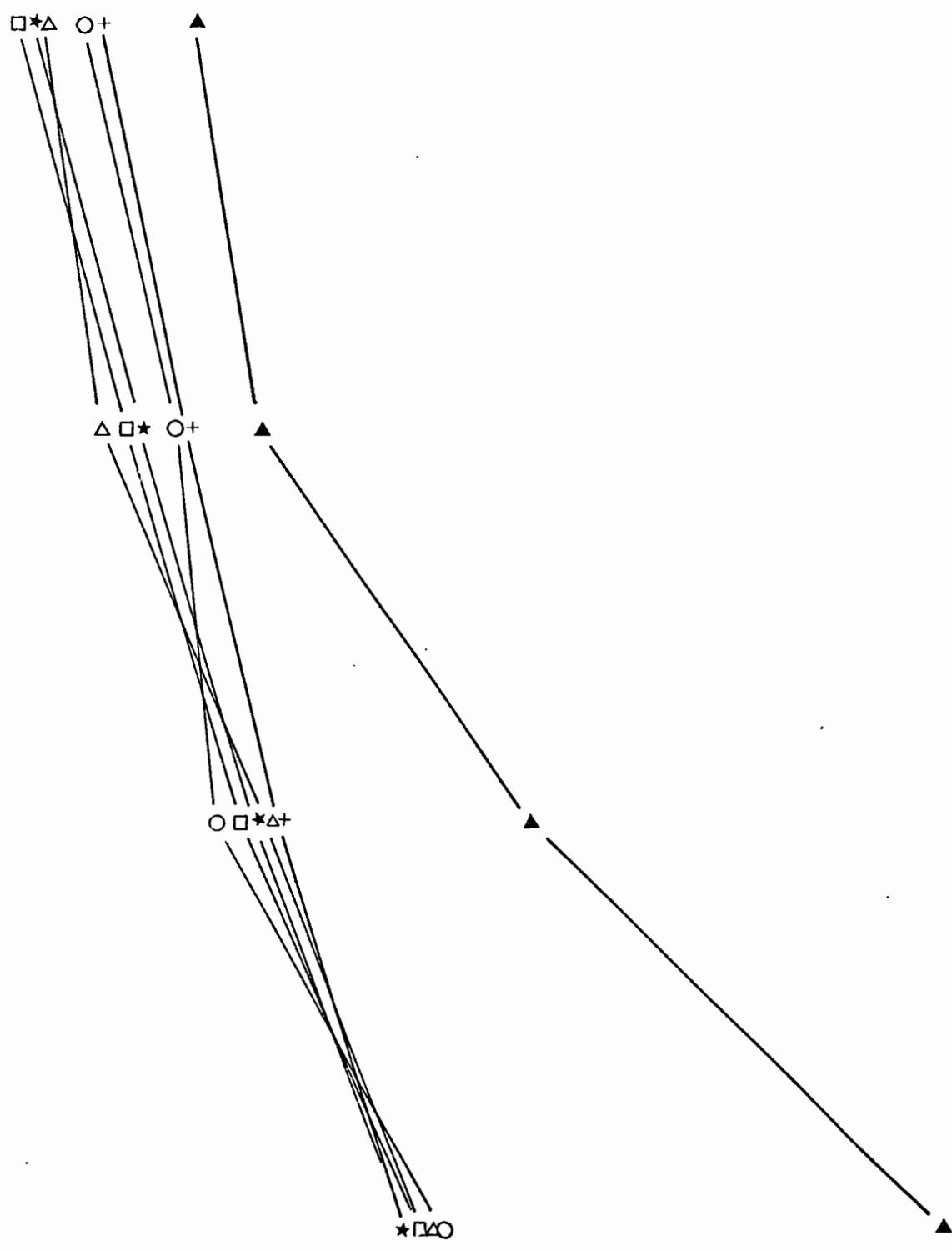
Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

Fig. 22 (3)
Sol très salé de Tunisie
Dose D3

niveau de profondeur

Rapports $\frac{Na}{Ca + Mg}$,

- $\frac{20}{5} +$
- $\frac{20}{5} + M.O. 5\%$
- ★ $\frac{40}{10}$
- △ $\frac{12,5}{12,5}$
- ▲ $\frac{12,5}{12,5} + M.O. 5\%$
- $\frac{25}{25}$
- $\frac{25}{25} + M.O. 5\%$
- + H₂O



Répartitions de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines D₃ de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable

b) Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur et des divers traitements dans les différentes colonnes du sol très salée de Tunisie.

Dès le premier niveau situé en haut des colonnes, se détachent deux groupes de traitements, celui des sels neutres seuls, et celui des sels neutres additionnés de matière organique 5%.

Les colonnes alimentées par des solutions riches en gypse (SAR= 5 et 7) en présence de matière organique montrent un maximum d'humidité, situé entre 40% et 45%. A la dose D1 on observe plus d'humidité en surface qu'en profondeur. Après percolation avec les doses successives (dose D2 et D3) on trouve moins d'humidité en surface, et plus vers la profondeur. C'est à cause de la migration de la matière organique vers la profondeur.

Les colonnes alimentées par des solutions sodiques de SAR = 12,6 en présence de matière organique (dose D1) montrent moins d'humidité en surface et plus vers la profondeur par rapport à des colonnes alimentées par les solutions riches en gypse.

Dans les colonnes alimentées par des solutions salines mais sans apport de matière organique (dose D1) il n'y a pas beaucoup de variations d'humidité entre les traitements. Le pourcentage d'humidité varie entre 34 et 39%. Il y a augmentation progressive d'humidité vers la profondeur. On observe 5% de plus d'humidité en profondeur qu'en surface. Avec les doses successives, dose D2 et dose D3 il y a une légère augmentation d'humidité et les courbes d'humidité deviennent très proches les unes des autres.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE QUELQUES TRAVAUX SE RAPPORTANT AUX PROBLEMES ENVISAGES.

Dans le chapitre précédent nous avons essentiellement rapporté et discuté les résultats de nos expérimentations, en ne faisant que rarement allusion aux travaux analogues réalisés par d'autres auteurs.

Dans ce dernier chapitre au contraire, nous avons rassemblé les résultats obtenus sur les mêmes problèmes ou sur des problèmes voisins, par un certain nombre de spécialistes, sans chercher à effectuer une revue bibliographique et critique exhaustive.

Les éléments exposés ci-dessous peuvent éclairer largement nos propres résultats ou peuvent au moins leur être comparés.

1. Action des solutions sodiques sur la richesse en Na soluble et en Na échangeable.

Dans notre expérience la solution de percolation contenant 20 me/l de Na pour 5 me/l de $Ca^{++} + Mg^{++}$, a provoqué à la suite d'un apport de 1500 cm³ une augmentation du Na soluble, faible mais nette, surtout en surface et du sodium échangeable aussi, en surface.

Les travaux de ANTIPOV-KARATÆV (1953) GEDROYTS (1955) et KOTIN (1962) montrent qu'il y a une augmentation de sodium échangeable en surface dans les sols à complexe calcimagnésique si le rapport de $\frac{Na}{Ca}$ dans la solution de percolation est 4 ou plus. KELLEY (1962) montre que l'augmentation de sodium sur le complexe dépend de deux facteurs : d'une part la fixation du sodium sur le complexe est d'autant plus importante que le rapport entre le sodium et les autres cations présents, est plus élevé; d'autre part, intervient le type spécifique de matériel argileux présent dans le sol. S'il s'agit de montmorillonite (comme dans notre cas), la fixation de sodium est forte; par contre elle est plus faible avec la kaolinite.

KELLEY (1963) souligne aussi, dans une autre expérience, une augmentation de Na^+ soluble et Na^+ échangeable si la solution de percolation contient plus de 75% de Na^+ .

DURAND (1958) a également insisté sur l'influence du rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ dans les solutions de percolation sur la rétention de l'ion Na^+ dans le sol.

$\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ de l'eau	% Na^+ échangeable
10	50
1	10

WAHAB (1961) a insisté également sur le danger d'alcalinisation du sol par percolation de solution dans lesquelles $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}} = \frac{4}{1}$; le phénomène est encore plus rapide lorsque $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}} = \frac{9}{1}$.

Les travaux exposés par AUBERT et OLLAT (1969) réalisés soit en Tunisie par l'équipe du C.R.U.E.S.I., soit en Irak par HARDANE, prouvent inversement que si la teneur relative en sodium de l'eau d'irrigation n'est pas trop élevée (SAR faible), des eaux peu minéralisées (IRAK, CE 1,3 mmhos) ou même assez salées (Tunisie 2,5-6 mmhos) permettent de désaler un sol sableux ou limoneux et de le désalcaliniser, au moins partiellement ($\frac{\text{Na}}{\text{T}}$, dans le sol de Tunisie de 18-20 p. 100 à 5-12 p.100 jusqu'à 80 cm).

D'après l'étude de A.M. BALBA (1965), l'effet de salinisation ou de désalinisation dépend de la concentration initiale des sels dans le sol et de la concentration de la solution de lessivage.

La quantité de sel lessivé, ^{augmente} lorsque la concentration initiale en sel est plus forte dans le sol.

Inversement, pour de faibles concentrations en sel, le sol retient des sels provenant de la solution de percolation.

Ces quantités de sel retenues n'augmentent pas avec les quantités percolées on aboutit à un maximum de fixation dès les premières doses. Il s'établit un équilibre entre le sol et la

solution dans la première irrigation qui ne varie plus avec les irrigations ultérieures.

Nos résultats confirment et précisent ceux qui sont indiqués ci-dessus en particulier quant à l'influence de la concentration de la solution de percolation (comparaison de l'effet sur le sol de Tunisie des solutions contenant soit 20 me soit 40 me NaCl/l).

Par contre si les essais sur le sol de Feucherolles montrent une augmentation de Na échangeable lors de la percolation par les solutions les plus sodiques, en conformité avec ce qui est indiqué ci-dessus, il n'en est pas de même pour le sol de Tunisie, très riche en sulfate de Ca partiellement soluble.

Enfin, il est utile de rappeler que, d'après les travaux récents de DYER (1965), THOMAS et SWOBODA (1970), SMITH (1972) les anions (chlorure, nitrate) migrent plus vite dans un sol que la vitesse moyenne des molécules d'eau présentes. En conséquence, lorsque se produit un lessivage la migration descendante des chlorures et nitrates est plus rapide et à lieu jusqu'à une plus grande profondeur que s'ils accompagnaient le mouvement global de l'eau.

Le degré de mouvement relatif des chlorures par rapport à l'eau augmente avec l'augmentation de la capacité d'échange.

2. Action de la matière organique facilement fermentescible sur des sols plus ou moins riches en Na échangeable, percolés par des eaux de sa-
lure variable.

L'apport de matière organique au sol, permet une plus forte diminution, non du sodium soluble, mais du Na^+ échangeable, probablement grâce à la production de sels suffisamment solubles de Ca^{++} et de Mg^{++} (bicarbonates).

D'après KOVDA et VAN DEN BERG (1973) la matière organique joue un rôle important pour le lessivage du sodium soluble et échangeable du sol. La matière organique a deux effets principaux pour l'amélioration des sols salés et à alcali. D'une part l'amélioration de la perméabilité du sol et d'autre part l'augmentation des acides organiques permettant la formation de sels solubles de calcium tels que le bicarbonate. Ces derniers, spécialement dans les sols calcaires plus ou moins alcalinisés augmentent de l'échange de Ca^{++} contre Na^+ .

EW. RUSSEL (1973) souligne aussi que l'addition de matière organique maintient la perméabilité du sol quand on utilise les solutions salines de SAR élevé, on diminue la teneur en Na^+ échangeable du sol et on augmente sa porosité et son aération.

BOWER et ses collaborateurs (1950) montrent que l'application de 50 tonnes de fumier/acre sur un sol sodique accroît le degré d'agrégation, et augmente 3 fois la vitesse d'infiltration. D'après CAMPBELL et RICHARDS (1950), cette action bénéfique serait pour une part, due au développement des micro-organismes du sol pour lesquels cette matière organique ajoutée constitue une importante source d'énergie. Ces résultats ont été confirmés dès 1954 par FIREMAN et BLAIR. Ils le sont également à nos travaux.

3. Action du gypse sur le déplacement du sodium et la mobilité des sels de calcium.

L'addition de gypse dans la solution de percolation fait baisser les taux de sodium soluble et de sodium échangeable du sol par rapport aux valeurs de départ et même par rapport à celles obtenues par percolation avec la même solution non enrichie secondairement en gypse comme nous l'avons montré dans les essais sur le sol de Feucheroilles.

Il est d'ailleurs de pratique courante d'utiliser du gypse comme amendement pour améliorer les sols à alcalis (G.AUBERT in FAO-UNESCO 1967).

Dans leurs travaux de recherche OVERSTREET et MARTIN (1951) ont obtenu une diminution de Na^+ éch. de 9,1 à 2 me/100 g par apport de 25 à 31 tonnes de gypse par hectare.

Des résultats semblables ont été obtenus par OBORION (1958) KOTIN (1962) KELLEY (1962-1963) etc...

NAKSHABANDI (1971) et al. ont montré en Irak que la présence de gypse empêche la formation de sols sodiques à condition que la lixiviation soit réalisée avec de l'eau faiblement salée, de composition voulue. Il a également insisté que dans l'effet sur l'entraînement plus poussé des sels solubles de sodium, il ne s'agit pas d'une simple lixiviation des sels, mais d'un processus plus complexe impliquant une suite de réactions dans lesquelles jouent un rôle important, les types même de colloïdes du complexe et les cations échangeables qui s'y trouvent retenus.

Dans nos essais l'apport de gypse à des doses correspondant à 6,5 - 13 - et 19,5 t/ha a provoqué une diminution progressive importante du sodium échangeable.

Cependant, dans une solution du sol riche en gypse et en calcium, une augmentation de la tension de CO_2 permettant une nouvelle dissolution du calcaire, provoque la précipitation d'une certaine quantité de gypse et peut diminuer l'efficacité de son effet sur le sol.

Une étude du département d'agronomie d'Illinois (urbana 1964) a montré que l'addition de 8 T acre de gypse ($\frac{1}{4}$ 20 T ha) dans des solonchets provoque un très fort entraînement de sodium dans des percolats

réalisés sur des colonnes de sol remanié. Cela correspond sensiblement à notre expérience avec les fortes doses de gypse, les quantités de liquide percolées sont élevées et demeurent constantes au cours de 12 percolations successives; la perméabilité est fortement accrue. L'addition de fortes quantités de matière organique (amidon) (10 T Acre) diminue l'action lessivante du gypse; l'action de l'amidon sur le calcium diminue la solubilité du gypse et par la perméabilité du sol.

Dans nos expériences avec des doses moyennes de gypse et de la matière organique on note une phase intermédiaire où le lessivage du gypse se trouve ralenti correspondant à une insolubilisation due au calcium en excès dans la solution.

Si dans la plupart des cas, la présence de gypse permet un meilleur entraînement du chlorure de sodium, en sens inverse la présence de ce dernier dans la solution du sol favorise la solubilisation du gypse qu'il contient comme l'a soulignée POUGET (1968). La solubilité du gypse dans l'eau est de l'ordre de 2 g/l. Elle varie suivant la température (maximum vers 35-40°C) en restant aux environs de 2,1 g/l.

En ajoutant des chlorures à une solution saturée de gypse, la force ionique de la solution augmente et le coefficient d'activité diminue. La solubilité du gypse augmente jusqu'à 7 g/l dans les solutions contenant environ 120-130 g/l de chlorure de sodium ou magnésium.

4. La dissolution du calcaire.

a) Action de la matière organique.

La dissolution du calcaire du sol est très lente par l'eau distillée. Dès que l'eau qui percole à travers le sol contient plus ou moins de gaz carbonique, son action dissolvante croît très fortement, le bicarbonate formé étant bien plus soluble que le carbonate. Dans notre expérimentation, nous avons pu montrer que l'apport de matière organique facilement fermentescible accroît notablement la quantité de Ca + Mg entraînée dans les lessivats. La lixiviation de

$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ est facilitée par cette opération grâce à la production de CO_2 et à la formation de bicarbonate de calcium et de magnésium très solubles.

Dans ses expériences, sur la décarbonatation des sols du Liban, LAMOUREUX (1971) indique une dissolution moyenne de 25 mgr de calcaire par litre d'eau qui percole dans un sol soumis à des successions de dessiccations et d'humidifications.

RODNEY (1967) rappelle que dans les conditions naturelles, en sol non dépourvu de matière organique en Russie, si le drainage excède 460 mm, la décarbonatation, et même la décalcification du complexe absorbant sont rapides.

Les études réalisées par AFANASYEVA (1967) en Russie dans la zone des chernozems et des sols gris forestiers, ont mis en évidence que, dans ces derniers sous forêt, l'évolution de la matière organique provoquant une teneur en CO_2 de la solution du sol de ce qu'elle est sous la steppe (chernozem), le lessivage du calcaire est quatre fois plus intense dans le premier cas que dans le second.

C.B. WELLS (1965) dans une expérience en tubes sur la dissolution de carbonate de calcium par des eaux chargées de gaz carbonique, a montré que des extraits de feuilles donnant des composés organiques solubles, augmentent le pouvoir dissolvant de ces eaux sur le calcaire. D'ailleurs, l'importance de la pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère du sol sur la solubilité du calcaire qu'il contient a été encore récemment précisée sur les sols irrigués du Liban. GRAS.F. (1973 1975).

b) Action des sels de sodium.

Il est bien connu que les eaux salées (riches en NaCl) favorisent la dissolution du calcaire, mais en outre l'apport de solutions de rapport élevé $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ se traduit par une augmentation du Na échangeable du sol, phénomène qui intervient dans le dynamique du calcaire qu'il contient.

D'après AHMED (1972), l'action de l'argile sodique sur le CO_3Ca provoque d'une part, une dissociation du sodium avec alcalinisation, d'autre part accroissement de la concentration en acide carbonique dans le sol.

Les anciens auteurs comme HILGARD pensaient que ces réactions étaient à l'origine de la formation de carbonate de soude dans le sol. Dans notre expérience il n'y a pas d'élévation suffisante du pH du sol ou de la solution pour conclure à cette formation. D'ailleurs plus récemment d'autres facteurs ont été invoqués pour expliquer la formation de grandes quantités de carbonate de soude.

D'après EATON (1950), la formation de carbonate de soude, résulterait indirectement de l'application d'eau d'irrigation bicarbonatée.

Le calcaire du sol se trouve dissout par les sels de sodium comme NaCl. Cette dissolution diminue le rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$, la formation de CO_3Na_2 résiduel n'a lieu que si la somme $CO_3 + CO_3H$ dépasse la somme $Ca + Mg$. (cas des eaux bicarbonatées).

D'après d'autres auteurs comme KELLEY (1962), c'est plutôt CO_3NaH qui se forme que CO_3Na_2 . Le bicarbonate maintient le calcium en solution alors que ce dernier est insoluble dans CO_3Na_2 .

Dans notre expérience il n'y a pas d'apport de bicarbonate par les solutions de percolation, il se produit effectivement une solubilisation du calcaire, et une augmentation de l'argile sodique sous l'influence du NaCl.

Ces produits formés en solution réagissent entre eux, en accroissant la concentration en acide carbonique dans le sol. C'est ainsi qu'il se forme des bicarbonates de Ca et Mg dont la plus grande partie passe dans le percolat et une autre partie demeure dans le sol; le calcium tendant à se redéposer sous forme échangeable ou facilement extractible par NH_4NO_3 .

5. Equilibres des sulfates et des carbonates dans les sols salés et dans les sols sodiques.

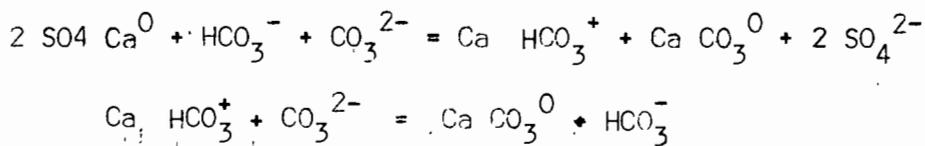
D'après NAKAYAMA (1969) (proc), c'est dans les sols alcalins à pH supérieur à 8,5 que la quantité d'ions CO_3^{2-} est beaucoup plus importante que celle de CO_3H^- .

L'addition de Ca^{++} en solution à un système alcalin, riche en CO_3^{2-} et Na^+ a pour conséquence la précipitation de CO_3Ca , la disparition sous forme active de CO_3^{2-} , l'abaissement du pH, et le remplacement de Na^+ par Ca^{++} sur le complexe.

Mais il y a quelques restrictions si la source de Ca^{++} est le gypse. En effet, la solubilité faible de SO_4Ca et CO_3Ca décroît lorsque le pH croît.

Ainsi l'activité de Ca^{++} est faible en solution en présence de sulfate et carbonate, ce qui provoque une nette diminution de l'intensité du phénomène d'échange de Na^+ par Ca^{++} . Nous en avons eu également la preuve dans nos essais sur le sol de Tunisie (solution de rapport 40/10).

Les complexes et paires d'ions CaHCO_3^+ et CaCO_3^0 , peuvent exister en solution sous certaines conditions qui ressemblent à celles de la solution du sol.



Entre pH 7 et 8 c'est l'ion HCO_3^- qui domine largement l'équilibre entre CaCO_3^0 et CaHCO_3^+ varie très rapidement entre pH 7 et pH 9.

Au-delà de pH 8 c'est CO_3Ca^0 qui se forme.

L'augmentation d'activité de CO_3^{2-} favorise la formation de CO_3Ca^0 et l'augmentation d'activité de HCO_3^- favorise CaHCO_3^+ .

L'existence de ces ions complexes de solubilité variable explique certaines réactions entre les sulfates, le calcaire, et l'acide carbonique produit par la matière organique dans nos expériences. On peut d'ailleurs remarquer que de nombreux auteurs ont insisté sur la plus grande vitesse d'entraînement des chlorures par rapport à celles d'autres corps comme les sulfates (A.R. SWOBODA, 1963, JABER, 1971, NAKSHABANDI, 1971. Nos observations vont dans le même sens.

6. Rôle du magnésium.

Le rôle du magnésium dans les sols salés et surtout dans les sols dits "à alcalis" est encore très discuté et il ne nous est pas possible de le traiter ici.

Il nous paraît néanmoins nécessaire cependant de l'évoquer sous ses deux aspects : Magnésium échangeable et Magnésium des sels solubles.

A propos de la définition de l'horizon natrique dans la 7ème approximation de la classification U S D A des sols il est écrit : "l'action des ions magnésium sur la dispersion de l'argile est encore en question. "

Les recherches de laboratoire semblent montrer peu de différence entre les effets du Mg et ceux de Ca. Cependant, il est fréquent de trouver de mauvaises conditions physiques dans les argiles à forte teneur en Mg échangeable, sans qu'on puisse expliquer ce phénomène.

Cependant si bien des auteurs, dont nous citerons que J.H. DURAND (1955) A. SANDOR (1956) et A. RUELLAN (1971) attribuent une action importante à la teneur élevée du sol au magnésium échangeable sur sa mauvaise structure (forte compacité, structure diffuse ou très large) formation même de solonetz magnésiens) d'autres ont montré par des expérimentations précises et très approfondies, que dans ces phénomènes, l'action du magnésium est beaucoup plus proche de celle du calcium que de celle de sodium (KOUHESTANI, 1964).

Il a été également montré par exemple, OLIVIN et OCHS (1974) que la mobilité relative de magnésium échangeable par rapport aux autres cations dépend largement du type d'argile.

Le plus souvent, comme dans nos expériences, Mg est plus mobile que le calcium et moins que le sodium.

Pour ce qui est du magnésium soluble nous soulignerons seulement que de nombreux auteurs ont insisté sur sa très grande abondance dans certains sols comme cela a été décrit en Tunisie par BELKHODJA (1972) et sur sa grande mobilité relativement à celle du calcium.

Au Maroc LEPOUTRE et SAUVAGEOT (1969) ainsi que RUELLAN (1971) ont expliqué par la solubilité **inégale** des carbonates de calcium et de magnésium, leur répartition différente, ainsi que celle des ions échangeables correspondant, dans les profils de sols, où le magnésium domine surtout et parfois très largement en profondeur. Nos expériences ont aussi fait ressortir la mobilité plus grande des diverses formes dans le sol de magnésium par rapport à celle de calcium.

CONCLUSIONS GENERALES

A) SOLS BRUNS CALCAIRES ARTIFICIELLEMENT SALES (FEUCHELOLLES).

a) Résumé des conclusions partielles.

Nous reprenons ici les conclusions partielles qui ont été présentées pour les différents ions, pris séparément, en les regroupant pour chaque type de traitement, et en réunissant l'ensemble des modifications apportées à la composition du sol et des sels solubles sous l'influence de ces traitements.

Nous considérerons dans l'ordre les cations alcalins (Na) et les chlorures qui leur sont principalement associés, puis les alcalino-terreux (Ca et Mg), avec les cations associés carbonates et sulfates. Quant au potassium il ne joue qu'un rôle secondaire dans ces évolutions.

1) Dans le cas de la solution de percolation de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ en m.e./l au cours du passage des trois doses successives de 500 ml 1000 ml 1500 ml appelées D1 D2 D3, on observe une augmentation des teneurs du sol en Na soluble et Na échangeable; avec un enrichissement plus important dans la couche de surface, il y a très peu de lessivage du chlorure préexistant dans le sol, et la concentration dans le sol s'équilibre très rapidement avec celle de la solution.

En ce qui concerne $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ les formes solubles sont lessivées, d'abord lentement, puis d'une façon plus importante avec les doses successives, les formes de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ échangeables augmentent nettement et même dépassent la capacité d'échange. Cette accumulation provient d'une dissolution du calcaire du sol (CO_3Ca) par NaCl qui tend ensuite à se déposer dans le sol sous forme peu soluble à l'eau, mais facilement extractible par NO_3NH_4 .

Dans le filtrat ou encore lessivat recueilli à la base des colonnes et qui correspond normalement au filtrat on constate un très fort entraînement de Ca+Mg qui se trouvent solubilisés en particulier à partir du calcaire. Ce sont ces éléments dissous dont une partie se fixe

dans le sol sous forme échangeable, ou facilement extractible, et en petite quantité à l'état soluble. On observe aussi dans le sol la formation de bicarbonates solubles, mais la plus grande partie passe dans le lessivat où l'on dose de fortes quantités de bicarbonates.

Les sulfates préexistants sont lessivés, les sulfates apportés par la solution ne s'accumulent que faiblement.

2) La même solution $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{20}{5}$ me/l additionnée de 15 me/l de gypse montre une diminution du Na soluble et du Na échangeable par rapport aux valeurs d'origine dans le sol ; il y a cependant peu d'entraînement des chlorures.

Ca + Mg solubles sont davantage lessivés en surface avec les premières doses mais beaucoup moins en profondeur (on l'explique par l'accroissement de perméabilité de la surface). L'addition de gypse accroît le dépôt dans le sol de Ca + Mg peu soluble dans l'eau, mais facilement extractible dans le nitrate d'ammonium (éléments échangeables). L'augmentation de la charge en calcium, diminue la solubilité du calcaire par NaCl.

Il y a augmentation du lessivage de Ca et Mg préexistants, mais diminution du lessivage de Ca et Mg dissous à partir des carbonates. L'entraînement total dans le lessivat demeure important; il y a moins de formation de bicarbonates dans le sol, mais ils se trouvent retenus. On dose trois fois moins de bicarbonates dans le lessivat par rapport à la solution précédente sans gypse.

Il y a peu de lessivage des sulfates préexistants, mais pas d'enrichissement du sol à partir des solutions.

3) La solution de rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{12,5}{12,5}$ me/l provoque dans le sol un fort abaissement de Na soluble et Na échangeable, Il s'accompagne d'un lessivage des chlorures que l'on retrouve dans les lessivats (percolats).

Il y a également, accroissement du lessivage de Ca et Mg solubles, sur toute la hauteur des colonnes de terre, qui augmenté avec les doses successives d'irrigation (diminution progressive des teneurs).

Il y a appauvrissement net également de Ca et Mg échangeables, ceci dans des proportions équivalentes à Ca et Mg solubles (il y a équilibre entre les deux formes d'éléments).

En valeur absolue il y a diminution de Ca et Mg entraînés dans les lessivats par rapport aux traitements précédents; cela provient d'une plus faible solubilisation des carbonates du sol.

On dose moins de bicarbonate dans le sol, et également beaucoup moins dans le lessivat que pour le traitement (20).

Par contre, il y a un fort lessivage des sulfates dans le sol.

4) L'addition de 5 me/l de gypse à la solution précédente $\frac{12,5 \text{ (Na)}}{12,5 \text{ (Ca+Mg)}}$, n'amène qu'un peu de variations relatives par rapport à cette solution au point de vue du Na solubles et du Na échangeable qui diminuent tous les deux, mais on observe un entraînement un peu plus important des chlorures qui passent dans les lessivats. Par contre, en ce qui concerne Ca et Mg, il y a un très fort lessivage des formes solubles, ceci par amélioration de la perméabilité du sol. Il y a également appauvrissement net en Ca et Mg échangeables, surtout pour la première dose, avec réenrichissement aux doses successives de percolation; le sol demeurant cependant désaturé. Cette désaturation n'est sans doute que provisoire, en raison de la vitesse moindre d'hydrolyse du calcaire. Ce processus doit cependant ultérieurement resaturer le sol en Ca; il empêche un fort abaissement du pH global du sol, par suite de la présence de la masse importante de calcaire, ainsi que du sodium échangeable.

La solubilisation des carbonates de Ca et Mg du sol avec entraînement dans les lessivats, n'est pas plus élevée que dans le cas précédent, et le dosage des carbonates dans les lessivats montre des teneurs plus faibles; il y a également moins de lessivage des sulfates préexistants, et un enrichissement du sol à partir du SO_4^{4-} des solutions qui augmente avec les doses croissantes.

5) L'addition de 5% de matière organique fermentescible au sol (luzerna) dans le cas de la solution $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$, n'entraîne pas un fort lessivage de Na soluble, par contre il y a une très forte diminution du Na échangeable. L'entraînement des chlorures est assez important et les lessivats sont riches en cet élément.

En ce qui concerne Ca et Mg solubles, il y a un léger lessivage avec les premières doses de percolation, puis accroissement des teneurs dans le sol aux doses successives, il y a alors dissolution du calcaire par l'apport de CO₂ dû à la matière organique (avec formation de bicarbonate de Ca).

On observe une diminution de Ca et Mg échangeables, en surface avec les premières doses, avec tendance à la refixation sur le sol à des profondeurs croissantes aux doses successives. Enfin avec la plus forte dose il y a lessivage complet de Ca et Mg accumulé sur la totalité de la colonne de terre.

L'entraînement de Ca et Mg dans le lessivat est maximum (trois fois plus que pour la solution $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$) ; il y a donc dissolution maximum des carbonates de Ca et Mg dans le sol. La plus grande partie va dans le lessivat, une autre partie demeure dans le sol sous forme de Ca et Mg solubles. Cette conclusion est confirmée par le dosage des bicarbonates dans le sol et les lessivats, la teneur en bicarbonate est alors sept fois plus élevée que pour le traitement $\frac{(20)}{5}$ et vingt fois plus que pour le traitement $\frac{(12,5)}{12,5}$.

De même, dans les lessivats provenant du traitement avec la matière organique, les teneurs en acides fulviques et acides humiques, sont dix fois supérieures à celles obtenues dans les autres traitements, qui sont elles peu variables. Les teneurs en AF sont cinq fois plus élevées que les teneurs en A.H. dans les percolats.

Il y a lessivage des sulfates du sol avec une légère phase intermédiaire de refixation due au calcium, suivie d'un entraînement important, surtout en profondeur, ceci parallèlement au lessivage des bicarbonates.

Le potassium ne joue pas un rôle très important sur le plan de la salinité du sol, cependant la matière organique provoque à la fois

un lessivage , mais aussi une accumulation du potassium dans le sol surtout en profondeur. Le K est directement solubilisé à partir de la matière organique qui en cède les 2/3. L'augmentation de Ca et Na des solutions favorise le lessivage du potassium.

6) Solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{5}{20}$ me/l. Avec cette solution pauvre en chlorures et en sodium, mais riche en sulfates et alcalino terreux. On observe un maximum d'entraînement de Na soluble et échangeable du sol, qui est à peine inférieur à celui provoqué par l'eau distillée. Les chlorures sont de même lessivés rapidement.

Les cations Ca et Mg solubles sont lessivés au maximum, mais remontent légèrement aux fortes doses.

Les formes échangeables de Ca et Mg sont également lessivés, puis refixées ultérieurement, mais principalement en profondeur et pas en surface des sols.

L'entraînement de Ca et Mg dans les lessivats est minimum; les éléments proviennent seulement de ceux qui préexistaient dans le sol, mais il n'y a pratiquement pas de dissolution du calcaire. Les bicarbonates solubles sont très faibles dans le sol ainsi que dans les lessivats.

Les sulfates préexistants sont très peu lessivés, par contre il y a un maximum de fixation dans le sol des sulfates provenant des solutions.

7) Avec le traitement des colonnes par l'eau distillée, il y a entraînement maximum du sodium soluble et échangeable du sol ainsi que des chlorures pour Ca et Mg le lessivage est seulement moyen. Dans le cas des formes solubles le lessivage est plus faible que pour les solutions $\frac{12,5}{12,5}$ et $\frac{12,5}{12,5} +$ gypse.

Les teneurs en Ca et Mg dans les lessivats sont plus faibles que pour toutes les solutions salines.

Le dosage des bicarbonates dans le sol montre des valeurs intermédiaires entre les traitements $\frac{5}{20}$ et $\frac{12,5}{12,5}$; dans les lessivats obtenus après traitement avec l'eau distillée les teneurs en bicarbonates sont un peu supérieures à celles du traitement de rapport $\frac{5}{20}$; cela prouve qu'il y a une légère dissolution du calcaire par l'eau distillée avec entraînement dans le percolat.

Enfin en ce qui concerne les sulfates, c'est l'eau distillée qui provoque le lessivage maximum, mais cependant un peu plus lent que celui des chlorures.

b) Conclusions sur certains aspects de la fertilité du sol.

Nous avons schématisée les profils brun calcaire artificiellement sale (Feucherolle) dans les graphiques joints.

Si nous considérons dans les profils et pour chaque traitement, la variation des éléments gênants ou toxiques par rapport au sol originel, l'évolution des profils peut être jugée globalement en considérant les surfaces relatives des graphiques représentées par l'ensemble sodium et chlorure (éléments gênants) dans le cas du sol de Feucherolles, et pour le maximum d'irrigation (dose D3).

Dans le cas de solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ SAR = 12,6 après percolation avec la plus forte quantité de solution (dose D3), on observe une diminution globale en conductivité puisqu'on obtient des valeurs qui varient entre 4,2 et 4,8 de la surface à la profondeur, au lieu de 7,5 mmhos/cm sur toute l'épaisseur dans le sol originel. Le pH du sol monte à 7,6 au lieu de 7,2 dans le sol originel.

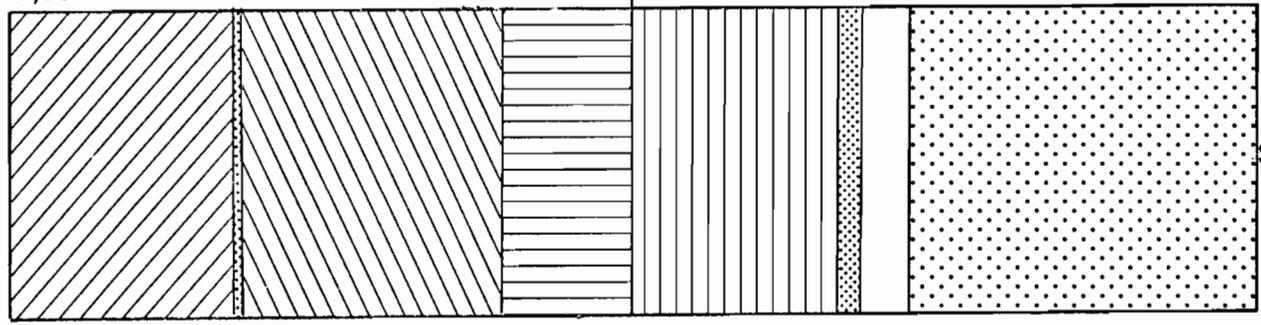
Il y a lessivage partiel des chlorures et du magnésium solubles. Par contre la concentration de sodium soluble augmente vers la surface lié en partie aux bicarbonates. Cette augmentation a un effet nuisible sur le sol, parce qu'elle provoque la dispersion du sol. En ce qui concerne la conductivité qui reste supérieure à 4 elle est limite pour les sols salés tandis que les autres solutions de même concentration (25 me/l) mais de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ plus faible diminuent la conductivité au dessous de 4 mmhos/cm. Enfin dans le cas du rapport $\frac{20}{5}$

ANIONS
10 me/100 g

0

CATIONS
10 me/100 g

3,75 7,2 7,53

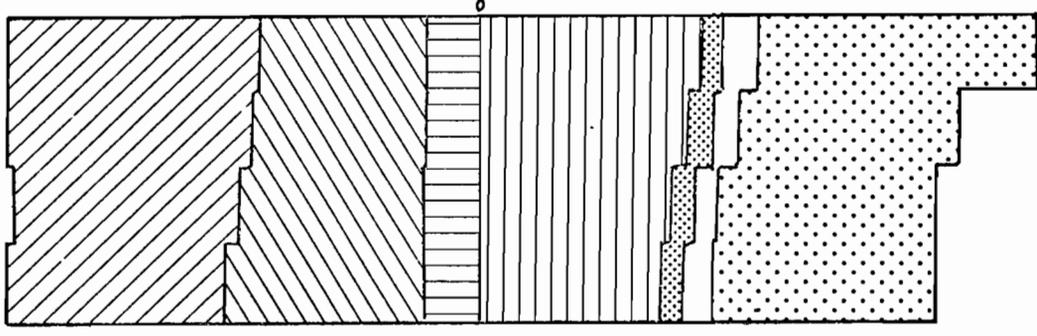


Sol origine!

$\frac{Na}{T}$ % pH EC

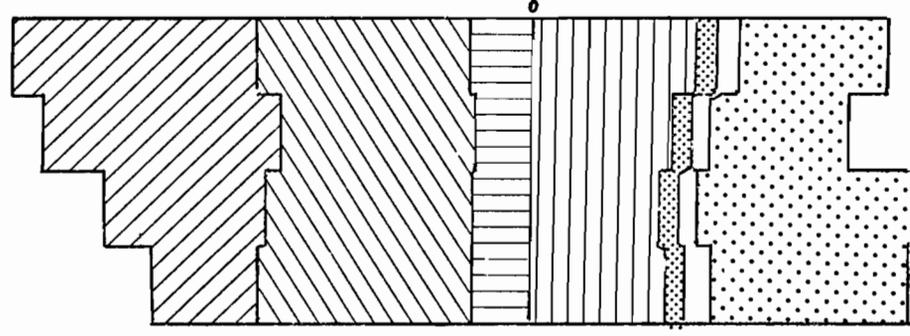
Rapports $\frac{Na}{Ca + Mg}$

6,5 7,6 4,2
4,7 7,6 4,3
4,5 7,6 4,6
4,3 7,6 4,8



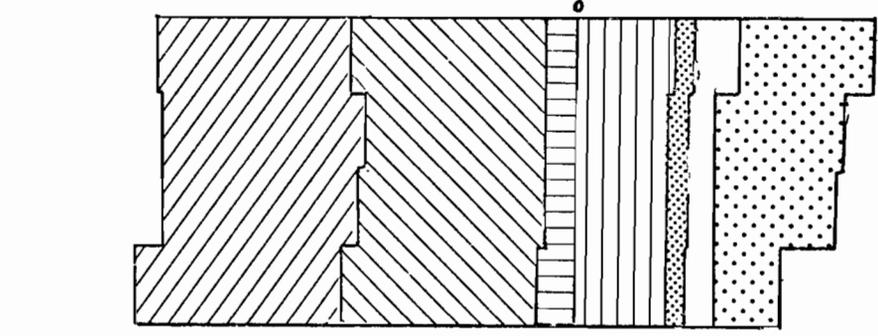
$\frac{20}{5}$

2,5 7,6 4,8
2,5 7,6 4,6
4,0 7,6 4,7
4,0 7,6 3,7



$\frac{20}{5} + 15 \text{ me/l gypse}$

3,5 7,6 4,0
4,0 7,4 3,8
3,5 7,6 4,0
3,5 7,6 3,9



$\frac{12,5}{12,5}$

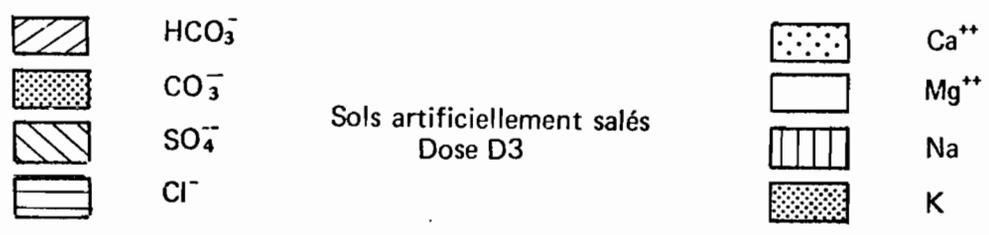


Fig. 23 (1) Répartitions et nature des sels solubles dans les colonnes après lessivage avec différentes solutions salines de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable.

Il y a une augmentation de SAR du sol par rapport au sol originel. De même le rapport Na/T échangeable a augmenté par rapport au sol originel, il est maximum en surface 6,5%, et supérieur à celui de tous les autres traitements.

Dans le cas de solution de rapport $\frac{20}{5} + 15$ me/l gypse (SAR=6,3) après l'apport de la plus forte dose (D3) on observe une baisse de conductivité par rapport au sol originel mais qui demeure plus élevée que dans le traitement précédent $\frac{20}{5}$. Le pH du sol monte à 7,6 au lieu de 7,2 dans le sol originel. Il y a lessivage partiel des chlorures et léger lessivage de Na^+ vers la profondeur. Ce traitement a un effet légèrement plus améliorant que le traitement précédent malgré la conductivité de 4,8 car il y a moins d'effet dispersant du sodium lié aux bicarbonates. Le SAR du sol augmente vers la surface par rapport au sol originel, par contre on note un net abaissement du rapport $\frac{\text{Na}}{\text{T}}$ en surface qui se maintient en profondeur.

Dans le cas de solution, dont la valeur du rapport alcalin sur alcalino-terreux, est égale à l'unité (NaCl 12,5 me/l et $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4$ 12,5 me/l SAR = 5), après lessivage avec la plus forte dose (D3) il y a une baisse de conductivité < 4 mmhos/cm donc plus importante que dans les traitements précédents. Le pH du sol varie entre 7,4 et 7,6. Le SAR de l'extrait aqueux a diminué par rapport au sol originel; ce qui augmente la perméabilité du sol. Cette solution provoque un lessivage assez important des ions (chlorure et sodium). Cette solution a un effet améliorant supérieure à celui des solutions $\frac{20}{5}$ et $\frac{20}{5} + 15$ me/l gypse. Le rapport Na/T est diminué dans son ensemble par rapport au sol originel, ce qui donne une perméabilité correcte.

Dans le cas de la solution précédente de SAR = 5 l'addition de 5 me/l de gypse (SAR définitif = 4,2) ne modifie pratiquement les teneurs en chlorure et sodium du sol; Le pH du sol augmente légèrement (7,7 au lieu de 7,2); mais par contre il diminue la conductivité du sol, sauf en profondeur, et augmente sa perméabilité, ces deux facteurs étant favorables, mais de faible intensité, il est également curieux de constater que Na/T est plus grand que dans le traitement précédent en raison du contact moins profond avec les eaux de lessivage.

Dans le cas de solution de rapport $\frac{12,5}{12,5}$, l'addition de 5% de matière organique dans le sol ne modifie pas beaucoup les teneurs en sodium et en chlorure. Par contre elle augmente le calcium soluble et le magnésium ce qui a un effet améliorant par diminution maximum du sodium échangeable. Le pH du sol est minimum (7,5) par rapport à tous les traitements. En outre la diminution de conductivité est assez importante et il y a aussi diminution de SAR du sol par rapport au sol originel et aux solutions précédentes. L'amélioration d'ensemble est importante. Le rapport $\frac{Na}{T}$ est le plus faible de tous les traitements excepté l'eau pure.

La solution riche en alcalino-terreux de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{5}{20}$ après percolation avec la forte quantité de solution (dose D3) provoque une forte diminution des teneurs en sodium et chlorure solubles. Ce traitement diminue fortement le sodium échangeable du sol mais moins que le traitement avec la matière organique. La conductivité du sol devient proche de 3,5 millimhos/cm mais le pH du sol est maximum (7,8) par rapport à tous les traitements et sol originel. Le SAR diminue à la valeur de 1 à tous les niveaux. Le sol n'est pratiquement plus salin. Le rapport $\frac{Na}{T}$ est plus faible que dans le sol originel.

L'apport de l'eau distillée (témoin) diminue tous les éléments gênants. Il y a maximum de diminution de conductivité (70%) du sol originel par rapport à toutes les solutions. Le SAR du sol devient 0,1 et le rapport $\frac{Na}{T}$ s'abaisse à 1. C'est le plus faible obtenu dans tous les traitements. Un tel résultat n'est probablement dû qu'à la présence du calcaire très fin, suffisamment solubilisable pour permettre un entraînement de sodium échangeable.

Le traitement 5/20 est le meilleur par rapport à tous les traitements salins au point de vue du lessivage des sels solubles, en outre il augmente la perméabilité du sol par flocculation, élimination des éléments gênants pour la culture (Na et Cl), tout en permettant une élimination de Na^+ échangeable très importante. Cependant à ce point de vue le traitement avec la matière organique, ou l'eau pure sont plus efficaces en raison de la présence de calcaire dans le sol. L'ordre de l'amélioration des sols par le

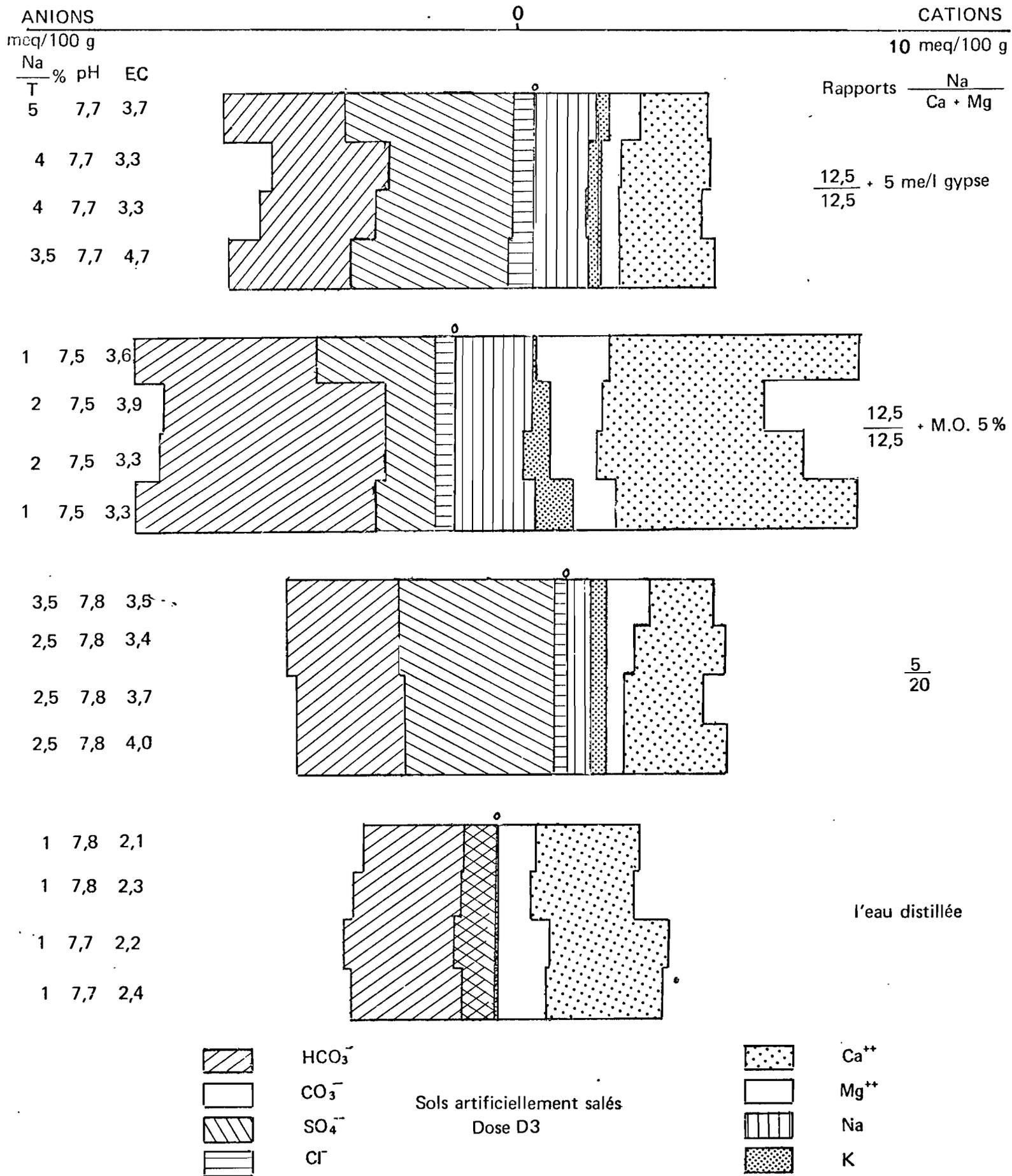


Fig. 23 (2) Répartitions et nature des sels solubles dans les colonnes après lessivage avec différentes solutions salines de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable.

traitement est le suivant :

$$\text{eau pure} > \frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}} = \frac{12,5}{12,5} + \frac{0,05\%}{20} > \frac{12,5}{12,5} > \frac{12,5}{12,5} + 5 \text{ me/l gypse} > \frac{20}{5} + 15 \text{ me/l gypse} > \frac{20}{5}$$

B) SOLS TRES SALES DE TUNISIE.

a) Résumé des conclusions partielles.

Dans le cas du sol naturel de Tunisie comme pour les sols artificiellement salés, nous allons tenter de faire la synthèse de l'action sur le sol des différents percolats de composition variable. Au départ le sol est moyennement calcaire mais très riche en chlorure de sodium et surtout en gypse.

En raison de ces particularités, il n'y a pas de traitement d'eau de percolation contenant un supplément de gypse ; par contre nous avons augmenté parfois la concentration globale de ces solutions, soit pour celles qui contiennent un excès de sodium, soit pour celles dont les concentrations en alcalin et alcalino-terreux est équivalente.

Par ailleurs, nous avons testé l'action de la matière organique sur ces différents types de traitement du sol.

En ce qui concerne les taux de chlorures ainsi que les teneurs en sodium soluble et échangeable, les différentes solutions de percolation agissent suivant une règle assez simple qui dépend de la concentration absolue en ces éléments. Quel que soit le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca+Mg}}$ de la solution, il y a un lessivage très important des chlorures préexistants dès la première dose; la répartition des chlorures est très homogène en profondeur. Les teneurs moyennes dans le sol s'établissent rapidement à une valeur d'équilibre fonction de la richesse en chlorure de la solution de percolation, et qui n'est que très légèrement accrue par la présence de matière organique.

En ce qui concerne le sodium soluble on observe également un très fort lessivage par rapport au sol d'origine, les teneurs résiduelles

dans le sol sont fonction de la teneur en Na de la solution de percolation comme elles l'étaient pour les chlorures du sol de la teneur en chlorures de la solution; elles sont indépendantes du rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$. Le sodium échangeable est également diminué fortement par toutes les solutions salines, mais les valeurs résiduelles varient peu en fonction des traitements, l'ordre est voisin de celui du Na soluble, mais sans écarts importants.

C'est la solution équilibrée $\frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5) en présence de matière organique qui diminue le plus le taux de Na échangeable, par contre cette action de la matière organique sur Na échangeable est plus faible dans le cas de la solution équilibrée de SAR = $7 \left(\frac{25}{25}\right)$.

Il faut signaler que le rapport $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}}$ échangeable peut augmenter fortement sous l'action des concentrations élevées en NaCl de la solution de percolation sans que soit beaucoup augmenté la teneur en Na échangeable, mais par suite du déplacement de Ca et Mg.

En ce qui concerne les autres anions bicarbonates et sulfates ainsi que les cations Ca^{++} et Mg^{++} , les actions sont plus complexes, et il convient d'étudier séparément les différents traitements du sol.

- 1) $\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{20}{5}$ - Les solutions riches en Na provoquent un lessivage des carbonates solubles; l'entraînement dans les lessivats est deux fois plus important que celui provoqué par l'eau distillée; cependant il est nettement plus faible que dans le cas du sol Feucherolles (environ 4 fois) en raison de la forte teneur du sol en gypse au départ et de la plus faible teneur en calcaire. Ces solutions provoquent un fort lessivage des sulfates qui augmente avec les doses successives.

De même la somme Ca+Mg à l'état soluble diminue de plus en plus avec les doses, mais le magnésium est beaucoup plus entraîné que le calcium; ce dernier peut même former des dépôts secondaires en profondeur des colonnes. Les cations Ca et Mg entraînés de la surface se refixent en profondeur à l'état échangeable.

En ce qui concerne le carbonate de calcium insoluble (calcaire), il se forme plutôt lorsque le Ca échangeable est déplacé, c'est à dire

en surface ; mais dans le cas de la solution riche en Na et pauvre en gypse, cette formation de calcaire est faible car elle est compensée par l'action de dissolution par les chlorures.

$\frac{Na}{Ca+Mg} = 40/10$ - L'accroissement de concentration des solutions riches en sodium avec un SAR de 18, provoque d'abord un lessivage important des bicarbonates solubles et ensuite leur accumulation. Il y a accroissement des bicarbonates solubles dans les lessivats par rapport à $\frac{20}{5}$; l'augmentation de teneur de la solution en NaCl favorise la dissolution du calcaire et la formation de bicarbonates solubles, mais secondairement l'apport d'une plus grande quantité de sulfate et l'augmentation de Na échangeable favorisent le blocage des carbonates de calcium. On observe d'ailleurs aux fortes doses un dépôt de calcaire dans le sol plus important que pour la solution précédente.

Les sulfates sont également lessivés mais pas davantage que dans le cas de la solution précédente (rapport cationique $\frac{20}{5}$).

En ce qui concerne les cations Ca et Mg on observe d'abord un lessivage important par les premières doses de percolation qui joue sur le magnésium à 75% ; puis ce lessivage diminue avec tendance à l'accumulation. Il se produit des dépôts en profondeur dès les premières doses, cependant les cations Ca^{++} et Mg^{++} à l'état échangeable sont entraînés en raison de la forte charge en Na^+ de la solution.

$\frac{Na}{Ca+Mg} = 12,5$ - Les solutions d'égale concentration en Na et la valeur de SAR 5 provoquent le phénomène inverse, d'abord une légère accumulation puis avec les doses successives du léger lessivage des bicarbonates. Il y a moins de bicarbonate dans le lessivat que dans le cas des solutions riches en sodium, la diminution de NaCl dans la solution diminue la formation de carbonates solubles, et l'augmentation du sulfate de calcium diminue leur lessivage.

Les sulfates sont moyennement lessivés.

Le lessivage de Ca + Mg soluble est très faible et leur répartition est régulière dans le profil.

Pour Ca + Mg échangeables, il se produit aux faibles doses de percolation un lessivage maximum, dû aux sels de sodium préexistants dans le sol, puis aux plus fortes doses lorsque ce sodium soluble est éliminé on observe une accumulation importante et progressive de Ca + Mg échangeables dans le sol. En surface aux fortes doses, la faible dissolution des carbonates, l'apport de gypse, et l'action de déplacements des cations échangeables dû au sodium provoque un maximum d'accumulation du calcaire (CO_3Ca) par rapport au sol original.

$\frac{\text{Na}}{\text{Ca}+\text{Mg}} = \frac{25}{25}$ - Les solutions de même concentration en sodium et alcalino-terreux, mais plus concentrées de SAR =7 montrent un processus analogue aux solutions précédentes mais nettement plus intense ; il y a d'abord accumulation importante des bicarbonates solubles dans le sol, puis lessivage assez intense aux fortes doses de percolation. Dans les lessivats on observe une faible augmentation des bicarbonates par rapport à la solution précédente aux doses D1 et D2; par contre à la forte dose D3 il y a davantage de bicarbonates dans les lessivats. L'augmentation des sulfates alcalino-terreux a provoqué un blocage plus important des carbonates solubilisés aux faibles doses, l'augmentation du NaCl a accentué la dissolution du calcaire dans un premier temps avec dépôt secondaire de sels de calcium, mais aux fortes doses les produits d'insolubilisation ont été davantage entraînés dans les lessivats. Le lessivage des sulfates est minimum.

Les cations Ca et Mg solubles subissent un lessivage modéré et leur répartition dans le profil est régulière. Les cations échangeables diminuent fortement, le magnésium étant entraîné. Avec les doses successives il se produit une certaine augmentation de Ca échangeable mais plus faible que dans le traitement précédent. Dans ce traitement il y a un antagonisme entre la dissolution du calcaire, d'une part, et le lessivage des sels de calcium, d'autre part.

En ce qui concerne le carbonate de chaux (CO_3Ca), c'est l'effet global de lessivage aux fortes doses qui est dominant avec cette solution, il y a donc diminution maximum du calcaire à tous les niveaux.

$\frac{20}{5} + M.O 5\%$ - L'addition de 5% de MO. au sol dans le cas de solutions riches en sodium et pauvres en sulfates alcalino-terreux provoque une forte accumulation dans le sol des bicarbonates solubles (1 à 6 fois plus que les autres traitements), les lessivats sont très enrichis en bicarbonate par rapport au traitement avec la même solution sans apport de matière organique, 30 fois plus à la première dose, et diminution ensuite).

On observe une dissolution du calcaire avec formation de bicarbonates dont les solutions sodiques favorisent le lessivage ; elles provoquent aussi une dispersion de l'argile.

La matière organique dans ces solutions riches en sodium produit un maximum de lessivage des sulfates dès les premières doses d'irrigation. Le phénomène de sulfato réduction apparaît précocement en raison de la dispersion de l'argile, mais ensuite disparaît rapidement avec les percolations successives.

Il y a un maximum de lessivage de Ca + Mg soluble ; le magnésium y représente 85%.

Par contre il y a une forte augmentation de Ca + Mg échangeables aux premières doses. Les phénomènes de sulfato-réduction accroissent cette immobilisation, puis aux fortes doses les teneurs en cations diminuent, la sulfato-réduction disparaissant aux premières doses les bicarbonates augmentent en même temps que diminuent les sulfates, il s'en suit que le calcium soluble diminue peu alors que le magnésium est éliminé puis l'ensemble des anions CO_3H^- et SO_4^{--} tend à s'éliminer et entraîne Ca soluble et échangeable. En ce qui concerne le calcaire, il y a un effet d'accumulation aux doses moyennes, favorisé par la sulfato-réduction, puis un lessivage aux fortes doses surtout en profondeur.

$\frac{20}{5} + 1\%$ de MO.- L'addition de 1% seulement de MO. provoque essentiellement le lessivage des bicarbonates, sans accumulation du moins à dose faible d'irrigation; ces bicarbonates se retrouvent dans les premiers lessivats.

La sulfato-réduction est plus faible que précédemment, ce qui cause une diminution du lessivage des sulfates en profondeur.

En ce qui concerne le calcium soluble son entraînement est maximum dans les lessivats; Il subit un blocage moindre qu'avec les doses plus fortes de matière organique. Avec ce traitement il y a un effet de dissolution et de lessivage du calcaire.

$\frac{12,5}{12,5} + 5\%$ MO.- Ces solutions également riches en chlorure de sodium et sulfates alcalino-terreux de concentration moyenne SAR = 5 en présence de matière organique facilement fermentescible, provoquent une accumulation de bicarbonates solubles dans le sol; les bicarbonates passent aussi davantage dans les lessivats que lors de la percolation avec la même solution mais sans apport de matière organique supplémentaire, dans ce cas d'ailleurs, la quantité de bicarbonates dans les lessivats était très faible. En présence d'un apport de matière organique la formation de bicarbonate est plus importante que son lessivage.

Les sulfates sont faiblement lessivés, par contre il se produit une sulfato-réduction plus tardive que dans le cas de la solution précédente; les produits formés s'accumulent en profondeur et ne s'éliminent que lentement aux fortes doses.

Il y a cependant une diminution régulière de Ca + Mg soluble dans tout le profil. Par contre il n'y a qu'un faible lessivage de Ca + Mg échangeable aux premières doses et au contraire augmentation de ces éléments aux doses de percolation plus fortes.

L'amélioration de la structure tend à provoquer rapidement un lessivage des sels solubles préexistants. Mais la formation de bicarbonates à partir du calcaire, puis l'action de l'excès de sels de calcium, et la sulfato-réduction, provoquent une redéposition secondaire du calcium surtout à l'état échangeable, mais n'empêche pas le lessivage du magnésium soluble. En ce qui concerne le calcaire il y a un équilibre entre le phénomène de dissolution d'une part, et le phénomène de dépôt d'autre part, les teneurs sont peu changées, aux fortes doses par rapport à la teneur originelle.

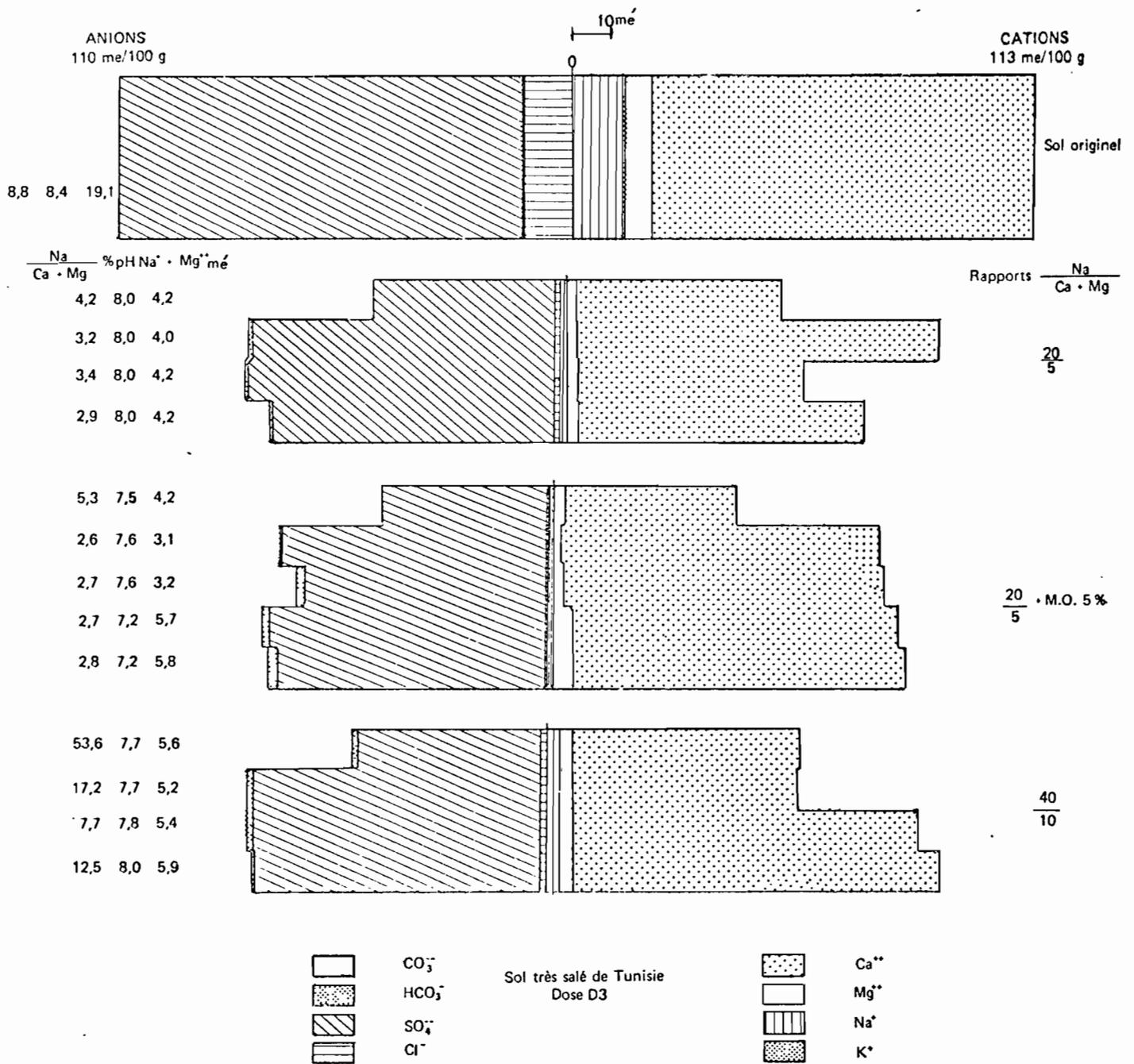


Fig. 24 (1) Répartitions et nature des sels solubles dans les colonnes après lessivage avec différentes solutions salines de rapport $\frac{Na}{Ca + Mg}$ variable.

sol originel. Le pourcentage de sodium échangeable du complexe baisse (entre 2,5% et 2,7%) par rapport au sol originel (8,3%) ce qui doit correspondre à une amélioration de la structure.

On observe par rapport au sol originel un lessivage très important des chlorures de sodium et de magnésium solubles préexistants. La quantité Na + Mg restant dans le sol demeure supérieure à 4 me pour 100 g, c'est à dire une concentration encore trop élevée. (1 me de sel soluble pour 100 g de sol (extrait saturé) correspond à peu près à 2 mmhos cm). (1)

Dans le cas de la solution la plus sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{40}{10}$ (SAR = 18) après l'apport de la dose D3, on observe que le pH du sol baisse plus en surface qu'en profondeur et que cette baisse est plus forte que lors de l'utilisation de la solution de rapport $\frac{20}{5}$. Ce fait est dû à l'abondance des chlorures.

On observe une légère augmentation du pourcentage de sodium échangeable en surface (niveau 0) et en profondeur (niveau 3) par rapport au solution $\frac{20}{5}$. On observe visuellement une dégradation de la structure ce qui est dû au fait qu'il y a une forte diminution de Ca + Mg échangeable et par conséquent très nette augmentation de sodium échangeable par rapport aux cations bivalents échangeables par comparaison avec tous les autres traitements et avec le sol originel.

Le rapport $\frac{Na}{\text{bivalents}} = \frac{53,6\%}{\text{bivalents}}$ est de 53,6% ce qui constitue un équilibre très défavorable pour la structure. Il semble ainsi qu'en certain cas la dégradation de la structure corresponde plus à une augmentation du rapport $\frac{Na}{Ca+Mg}$ qu'à celle de $\frac{Na}{T}$ généralement envisagée.

Bien qu'il y ait un lessivage des chlorures sodium et magnésium (éléments gênants) par rapport au sol originel, la somme des cations solubles se stabilise entre 5 et 6 me, c'est à dire parmi les concentrations maximum, encore toxiques pour les plantes (surtout si l'on ajoute le gypse solubilisé).

(1) 1 mmhos cm \pm 12,5 me par litre de sels solubles \pm 0,5 me p.100gr.

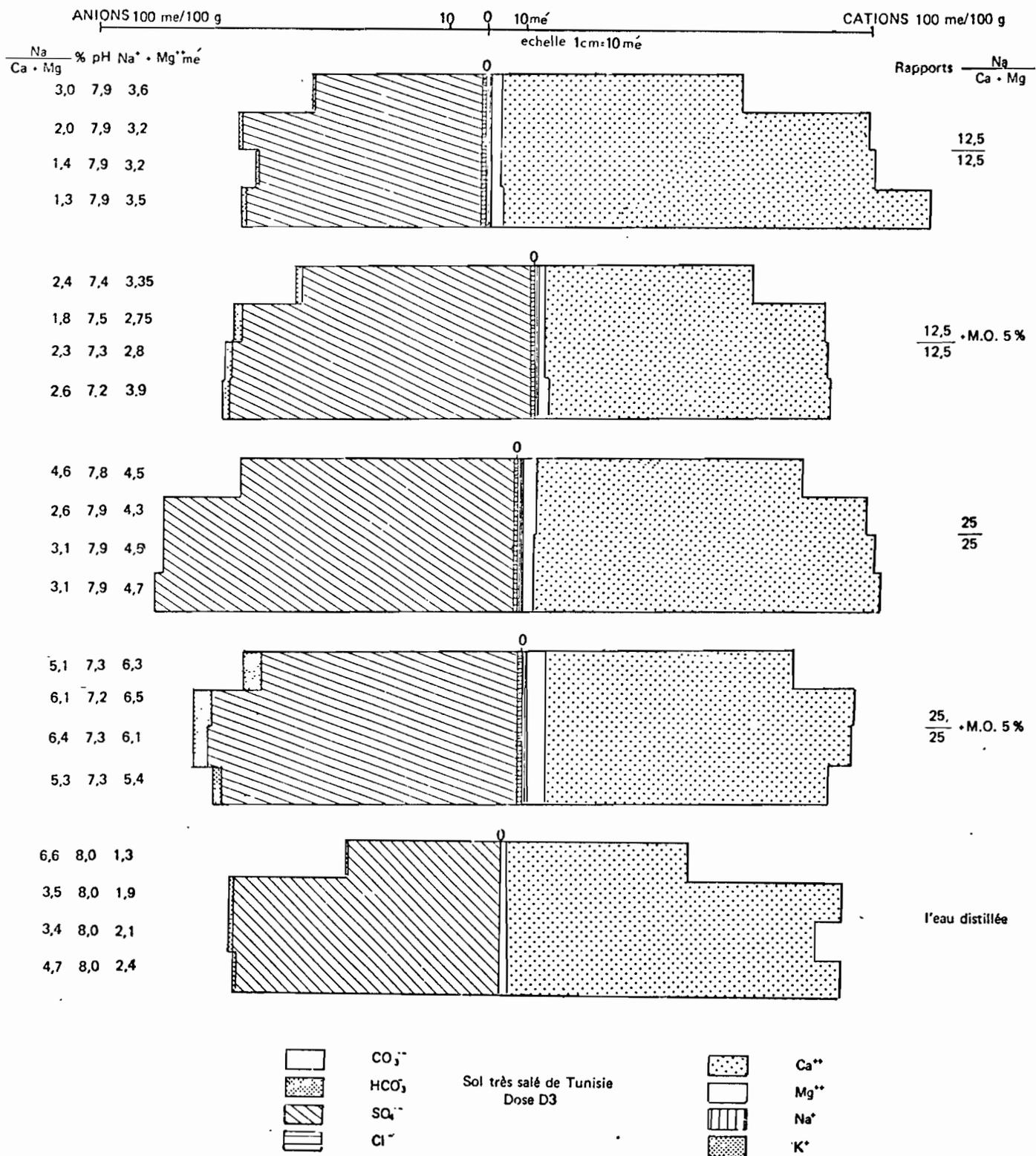


Fig. 24 (2) Répartitions et nature des sels solubles dans les colonnes après lessivage avec différentes solutions salines de rapport $\frac{Na}{Ca \cdot Mg}$ variable.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, et de moyenne concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ (SAR = 5), on observe une baisse de pH du sol jusqu'à 7,9 dans tout l'ensemble du profil par rapport au sol original (8,4). On observe un maximum de diminution du pourcentage de sodium échangeable vers la profondeur, par rapport à tous les traitements, et par rapport au sol original. Les valeurs de ESP varient entre 2,3 et 1,9; la désalcalisation du sol est donc très bonne, favorisant l'amélioration de la structure.

Au fur et à mesure qu'on diminue le rapport alcalin sur alcalino-terreux, on trouve plus de magnésium dans le sol, que dans les traitements de rapport alcalino-terreux élevé, mais d'un autre côté il y a davantage de lessivage de sodium (93-95%) et de chlorure. En conclusion la somme Na + Mg soluble (restant dans le sol après lessivage) dépasse 3me; ce qui est plus faible que dans les traitements précédents et sans doute à la limite de l'utilisation par les cultures.

Quand le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, avec une forte concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ (SAR = 7) le pH du sol baisse à 7,9; il en est de même avec la solution de rapport $\frac{12,5}{12,5}$. On observe une diminution importante du pourcentage de sodium échangeable par rapport au sol original, mais plus faible par rapport au traitement $\frac{12,5}{12,5}$ de SAR 5. La valeur se situe entre 2,1 et 2,3% en surface, et est acceptable du point de vue de la structure.

On observe un lessivage très important des chlorures et du sodium (88%), quant au magnésium il est moyennement lixivlé.

La somme Na + Mg soluble, se stabilise entre 4 et 5me, et joue peut-être un rôle encore néfaste pour la culture en plus du gypse solubilisé.

L'enfouissement de matière organique (5%) dans le cas de la solution sodique de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{20}{5}$ (SAR = 12,6) après percolation avec la forte dose, montre une baisse de pH très importante vers la profondeur et par rapport au sol original. On atteint 7,1 en surface.

Le pourcentage de sodium échangeable diminue par rapport au sol origine! et aussi par rapport au traitement avec la même solution mais sans apport de matière organique. Les valeurs varient entre 2,3% et 2,1%. Ce pourcentage de sodium échangeable est correct pour la structure du sol.

La matière organique provoque davantage de lessivage des éléments gênants, chlorure et sodium, que le même traitement $\frac{20}{5}$ sans matière organique. On observe une diminution de magnésium par rapport au sol originel mais cette diminution est plus faible par rapport au traitement simple $\frac{20}{5}$ sans matière organique.

La somme Na + Mg soluble; varie entre 3 et 4 me en surface, 5 à 6 me en profondeur et est sans doute encore néfaste pour la culture (en plus du gypse).

L'enfouissement de matière organique (5% dans le cas de la solution de rapport $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{12,5}{12,5}$ (SAR=5), provoque une baisse de pH très importante par rapport à la solution simple $\frac{12,5}{2,5}$ (7,2 contre 7,8). On observe aussi une diminution de pourcentage de sodium échangeable vers la surface. Le taux est le plus bas en surface, avec 1,7% la desalcalinisation est très bonne.

On observe un lessivage très important des éléments gênants (chlorure et sodium 94%) par rapport au traitement sans apport de matière organique. A l'inverse du traitement $(\frac{20}{5} + M.O 5\%)$ ici la matière organique provoque le lessivage du magnésium.

La somme Na + Mg soluble se situe entre 2,5 et 3,5 me et bien qu'encore un peu élevée, permet peut être l'établissement de cultures.

Lorsque le rapport alcalin sur alcalino-terreux est égal à 1, et de forte concentration $\frac{Na}{Ca+Mg} = \frac{25}{25}$ (SAR =7), l'addition de 5% de matière organique, provoque un maximum de baisse de pH par rapport à tous les autres traitements. On observe une diminution importante du pourcentage de sodium échangeable par rapport au sol originel; cependant le pourcentage de sodium échangeable ne diminue pas comparativement au traitement par la solution de rapport $\frac{25}{25}$ sans addition de matière organique au sol. Ce rapport se situe entre 2,1

et 2,3% sur l'ensemble du profil ce qui est acceptable.

On observe un lessivage très important des éléments gênants (chlorure et sodium) par rapport au sol originel. Mais par contre l'apport de matière organique provoque une légère augmentation de magnésium par rapport au traitement simple $\frac{25}{25}$ sans matière organique. La somme Na+Mg soluble dépasse 6 me sur l'ensemble du profil, et est certainement encore néfaste aux cultures. (car elle s'ajoute au gypse).

L'apport de la forte dose de l'eau distillée (témoin) provoque une légère baisse de pH par rapport au sol originel : 8,0 au lieu de 8,4. Les valeurs de pH sont les mêmes qu'avec le traitement par la solution de rapport $\frac{20}{5}$. On observe une diminution importante de pourcentage de sodium échangeable. Cette désalcalisation est moyenne mais provoque une amélioration de la structure.

On observe un lessivage complet des éléments gênants solubles (chlorure et sodium 100%) et un lessivage maximum du magnésium, par rapport à tous les autres traitements. La somme Na+Mg soluble varie de 1,5 à 2,5 me et n'est sans doute plus très gênante pour la culture.

L'ordre de l'amélioration des sols par les traitements est le suivant pour la structure :

$$\frac{12,5}{12,5} + M.O > \frac{12,5}{12,5} > \text{eau distillée} > \frac{20}{5} + M.O > \frac{20}{5} > \frac{25}{25} > \frac{25}{25} + M.O > \frac{40}{10}$$

et pour la desalinitation :

$$\text{eau pure} > \frac{12,5}{12,5} + M.O > \frac{12,5}{12,5} > \frac{20}{5} + M.O > \frac{20}{5} > \frac{25}{25} > \frac{40}{10} > \frac{25}{25} + M.O.$$

La matière organique joue un rôle efficace sur l'amélioration du sol à condition que les eaux d'irrigation ne contiennent que des doses peu élevées et équilibrées de sels de sodium et de sulfates alcalino-terreux; lorsque ces concentrations augmentent l'action de la matière organique est plutôt néfaste.

Par contre la matière organique garde un rôle améliorant dans les sols gypseux si les eaux d'irrigation sont principalement chargées en sodium.

B I B L I O G R A P H I E

- ABDEL-MALEK (Y.), RIZK (S.J.), 1963 - Bacterial sulphate reduction and the development of alkalinity. *J. appl. Bacterio.*, T.26, pp.7-26.
- AHMED (H.A.), 1972 - Activity of sodium ions in calcareous soil suspensions. *Soviet soil Science.*, 4, pp. 102-104.
- ANTIPOV-KARATAEV (I.N.), 1953 - The genesis and géographique distribution of solonchets in the USSR (In Russ.), in "Improvement of solonchets soils in the USSR " USSR Academy of Sciences. Moscow.
- ARNY (S.), 1956 - Contribution to the role of Mg in the formation of alkali soils. *Vie Congr. Sci. du sol*, Paris.
- AUBERT (G.), 1961 - *Trop. Soils veget. Proc*; Abidjan, Paris, UNESCO, 41-47.
- AUBERT (G.), 1965 - Classifications des sols. Tableaux des classes, sous classes et sous groupes de sols utilisés par la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. (1965) *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Pédol, III, 4, pp. 89-90.
- AUBERT (G.), 1967 - Irrigation, drainage and salinity. An International source book FAO/UNESCO.
- AUBERT (G.), OLLAT (C.), 1969 - Observation sur l'utilisation d'eaux saumâtres pour l'irrigation et sur l'amélioration des sols salées. *C.R. acad.Agric.Fr.*, T. 55 n°4, pp.244-250, II tabl; Bibliogr.
- AUBERT (G.), BOULAIN (J.), 1972 - La Pédologie. Collection : "Que sais-je" ?. n° 352, pp. 87-100.
- BALBA (A.M.), 1965 - A quantitative study of the salinization and desalinization of soil columns. *Agrok es talajtan*, tom.14. Supplementum, pp.351-358.
- BARBIER (G.), 1962 - La dynamique du Potassium dans le sol. *Potassium symposium*. pp. 231-258.
- BAZILEVICH (N.I.), 1965 - Geochemistry of soils with soda-salinity. " *Nauka* " Moskva. Translated by Israel program for Scient. Transl., Jérusalem, 1970, 391 p.
- BELKHODJA (K.), 1972 - Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairovan (Tunisie Centrale) contribution à l'étude de leur mise en valeur. Thèse Toulouse (1970) *Bulletin de la division des sols de Tunisie Tunis*.

- BLOOMFIELD (C.), 1969 - Sulphate reduction in water logged soils J. of soil Sci, V 20, n°1, pp.207-221.
- BOCQUIER (G.), 1973 - Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique, Mém. O.R.S.T.O.M. n° 62. Paris, 350 p.
- BOULAINÉ (J.), 1971 - Cours de Pédologie Générale. I.N.A. Paris-Grignon 277 p. multigr.
- BOWER (C.A.) et al, 1954 - United states salinity laboratory staff. Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils U.S. depart. Agric. Handb n° 60. Washington, VIII. 160 p.
- BRIDGE (B.J.), TUINY (J.), 1973 - The effect of gypsum treatment on the swelling of natural clods of a clay soil. Soil Sci., 115, 6 - pp. 414-419.
- CHAMINADE (R.), 1955 - Le potassium et la matière organique. Potassium symposium (1955) pp. 203-218.
- CHEVERRY (C.), 1974 - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse O.R.S.T.O.M. Strasbourg.
- COMBEAU (A.), 1971 - Observations sur la stabilité de la structure des sols de la station de cherfech. Tunis Projet d'Amélioration des techniques d'irrigation et de drainage. P. 26. multigr.
- DABIN (B.), 1951 - Contribution à l'étude des sols du delta central Nigérien. Agron. trop., Nogent, vol VI II-12, pp.606-637.
- DABIN (B.), 1969 - Etude générale des conditions d'utilisation des sols de la cuvette tchadienne. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M. n°2 pp.23-26.
- DEELMAN (J.C.), 1975 - Bacterial sulfate reduction affecting carbonate sediments. Soil Sci.V.119, n°1 pp.73-80.
- DEMOLON (A.), 1960 - Dynamique du sol. Dunod, Paris 520 p.
- DOMMERGUES (Y.), JACQ (V.), BECK (G.), 1969 - C.R. hebd. Séances Acad. Sci., Paris, 268, 605-608.
- DOMMERGUES (Y.), 1970 - Ecologie microbienne du sol. pp. 578-581.
- DUCHAUFOUR (P.), 1970 - Précis de Pédologie.
- DUCHAUFOUR (P.), 1972 - Cycle biologique des cations alcalins et alcalino-terreux. Processus de formation des sols, Biochimie et Géochimie. pp. 51-57.

- DURAND (J.H.), 1955 - Contribution à l'étude des solonetz magnésiens. Bull. A.F.S. n° 77, 508-513.
- DURAND (J.H.), 1958 - Les sols Irriguables (étude pédologique), Alger 190 p.
- EATON (F.M.), 1950 - Significance of carbonates in Irrigation waters. Soil Sci. 69 pp. 123-133.
- FELTSIANT (I.N.), 1959 - Capillary movement of moisture in stratified soils. Soviet Soil Science N.3 pp. 282-92.
- FINK (D.H.), THOMAS (G.W.), 1964 - X-ray studies of crystalline swelling in montmorillonite. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28, pp. 747-750.
- FINK (D.H.), NAKAYAMA (F.S.), Mc NEAL (B.L.), 1971 - Demixing of exchangeable cations in free swelling bentonite clay. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35. 4, pp. 552-555.
- FINK (D.H.), NAKAYAMA (F.S.), 1972 - Equation for describing the free swelling of montmorillonite in water. Soil Sci., 114,5, pp. 355 - 358.
- GONIC (J.), PARENT (C.), 1966 - Etude géochimique d'une tranche de sédiments fins actuels. Bull. BRGM, 5, pp. 19-33.
- GRAS (F.), 1973 - Preliminary results of lysimeter studies on the dynamics of calcium in the irrigated calcareous soils of south LEBANON. Soils bulletin, 21. Calcareous soils. Food Agriculture organization of the united nations. Rome, Cairo, Egypt, 27 Nov - 2 Dec 1972 pp. 221-231.
- GRAS (F.), 1975 - Les sols très calcaires du Liban sud évolution et mise en valeur. thèse O.R.S.T.O.M. Strasbourg pp.191 multigr.
- ISLAM-UL-HAQ (M.), 1968 - Investigations on the role of Diplachne Fusca in reclamation of saline and alkali soils. thèse M Sc west Pakistan agril. univ Lyallpur. Pakistan.
- ISLAM-UL-HAQ (M.), SANDHU (G.R.), 1970 - Effect of microbial inoculation on nitrogen fixation in rice soils (Pot culture experiment) Annual Report Pakistan Atomic Energy centre Lahore (1970).
- ISLAM-UL-HAQ (M.), FASAHAHAT (M.F.A.), 1971 - Reclamation of saline alkali soils by growing kallar grass. The Nucleus 8,4, pp.139-144.
- ISLAM-UL-HAQ (M.), SANDHU (G.R.), 1971 - i) conjoint culture of kallar grass, blue green algae and nitrogen fixing bacteria. ii) use of sesbania aculeata and a local weed in soil reclamation. Biological control of soil salinity and Fertility Annual Report N I A B (1971) Lyallpur. Pakistan.

- JABER (A.), 1970 - Contribution à l'étude expérimentale des mouvements, ascendant et descendant, des solutions de sels de sodium (carbonate, sulfate et chlorure) et de certains aspects de leur action physique sur un sol soumis à l'influence d'une nappe peu profonde dans laquelle ils sont dissous. O.R.S.T.O.M. Paris, 124 p. multigr.
- KELLEY (W.P.), 1962 - Sodium carbonate and adsorbed sodium in semi-arid soils. Soil Sci. V. 94, n°1.
- KELLEY (W.P.), 1963 - Use of saline irrigation water. Soil Sci. V 95 n°6 pp. 385-391.
- KOTIN (N.I.), 1962 - Calcareous solonchets in the western part of the sub-ural plateau. Soviet Soil Science, 7, pp. 735-742.
- KOUHESTANI (E.), 1964 - Contribution à l'étude de l'effet des ions alcalins et alcalino-terreux sur quelques propriétés physiques du sol et en particulier sur sa structure. thèse O.R.S.T.O.M., Paris, 63 p. multigr.
- KOVDA (V.A.) VAN DEN BERG, 1973 - Irrigation drainage and salinity. An International source book. FAO/UNESCO.
- LAMOUREUX (M.), 1970 - Influence des alternances saisonnières sur la dissolution des roches carbonatées (en régions méditerranéennes) Science du sol n°1 pp. 43-53.
- LE POUTRE (B.), SAUVAGEOT (A.), 1969 - " Une cause de la saturation magnésienne des argiles dans le sol : l'hydromorphie temporaire de saison chaude ". Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., VII, 2, pp.183 - 201.
- MC NEAL (B.L.), 1970 - Prediction of inter-layer swelling of clays in mixed salt solutions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34, pp.201-206.
- MOUREAUX (C.), 1973 - Cours de microbiologie du sol. SSC, ORSTOM, Bondy.
- NAKAYAMA (F.S.), 1969 - Theoretical consideration of the calcium sulfate-bicarbonate-carbonate interrelation in soil solution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., V 33, pp. 668-672.
- NAKSHABAND (A.L.), et al, 1971 - Leaching of Euphrates saline soil in lysimeters. J. of Soil Sci 22, pp. 508-513.
- NORRISH (K.), 1954 - Manner of swelling of montmorillonite. Nature, 173, pp. 256-257.
- OBORIN, 1958 - Irrigation, drainage and salinity (1973) an International source book FAO/UNESCO.

- OGATA (G.), BOWER (C.A.), 1965 - Significance of biological sulphate reduction in soil salinity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 29, pp. 23-25.
- OLIVIN (J.), OCHS (R.), 1974 - Le lessivage du potassium et du magnésium en colonnes de terre. Premiers résultats expérimentaux. Oléagineux n°4, pp. 175-182.
- OVERSTREET et MARTIN, 1951 - In Irrigation drainage and salinity, An International source book, FAO/UNESCO 1973 pp. 430 - 480.
- PELLOUX (P.), DABIN (B.), FILLMANN (G.), GOMEZ (P.), 1971 - Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. O.R.S.T.O.M.
- POUGET (M.), 1968 - Les encroûtements gypseux actuels de nappe dans le sud-tunisien. O.R.S.T.O.M. Réunion annuelle des Pédologues 1968, Bondy.
- RHOADES (J.D.), INGVALSON (R.D.), 1969 - Macroscopic swelling and hydraulic conductivity properties of four vermiculite soils. Soil. Sci. Soc.Amer.Proc., 33, pp.364-369.
- RODNEY (J.), ARKLEY, 1967 - Soil Sci, V 103 (6), pp. 389.
- ROWELL (D.L.), PAYNE (D.), AHMAD (N.), 1969 - The effect of the concentration and movement of solutions on the swelling, dispersion and movement of clay in saline and alkali soils. I. Soil Sci., 20, 1, pp. 176 - 188.
- RUELLAN (A.), 1970 - Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la basse moulouya Maroc (oriental) thèse O.R.S.T.O.M. Strasbourg, multigr.
- RUSSEL (E.W.), 1973 - Soil conditions and plant growth.
- SAMBUR et MOZHEIKO, 1973 - In Irrigation drainage and salinity. An International source book FAO/UNESCO (1973) pp.430-480.
- SHAINBERG (I.) BRESLER (E.), KLAUSNER (Y.), 1971 - Studies on $\frac{Na}{Ca}$ montmorillonite systems. I. the swelling pressure. Soil. Sci. III, 4, pp. 214 - 219.
- SWEENEY (R.E.), KAPLAN (I.R.), 1973 - Pyrite Frambold formation : Laboratory synthesis and marine sediments. Econ. Geol 68, 618 - 634.
- SWOBODA (A.R.), 1963 - M.S. thèse, Virginia polytechnique Institute.
- SWOBODA (A.R.), THOMAS (G.W.), 1965 - The movement of sulphate salts in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol. 29 pp. 540-544.
- TAHOUN (V.S.), HAMDY (H.), 1973 - Potassium release and clay degradation as affected by sodium chloride. J. of plant nutrition and soil Sci. Z P B OAL 136 (I) 1-96 1973 PB 271 p.33 - 39

- TIMAR (E.), 1965 - Effect of organic matter on sulfate reduction occurring in alkali (szik) soils. *Agrok és talajt; tom.14. Supplémentum* pp. 195-198.
- TSUN-TIEN-CHANG (M.E.), HARWARD (M.E.), 1962 - Movement of S^{35} tagged sulfate through soil column. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26, pp. 27-32.
- TUNISIE, 1970 - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962 - 1969. Rapport technique. Unesco, Paris. UNESCO UNDP (SF), TUN 5, PARIS, 243 p. multigr.
- Université d'Illinois département of Agronomy Illinois, Urbana, 1965- Effect of gypsum and starch on water movement and sodium removal from solonchic soils in Illinois. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* pp.227 - 229.
- VIEILLEFON (J.), 1974 - Contribution à l'étude de la pédogenèse dans le domaine fluvio-marin à climat tropical de l'Afrique de l'Ouest. thèse, Paris.
- WAHHAB (A.), 1961 - Effect of saline irrigation waters on soil properties. *Salinity Problem in the arid zones UNESCOPP.* 233 - 236.
- WELLS (C.B.), 1965 - The formation of calcium carbonate concentration. *Expérimentale Pedology.* Pp. 165 - 175.
- YAALON (A.H.), 1965 - Downward movement and distribution of anions in soil profiles with limited wetting. *Experimental Pedology* pp. 157 - 164 .

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION.....	1

PREMIERE PARTIE

I - EVOLUTION D'UN ECHANTILLON DE SOL BRUN CALCAIRE LIMONO-ARGILEUX ARTIFICIELLEMENT ENRICHIS EN SELS, AU COURS DE SON LESSIVAGE PAR DES EAUX DIVERSEMMENT MINERALISEES.....	3
1- Schéma et mise en place de l'expérimentation.	
a) Origine du sol.....	3
b) Salinisation artificielle du sol de Feucherolles..	3
c) Composition physique et chimique de l'échantillon après traitement.....	4
c) Préparation des colonnes de sol.....	4
2- Nature et concentrations des solutions utilisées.....	7
3- Mode opératoire pour la réalisation du lessivage.....	9
4- Résultats obtenus.....	11
A - Influence des divers traitements sur les différentes formes du sodium dans le sol.....	11
B - Influence des divers traitements sur les différentes formes de l'ensemble calcium plus magnésium dans le sol (Ca+ Mg solubles échangeables et facilement extractibles).....	23
C - Influence des divers traitements sur les différentes formes du potassium dans le sol.....	43
D - Influence des divers traitements sur la répartition des chlorures après le lessivage.....	51
E - Influence des divers traitements sur la répartition des sulfates après le lessivage.....	61
F - Influence des divers traitements sur la répartition des carbonates et bicarbonates après le lessivage.....	71

	Pages
G - Influence des divers traitements sur la teneur en carbone mgm/l des acides humiques et des acides fulviques dans les différents lessivats.....	80

DEUXIEME PARTIE

I - EVOLUTION D'UN ECHANTILLON DE SOL SALIN DE TUNISIE AU COURS DE SON LESSIVAGE PAR DES EAUX DIVERSEMENT MINERALISEES.....	83
1- Schéma et mise en place de l'expérimentation.	
a) Origine du sol.....	83
b) Composition physique et chimique de l'échantillon	83
2- Nature et concentration des solutions utilisées.....	86
3- Mode opératoire pour la réalisation du lessivage.....	86
4- Résultats obtenus.	
A - Influence des divers traitements sur les différentes formes du sodium dans le sol.....	89
B - Influence des divers traitements sur les différentes formes de Calcium + Magnésium dans le sol	101
C - Influence des divers traitements sur les différentes formes du potassium dans le sol.....	123
D - Influence des divers traitements sur la répartition des chlorures après le lessivage.....	131
E - Influence des divers traitements sur la répartition des sulfates après le lessivage.....	137
F - La sulfato-réduction dans le sol de Tunisie.	
a- Le phénomène et son mécanisme.....	147
b- Les observations sur le sol de Tunisie.....	153

	Pages
G - Influence des divers traitements sur la répartition des bicarbonates après le lessivage.....	159
H - Répartition de calcaire total après lixiviation.....	169
I - Influence des divers traitements sur la teneur en carbone mg/l des acides humiques et des acides fulviques dans les différents lessivats.....	177

TROISIEME PARTIE

I - Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur après le lessivage avec différentes solutions salines..	179
a) Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur et les divers traitements dans les différentes colonnes du sol brun calcaire artificiellement salé	181
b) Répartition de l'humidité en fonction de la profondeur et des divers traitements dans les différentes colonnes du sol très salé de Tunisie.....	183
II - Etude bibliographique de quelques travaux se rapportant aux problèmes envisagés.....	185
1- Action des solutions sodiques sur la richesse en Na soluble et en Na échangeable.....	185
2- Action de la matière organique facilement fermentescible sur des sols plus ou moins riches en Na échangeable, percolés par des eaux de salure variable.....	188
3- Action du gypse sur le déplacement du sodium et la mobilité des sels de calcium.....	189
4- La dissolution du calcaire.....	190
a) Action de la matière organique.....	190
b) Action des sels de sodium.....	191

	Pages
5- Equilibre des sulfates et des carbonates dans les sols salés et dans les sols sodiques.....	192
6- Rôle du magnésium.....	194
III- A. Conclusions générales (sol brun calcaire artificiellement salé).....	197
a) Résumé des conclusions partielles.....	197
b) Conclusions sur certains aspects de la fertilité du sol.....	202
B. Conclusions générales (sol très salé de Tunisie)...	205
a) Résumé des conclusions partielles.....	205
b) Conclusions sur certains aspects de la fertilité du sol.....	212
IV- Bibliographie.....	219