

UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
(PARIS VI)

UNIVERSITE NANCY I

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
PARIS-GRIGNON

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
AGRONOMIQUE DE RENNES

**D . E . A .
de PEDOLOGIE
(Science des Sols)**

Jean de Dieu N'ZILA

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
DE L'EFFET DES AMENDEMENTS CALCIQUES
SUR UN SOL FERRALLITIQUE ACIDE
DE LA VALLÉE DU NIARI (CONGO)

Septembre 1986

Laboratoires des Formations Superficielles
ORSTOM – Centre de Bondy
70-74, route d'Aulnay
93140 BONDY

R E M E R C I E M E N T S

Je remercie infiniment Monsieur Roland MOREAU qui m'a beaucoup conseillé, aidé et soutenu dans ce travail . Que Monsieur MOREAU trouve ici l'expression de ma plus grande reconnaissance .

Mes remerciements vont également à l'égard de Monsieur Gérard BELLIER qui a beaucoup participé pour la mise en route de l'expérience et qui m'a aidé dans les diverses opérations techniques .

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Paul DE BOISSEZON pour l'aide, si précieuse, qu'il m'a apportée et aussi pour l'attention qu'il a accordé à mon travail.

Je remercie sincèrement Monsieur Pierre PELLOUX pour l'accueil qu'il m'a réservé dans son laboratoire et pour tous les services qu'il m'a rendu .

Enfin, mes remerciements sont adressés à toutes les techniciennes et tous les techniciens des laboratoires spécialisés de: Dynamique des Ions et Physique du Sol, Matière Organique, Spectrochimie et Minéralogie qui m'ont beaucoup aidé dans l'élaboration de ce travail .

ABSTRACT

Due to its geographical situation and to the environmental conditions, the Niari valley shows favourable agronomic potentialities. The highly unsaturated ferrallitic soils are favourable to the development of mechanization but, due to the intensive cultivation, they are subject to an increased acidification along with an increase in the exchangeable aluminium and manganese contents which lead to aluminium and manganese toxicities. In order to cope with this phenomenon, calcic improvements are made but their use in the field has been badly defined.

This study conducted in the laboratory aims at observing the effect of these improvements and the resulting modifications in the soil characteristics. We also compared the influence exerted by the crushed limestone to that of lime and we observed the effect of the fresh plant matter on limestone.

Some evaluations have been made concerning the major compounds (Ca, Mg, K) as well as aluminium and manganese. The effect exerted by the improvements is positive, but the rate of reaction and the intensity of the phenomenon are not similar for each improvement. Thus, the crushed limestone leads to an increase in the soil pH and in the rate of the soil exchangeable bases. This increase in the soil pH leads to a considerable decrease in the exchangeable aluminium contents. The exchangeable manganese first decreases and then it increases with time, while the easily reducible manganese decreases with time. The plant matter associated with the crushed limestone makes the effect of the latter more rapid. But the base and the metallic cation (Al, Mn, Fe) leaching is more important in the soil + limestone + plant matter treatment. The reaction of lime with soil is rapid and a high increase in pH and exchangeable bases is observed as well as a decrease in the exchangeable aluminium contents as related to the test compounds. As was observed with the crushed limestone, the exchangeable manganese first decreases with lime, then it increases and the easily reducible manganese always decreases. As compared to the crushed limestone, the bases leaching is more considerable in the case of lime. The action of lime is instantaneous and rapid, while that of limestone is more gradual mainly as far as the exchangeable bases are concerned.

R E S U M E

De part sa situation géographique et les conditions du milieu, la vallée du NIARI est une région qui présente de bonnes potentialités agronomiques . Les sols ferrallitiques fortement désaturés sont favorables au développement de la mécanisation mais subissent, sous l'effet des cultures intensives, une acidification accrue s'accompagnant d'une augmentation des teneurs en Aluminium et Manganèse échangeables qui provoquent des toxicités Aluminium et Manganèse . Pour y remédier, on apporte des amendements calciques dont les normes d'utilisation sur le terrain ont été mal définies .

Le but de cette étude, réalisée en laboratoire, est ainsi d'observer le mode d'action des amendements et les modifications des caractéristiques du sol dus à l'apport de ces amendements . Nous avons aussi comparé l'action du Calcaire broyé à celle de la Chaux et on a vu l'effet de la matière végétale fraîche sur l'action du Calcaire .

Des bilans ont été faits pour les éléments majeurs (Ca, Mg, K) et pour l'Aluminium et le Manganèse . L'effet des amendements est positif mais la vitesse de réaction et l'intensité du phénomène ne sont pas les mêmes pour chaque amendement . Ainsi, le Calcaire broyé favorise une augmentation du pH du sol et une augmentation des taux des bases échangeables dans le sol . Cette remontée du pH dans le sol contribue à une baisse considérable des teneurs en Aluminium échangeable . Le Manganèse échangeable diminue au départ et ensuite croît avec le temps alors que le Manganèse facilement réductible décroît avec le temps . La matière végétale, associée au Calcaire broyé active l'effet de celui-ci . Mais le lessivage des bases et des cations métalliques (Al, Mn, Fe) est plus important dans le traitement sol + Calcaire + Matière végétale . La Chaux réagit rapidement avec le sol et l'on note aussi une forte augmentation du pH et des bases échangeables et une réduction des teneurs en Aluminium échangeable par rapport aux témoins . Comme le Calcaire broyé, la Chaux réduit le Manganèse échangeable au départ et il augmente par la suite, le Manganèse facilement réductible étant toujours en décroissance . Par rapport au Calcaire broyé, le lessivage des bases est plus important dans le cas de la Chaux . L'action de la Chaux est immédiate et rapide alors que celle du Calcaire est plus progressive au cours du temps, surtout en ce qui concerne les bases échangeables .

P L A N

- I - MOTIVATIONS ET OBJECTIFS DE L'ETUDE -
- II - CONDITIONS D'EXECUTION DE L'ETUDE -
 - 1 - Caractéristiques du sol et des amendements
 - a/ Caractéristiques du sol ferrallitique fortement désaturé de MANTSOUMBA
 - b/ Caractéristiques des amendements
 - 2 - Dispositif et modalités de l'expérimentation
 - 3 - Analyses et méthodes
- III - RESULTATS -
 - A - PERCOLATS ET ELEMENTS LIXIVIES -
 - 1 - La percolation et les volumes des percolats
 - 2 - Les pH des percolats
 - 3 - Les bicarbonates
 - 4 - Les bases (Ca, Mg, K) dans les percolats
 - 5 - Le phosphore total
 - 6 - L'aluminium
 - 7 - La manganèse
 - 8 - Le fer
 - 9 - La silice
 - 10 - Le carbone organique
 - 11 - L'azote total
 - B - EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL -
 - 1 - Le pH
 - 2 - Les carbonates
 - 3 - Les bases échangeables
 - 3.1 - Problème de détermination des bases échangeables
 - 3.2 - Bases échangeables et essai des bilans comparatifs
 - a/ Calcium et Magnésium
 - b/ Potassium

- 4 - La capacité d'échange cationique et taux de saturation
- 5 - L'aluminium échangeable
- 6 - Le manganèse
- 7 - Le phosphore
- 8 - La matière organique
- 9 - Les agrégats stables et les éléments fins dispersés dans l'eau

IV - CONCLUSIONS -

- 1 - Effets des différents traitements
- 2 - Conséquences agronomiques

I- MOTIVATIONS ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La région de la vallée du Niai, au Congo, présente sur le plan du développement rural, une grande importance en raison du potentiel agricole élevé qui lui a été reconnu depuis longtemps (plantations agroindustrielles installées dès les années 50). Cette région, parmi les plus peuplées du pays et bien desservie en voies de communication : routes et chemins de fer, jouit en effet des conditions naturelles plutôt favorables pour l'agriculture.

Le climat de la région est bas-congolais de type "oudano-guinéen" reparti en deux saisons des pluies séparées par un bref ralentissement de la pluviométrie et une grande saison sèche de quatre mois qui correspond à la saison la plus fraîche.

La "vallée du Niai", du point de vue géologique, correspond en fait à un vaste synclinal s'étirant d'Est en Ouest, représenté dans sa plus grande partie par des formations schisto-calcaires (SC) surmontées par des formations schisto-gréseuses (SG); l'ensemble appartenant au "système du Congo-occidental" est daté du précambrien terminal (BRUGIERE, 1953) -

La topographie peu différenciée comprend schématiquement du sud au Nord : la zone de plateau, surface faiblement ondulée, sur une largeur variable de quelques dizaines de km, puis la plaine alluviale du Niai, assez étroite et ne dépassant guère 1 à 2 km de large.

Les roches-mères des sols de la vallée du Niai résultent des formations sédimentaires du système du Congo-occidental. Compte tenu de la diversité des matériaux originaux des sols, il n'y a pas de correspondance entre les différents sols observés et les formations géologiques sous-jacentes (BOISSEZON, 1965; MARTIN G., 1970; MARTIN D., 1975). La nature des sols dans la vallée du Niai est plutôt liée à la topographie; Ainsi on observe une nette opposition entre les sols de la vallée et ceux du plateau. Dans les zones déprimées, telles que les fonds de vallées, on observe des sols peu évolués.

d'apport alluvial auxquels s'ajoutent parfois des sols hydromorphes tandis que sur les plateaux on a des sols ferrallitiques fortement désaturés (BOISSEZON, 1965 ; MARTIN G., 1970 ; MARTIN D., 1975) . C'est un sol de ce type, de loin le plus répandu, qui a été étudié avec l'expérimentation réalisée .

Parmi ces trois grandes catégories des sols de la vallée du Niari, les sols ferrallitiques, profonds et riches en éléments fins, sont favorables à une agriculture mécanisée, également à cause de leur position topographique. Cependant, ces sols de plateau ne sont pas exempts des maux dont souffrent les sols de la vallée du Niari. En effet la mise en culture mécanisée intensive de ces sols se traduit par une dégradation de la structure, diminution considérable du taux des bases échangeables par exportation de récoltes et surtout par lixiviation (AUBERT G. et AL., 1955 ; MARTIN G., 1958, 1961, 1962, 1963 et 1970 ; MARTIN D., 1979 ; MONNIER et COMBEAU, 1961) ; on a aussi une baisse de pH qui s'accompagne d'une augmentation des taux de Manganèse soluble et d'aluminium échangeable provoquant ainsi des toxicités aluminique et manganique défavorables pour les plantes cultivées (AUBERT et AL., 1955 ; BOYER, 1970, 1975, 1978 ; FRANQUIN, 1958) .

Pour pallier ces difficultés agronomiques que l'on rencontre dans la vallée du Niari, en particulier l'acidification des sols, on s'est proposé depuis longtemps d'apporter aux sols, des amendements calcaires ou calco-magnésiens constitués par des calcaires broyés le caux, plus ou moins dolomitiques (FRANQUIN, 1958 ; MARTIN G., 1961) . Cependant les résultats encourageants qui ont été obtenus dans les conditions de recherche n'ont guère été suivis d'effets. Des normes d'utilisation étant mal définies ou appliquées sur les plantations (pour des raisons techniques et économiques), la dégradation des sols, et particulièrement l'acidification, reste un problème très grave obligeant à l'abandon de certaines terres, pouvant même entraîner la disparition d'exploitations.

Ce problème de diminution de la fertilité se pose, par exemple, sur les parcelles du Complexe Agro-Industriel d'Etat de Mantoumba (CAIEM), d'où provient le sol utilisé pour notre expérimentation, où l'acidité du sol peut descendre à des valeurs relativement basses ($\text{pH} < 4,5$), malgré l'apport épisodique de calcaire broyé.

Depuis qu'on pratique les apports d'amendements calciques dans la vallée du Niari, on ne s'est pas encore suffisamment préoccupé d'étudier les effets de ces amendements dans le sol, notamment en ce qui concerne leur mode d'action et les modifications des caractéristiques du sol selon leur nature et les conditions d'application.

Il faut tout de même noter qu'un "essai d'appréciation des pertes en calcium et en magnésium après un apport d'amendements calciques dans les sols de la vallée du Niari" a été fait par G. MARTIN (1961) et FRANQUIN (1958) a également essayé d'évaluer le taux de manganèse du sol pouvant entraîner la toxicité dans les plantes.

Pour apporter une contribution dans ce domaine, le travail réalisé en laboratoire consiste à observer les modifications, au cours du temps, des caractéristiques du sol (sur les plans physico-chimique et dans la moindre mesure organique et minéralogique) après apport d'amendements calciques. L'objectif est de pouvoir évaluer l'influence respective de plusieurs traitements, correspondant à des conditions d'amendement différentes, par l'importance et la vitesse des modifications intervenant sur les caractéristiques du sol et de l'eau qui a percolé à travers les colonnes de sol qui ont reçu différents amendements.

Ce qui est le plus important à considérer dans cette étude, c'est d'une part, la comparaison de l'action du calcaire broyé à celle de la chaux "vive" provenant de la calcination au four ($\text{à } 1000^\circ$) de ce même calcaire (calcaire de Madinon, proche de Mantoumba); d'autre part, l'action de la matière organique sur la solubilisation

du calcaire broyé.

On remarque aisément que cette étude en laboratoire n'abordera pas les problèmes de rendements des cultures.

En considération du problème de l'acidification et de ses conséquences, également parce qu'on ne peut escompter des modifications importantes pour l'ensemble des caractéristiques du sol dans les conditions de l'expérimentation, l'étude a été axée principalement sur le suivi des caractéristiques chimiques et la distribution des éléments minéraux dans le sol et l'eau de percolation.

II - CONDITIONS D'EXECUTION DE L'ETUDE

On a essayé de travailler, dans la mesure du possible, dans les mêmes conditions que sur le terrain. Mais il faut déjà signaler que du fait de la courte durée de l'expérience (deux mois) et des faibles tenues de calcaire broyé et de chaux apportés au sol, on ne doit pas s'attendre à observer des modifications ou des transformations très importantes surtout en ce qui concerne les transformations minéralogiques.

Il faut aussi noter que le sol utilisé pour cette étude expérimentale est un sol ferrallitique désaturé (de plateau), acide mais non amendé d'une parcelle cultivée en manioc (monoculture mécanisée) sur le terrain du CAIEM, ferme d'état s'occupant de la fabrication de la farine de manioc au Congo.

1. Caractéristiques du sol et des amendements:
 - a) Caractéristiques du sol ferrallitique fortement désaturé de Mantsoumba :

On ne reviendra pas sur la description totale des sols de la vallée du Niari puisque cela n'est pas le des-

Tableau I : Caractéristiques physico-chimique du sol utilisé (N21)

Argile	:	46,6 %
Limons	:	29,5 %
Sables	:	24,1 %
pH eau	:	4,8
Capacité d'échange cationique (T)	:	8,38 me/100g de sol
Somme des Bases échangeables (S)	:	1,63 me/100g de sol
Manganèse échangeable	:	37,91 ppm
Aluminium échangeable	:	1,30 me/100g de sol
P ₂ O ₅ total	:	0,652 ‰
P ₂ O ₅ assimilable	:	0,050 ‰
C/N	:	12,7

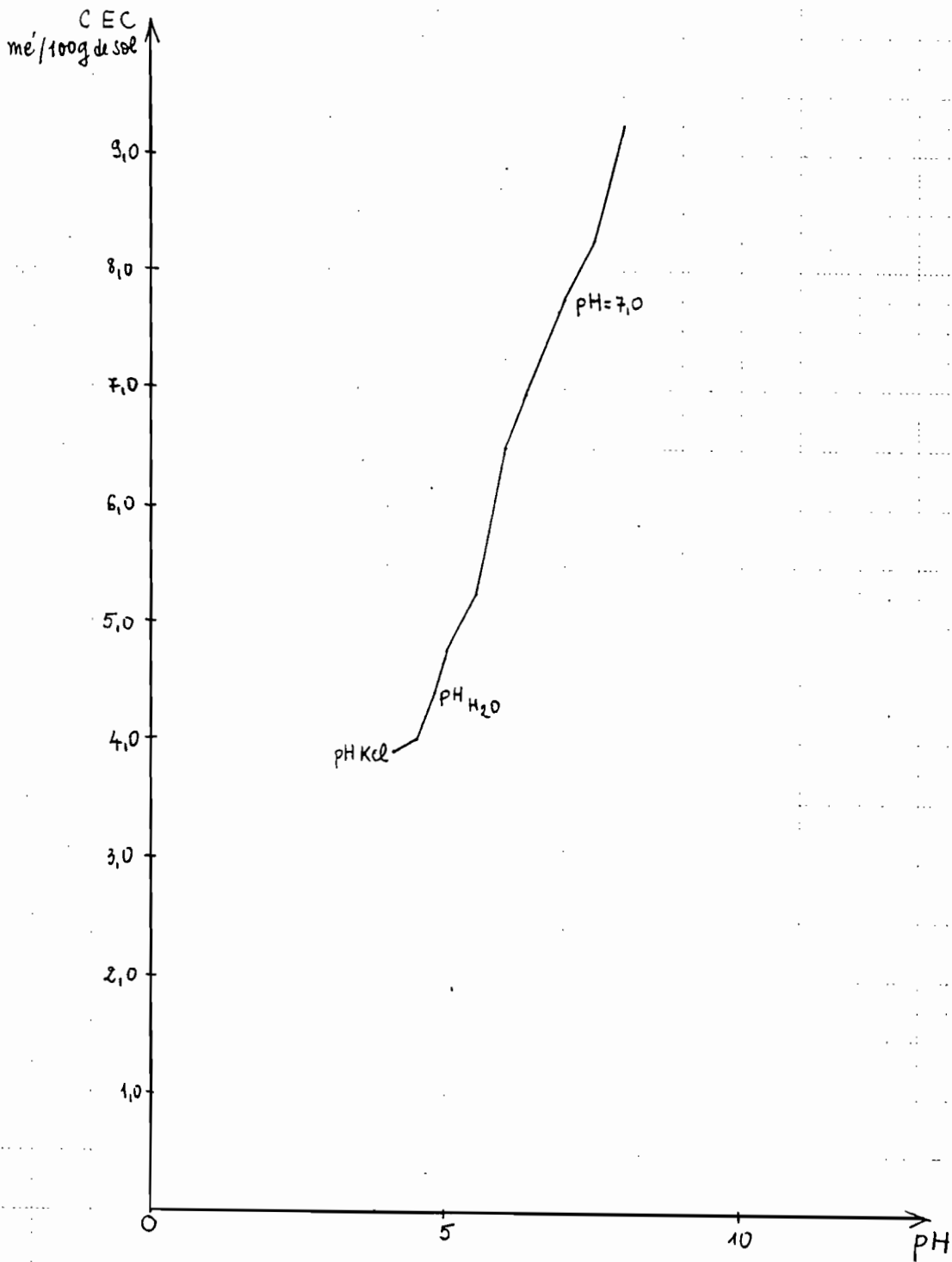


fig. 1: Courbe de la capacité d'échange cationique du sol NZ1 en fonction du pH (saturation CaCl₂ tamponné)

sein de cette étude. Toutefois il est quand même nécessaire de rappeler les principales caractéristiques physico-chimiques des sols ferrallitiques fortement désaturés de la vallée du Niari ou sols de plateau. On se contentera de décrire la partie supérieure de ces sols car on a utilisé, pour cette étude, la terre de l'horizon de surface (0 à 17 cm de profondeur) après récolte de manioc.

D'après MARTIN D. (1975) dans son étude pédologique de la Ferme de Mantsoumba, ces sols de plateau ont une bonne structure; la texture est argilo-limoneuse à argileuse (40 à 60% d'argile). Cette texture confère à ces sols une importante capacité de rétention d'eau.

Il s'agit de sols acides dont les pH varient entre 4,5 et 5,5 avec des extrêmes pouvant atteindre 4,2 et 5,8.

La somme des bases échangeables est comprise entre 0,5 et 2,5 me/100g de sol en général le rapport S/T varie entre 0,10 et 0,28.

Les teneurs en Azote total varient entre 0,65 et 1,4‰ et les rapports C/N entre 12 et 16.

Le phosphore total a des teneurs variant entre 0,8 et 1,5‰ et les teneurs en phosphore assimilable sont supérieures à 0,03‰.

Ainsi les sols ferrallitiques de plateau ont des bonnes propriétés physiques mais sont chimiquement pauvres.

Les caractéristiques analytiques, précises, de l'horizon prélevé pour notre étude sont données au tableau 1 et l'on remarquera qu'elles concordent bien avec les caractéristiques générales.

b). Caractéristiques des amendements:

Le calcaire broyé qu'on a utilisé pour nos amendements est un calcaire dolomitique, donc constitué de carbonate mixte de calcium et de magnésium. Il représente environ 86% de CO_3Ca et 14% de CO_3Mg .

Ce calcaire broyé très finement donne 98% de passants au tamis n° 31 (ouverture de mailles : 1mm), 74% de passants pour le tamis n° 26 (0,315mm) et 57% de passants pour le tamis n° 23 (0,160mm); ce calcaire représente ainsi un amendement du type D.

La chaux "vive" résulte de la calcination de ce calcaire dans un four à 1000° et pendant quatre heures.

Les teneurs du calcaire et de la chaux en cations, Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ , sont résumées dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Teneurs en cations majeurs (mé/100g de sol) des amendements.

Amendements	Cations		
	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+
Calcaire broyé	5,31	0,23	0,003
Chaux	5,01	0,50	0,002

La matière organique utilisée, pour l'associer au calcaire broyé, est représentée par des feuilles et des tiges de maïs (de Grignon) qui ont été broyées sous forme de poudre. Les résultats de l'analyse chimique de cette matière végétale sont donnés dans le tableau 3 :









































Tableau 3 : Teneurs des éléments provenant de la matière organique (paille de maïs) rapportées à 100g de sol.

mé pour 100g de sol				% du sol			ppm du sol			% du sol
Ca	Mg	K	Na	P_2O_5	C	N	Al	Fe	Mn	SiO_2
0,42	0,21	0,50	0,01	0,041	0,425	0,018	2,3	1,1	0,6	0,012

2. Dispositif et modalités de l'expérimentation

On est parti d'un échantillon de sol qu'on a appelé NZ1, placé dans plusieurs colonnes en verre de 4,5 cm de diamètre (fig. 1).

TABLÉAU 4 DIFFÉRENTS TRAITEMENTS ET ÉCHANTILLONS DE SOLS ÉTUDIÉS

TRAITEMENTS	SÉRIE 1 : 0 JOUR	SÉRIE 2 : 07 JOURS	SÉRIE 3 : 30 JOURS	SÉRIE 4 : 60 JOURS						
T ₁ SOL TEMOINS	111A 	111B 	111M 	211A 	211B 	311A 	311B 	411A 	411B 	411M 
T ₂ SOL + CALCAIRE	121A 	121B 	121M 	221A 	221B 	321A 	321B 	421A 	421B 	421M 
T ₃ SOL + CALCAIRE + M.O.	122A 	122B 	122M 	222A 	222B 	322A 	322B 	422A 	422B 	422M 
T ₄ SOL + CHAUX	131A 	131B 	131M 	231A 	231B 	331A 	331B 	431A 	431B 	431M 

M.O. = matière végétale apportée (paille de maïs)

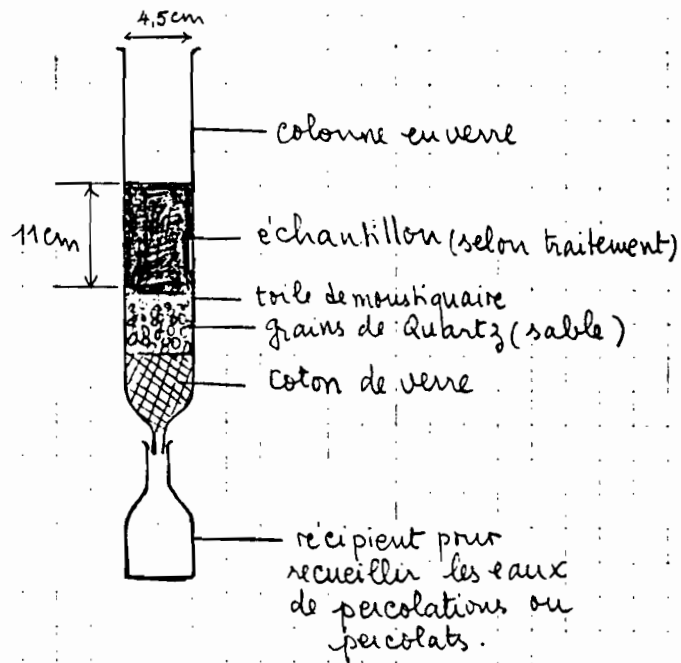


fig. 2 : Représentation schématique du dispositif expérimental.

Pour chaque colonne, on a pris 200 g de sol NZ1, tamisé à 2 mm, auquel on a ajouté, selon les traitements, du calcaire, de la chaux ou du calcaire plus la paille de maïs représentant la matière organique. Il y a eu ainsi quatre traitements avec deux répétitions (A et B) comme le montre le tableau 4.

On remarque bien qu'il manque quelques traitements car l'idéal serait d'avoir toutes les combinaisons possibles c'est-à-dire qu'en dehors de ces quatre traitements on aurait dû ajouter deux autres traitements qui seraient : Sol + matière organique et sol + chaux + matière organique mais compte tenu, d'une part du temps qui nous était très limité et d'autre part surtout de la place limitée dans l'étude bactériologique dont on disposait, on se trouvait obligé de réduire le nombre des traitements.

La détermination des quantités d'amendements calcaires à apporter a été faite par un calcul. On s'est basé sur le principe de la saturation du complexe absorbant

puisque le but des amendements calciques est de relever le pH du sol en saturant le complexe absorbant. Ainsi on a tenu compte de la capacité d'échange cationique (CEC) choisie à $\text{pH} = 6,5$ (valeur théorique de la CEC à saturer d'après la courbe des variations de la CEC en fonction du pH (fig.1)), des teneurs des bases échangeables du sol NZ1 et des teneurs en bases des carbonates (CO_3Ca et CO_3Mg) dans le calcaire broyé et la chaux.

Pour le sol NZ1, on a :

- Capacité d'Echange Cationique à $\text{pH} = 6,5$ est : $7,13 \text{ me}$ pour 100 g de sol.

- Somme des bases échangeables : $1,63 \text{ me} / 100 \text{ g}$ de sol

Le déficit en bases qu'il faut saturer est alors de $7,13 \text{ me}$ pour 100 g de sol moins $1,63 \text{ me} / 100 \text{ g}$ de sol, soit $5,5 \text{ me}$ pour 100 g de sol. Pour 200 g de sol utilisé dans les colonnes il nous faudra donc $11,0 \text{ me}$ de bases

Dans le calcaire les teneurs de Calcium et de Magnésium sont respectivement de $1845,5 \text{ me} / 100 \text{ g}$ de calcaire et $78,7 \text{ me} / 100 \text{ g}$ de calcaire, donc pour $(\text{Ca} + \text{Mg})$ on a $1924,2 \text{ me} / 100 \text{ g}$ de calcaire soit $19,24 \text{ me} / \text{g}$ de calcaire. Nous savons qu'il faut $11,0 \text{ me}$ de bases pour 200 g de sol; Ainsi, cela représente $0,571 \text{ g}$ de calcaire broyé qu'il faut apporter au sol comme amendement.

On a fait les mêmes calculs pour déterminer la quantité de chaux qu'il fallait apporter et on a trouvé pour 200 g de sol, une quantité de $0,304 \text{ g}$ de chaux. Ainsi dans chaque colonne de terre où il fallait ajouter de la chaux ou calcaire, on devait apporter 571 mg de calcaire broyé ou 304 mg de chaux, soit en pourcentage du sol: $0,29\%$ de calcaire broyé et $0,15\%$ de chaux.

Pour le traitement T3, le pourcentage de la matière organique a été fixé à 1% . Ainsi pour 200 g de sol il fallait donc apporter 2 g de matière organique. Mais cette matière organique étant constituée des feuilles et des tiges de maïs, les teneurs respectives de celles-ci ont été déterminées à l'aide du rapport initial feuilles/tiges

après broyage de la quantité totale des feuilles et des tiges dont on disposait. Ce rapport global feuilles sur tiges est égal à $2/1$, donc pour 2 g de matière végétale il faut peser 1,33 g de feuilles et 0,67 g de tiges.

Après avoir placé les échantillons de sol (préparés selon les différents traitements du tableau 4) dans les colonnes de verre, selon les indications de la figure 1, on disposait de 40 colonnes pour suivre l'évolution des phénomènes à différentes périodes (tableau 4) :

- au temps t_0 (série 1) : après préparation des colonnes, humectation par descensus jusqu'à la capacité au champ, puis démontage après 24 heures, séchage à l'air et tamisage à 2 mm.
- puis après 7 jours (série 2), 30 jours (série 3) et 60 jours (série 4) d'incubation.

Nous avons également, en dehors des deux répétitions A et B, jugé opportun d'ajouter une troisième répétition qu'on a appelé M ; ces colonnes M ne se retrouvent que dans les échantillons de 0 jour (série 1) et dans les échantillons qui vont jusqu'à deux mois (60 jours) c'est-à-dire ceux de la série 4, soit 8 colonnes supplémentaires qui sont destinées à la micromorphologie.

Le numéro de chaque échantillon de sol comporte ainsi 3 chiffres et une lettre qui indique la répétition. Le premier chiffre indique la série ou durée d'incubation de l'échantillon ; le deuxième chiffre indique la présence ou l'absence du calcaire ou de la chaux et enfin le troisième chiffre indique la présence ou l'absence de la matière organique (voir tableau 4).

Les colonnes des séries 2, 3 et 4 ont été placées dans une étuve bactériologique à température constante de 28°C pendant 7, 30 et 60 jours. Elles ont été soumises pendant toute la durée de l'étude à des percolations deux fois par semaines. La quantité d'eau à apporter

deus chaque colonne a été déterminé en simulant les quantités d'eau qui tombent dans la région pendant les trois mois les plus pluvieux c'est-à-dire Novembre, Mars et Avril. On ne tient compte que de ces trois mois afin d'accélérer les processus de transformations. D'après D. MARTIN (1976), on a trouvé qu'il fallait apporter environ 70ml d'eau chaque semaine, en raison de 40ml d'eau chaque Lundi et 30ml d'eau chaque Jeudi. Les percolats étaient rassemblés dans une fiole à chaque fin de semaine. Pour les 60 jours (deux mois), on a eu en tout neuf séries des solutions, ce qui a fait un total de 156 échantillons de solutions à analyser. Les percolats étaient stockés dans des fioles conservées au frigidaire en attendant d'être analysés.

Quant aux colonnes de terre, après la durée d'incubation convenue, elles étaient démontées puis séchées à l'air et retamisées (à 2mm ou à 0,200mm) pour être analysées.

3. Analyses et méthodes:

Au départ les analyses ont porté sur la caractérisation des échantillons du sol NZ1 (tableau 1), de calcaire et de chaux (tableau 2) et enfin de maïs (tableau 3). Ensuite l'étude suivie repose sur l'analyse du contenu des colonnes et de l'eau percolée recueillie.

Sur les sols (NZ1 et différents traitements), les analyses effectuées sont les suivantes:

- pH eau et pH KCl uniquement pour NZ1 (rapport sol/eau = 1/2,5).
- CEC : saturation au Cl_2Ca , extraction de Ca fixé par NO_3K ; CEC à différents pH pour NZ1 (fig. 1).
- Carbone organique : Attaque au bichromate de potassium dans une étuve à 110°C (méthode Walkley et Black modifiée)
- Azote : méthode KJELDAHL
- Carbonates : attaque à l'acide phosphorique

et dosages du CO_2 au Coulomètre

- Bases échangeables : plusieurs méthodes (voir paragraphe III, B3)
- Aluminium échangeable : extraction avec KCl 1N, dosage par titrimétrie NaOH N/50
- Manganèse échangeable (extraction avec acétate d'ammonium M à $\text{pH} = 7$) et facilement réductible (extraction : acétate d'ammonium + 0,2% de chlorhydrate d'Hydroxylamine)
- P_2O_5 total (extraction à HNO_3 bouillant) et assimilable (méthode Olsen - modifiée Dabin) sur les échantillons des séries 1 et 4 (0 et 60 jours).
- Analyse totale (analyse triacide et analyse du résidu) sur NZ1 et calcaire broyé.
- Diffraction RX (sur NZ1)
- granulométrie : pipette Robinson (sur NZ1)
- pourcentage d'agrégats stables à l'eau et éléments fins dispersés (d'après méthode Is de Hévin).

En dehors de ces analyses physico-chimiques, il y a aussi les lames minces qui ont été faite pour le calcaire original et sur tous les échantillons des sols destinés à la micromorphologie sur le sol de départ (NZ1).

Sur les percolats, les analyses sont :

- pH : aliquote de 20ml de percolat et mesure directe avec électrode contenant de KCl 3M.
- bicarbonates : dosages dans la même aliquote que les pH, après mesures de ceux-ci.
- Bases solubles : par photométrie flamme en milieu HCl 1%.
- Carbone et Azote : dosages au CHN après séchage sur terre d'infusoire, à l'étuve, à 60°C .
- P_2O_5 , Fer, Aluminium et Silice : dosages par colorimétrie à l'autoanalyseur.
- Manganèse : dosage par absorption atomique

Tableau 5 : VARIATIONS DES VOLUMES DES PERCOLATS RECUEILLIS CHAQUE SEMAINE
(volumes exprimés en millilitres)

Traitements	Semaines Echantillons	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
T ₁ : TEMOINS	211 A	70,3								
	c	70,3								
	411 A	73,0	46,5	53,0	57,8	55,9	52,2	57,7	55,7	58,5
	c	73,0	119,5	172,5	230,3	286,2	338,4	396,1	451,8	510,3
	311 A	54,7	53,3	55,7	56,9	57,1				
	c	54,7	108,0	163,7	220,6	277,7				
T ₂ : SOL + CALCAIRE	221 A	69,6								
	c	69,6								
	421 A	69,1	49,5	54,9	57,9	56,8	56,2	58,0	56,2	57,7
	c	69,1	118,6	173,5	231,4	288,2	344,4	402,4	458,6	516,3
	321 A	53,6	51,8	53,5	55,9	54,6				
	c	53,6	105,4	158,9	214,8	269,4				
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	222 A	60,5								
	c	60,5								
	422 A	68,3	50,3	56,1	59,4	59,7	58,1	56,9	55,4	56,8
	c	68,3	118,6	174,7	234,1	293,8	351,9	408,8	464,2	521
	322 A	50,3	56,2	57,8	57,4	59,4				
	c	50,3	106,5	164,3	221,7	281,1				
T ₄ : SOL + CHAUX	231 A	73,6								
	c	73,6								
	431 A	67,7	50,2	56,4	58,0	59,2	59,0	56,7	56,4	56,6
	c	67,7	117,9	174,3	232,3	291,5	350,5	407,2	463,6	520,2
	331 A	55,1	52,5	56,2	56,7	57,5				
	c	55,1	52,5	108,7	165,4	222,9				

A = valeurs absolues (volumes recueillis chaque semaine).
c = valeurs cumulées pour la durée correspondante.

III - RESULTATS

Nous venons successivement dans ce chapitre les principaux paramètres suivis, en comparant leur évolution en fonction des différents traitements. Par souci de simplification on ne considèrera ici que les valeurs médianes des résultats pour les deux (ou parfois trois) répétitions A et B (et M, parfois dans les solutions). Mais les valeurs des différentes répétitions se tiennent les unes par rapport aux autres.

Le nombre de répétitions est insuffisant pour permettre un traitement statistique vraiment significatif des résultats analytiques obtenus pour mettre en évidence l'influence de chaque traitement au cours du temps. Nous nous appuierons surtout sur une exploitation graphique des données.

A/- PERCOLATS ET ELEMENTS LIXIVIES

1 - la percolation et volume des percolats

Compte tenu de la disponibilité de l'étuve bactériologique, on ne pouvait pas placer nos 28 colonnes, à incuber, en même temps. On a ainsi commencé avec 20 colonnes dont 8 de 7 jours (série 2) et 12 de 60 jours (série 4) qui vont jusqu'à la fin de l'expérience. Après une semaine d'incubation on retirait les colonnes de 7 jours (série 2) pour les remplacer par celles de 30 jours (série 3).

L'humectation per. descendue n'a pas été effectuée de la même manière avec les échantillons de 7 jours et 60 jours d'une part et les échantillons de 30 jours d'autre part. Pour les premiers on a versé, avec précaution mais en une seule fois, les 110 ml d'eau (servant pour humecter) dans la colonne tandis que pour les colonnes de 30 jours on a versé l'eau d'humectation par petites fractions successives. Cette différence dans la manière d'humecter a suffi pour modifier les volumes des percolats (tableau 5) et les quantités des éléments

lixiviés (tableaux 7, 8 et 9).

Après l'humectation, l'apport d'eau a été fait de la même manière à l'aide d'une pipette.

On constate qu'au bout d'une semaine les volumes de percolats ne sont pas identiques; dans les colonnes de 7 et 60 jours (séries 2 et 4) il s'est écoulé davantage d'eau que dans les colonnes de 30 jours (série 3). Cette faible quantité d'eau passée à travers les colonnes de 30 jours est certainement due à l'humectation. Dans les colonnes de 7 et 60 jours, l'eau est passée si vite qu'elle n'a pas été suffisamment répartie dans tous les pores alors que dans les colonnes de 30 jours, l'humectation lente, a permis une bonne distribution de l'eau dans l'échantillon de sol. Pendant la première semaine, dans les colonnes de 7 et 60 jours, l'eau est passée par les passages préférentiels créés par l'eau d'humectation. C'est à la deuxième semaine que l'eau s'est répartie dans les petits pores et on remarque qu'il y a une baisse du volume des percolats. Ensuite, à partir de la troisième semaine, l'écart entre les volumes d'eau percolée se retrecit, tous les percolats ont des volumes compris dans le même intervalle: entre 55 et 60 ml.

Globalement, les volumes des percolats, au bout de cinq semaines (un mois), dans les échantillons de 30 jours restent sensiblement inférieurs à ceux des échantillons de 60 jours pendant le même temps (tableau 5, valeurs cumulées).

Ainsi le volume des percolats dépend de la façon dont on a humecté le sol; plus on humecte vite plus le volume d'eau percolé est important. On verra plus loin la relation qu'il y a entre l'humectation et les quantités des éléments lixiviiés.

2. le pH des solutions (tableau 6; fig. 3)

Le pH des percolats est peu variable au cours du temps (pendant les deux mois qu'ont duré l'expérience).

Tableau 6 : VARIATIONS DU PH DANS LES PERCOLATS RECUEILLIS
CHAQUE SEMAINE.

Traitements	Semaines	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Echantillons									
T ₁ : TEMOINS	211	6,7								
	411	6,8	7,1	6,9	6,7	6,7	7,2	6,7	6,5	6,8
	311	7,3	7,5	7,3	7,5	7,2				
T ₂ : SOL + CALCAIRE	221	8,1								
	421	8,1	8,4	8,3	8,0	8,4	8,5	8,4	8,3	8,3
	321	8,1	8,3	8,1	8,2	8,5				
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	222	6,6								
	422	6,4	7,8	8,0	7,9	8,4	8,3	8,4	8,4	8,5
	322	5,4	7,8	7,7	8,1	8,6				
T ₄ : SOL + CHAUX	231	7,4								
	431	7,8	8,4	8,4	8,3	8,5	8,5	8,5	8,5	8,0
	331	8,1	8,3	8,2	8,4	8,5				

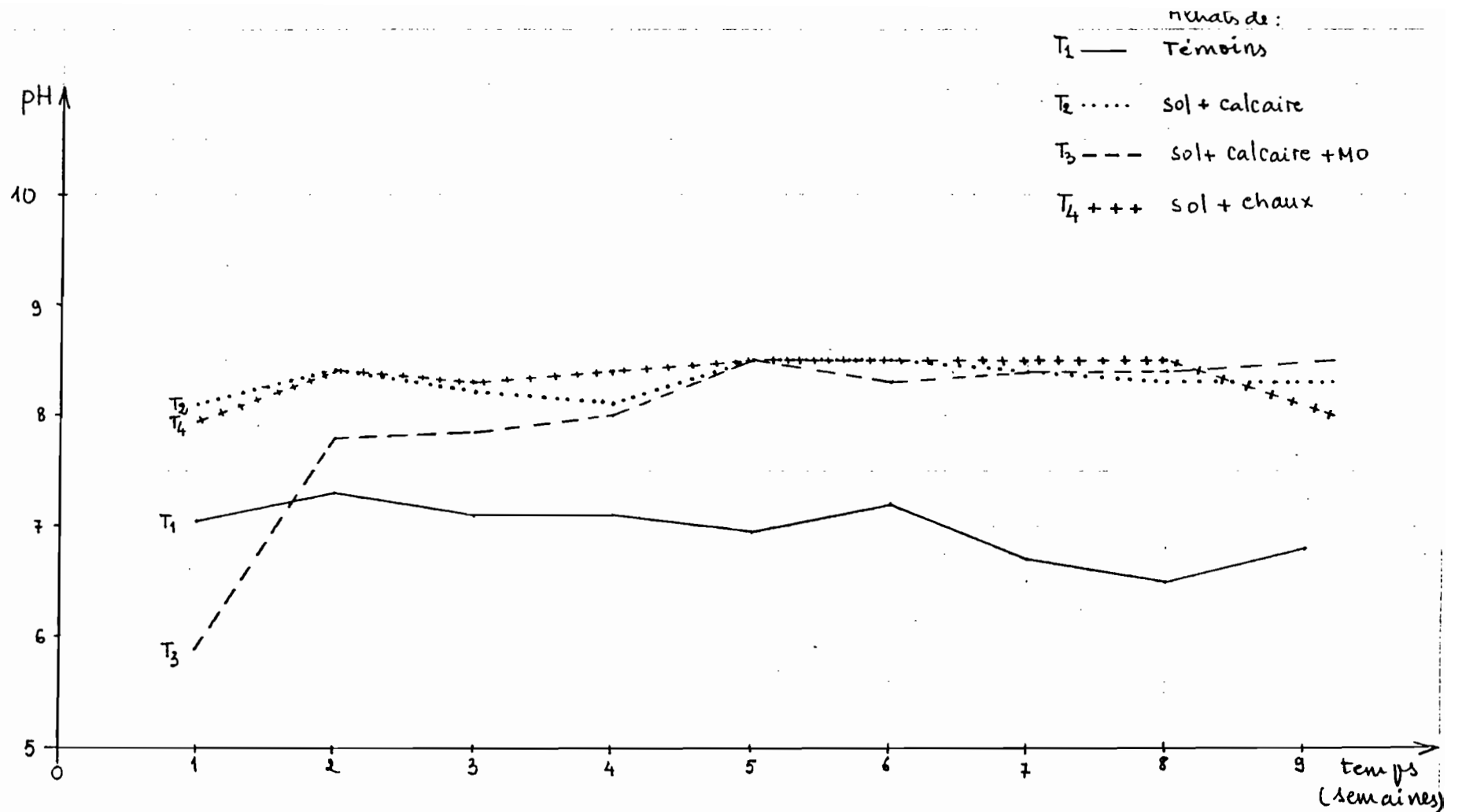


figure 3 : VARIATIONS DU PH EN FONCTION DU TEMPS, DANS LES PERCOLATS RECUEILLIS CHAQUE SEMAINE.

Pour les percolats des témoins (T_1), le pH varie, en moyenne, entre 6,5 et 7,2. Ces pH sont nettement plus bas que les pH des percolats des sols amendés.

Les percolats des sols enrichis en Calcaire (T_2) ou en chaux (T_4) ont des pH voisins de 8,0 à 8,5 et ces valeurs restent presque stables pendant les deux mois. L'effet de l'amendement sur l'élévation du pH dans les solutions percolées est très rapide : dès la première semaine dans ces deux traitements.

Quant aux percolats des sols enrichis en matière organique (T_3) on a d'abord des pH acides (de l'ordre de 6) qui augmentent fortement au cours de la deuxième semaine, dépassant $\text{pH} = 7$, plus faiblement ensuite pour atteindre des valeurs équivalentes à celles des deux autres traitements (T_2 et T_4) à partir de la cinquième semaine. La présence de la paille de maïs dans ce traitement T_3 a ralenti l'élévation du pH des solutions au cours du temps, ce par rapport aux traitements avec l'amendement seul (T_2 et T_4). On note également une coloration brun-jaunâtre des percolats des quatre premières semaines qui accompagne des valeurs croissantes du pH. Cette coloration qui disparaît par minéralisation en milieu nitrifique est due à la présence des matières organiques hydrosolubles.

3. les bicarbonates (fig. 4 et 5)

La quantité des bicarbonates dans les percolats est variable en fonction du traitement.

Dans les témoins (T_1) de 60 jours, les quantités des bicarbonates sont très faibles et décroissent progressivement avec le temps. Dans les témoins de 30 jours (série 3), les valeurs obtenues sont sensiblement plus élevées mais suivent la même évolution jusqu'à la 5^{ème} semaine (fin de l'expérience pour les échantillons de 30 jours).

Au début de la manipulation, pendant la première semaine les bicarbonates dans les percolats T_2 (sol +

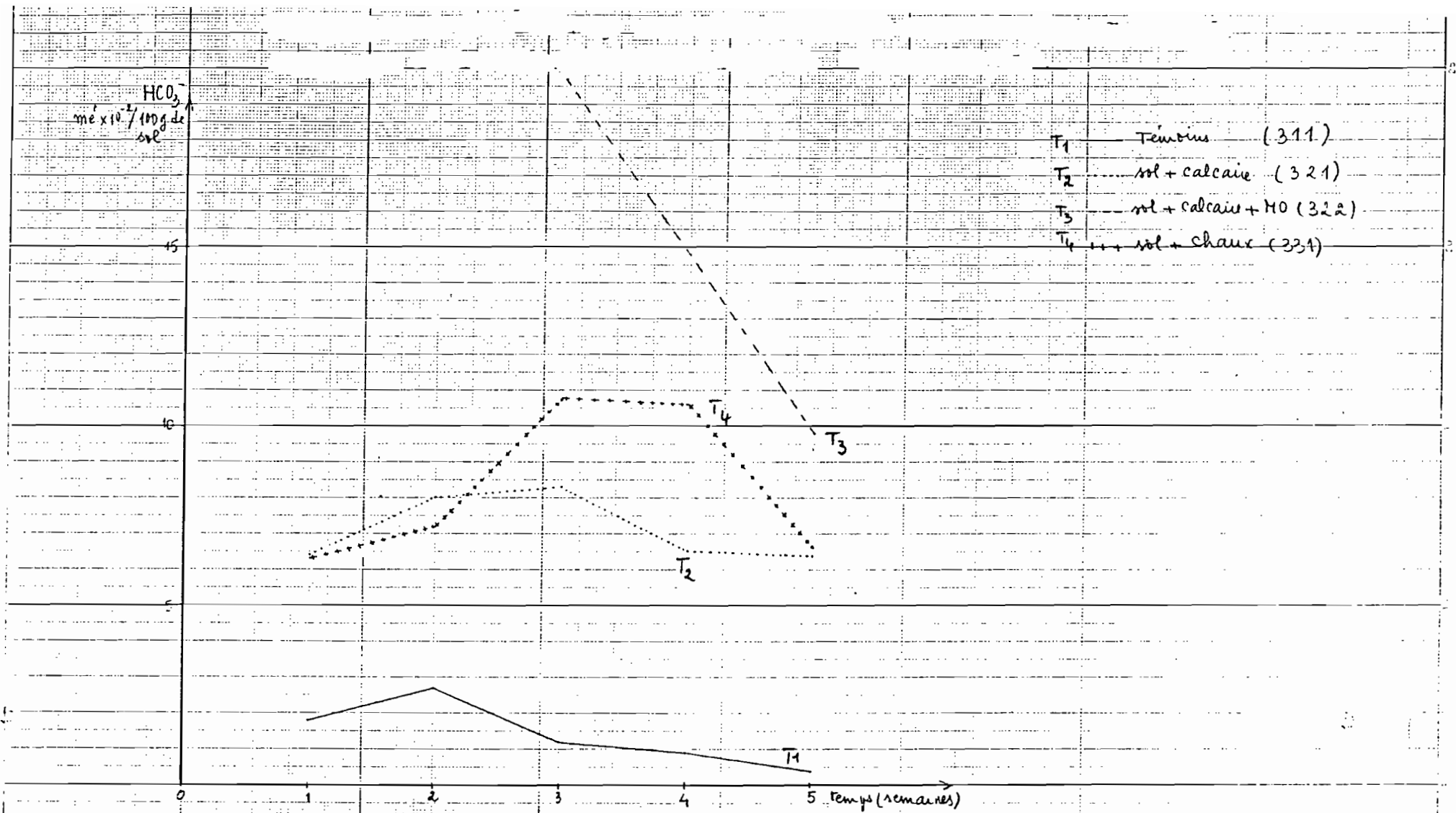


Figure 4 : Dynamique des Bicarbonates dans les percolats de : 1 mois

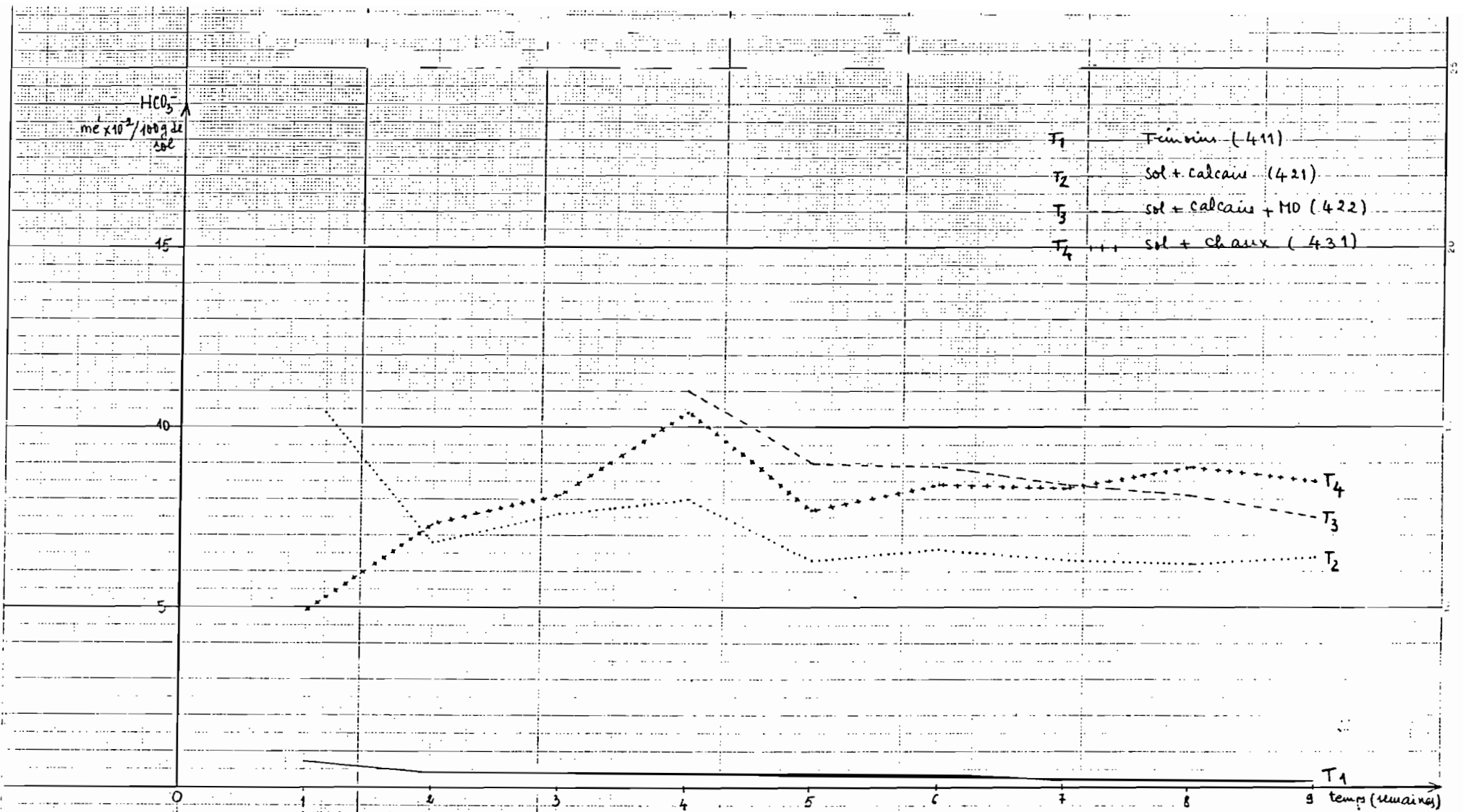


Figure 5: Teneurs en Bicarbonates dans les percolats de 2 mois

calcaire) sont plus élevés que dans les percolats T₄ (sol + chaux) et après c'est l'inverse qui se produit. Et globalement la quantité de bicarbonates dans les filtrats T₄ est plus grande que dans les filtrats T₂.

Pour T₃ (sol + calcaire + MO) on n'a pas pu doser les bicarbonates pendant les trois premières semaines; il y avait un effet tampon qui se manifestait tout au long du dosage alors que la réaction est légèrement acide (pH entre 5,4 et 7,4). Ce n'est qu'à partir de la 3^{ème} semaine (pour les échantillons de 30 jours) ou de la 4^{ème} semaine (pour les échantillons de 60 jours) qu'on a pu observer une bonne courbe de titration avec un palier net. Cet effet tampon ne s'observe que pour des pH < 8,0, dès qu'on atteint le pH = 8,0, on dose normalement les bicarbonates dans ces filtrats. Cet effet tampon a cessé avec l'existence des matières organiques hydrosolubles colorées dans les percolats et il est tout à fait probable que cet effet soit dû à l'existence des substances organiques.

À la 4^{ème} semaine les quantités de bicarbonates dans les solutions de T₃ sont du même ordre de grandeur que celles de T₄ (sol + chaux).

En comparant bicarbonates et pH des solutions, on note une similitude de l'ordre respectif des valeurs et de leur évolution en fonction des traitements: l'élévation du pH sous l'effet des amendements favorise l'activité biologique (DOMMERGUES et MANGENOT, 1970) et la production de CO₂ résultant de la minéralisation de la matière organique du sol explique que l'on retrouve davantage de bicarbonates dans les traitements amendés que dans le témoin.

4. Les bases (Ca, Mg, K) dans les percolats

Les trois éléments, Ca, Mg et K, présentent une évolution assez analogue dans les percolats; la quantité des cations diminue en fonction du temps mais les niveaux de valeur et la vitesse de diminution dépendent du trai-

Tableau 7 :

TENEURS EN CALCIUM (Ca^{++}) DANS LES PERCOLATS RECUEILLIS
 CHAQUE SEMAINE (valeurs absolues et cumulées, en mg pour 100g de sol).

Traitements	Semaines		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Echantillons										
T ₁ : TEMOINS	211	A	0,024								
		C	0,024								
	411	A	0,029	0,016	0,013	0,013	0,019	0,016	0,011	0,007	0,009
		C	0,029	0,045	0,058	0,071	0,090	0,106	0,117	0,124	0,133
	311	A	0,034	0,031	0,025	0,028	0,039				
		C	0,034	0,065	0,090	0,118	0,157				
T ₂ : SOL + CALCAIRE	221	A	0,145								
		C	0,145								
	421	A	0,143	0,078	0,082	0,083	0,070	0,072	0,065	0,059	0,060
		C	0,143	0,221	0,303	0,386	0,456	0,528	0,593	0,652	0,712
	321	A	0,087	0,083	0,088	0,102	0,088				
		C	0,087	0,170	0,258	0,360	0,448				
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	222	A	0,406								
		C	0,406								
	422	A	0,477	0,305	0,095	0,083	0,073	0,070	0,072	0,069	0,062
		C	0,477	0,782	0,877	0,960	1,033	1,103	1,175	1,244	1,306
	322	A	0,370	0,301	0,292	0,168	0,090				
		C	0,370	0,671	0,963	1,131	1,221				
T ₄ : SOL + CHAUX	231	A	0,102								
		C	0,102								
	431	A	0,084	0,083	0,090	0,103	0,089	0,070	0,082	0,079	0,073
		C	0,084	0,167	0,257	0,360	0,449	0,519	0,601	0,680	0,753
	331	A	0,111	0,081	0,092	0,085	0,092				
		C	0,111	0,192	0,284	0,369	0,461				

A = valeurs absolues (Quantités de Ca^{++} en solution pour chaque semaine)

C = valeurs cumulées

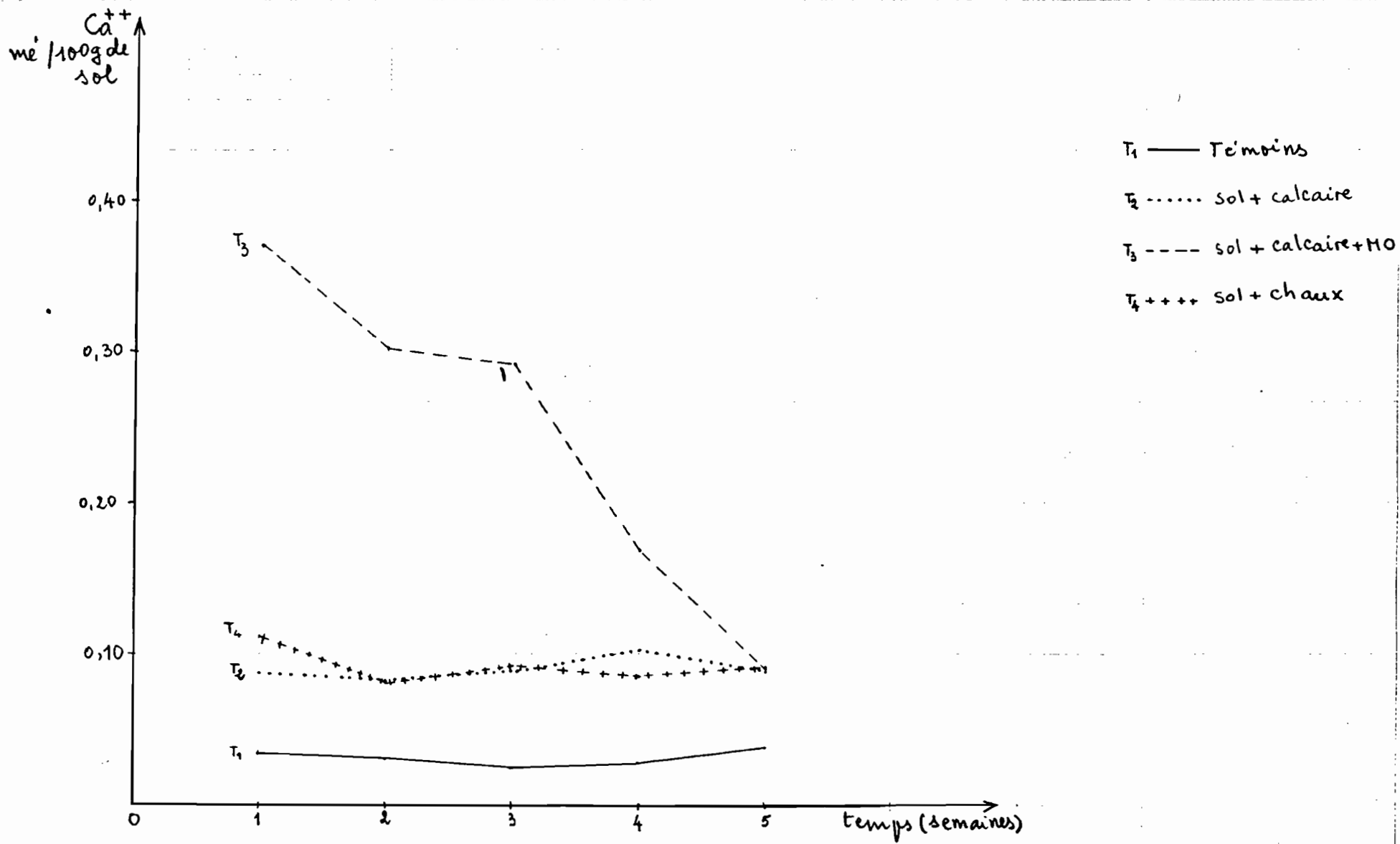


Figure 6 : Teneurs en Calcium dans les percolats de 1 Mois.

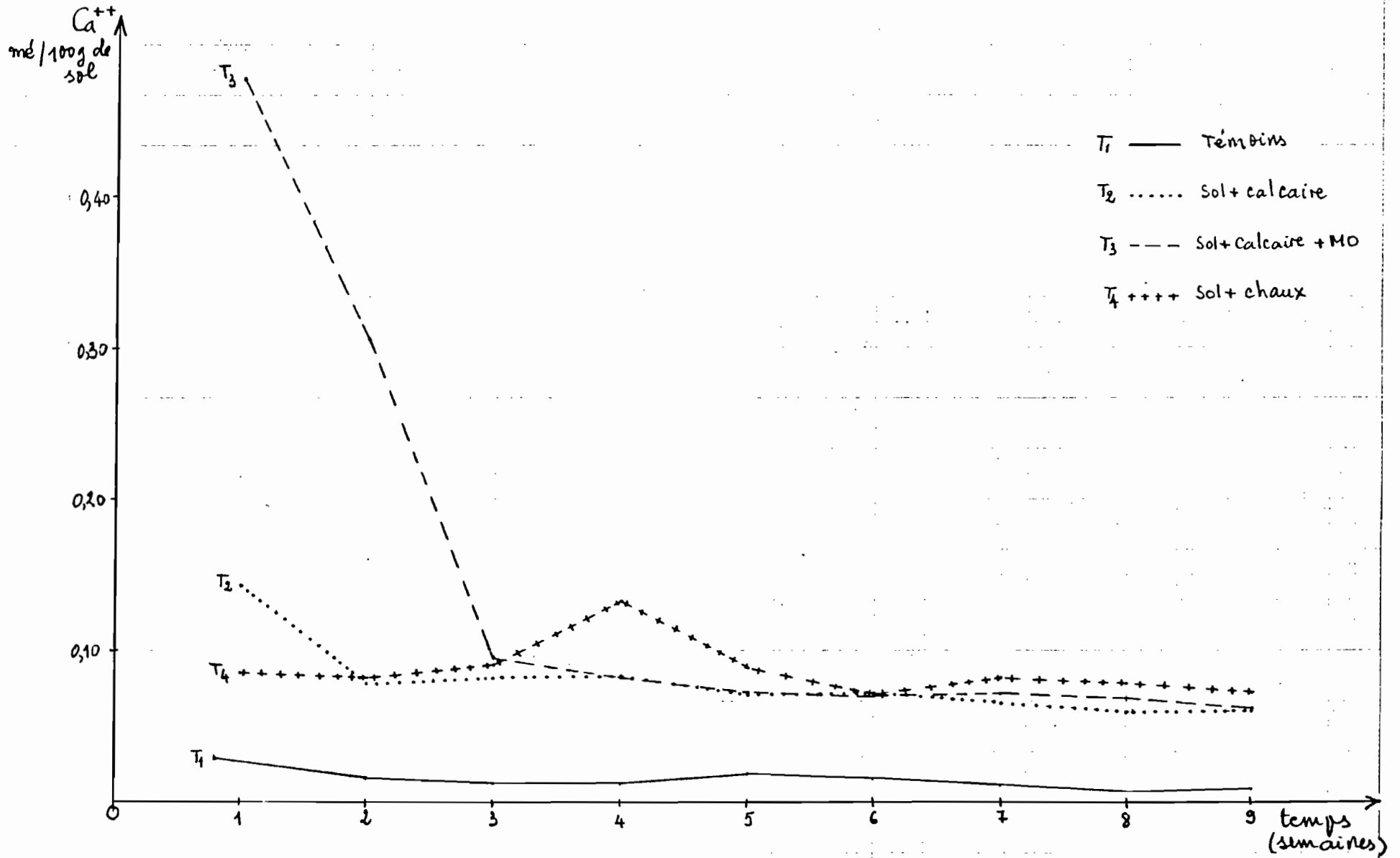


figure 7: Teneurs en calcium dans les percolats de 2 mois.

tement.

a). le calcium (tableau 7, fig. 6 et 7)

La dynamique du calcium est variable suivant les traitements.

Dans les Témoins (T_1) les pertes sont faibles, on a un peu plus de calcium au début (la 1^{re} semaine) et dès la 2^e semaine, il y a une stabilisation des teneurs en calcium dans les percolats. On note que les pertes obtenues avec les colonnes de 1 mois (série 3) se maintiennent à un niveau supérieur à celui des colonnes de 2 mois (série 4).

Dans les percolats de sol avec Calcaire (T_2), le phénomène est le même mais dans ce cas les teneurs en calcium sont plus élevées. Le Calcaire réagit assez rapidement puisque dès la première semaine on a une importante quantité de calcium dans les percolats. Comme cette quantité est près du triple de celle des percolats des sols témoins (T_1), on peut ainsi penser que ce calcium provient du calcaire apporté dans le sol. Avec le temps les pertes en calcium demeurent du même ordre de grandeur mais on observe une légère baisse progressive qui tend à se stabiliser vers la fin de l'expérience.

Pour le traitement T_4 (Chaux), les pertes se situent au même niveau que celles du T_2 (calcaire), et les courbes évolutives restent proches l'une de l'autre (fig. 6 et 7). Il n'y a pas de différence significative entre ces deux traitements sur les valeurs cumulées au bout de 30 et 60 jours (tableau 7). L'effet de la chaux et du calcaire sur les pertes en calcium dans les percolats est presque identique.

Quant à l'effet de la matière organique (T_3), on enregistre une importante quantité de Ca^{++} dans les percolats dès la première semaine, plus grande dans les percolats de 60 jours que ceux de 30 jours. Ces pertes diminuent rapidement pour rejoindre le niveau des traitements T_2 et T_4 dès la 3^e semaine pour les colonnes de 60 jours (fig. 7) et seulement à la 5^e semaine pour celles de 30 jours (fig. 6). Ensuite la courbe évolutive se confond

Tableau 8 : TENEURS EN MAGESIUM (Mg^{++}) DANS LES PERCOLATS RECUEILLIS
CHAQUE SEMAINE (valeurs absolues et cumulées, en mg pour 100g de sol)

Traitements	Semaines		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Echantillons										
T ₁ : TEMOINS	211	A c	0,005 0,005								
	411	A c	0,008 0,008	0,003 0,011	0,003 0,014	0,003 0,017	0,004 0,021	0,004 0,025	0,003 0,028	0,003 0,031	0,004 0,035
	311	A c	0,033 0,033	0,010 0,043	0,009 0,052	0,009 0,061	0,011 0,072				
T ₂ : SOL + CALCAIRE	221	A c	0,018 0,018								
	421	A c	0,014 0,014	0,009 0,023	0,009 0,032	0,010 0,042	0,008 0,050	0,009 0,059	0,006 0,065	0,006 0,071	0,007 0,078
	321	A c	0,033 0,033	0,015 0,048	0,015 0,063	0,014 0,077	0,011 0,088				
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	222	A c	0,067 0,067								
	422	A c	0,089 0,089	0,052 0,141	0,034 0,175	0,021 0,196	0,016 0,212	0,012 0,224	0,010 0,234	0,010 0,244	0,009 0,253
	322	A c	0,157 0,157	0,063 0,220	0,058 0,278	0,032 0,310	0,017 0,327				
T ₄ : SOL + CHAUX	231	A c	0,016 0,016								
	431	A c	0,012 0,016	0,010 0,026	0,012 0,038	0,014 0,052	0,013 0,065	0,013 0,078	0,011 0,089	0,011 0,100	0,009 0,109
	331	A c	0,029 0,029	0,018 0,047	0,018 0,065	0,017 0,082	0,016 0,098				

A = valeurs absolues (pmr chaque semaine).

c = valeurs cumulées

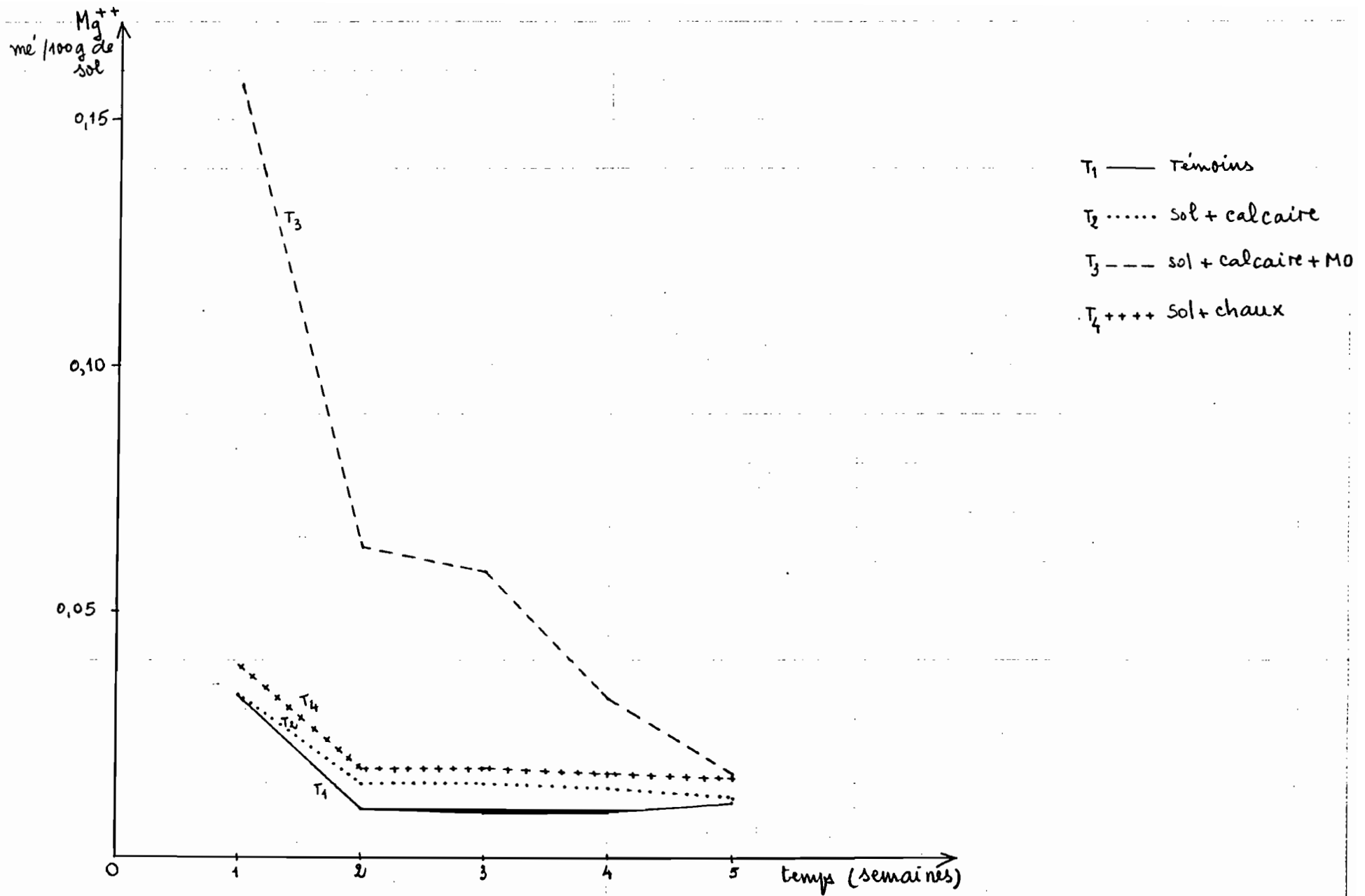


figure 8

Teneurs en Magnésium dans les percolats de 1 mois.

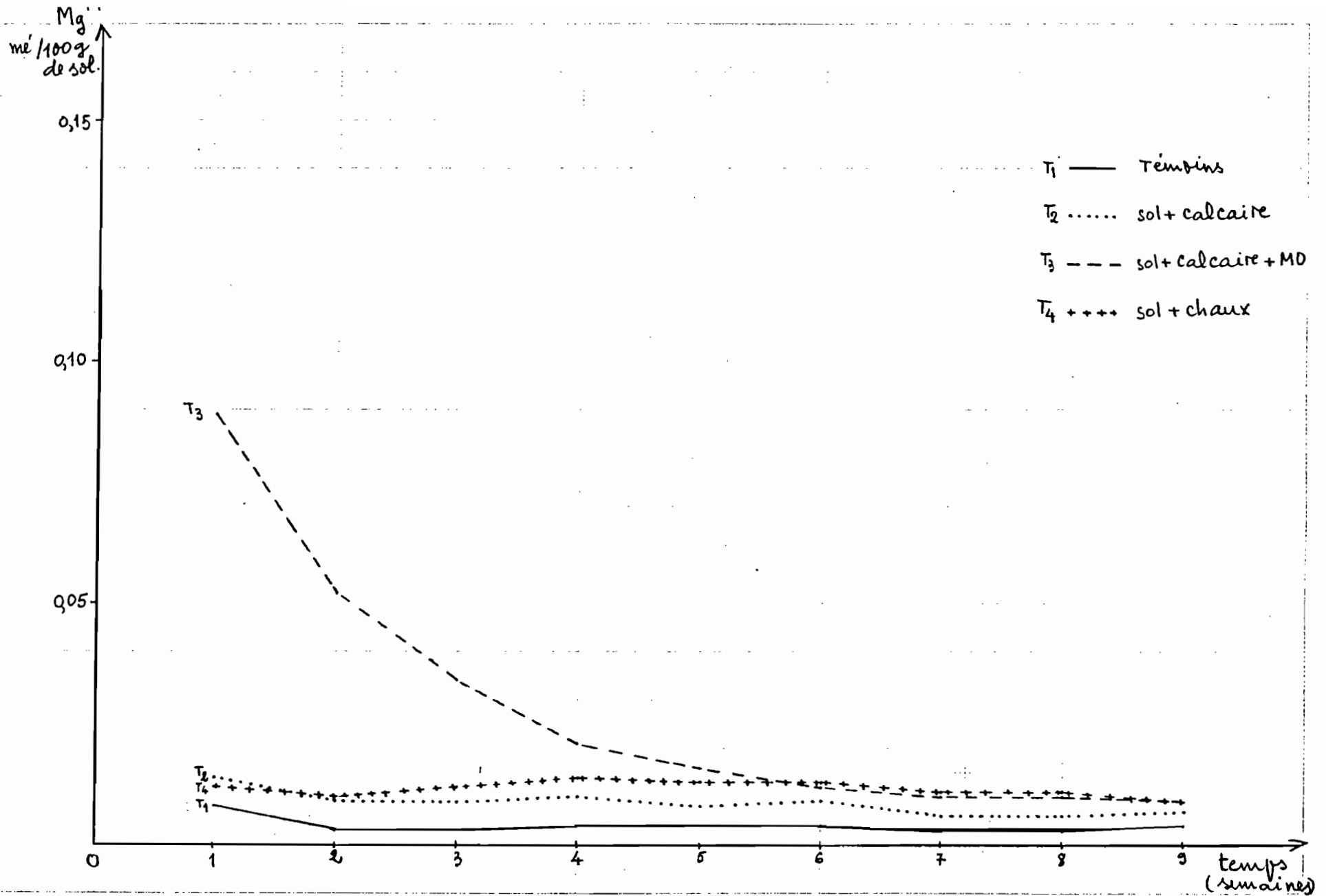


Figure 9. Teneurs en Magnésium dans les percolats de : 2 mois.

avec celles de T₂ et T₄. La matière organique semble donc favoriser l'exportation du Ca et cela très rapidement. Ce sucrat d'exportation du Ca hors des colonnes est nettement supérieur à la quantité de Ca apporté dans la paille de maïs (0,42 mg/100g de sol) et ne provient que, en grande partie des amendements. Au bout des deux mois la quantité de Ca lixivié dans le traitement avec matière organique (T₃) est près du double de celles obtenues avec les amendements seuls (T₂ et T₄).

b) - le Magnesium (tableau 8, fig. 8 et 9)

Les quantités de Mg en solution sont moins importantes que celles du Ca mais l'évolution au cours du temps est assez semblable. Après une diminution de la 1^{re} à la 2^e semaine, on observe une stabilité des pertes hebdomadaires, par la suite, pour les traitements T₁, T₂ et T₃, avec par ordre croissant de valeurs: T₁ (témoins), T₂ (calcaire) et T₄ (chaux). La différence entre T₁, d'une part, et T₂-T₄, d'autre part, est moins importante ici que dans le cas du Ca. Les pertes en Mg sont légèrement supérieures dans T₄ par rapport à T₂, mais la chaux a apporté deux fois plus de Mg que le calcaire (tableau 2 : analyse de la chaux).

Le traitement 3 (matière organique) fournit également des fortes quantités de Mg dans les percolats au cours de la première semaine, puis celles-ci diminuent pour rejoindre les valeurs de T₄ à la 5^e semaine; ensuite les pertes hebdomadaires sont pratiquement confondues par ces deux traitements (chaux et calcaire + matière organique).

Les pertes en Mg apparaissent aussi sensiblement supérieures dans les colonnes de 30 jours par rapport à celles de 60 jours.

c) - le potassium (tableau 9; fig 10 et 11)

Les pertes en K⁺ dans les percolats sont également

Tableau 9 : TENEURS EN POTASSIUM (K⁺) DANS LES PERCOLATS RECUEILLIS
 CHAQUE SEMAINE (valeurs absolues et cumulées, en mg pour 100g de sol)

Traitements	Semaines		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	Echantillons										
T ₁ : TEMOINS	211	A	0,019								
		C	0,019								
	411	A	0,020	0,007	0,009	0,008	0,007	0,007	0,007	0,006	0,006
		C	0,020	0,027	0,036	0,044	0,051	0,058	0,065	0,071	0,077
	311	A	0,021	0,010	0,009	0,010	0,011				
		C	0,021	0,031	0,040	0,050	0,061				
T ₂ : SOL + CALCAIRE	221	A	0,019								
		C	0,019								
	421	A	0,023	0,009	0,009	0,009	0,007	0,006	0,005	0,005	0,005
		C	0,023	0,032	0,041	0,050	0,057	0,063	0,068	0,073	0,078
	321	A	0,017	0,011	0,009	0,007	0,005				
		C	0,017	0,028	0,037	0,044	0,049				
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	222	A	0,224								
		C	0,224								
	422	A	0,284	0,140	0,108	0,071	0,061	0,047	0,042	0,044	0,039
		C	0,284	0,424	0,532	0,603	0,664	0,711	0,753	0,797	0,836
	322	A	0,207	0,156	0,136	0,092	0,056				
		C	0,207	0,363	0,499	0,591	0,647				
T ₄ : SOL + CHAUX	231	A	0,015								
		C	0,015								
	431	A	0,014	0,009	0,010	0,009	0,009	0,007	0,007	0,008	0,006
		C	0,014	0,023	0,033	0,042	0,051	0,058	0,065	0,073	0,079
	331	A	0,015	0,011	0,013	0,013	0,008				
		C	0,015	0,026	0,039	0,052	0,060				

A = valeurs absolues de K⁺ pour chaque semaine

C = valeurs cumulées.

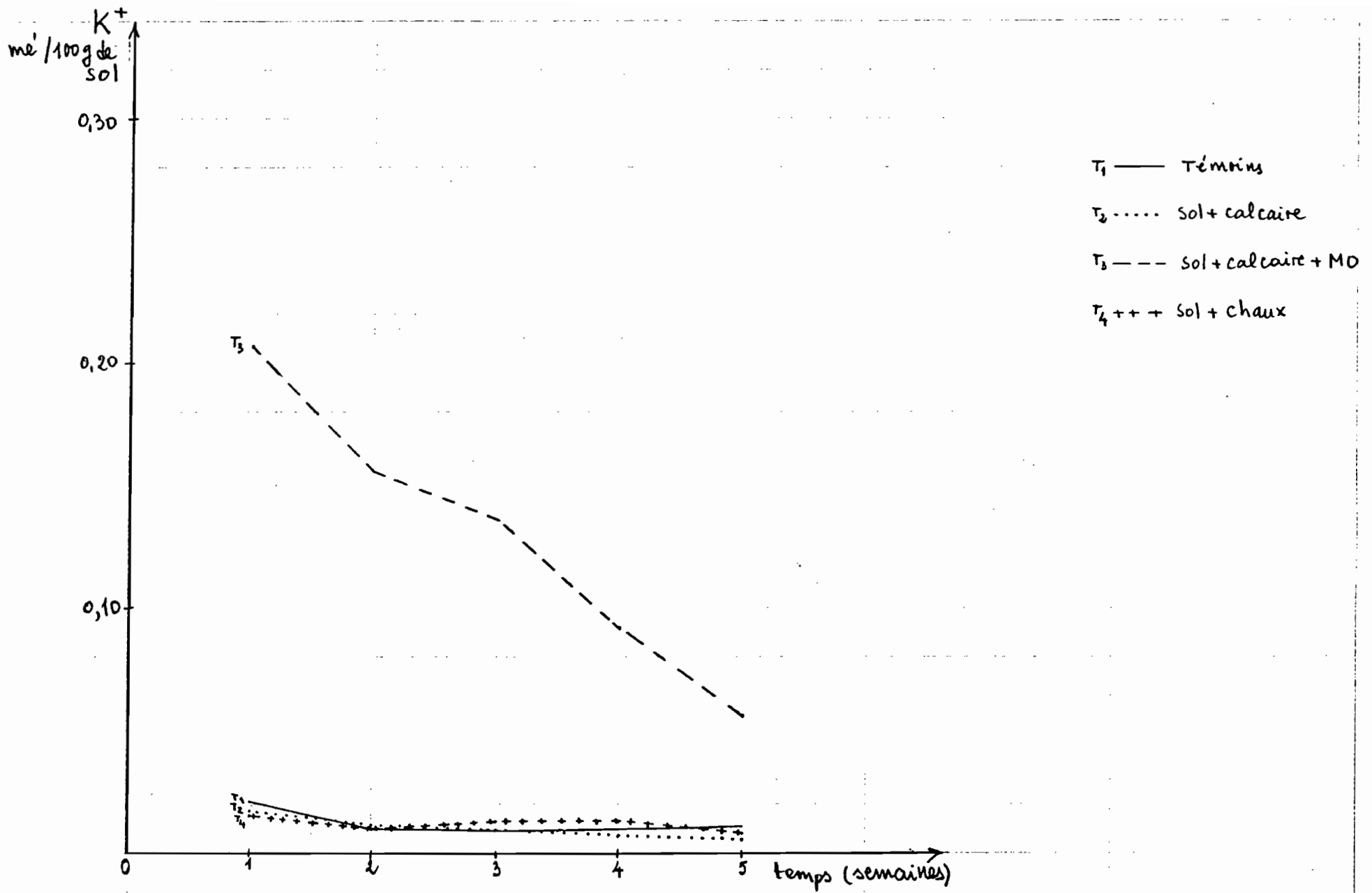


figure 10: Teneurs en Potassium dans les percolats de : 1 mois.

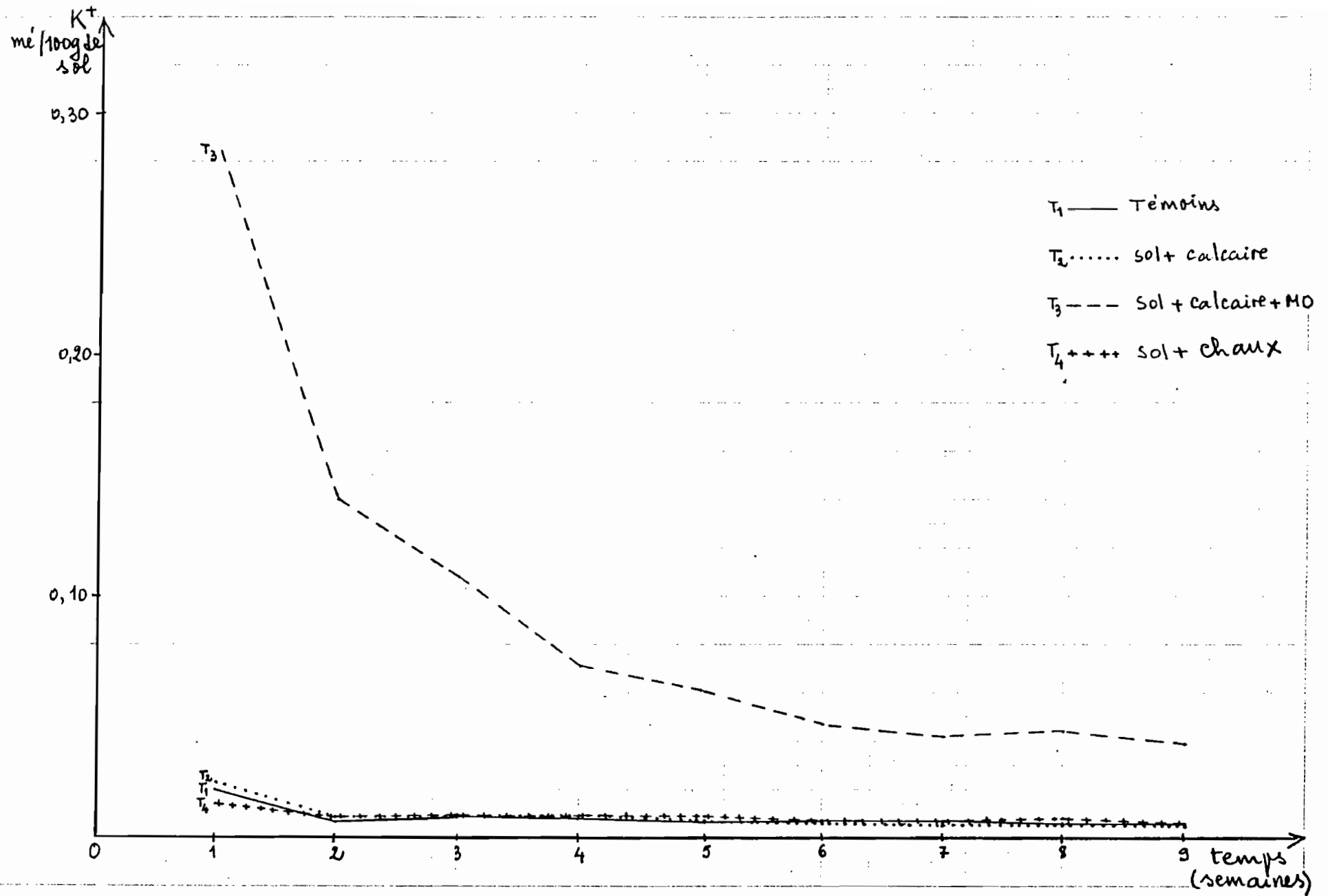


figure 11 Teneurs en Potassium dans les percolats de 2 mois

un peu plus importantes la première semaine, elles se maintiennent ensuite à un niveau régulier et il n'y a pas de différence significative entre les trois traitements T_1 , T_2 et T_4 ; les amendements Calcaire ou chaux, qui n'apportent que des traces de potassium (tableau 2) n'ont pas d'effet marquant sur les quantités de K^+ dans les percolats; ces pertes ont d'ailleurs du même ordre de grandeur.

Comme pour Ca et Mg, les pertes en K du traitement T_3 sont très importantes la première semaine et diminuent ensuite jusqu'à la 5^e semaine. Mais contrairement aux deux premiers éléments, les pertes en potassium au cours des dernières semaines restent nettement plus élevées que celles des autres traitements. Les pertes cumulées de K au bout de deux mois (0,8 mé/100 g de sol) sont nettement plus importantes que celles de Mg et sont dues en grande partie à la richesse de la matière organique en K qui apporte 0,5 mé/100g de sol (tableau 3).

L'exportation de bases sur les colonnes de 30 jours apparaît donc sensiblement supérieure à celle de 60 jours, surtout pour le calcium (tabl. 7) et de Magnésium (tabl. 8) et pour les traitements T_1 (témoins) et T_3 (sol + calcaire + Mo). Les écarts entre les deux séries de 30 et 60 jours sont réduits pour le potassium (tableau 5). Ces différences observées sont à mettre en relation avec la rapidité de réhumectation périodique pour les colonnes de 30 jours et celle de 60 jours dont il a été question au paragraphe III A 1. Cependant les pertes au cours du temps suivent une évolution semblable pour les deux séries des colonnes.

Si on compare les quantités d'éléments lixiviés (Ca, Mg et K) à celles présentes à l'état initial dans le sol, sans forme échangeable, d'amendements et de paille de maïs, on voit que les pertes dans les percolats n'ont

Elément	Traitements	T ₁ : TEMOINS	T ₂ : SOL+ CALCAIRE	T ₃ : SOL+CALCAIRE+MO	T ₄ : SOL+ CHAUX
	Temps				
Ca ⁺⁺	Temps initial: me/100g de sol	1,60	6,91	7,33	6,61
	7 jours	2%	2%	7%	1%
	30 jours	6%	7%	14%	7%
	60 jours	8%	10%	18%	11%
Mg ⁺⁺	Temps initial: me/100g de sol	0,20	0,43	0,64	0,60
	7 jours	4%	3%	14%	3%
	30 jours	10%	12%	33%	9%
	60 jours	18%	18%	40%	18%
K ⁺	Temps initial: me/100g de sol	0,10	0,10	0,60	0,10
	7 jours	20%	23%	47%	14%
	30 jours	51%	57%	110%	51%
	60 jours	77%	78%	139%	79%

Tableau 10: Comparaison des pertes par lixiviation de Ca, Mg et K, exprimées en % de la quantité d'éléments présents à l'état initial, sous forme échangeable dans le sol et dans les apports (amendements et matière organique)

pas le même niveau selon les trois éléments (tableau 10)

Les pourcentages d'éléments lixiviés augmentent en passant de Ca à Mg puis surtout à K ; ce qui correspond ainsi à leur ordre de mobilité croissante dans le sol et la matière organique (DUCHAUFFOUR, 1977). Dans tous les cas de traitement, les quantités lixiviées sont plus importantes au cours du premier mois que pendant le second mois.

On remarque pour chaque élément (Ca, Mg, K) une analogie sur la valeur des pourcentages cumulé pour les trois traitements T₁, T₂ et T₄ ; les quantités lixiviées sont de l'ordre de 65%, 18% et 10% au bout de 2 mois, respectivement, pour K, Mg et Ca. Les valeurs sont toujours supérieures avec le traitement T₃ (ml + calcaire + MO).

5. le phosphore total (tableau 11)

Il n'apparaît pas beaucoup d'influence de différents traitements excepté le cas de la matière organique dans lequel la teneur en P₂O₅ est de plus de trois fois plus grande que dans les autres traitements.

Ainsi le phosphore est très peu mobile dans ces sols de la vallée du Niari. Les amendements calcaires qui on apporte ne favorisent guère la libération du phosphore en solution. La prairie de maïs a apporté 41 ppm de P₂O₅ au sol dont une moitié peut être libérée par biodégradation.

6. l'Aluminium (tableau 12)

Il y a beaucoup plus d'Aluminium dans T₁ (Hémoirs). Dans les percolats T₃ (calcaire + MO), les pertes sont relativement plus importantes la 1^{ère} semaine (comparable à celles de T₁), période où la valeur du pH était plus basse pour ce traitement. Au bout de deux mois la quantité d'Al lixivié avec le traitement T₃ représente moins de 50% de celle de T₁. On peut aussi supposer qu'une partie de l'Aluminium provient de la matière organique qui a apporté 2,3 ppm d'Al dans le sol.

Tableau 11: Pertes cumulées de P_2O_5 dans les percolats
(en ppm du sol)

Traitement \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T_1 : Témoins	0,3	1,1	1,6
Percolats T_2 : sol + calcaire	0,3	1,1	1,7
Percolats T_3 : sol + calcaire + MO	1,6	5,2	6,5
Percolats T_4 : sol + chaux	0,4	1,4	1,9

Tableau 12: Pertes cumulées de Al dans les percolats
(en ppm du sol)

Traitement \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T_1 : Témoins	1,4	6,2	8,7
Percolats T_2 : sol + calcaire	0,4	2,1	3,0
Percolats T_3 : sol + calcaire + MO	1,3	3,3	3,9
Percolats T_4 : sol + chaux	0,3	1,4	2,0

Tableau 13: Pertes cumulées de Mn dans les percolats
(en ppm du sol)

Traitement \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T_1 : Témoins	2,7	3,7	6,4
Percolats T_2 : sol + calcaire	1,9	2,1	2,4
Percolats T_3 : sol + calcaire + MO	29,2	107,2	130,2
Percolats T_4 : sol + chaux	0,5	3,5	12,0

Ainsi la chaux (T_4) empêcherait mieux la mise en solution de l'Aluminium que le calcaire. Mais à comparer avec les teneurs d'Al dans les Témoins (T_1), on peut conclure que le calcaire ou la chaux contribuent au blocage de l'Al dans le sol.

Cette dynamique de l'Aluminium dans les percolats est aussi liée aux pH des solutions : il y a beaucoup plus d'Al dans les percolats qui ont des pH relativement bas (T_1) alors que pour les percolats à pH élevés (T_4, T_2) on a de teneurs en Al très faibles (tabl. 6 et 12). Ainsi contrairement aux bicarbonates, les teneurs en Al dans les percolats sont inversement proportionnelles à l'élévation des pH.

7. le Manganèse (Tableau 13)

Dès la 1^{ère} semaine, on a déjà une bonne quantité de Mn dans les percolats T_3 . Ce Mn ne doit pas provenir uniquement de la matière organique (M.O.) puisque les quantités exportées dépassent largement celles apportées par la M.O. dans le sol (0,6 ppm). Ce Mn, observé dans les percolats, proviendrait en grande partie du sol. On peut penser que la M.O. favorise, dans les colonnes, des conditions de réduction de Mn^{4+} en Mn^{2+} et permet ainsi sa libération en solution.

Dans ce cas la M.O. s'oppose à l'action du calcaire qui est d'empêcher la solubilisation du Mn. C'est en effet dans les percolats T_2 (Calcaire) qu'on a moins de Mn en solution. Et avec le calcaire on remarque que l'augmentation du Mn lixivré au cours du temps est très faible.

Avec la chaux (T_4), les percolats sont très pauvres en Mn au départ, mais à partir de 1 mois, on retrouve presque les mêmes teneurs que dans T_1 et on les dépasse même largement au bout des 2 mois.

Ainsi, à terme, le Mn apparaît moins lixivré avec le calcaire broyé qu'avec la chaux. Et la M.O., apportée dans le sol avec le calcaire, ne fait qu'augmenter le processus de libération de Mn.

8. Le Fer (tableau: 14)

Les quantités de fer exportées dans les percolats sont plus faibles dans T₂ (calcaire) et T₄ (chaux) que dans T₁ (témoins). Le traitement T₄ (matière organique) fournit, comme dans le cas précédent, les valeurs les plus fortes (mais avec de différences par rapport aux autres traitements relativement moins importants que pour Mn). Cette similitude n'est pas étonnante si l'on considère que ces deux éléments ont une dynamique assez semblable dans les sols, en particulier sous l'influence de phénomènes d'oxydo-réduction dont on a déjà parlé à propos de l'action de la M.O. dans les colonnes. La migration du Fer peut également être facilitée par la présence de matières organiques hydrosolubles en plus grande quantité dans ce traitement T₃ et qui sont susceptibles de former des complexes avec le Fer.

9. la silice (tableau: 15)

Les différences entre traitements sont moins importantes que pour les autres éléments. Cependant au cours du 1^{er} mois le traitement T₃ (M.O) a encore les valeurs les plus fortes. Au cours du 2^e mois les pertes se réduisent au niveau du même ordre de grandeur que pour les autres éléments.

10. le Carbone organique (tableau 16)

Le carbone de matières organiques hydrosolubles est nettement plus important dans les percolats T₃ (M.O.) que dans les autres traitements. En fait les valeurs de C organique dans les percolats de T₃ ne sont pas supérieures à celles de autres traitements à la 1^{ère} semaine, malgré la coloration des percolats pour ce traitement (T₃); les pertes sont ensuite plus importantes jusqu'à un mois. Entre le 1^{er} mois et le 2^e mois les tenues de C-organique lixivré ont de même ordre de grandeur dans tous les traitements (T₃, T₁, T₂ et T₄).

L'abondance des matières organiques hydrosolubles pendant les quatre premières semaines doit être liée à une intense activité biologique qui dégrade la matière organique avec production de CO₂ et l'ensemble peut être la cause

Tableau 14: Pertes cumulées de Fer dans les percolats
(en ppm du sol)

Traitements \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T ₁ : Témoins	1,3	8,3	10,5
Percolats T ₂ : sol + calcaire	0,6	2,0	2,9
Percolats T ₃ : sol + calcaire + MO	2,3	36,3	53,9
Percolats T ₄ : sol + chaux	0,3	1,7	3,1

Tableau 15: Pertes cumulées de SiO₂ dans les percolats
(en ppm du sol)

Traitements \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T ₁ : Témoins	0,8	5,8	11,8
Percolats T ₂ : sol + calcaire	0,6	4,7	9,1
Percolats T ₃ : sol + calcaire + MO	2,2	10,2	14,2
Percolats T ₄ : sol + chaux	0,6	5,3	9,3

Tableau 16: Pertes cumulées de Carbone organique dans
les percolats (en ppm du sol)

Traitements \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T ₁ : Témoins	19,3	37,5	56,3
Percolats T ₂ : sol + calcaire	20,8	53,7	76,3
Percolats T ₃ : sol + calcaire + MO	22,2	162,7	189,9
Percolats T ₄ : sol + chaux	33,7	89,8	109,3

Tableau 17: Pertes cumulées d'Azote total dans les
percolats (en ppm du sol)

Traitements \ Temps	1 SEMAINE	1 MOIS	2 MOIS
Percolats T ₁ : Témoins	4,4	8,1	12,6
Percolats T ₂ : sol + calcaire	6,1	14,9	18,5
Percolats T ₃ : sol + calcaire + MO	13,1	26,0	30,5
Percolats T ₄ : sol + chaux	6,9	17,3	21,7

des particularités, de ce traitement T₃, observées sur plusieurs paramètres : augmentation progressive de pH, effet tampon, lixiviation plus importante des bases, du manganèse et du fer.

Les deux traitements T₂ et T₄ accroissent la quantité de carbone organique par rapport aux témoins. Ces matières organiques hydrosolubles ne peuvent provenir ici que de la matière organique préexistante dans le sol. La différence par rapport aux témoins serait due à l'augmentation du pH qui va favoriser soit la solubilisation de certaines substances organiques préexistantes soit la libération de composés hydrosolubles résultant de la biodegradation de la matière organique du sol.

La lixiviation du carbone organique est relativement plus élevée au cours du 1^{er} mois avec la chaux (T₄) qu'avec le calcaire (T₂).

11. L'Azote total (tableau 17)

L'Azote des percolats est relativement plus élevé dans les percolats des traitements T₂ (calcaire) et T₄ (chaux) que dans ceux de T₁ (Témoins), principalement au cours du 1^{er} mois. La présence du calcaire ou de chaux favorise l'ammonification et la solubilisation de l'Azote provenant de la décomposition de matières organiques du sol.

Les quantités d'Azote des percolats de T₃ (Mo) ont les plus importantes, surtout au cours de la première semaine où elles ont plus du double de celles des autres traitements.

B/- EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU SOL

1. le pH (tableau 18)

Le pH des sols n'est pas beaucoup variable dans chaque traitement, mais en considérant un traitement donné par rapport aux autres, on constate des modifications de pH dues aux effets des divers amendements.

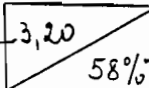
On peut aussi remarquer que les échantillons se comportent toujours de façon particulière par rapport aux au-

Tableau 18 : Variations du pH des sols

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	4,9	5,0	4,9	5,1
T ₂ : SOL + CALCAIRE	5,8	6,2	6,1	6,1
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MD	6,1	6,3	6,2	6,3
T ₄ : SOL + CHAUX	6,4	6,5	6,2	6,5

Tableau 19 : Carbonates restants dans les sols en me/100g de sol et en % de l'apport initial au sol

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	—	—	—	—
T ₂ : SOL + CALCAIRE	3,20 58%	2,58 47%	1,80 32%	1,84 33%
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MD	2,97 54%	2,60 47%	1,93 35%	1,46 26%
T ₄ : SOL + CHAUX	1,47 27%	1,43 26%	1,35 25%	1,14 21%

valeur absolue en me/100g de sol —  — % par rapport à la teneur initiale dans l'amendement.

Teneurs initiales dans les amendements :

Calcaire : 5,54 me CO₃²⁻ / 100g de sol.

Chaux : 5,51 me CO₃²⁻ / 100g de sol.

ties échantillons des sols.

Dans les témoins (T₁), le pH ne varie pas de façon significative pendant les deux mois d'incubation.

Le calcaire (T₂) a un effet très positif puisqu'il élève le pH d'une unité. Dès le premier jour (t₀), le pH a augmenté de 4,9 à 5,8, il s'élève à 6,2 au bout d'une semaine et se maintient ensuite à ce niveau jusqu'à 2 mois.

Associée au calcaire, la matière organique renforce et accélère l'effet positif dans l'augmentation du pH. Le traitement T₃, le pH atteint 6,1 dès le premier jour et reste stable à 6,2-6,3 jusqu'à la fin de l'expérience.

La Chaux (T₄) réagit très rapidement dans le sol puisque même le premier jour, pour les colonnes humectées, le pH est déjà à 6,4. A partir de la 1^{ère} semaine le pH est à 6,5 et reste stable jusqu'à 2 mois. Ainsi la Chaux réagit plus vite et mieux que le calcaire broyé seul ou associé à la matière organique.

2. les Carbonates (tableau 19)

En dosant les carbonates restant dans le sol, on constate que les amendements ont réagi très vite. En effet, dans les sols qui n'ont pas été incubés, leur humectation pour ramener à la capacité de rétention a suffit pour réduire de près de la moitié des carbonates apportés pour les traitements T₂ (calcaire) et T₃ (calcaire + MO). Au bout des 2 mois on a perdu 67% de carbonates aux sols pour T₂ et 73% pour T₃ (voir tableau 19).

Pour la chaux (T₄), après l'humectation, il y a déjà 27% de carbonates. La chaux a donc réagi avec le sol et s'est carbonatée rapidement.

Comme dans les échantillons de zéro jour, il n'y a pas eu de lixiviation on peut supposer que les cations issus de la décarbonatation sont devenus échangeables et peuvent se fixer sur le complexe absorbant. On peut considérer que cette action rapide de ce calcaire broyé est due à

son état de broyage qui est très fin et à l'acidité du sol relativement forte à l'état initial.

Ensuite cette partie carbonatée ne diminue que très rapidement et représente encore 21% de l'équivalent carbonaté apporté par la chaux à l'état initial.

La matière organique intervient aussi dans la mobilisation des carbonates puisque dans le traitement T₃, on a moins de carbonates restants que dans T₂.

3. les bases échangeables

3-1- Problème de détermination des bases échangeables:

Pour doser les bases échangeables (B.E.), la méthode couramment utilisée est celle à l'acétate d'ammonium tamponné à pH = 7,0. Dans les sols carbonatés, on sait que cette méthode à l'acétate extrait non seulement les bases du sol dites "échangeables" mais l'acétate dissout aussi une partie des carbonates et au dosage on dose les bases "échangeables" du sol et des bases supplémentaires provenant de la dissolution des carbonates dans les sols. Cette méthode se trouvait donc mal adaptée à l'objet de notre étude pour la détermination des bases Ca et Mg existant aussi sous forme carbonatée dans les échantillons de certains traitements (T₂, T₃ et T₄).

Confrontés à cette difficulté, nous avons eu recours à d'autres méthodes de détermination des bases "échangeables" du sol. On a utilisé ainsi deux autres méthodes qui sont: une méthode par calcul différentiel et une par Electro-Ultra-Filtration (E.U.F.).

La méthode par calcul consiste à doser d'une part, les carbonates restants dans le sol (Coulométrie après acidification) et d'autre part, à doser la somme des bases échangeables et carbonates extraits par HCl N/20. Ainsi par une simple différence entre bases dosées ou extraits HCl N/20 et les bases équivalentes aux carbonates déterminés, on déduit les teneurs en bases (Ca + Mg) échangeables du sol.

L'extrait HCl 1/20 contient aussi du K échangeable qui est déterminé par dosage direct.

L'Electro-Ultra-Filtration (E.U.F.) est basé sur des extractions à l'eau, sous l'effet du courant électrique en combinant électro-dialyse et ultrafiltration. L'extraction se fait en quatre fractions qui sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 20: Principe d'extraction par Electro-Ultra-Filtration

Fractions	Température	Tension	Intensité	Temps
1 ^{re} fraction	20°C	200V	15 mA	de 0 à 30 mn
2 ^e fraction	80°C	400V	40 mA	de 30 à 35 mn
3 ^e fraction	80°C	400V	150 mA	de 35 à 39 mn
4 ^e fraction	Filtre dans HCl N			24 Heures

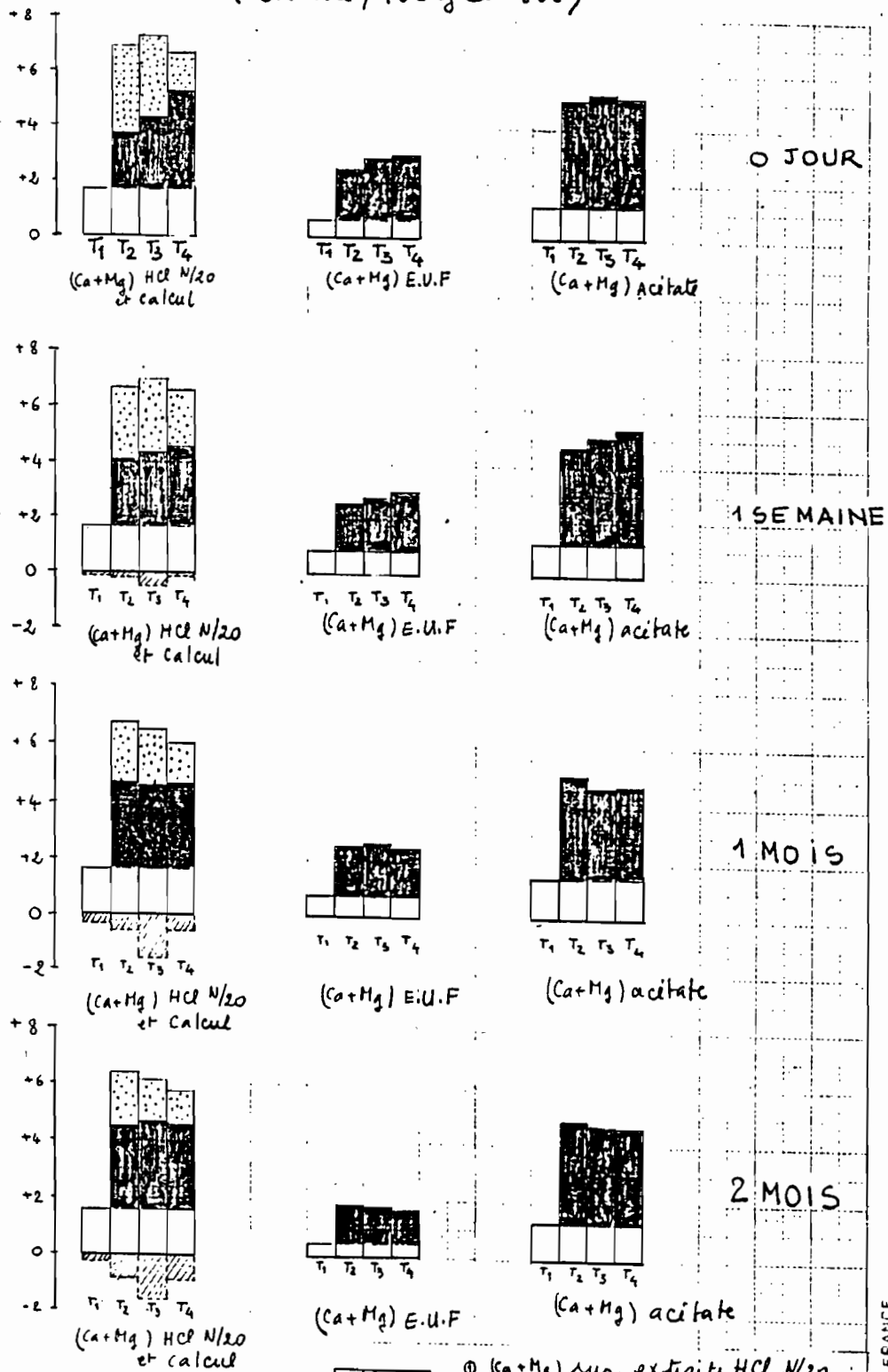
Théoriquement, la 1^{re} fraction extrait tous les cations libres dans la solution; la 2^e fraction extrait les cations faiblement liés aux argiles donc qui sont sur les faces et les plans de feuillets des minéraux argileux; et la 3^e fraction extrait les cations un peu plus liés aux argiles donc les cations localisés dans l'espace interfoliaire. La teneur en bases échangeables correspond à la somme de toutes les fractions. L'avantage de cette méthode est le fait de travailler en solution aqueuse et au pH du sol.

Ainsi pour la détermination des bases "échangeables" du sol nous avons utilisé trois méthodes différentes dont nous allons d'abord comparer les résultats.

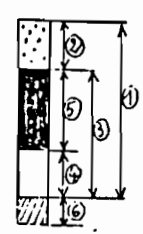
3-2 Bases échangeables et essai des bitaux comparatifs.

Il faut d'abord noter que pour ce qui est des bases échangeables dans le sol, on ne tiendra compte que du Ca, Mg et K; le Na n'étant pris en considération à cause de sa quantité négligeable dans ces sols feuillettiques.

Figure 12 : Comparaison de Ca+Mg échangeable selon trois méthodes : Acétate d'ammonium, Electro-Ultra Filtration (E.U.F) et par calcul : extraits HCl N/20 - Carbonates dissous au Carbone. (en me/100 g de sol)



T₁ : Témoins
 T₂ : sol+ calcaire
 T₃ : sol+ calcaire + MO
 T₄ : sol+ chaux



- ① (Ca+Mg) sur extraits HCl N/20
- ② carbonates restants dans le sol. (Ca+Mg)
- ③ (Ca+Mg) échangeable obtenue soit par calcul soit E.U.F. soit avec Acétate
- ④ (Ca+Mg) du sol témoin
- ⑤ gain de (Ca+Mg) échangeable par rapport au témoin selon les trois méthodes.
- ⑥ pertes de (Ca+Mg) dans les solutés (percolats).

Tableau 21a: Ca+Mg échangeable, selon la méthode par calcul (HCl N/20 - carbonates): en me/100g de sol.

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	1,66	1,66	1,65	1,59
T ₂ : SOL + CALCAIRE	3,67	4,12	4,73	4,54
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	4,28	4,37	4,60	4,68
T ₄ : SOL + CHAUX	5,17	5,17	4,66	4,57

Tableau 21b: Ca+Mg échangeable, selon la méthode E.U.F (me/100g de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	0,66	0,83	0,78	0,49
T ₂ : SOL + CALCAIRE	2,52	2,58	2,57	1,82
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	2,85	2,77	2,62	1,77
T ₄ : SOL + CHAUX	2,95	3,02	2,51	1,72

Tableau 21c: Ca+Mg échangeable, selon la méthode à l'acétate d'ammonium (me/100g de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	1,21	1,20	1,49	1,31
T ₂ : SOL + CALCAIRE	5,03	4,73	5,08	4,85
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	5,31	5,08	4,70	4,70
T ₄ : SOL + CHAUX	5,14	5,39	4,72	4,65

TABEAU 22

GAINS DE (Ca+Mg) ECHANGEABLES DES TRAITEMENTS T₂, T₃ et T₄ PAR RAPPORT AUX TEMOINS (T₁), ET EN FONCTION DES DIFFERENTES METHODES.
(en me/100g de sol et en %)

Ca+Mg
calcul

Traitements \ Temps		Temps			
		0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₂	SOL + CALCAIRE	2,01 / 121,1	2,42 / 145,8	3,08 / 186,7	2,95 / 185,5
(22a) T ₃	SOL + CALCAIRE + M.O.	2,62 / 157,8	2,71 / 163,3	2,26 / 137,0	3,09 / 194,3
T ₄	SOL + CHAUX	3,51 / 211,4	3,51 / 211,4	3,01 / 182,4	2,98 / 187,4

Ca+Mg
E.U.F

Traitements \ Temps		Temps			
		0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₂	SOL + CALCAIRE	1,86 / 281,8	1,75 / 210,8	1,79 / 229,5	1,33 / 271,4
(22b) T ₃	SOL + CALCAIRE + M.O.	2,19 / 331,8	1,94 / 233,7	1,84 / 235,9	1,28 / 261,2
T ₄	SOL + CHAUX	2,29 / 347,0	2,19 / 263,9	1,73 / 221,8	1,23 / 251,0

Ca+Mg
Acétate

Traitements \ Temps		Temps			
		0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₂	SOL + CALCAIRE	3,82 / 315,7	3,53 / 294,2	3,59 / 240,9	3,54 / 270,2
(22c) T ₃	SOL + CALCAIRE + M.O.	4,10 / 338,8	3,88 / 323,3	3,21 / 215,4	3,39 / 258,8
T ₄	SOL + CHAUX	3,93 / 324,8	4,19 / 349,2	3,23 / 216,8	3,34 / 255,0

Ecart de (Ca+Mg) échangeable entre l'échantillon considéré et le témoin (Variation en valeur absolue) en me/100g de sol

1,84 / 235,9

variation de (Ca+Mg) échangeable en % du témoin.

de la vallée du Niou -

Nous savons aussi que le calcaire utilisé comme amendement est dolomitique, donc contenant des carbonates de calcium et de magnésium ; et du fait que ces deux carbonates n'ont pas la même solubilité dans l'eau, nous ne pouvions pas savoir à la fin de l'expérience quelles étaient les proportions respectives de ces deux carbonates dans les sols. Nous avons décidé de considérer la somme des deux éléments dans le sol et dans les carbonates du sol. Ainsi par la suite on ne parlera que de la somme calcium + Magnésium d'une part et du potassium d'autre part.

a) - Calcium et Magnésium

En comparant les trois méthodes de détermination des bases échangeables (tableau 21 a, b, c, fig. 12, 13, 14, 15), on constate :

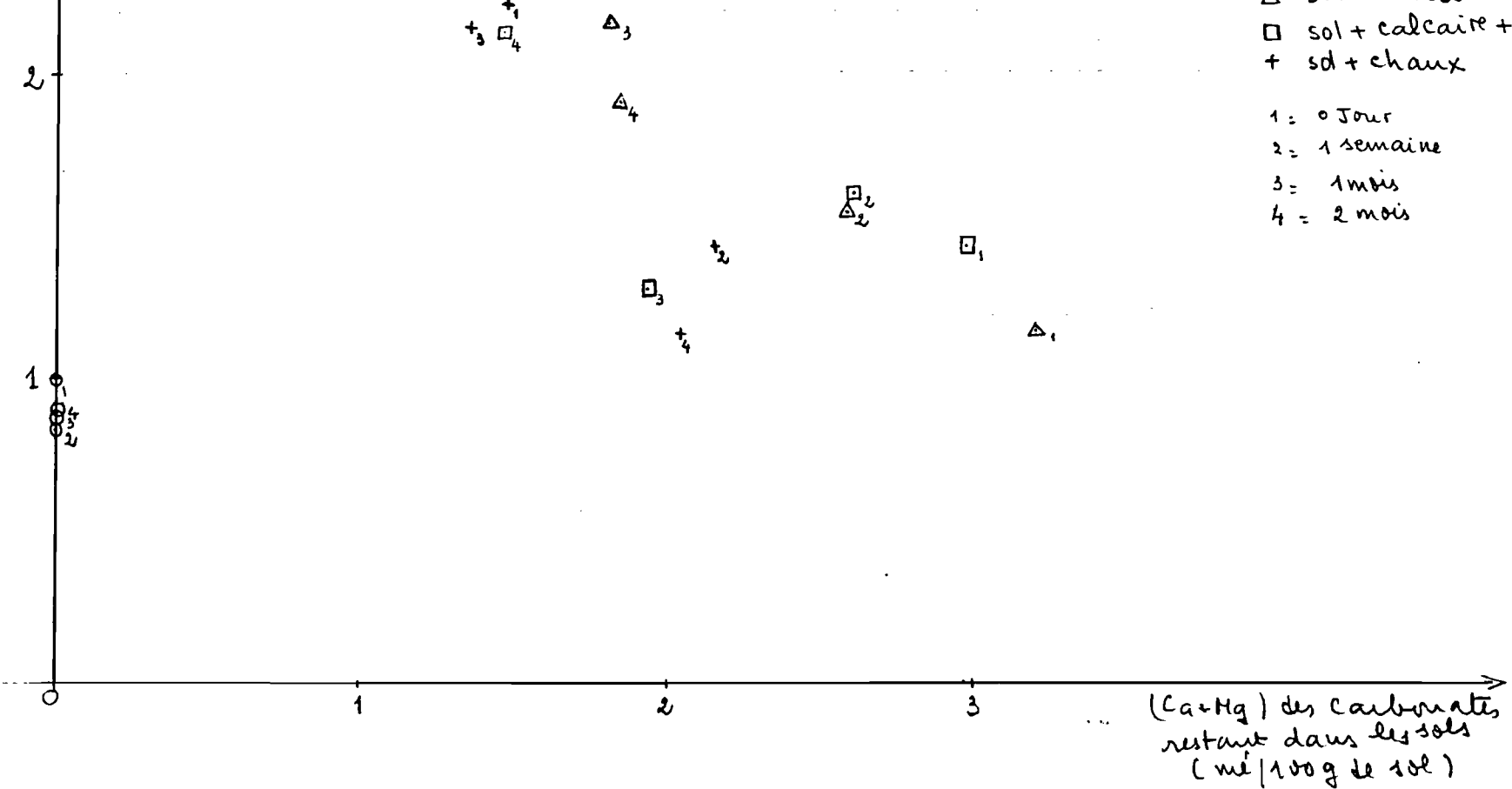
- que la méthode à l'acétate d'ammonium donne moins de Ca+Mg "échangeables" que la méthode par calcul (HCl $N/20$ - carbonates) pour les échantillons non carbonatés (T_1) et davantage de Ca+Mg échangeables pour les échantillons contenant des carbonates (T_2, T_3, T_4) : cf fig. 13

- que la méthode E.U.F. extrait moins de Ca+Mg échangeables que la méthode par calcul mais la différence entre les résultats de méthodes est proportionnellement plus petite pour les échantillons contenant des carbonates (fig. 14)

- que la méthode à l'acétate extrait davantage de Ca+Mg échangeables que la méthode E.U.F. mais les écarts sont proportionnellement de même grandeur pour les échantillons carbonatés et pour les échantillons du traitement témoin, sans carbonates (fig. 15)

Comme les trois méthodes ne donnent pas les mêmes résultats, on a aussi essayé de calculer pour chacune la variation de Ca+Mg échangeables entre le témoin et les échantillons enrichis en calcaire, chaux ou en calcaire + MO (tableau 22 a, b, c). Cette variation est exprimée en valeur absolue (mg/100g de sol) et en pourcentage de la teneur de Ca+Mg du témoin. On remar-

variations
de (Ca+Mg)
entre le calcul
et E.U.F.
(me/100g de sol)



Δ sol + calcaire
 □ sol + calcaire + MO
 + sol + chaux

 1 = 0 Jour
 2 = 1 semaine
 3 = 1 mois
 4 = 2 mois

Figure 16 : Comparaison de la différence des (Ca+Mg) échangeables obtenue selon deux méthodes :
 calcul (HCl N/20) - Electro-ultrafiltration, avec les teneurs en carbonates du sol.

Variations
de (Ca+Mg) éch.
entre Acétate
et Calcul
(mg/100g de sol)

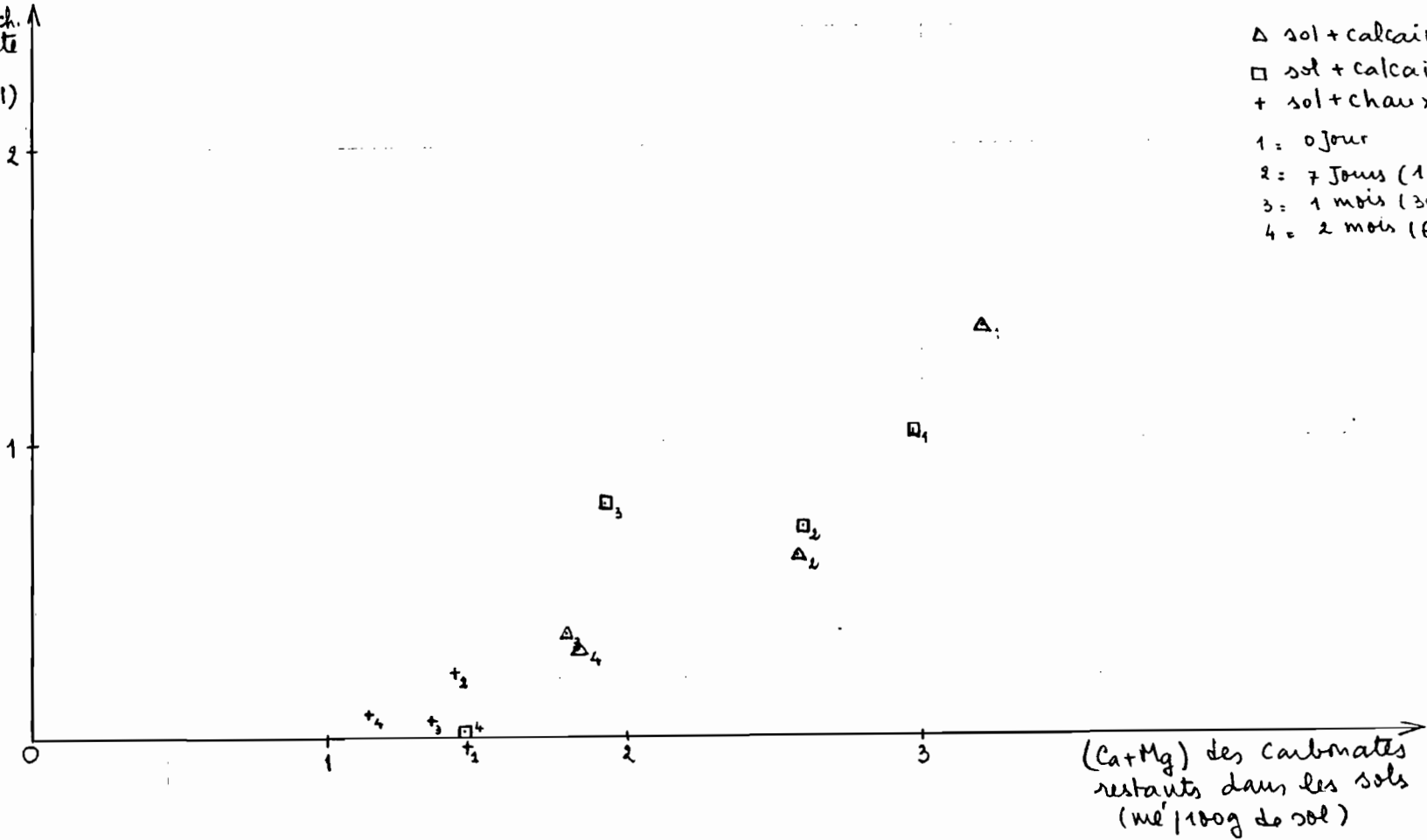


figure 17

Comparaison de la différence des (Ca+Mg) échangeables obtenue selon deux méthodes:
Acétate d'ammonium - Calcul (HCl N/20 - carbonates), avec les teneurs en carbonates du sol.

Variations
de (Ca + Mg)
entre Acétate
et E. U. F
(me / 100g de
sol)

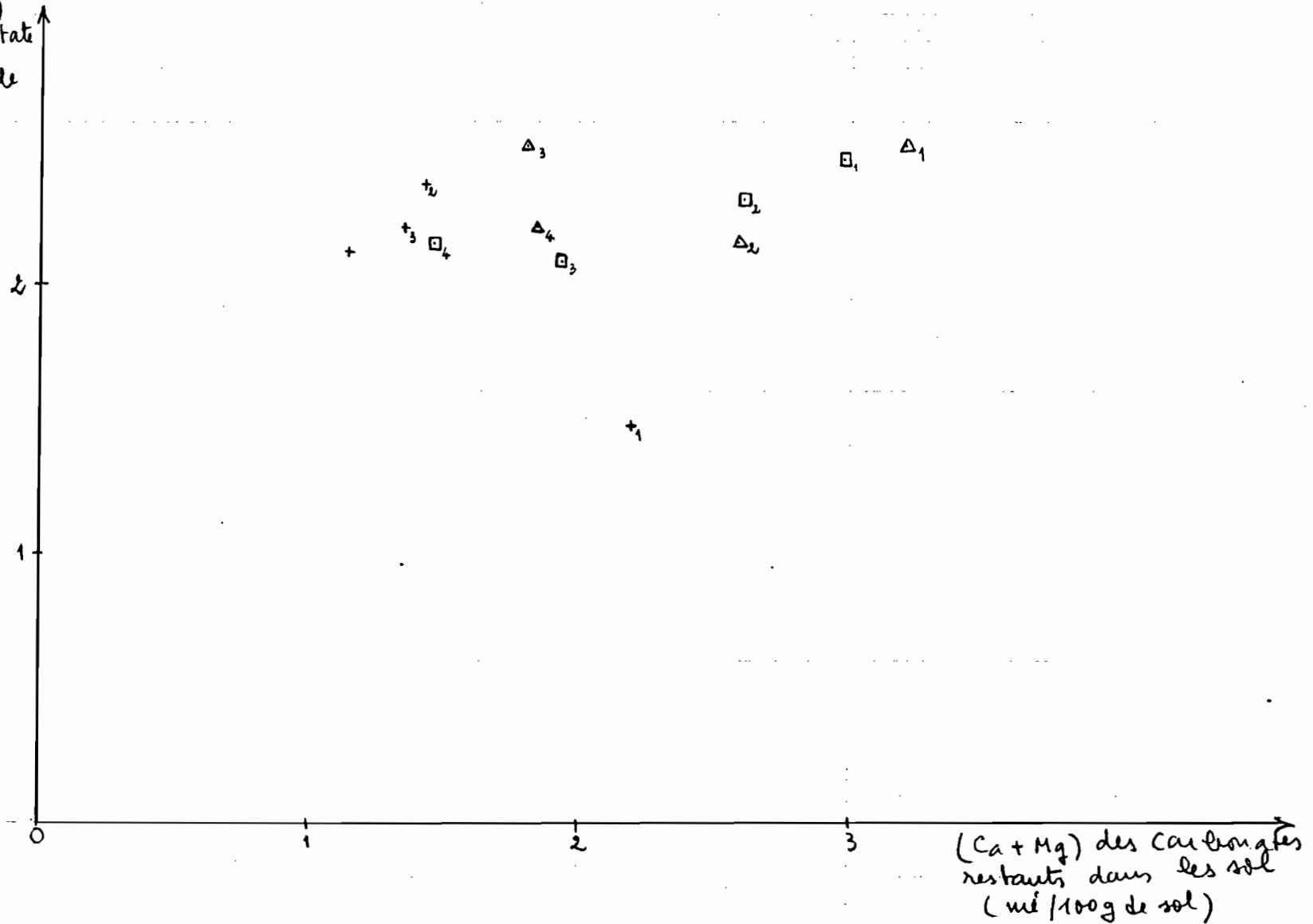


Figure 18: Comparaison de la différence des (Ca + Mg) échangeables obtenue selon deux méthodes: Acétate d'ammonium - Electro-ultra Filtration, avec les teneurs en carbonates du sol.

Tableau 23: Répartition de Ca+Mg dans les sols et dans les percolats, en % de la quantité totale à l'état initial et à 2 mois.

Traitements	Durée	Ca+Mg non échangeable et non carbonaté	Ca+Mg des Amendements et des Carbonates	Ca+Mg échangeable	Ca+Mg des Percolats dans les Percolats
T ₁ : TEMOINS	état initial	84,8		15,2	
	2 mois	84,3		13,8	1,8
T ₂ : SOL + CALCAIRE	état initial	57,5	32,2	10,3	
	2 mois	56,5	11,1	27,4	5
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	état initial	59*	31,1	10	
	2 mois	55,2**	9,1	29,1	6,7
T ₄ : SOL + CHAUX	état initial	57,9	31,7	10,4	
	2 mois	57,1	7,4	29,7	5,8

* tout 3,5% pour la matière organique et 55,5% pour la partie minérale.

** à 2 mois d'incubation, on ne peut plus distinguer (Ca+Mg) lié à la matière organique du reste de (Ca+Mg) non échangeable ou non carbonaté.

que que c'est avec la méthode à l'acétate d'ammonium qu'on a les plus fortes variations absolues et relatives. L'E.U.F a les plus faibles variations absolues mais en variations relatives, cette méthode dépasse celle du calcul (HCl N/20-carbonates). Il apparaît donc que les valeurs de Ca+Mg échangeables fournies par l'acétate d'ammonium et à un moindre degré par l'E.U.F sont d'autant plus élevées que les échantillons contiennent des carbonates. Par rapport à la méthode par calcul, ceci conduit à penser que ces deux méthodes peuvent extraire une partie des Ca+Mg existant sous forme de carbonates. Si tel est le cas, il doit exister une corrélation entre la richesse en carbonates des échantillons et la différence des résultats entre la méthode par calcul d'une part et l'une ou l'autre de ces deux méthodes (acétate ou E.U.F), d'autre part.

Sur les figures 16 et 17 on a comparé les différences entre la méthode par calcul et E.U.F d'une part, la méthode à l'acétate et la méthode par calcul d'autre part, avec les teneurs en carbonates (en Ca+Mg) du sol. Il existerait effectivement des corrélations significatives; ces représentations nous donnent des droites de régression dont les coefficients de corrélation sont de l'ordre de -0,80 et 0,93 ($y_1 = 3,42 - 0,71x_1$; $y_2 = -0,73 + 0,60x_2$). Sur la fig. 16, on remarque que plus on a de carbonates dans le sol, plus la différence de Ca+Mg entre la méthode par calcul et l'E.U.F diminue. Et sur la fig. 17, plus les carbonates augmentent plus la différence "Acétate" et "calcul" est grande. Et comme dans la méthode par le calcul on exclut les carbonates du sol, il n'y a que les méthodes E.U.F et Acétate qui sont susceptibles de varier en fonction des carbonates du sol et ainsi on peut conclure que ces deux dernières méthodes extraient aussi une partie des cations des carbonates.

Sur la figure 18, on voit qu'il n'y a pas de corrélation entre la richesse en carbonates et la différence Acétate-E.U.F.

En ne considérant que la méthode du calcul (fig.

12, tableau 22), on remarque que la quantité et la répartition de Ca+Mg échangeables ne sont pas les mêmes dans tous les traitements. Si on compare Ca+Mg échangeables de sols amendés (T₂, T₃, T₄) par rapport au sol témoin (T₁) tout les valeurs de Ca+Mg échangeables ne varient pas de façon significative au cours du temps, on constate que chaque amendement réagit à sa manière et donc que l'effet ou le gain de Ca+Mg obtenu n'est pas le même suivant les amendements.

Dans les échantillons non incubés (0 jour), l'effet ou le gain de Ca+Mg échangeables est croissant du calcaire à la chaux c'est-à-dire du traitement T₂ à T₄. Ainsi la chaux, en 24 heures, a déjà bien réagi avec le sol sous l'effet d'une humectation. La matière végétale associée au calcaire favorise aussi, par rapport au calcaire seul, une progression du Ca+Mg échangeable dans le sol.

Cette augmentation de Ca+Mg échangeables dans le sol doit être liée au pH du sol puisqu'on remarque que plus le pH croît plus on a une grande variation Ca+Mg échangeables.

Pour les échantillons d'une semaine, la réaction est la même que dans les échantillons de 0 jour. C'est toujours la chaux qui a un effet plus important sur Ca+Mg échangeables; dans ce cas, les pH sont aussi fonction de la saturation du complexe absorbant c'est-à-dire que le pH est d'autant plus élevé que la réactivité de l'amendement est grande. On remarque qu'aussi pour la chaux, le gain de Ca+Mg échangeables est le même pour les échantillons de 0 jour et ceux de 7 jours (tabl. 22a)

Le calcaire seul ou associé à la matière organique réagit plus progressivement avec le temps. Ainsi son effet augmente jusqu'à un mois. Dans T₃, la paille de maïs, favorise l'action du calcaire et l'enrichissement du sol en Ca+Mg échangeable, vraisemblablement en accélérant la dissolution de carbonates sous l'effet du CO₂ résultant de la minéralisa-

tion des matières végétales.

Quant aux pertes dans les percolats (fig. 12), elles ne sont pas encore très importantes au bout d'une semaine sauf dans T₃ où on a plus de pertes que dans les autres traitements.

Dans les échantillons de 30 jours (1 mois), on note une augmentation de Ca+Mg échangeable avec le calcaire tandis qu'il y a une baisse avec la chaux. On voit que le calcaire continue à enrichir le complexe absorbant jusqu'à un mois alors que l'effet de la chaux, qui a réagi très rapidement, a légèrement diminué.

Pas rapport aux échantillons de 30 jours, en général, on a une stabilité de Ca+Mg échangeable dans les échantillons de 2 mois. On note une diminution des réserves carbonatées au début et à la fin de l'expérimentation, et malgré l'augmentation des pertes dans les percolats, au cours du temps, les pH, dans les sols, sont encore stables au bout des 2 mois.

On peut conclure que la chaux a un effet très rapide dès le premier jour alors que le calcaire seul a un effet plus progressif. La matière organique active encore la réactivité du calcaire. Au bout des deux mois, c'est dans T₃ (H.O) qu'on a plus de Ca+Mg échangeable alors que dans T₂ (calcaire) et T₄ (chaux), on a des teneurs semblables mais légèrement inférieures à T₃.

Si on considère les carbonates restants dans le sol, on remarque que c'est dans le traitement T₂ où il y a beaucoup de carbonates; dans T₃ il y en a moins et cela justifie le rôle de la matière organique dans la solubilisation du calcaire apporté. Dans T₃ il y a très peu de carbonates restants du fait qu'il n'en existaient pas au départ dans la chaux: ce sont des carbonates dus à une recarbonatation de la chaux.

En prenant en compte les quantités totales de Ca+Mg déterminées par l'analyse totale, on peut voir la répartition de Ca+Mg dans les échantillons de sol et dans les percolats (tableau 23).

Dans ce tableau on n'a tenu compte que des échan-

échantillons à l'état initial (N21 et amendements) et les échantillons qui sont allés jusqu'à deux mois.

À l'état initial, dans les témoins (T_1), la plus grande partie de $Ca+Mg$ est à l'état non échangeable ou de non carbonaté. Par rapport aux témoins, la proportion de $Ca+Mg$ non échangeable ni carbonaté diminue dans les traitements T_2 , T_3 et T_4 en raison de l'apport des amendements.

Dans chaque traitement, il y a peu de variations de cette fraction de $Ca+Mg$ non échangeable ni carbonaté entre les échantillons à l'état initial et ceux de 2 mois, à l'exception du traitement T_3 , où il y a une faible diminution de $Ca+Mg$ non échangeable de l'état initial à 2 mois; cela signifie qu'une partie ^{de $Ca+Mg$} de la matière organique serait passée dans la phase échangeable ou en solution pendant les percolations.

Les carbonates varient aussi très peu dans les échantillons à l'état initial. Avec les échantillons de 2 mois on a une nette diminution de $(Ca+Mg)$ carbonaté de T_2 à T_4 . Ceci montre toujours que les carbonates sont mieux dissous dans T_3 que dans T_2 . Les carbonates de T_4 , issus de la carbonatation de la chaux, ont relativement peu diminué.

Pour le $(Ca+Mg)$ échangeable les teneurs sont croissantes de T_2 à T_4 pour les échantillons de deux mois. Ainsi la chaux améliore mieux l'état de saturation du sol; le calcaire est plus actif avec la matière organique. Dans les témoins (T_1) il y a baisse de $Ca+Mg$ échangeable à 2 mois, ceci doit être dû à la perte des bases en solution puisque il n'y a pas d'apport d'amendement dans ces échantillons.

Les pertes dans les percolats sont plus importantes avec la matière organique (T_3). Ces pertes seraient dues aussi à la minéralisation de la matière organique du sol ou celle qui est apportée.

En conclusion sur le Calcium et le Magnésium, on dira que les trois amendements réagissent bien dans le sol mais leurs vitesses de réaction ne sont pas les

Tableau 24a: K échangeable selon méthode sur extraits
HCl N/20 (en me/100g de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	0,12	0,11	0,11	0,08
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,11	0,10	0,09	0,09
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,57	0,51	0,37	0,30
T ₄ : SOL + CHAUX	0,12	0,11	0,09	0,08

Tableau 24b: K échangeable, selon méthode E.U.F
(me/100g de sol)

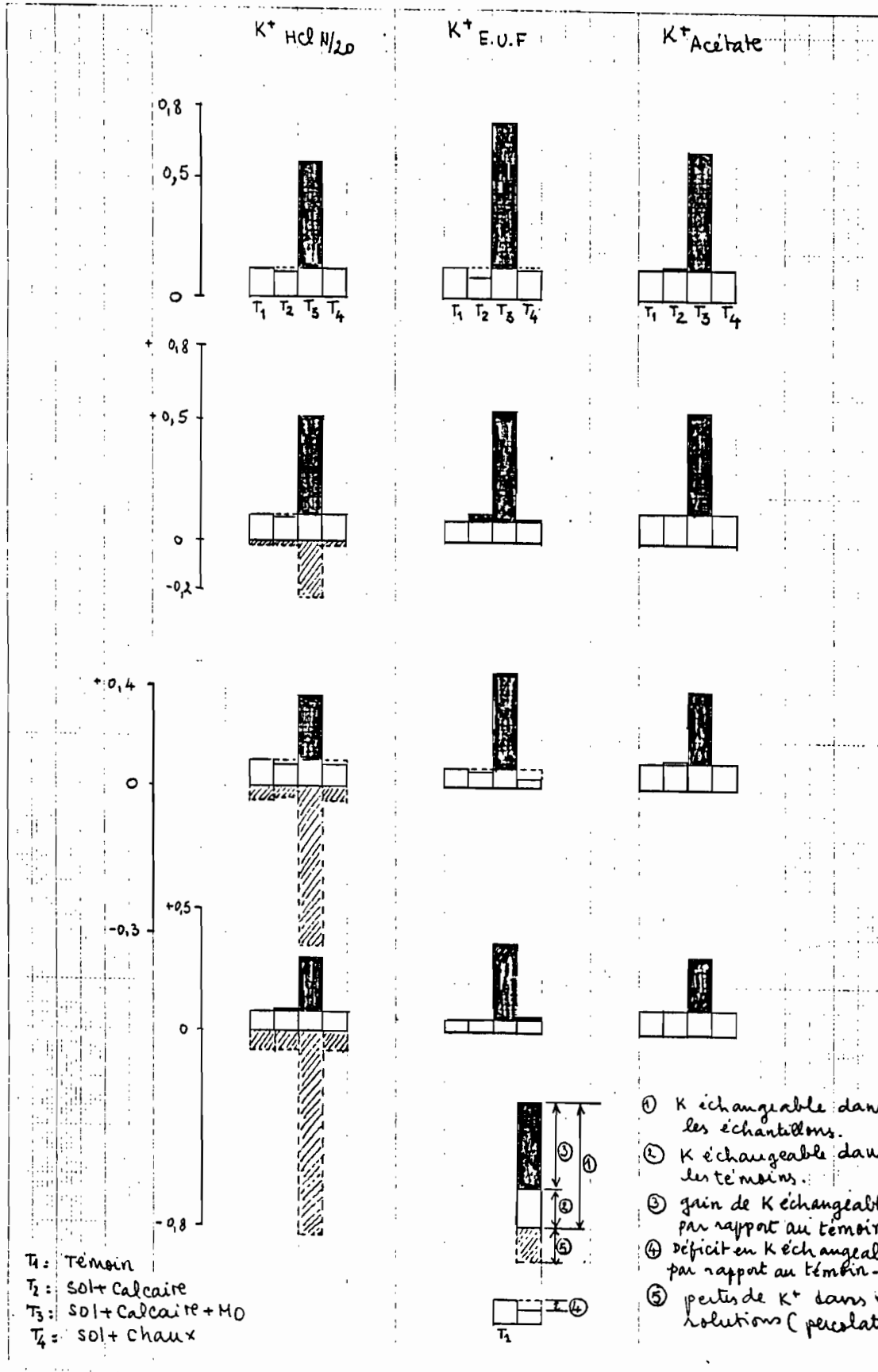
Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	0,13	0,09	0,08	0,04
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,09	0,12	0,07	0,04
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,74	0,54	0,47	0,37
T ₄ : SOL + CHAUX	0,12	0,10	0,04	0,07

Tableau 24c: K échangeable, selon méthode à
l'acétate d'ammonium (me/100g de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	0,13	0,13	0,11	0,10
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,14	0,13	0,12	0,10
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,63	0,54	0,40	0,32
T ₄ : SOL + CHAUX	0,13	0,13	0,11	0,10

Figure 19:

Comparaison de K échangeable selon trois méthodes: exhaire KCl N/20, Acétate d'ammonium et Electro-ultra-Filtration - (en me/100g de sol)



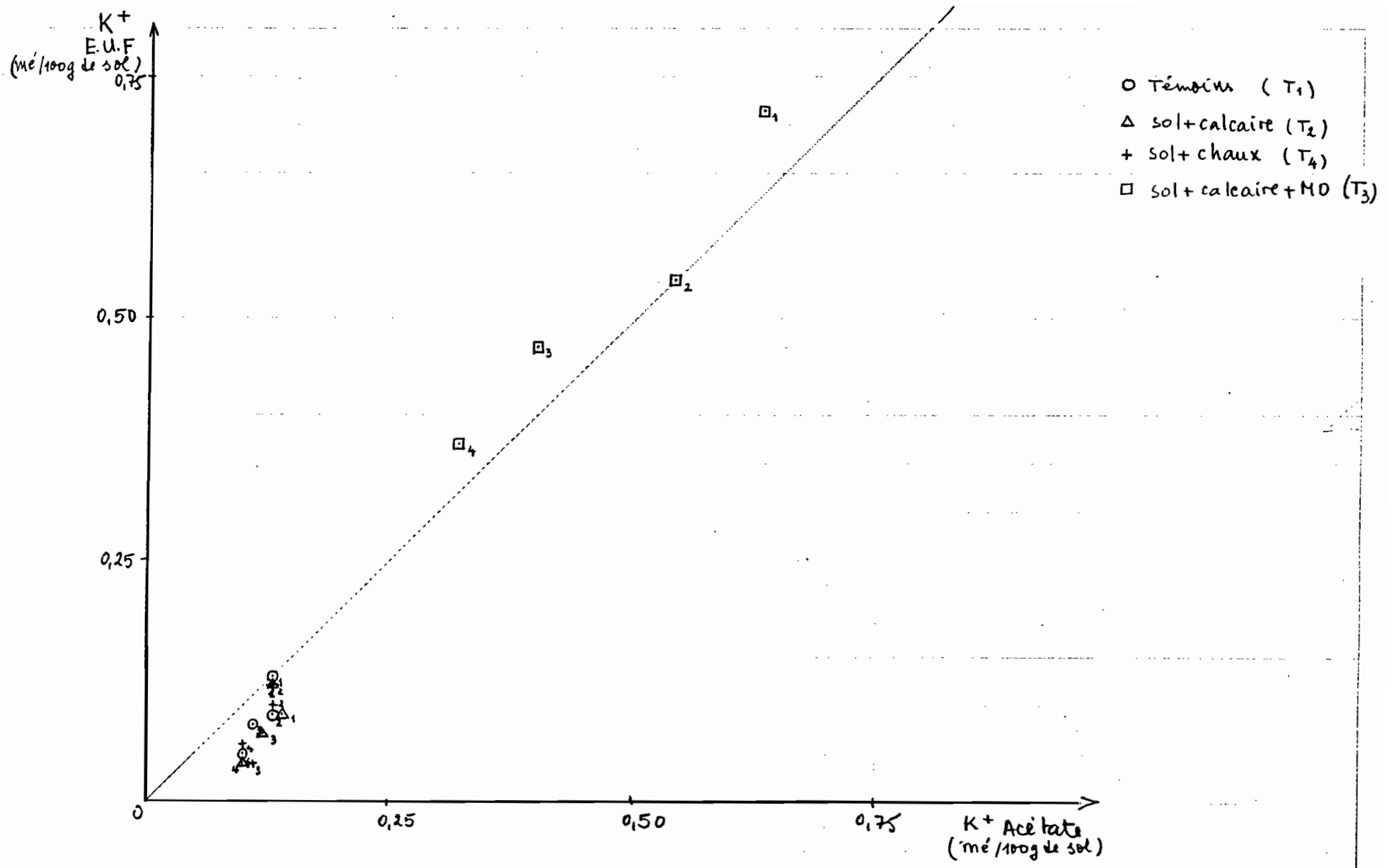


Figure 20: K^+ ECHANGEABLE : COMPARAISON K^+ sur EXTRAITS E.U.F et K^+ sur EXTRAITS ACETATE.

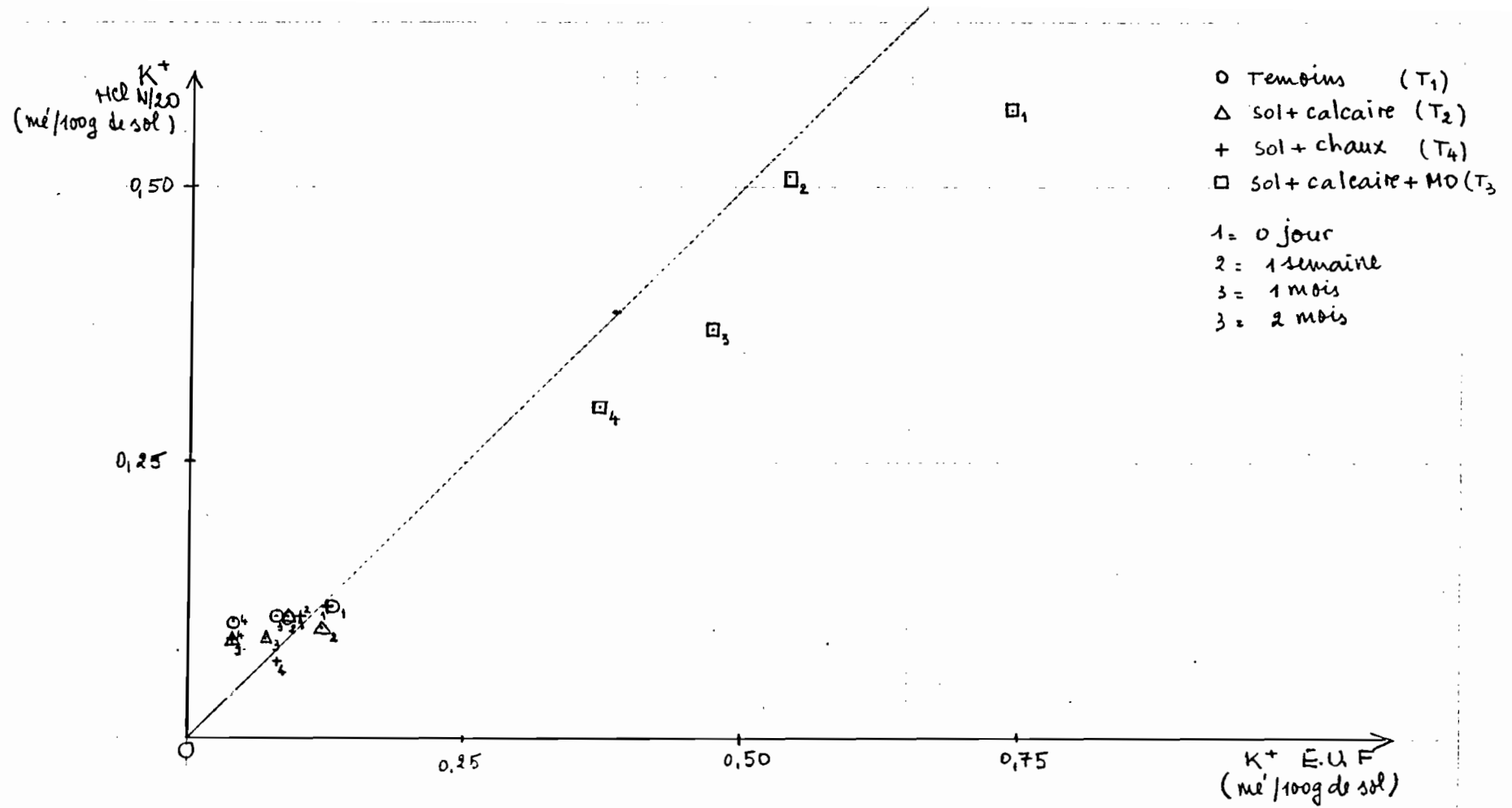


Figure 21: K^+ ECHANGEABLE : COMPARAISON K^+ sur EXTRAITS HCl N/20 ET K^+ sur EXTRAITS E.U.F

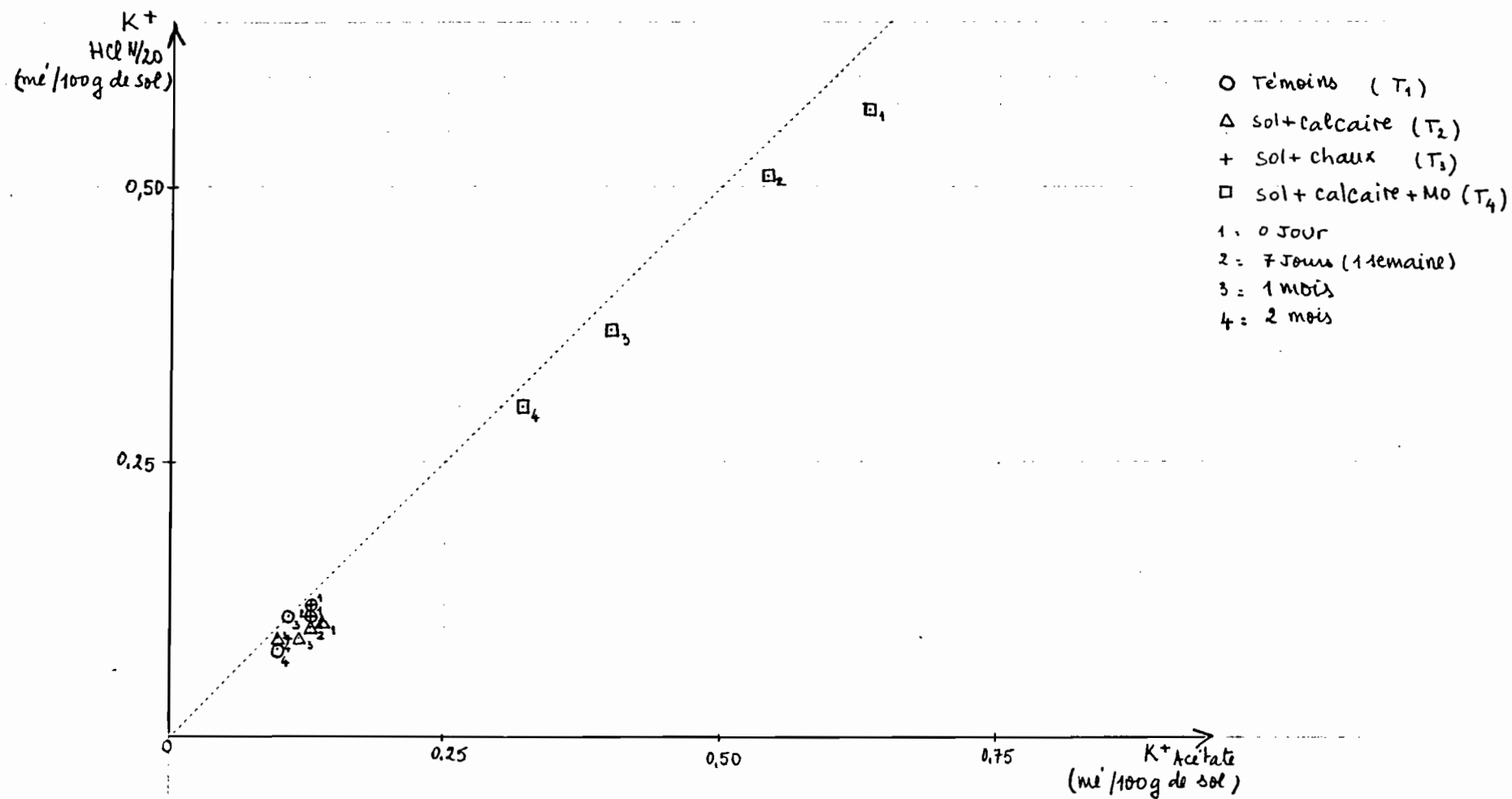


Figure 22: K^+ ECHANGEABLE: COMPARAISON K^+ sur EXTRAITS HCl N/20 et K^+ sur EXTRAITS Acétate

mêmes. La chaux réagit très vite dès le départ alors que le calcaire réagit plus tard mais avec un effet qui dure assez longtemps par rapport à la chaux. La matière organique augmente l'action du calcaire dans la saturation du complexe absorbant. En fin de compte, au bout des deux mois l'effet des trois traitements n'apparaît pas très différent.

b). Le Potassium

Le cas du potassium est relativement simple puisque les amendements calcaïques ne contiennent pratiquement pas de potassium, ni ce n'est à l'état des traces (tableau 2). De ce fait le dosage du potassium avec les trois méthodes (tableau 24, fig. 19, 20, 21, 22) donne des résultats bien corrélés très voisins pour Hcl N/20 et l'acétate; E.U.F fournit des résultats régulièrement plus élevés sur les échantillons de T₃ (M.O.).

Contrairement à Ca+Mg échangeable, les gains de K⁺ échangeable ne s'observent surtout que dans les traitements T₃ où il y a la matière organique (fig. 19). Pour les autres traitements (T₂, T₄) il n'y a pas de différence significative par rapport aux témoins (T₁). On note une légère diminution du K échangeable au bout de 60 jours pour les traitements non enrichis en matière végétale mais cette diminution est plus sensible avec les résultats de l'EUF. La diminution a été régulière et importante en T₃: de l'ordre de 50% de K échangeable initial.

Les pertes de potassium sont relativement importantes dans les percolats (cf tableau 9) et la vitesse de lixiviation est plus rapide que pour les autres éléments. Ce départ de K en solution entraîne une baisse de K⁺ dans l'échangeable.

Comme pour le potassium échangeable, les pertes les plus importantes sont dans T₃, on peut penser que ce potassium lixivié serait, d'une part, celui de la matière organique car il est l'élément le plus important de celle-ci (0.50 me/100g de sol) pour ce qui est des bases (Ca, Mg, K);

Traitements	Temps	K non échangeable et K organique	K échangeable	K des pertes dans les percolats
T ₁ : TEMOINS	état initial	98,5 %	1,5 %	
	2 mois	97,7 %	1,1 %	1,1 %
T ₂ : SOL + CALCAIRE	état initial	98,5 %	1,5 %	
	2 mois	97,6 %	1,3 %	1,1 %
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	état initial	98,6 % *	1,4 %	
	2 mois	84,7 %	4,0 %	11,3 %
T ₄ : SOL + CHAUX	état initial	98,5 %	1,5 %	
	2 mois	97,7 %	1,1 %	1,1 %

* dont 6,7 % de K provenant de la matière organique.

Tableau 24 bis: Répartition du potassium dans le sol, en % de l'analyse totale du sol, des amendements et de la matière organique.

Tableau 25 : Capacité d'échange cationique (T) des sols
(en $\text{me}/100\text{g}$ de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	8,75	8,13	9,13	9,38
T ₂ : SOL + CALCAIRE	8,13	8,13	9,88	8,25
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	7,95	8,95	9,50	8,88
T ₄ : SOL + CHAUX	7,75	8,75	9,13	8,63

Tableau 26 : Somme des bases échangeables (S) des sols
(en $\text{me}/100\text{g}$ de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	1,78	1,77	1,76	1,67
T ₂ : SOL + CALCAIRE	4,24	4,22	4,82	4,63
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	4,85	4,88	4,97	4,98
T ₄ : SOL + CHAUX	5,29	5,28	4,75	4,65

Tableau 27 : Taux de saturation (S/T) des sols

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	20,3	21,8	19,3	17,8
T ₂ : SOL + CALCAIRE	52,2	51,9	48,8	56,1
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	61	54,5	52,3	56,1
T ₄ : SOL + CHAUX	68,3	60,3	52,0	53,9

d'autre part ce potassium lixivié dans T_3 pourrait provenir de la partie minérale puisque la répartition K dans le sol (tableau 24 bis) nous montre que dans T_3 , à 2 mois, il y a une baisse considérable du pourcentage de K dans la partie non échangeable. Ainsi une partie du potassium pourrait donc provenir des argiles micacées qui sont des ions-titnants secondaires de ce sol.

Le calcaire seul ou la chaux ne semblent pas avoir un effet sur le potassium échangeable du sol ; cela est dû peut-être à leurs très faibles teneurs en cet élément.

4. la Capacité d'échange et le taux de saturation

La capacité d'échange (T) varie très peu selon les traitements et par rapport aux témoins (tableau 25).

Les bases échangeables (S) restent stables dans les témoins (T_1) ; elles sont toujours beaucoup plus importantes dans les autres traitements et cela dès le départ. (tableau 26).

À 0 jour, la somme des bases échangeables (S) ainsi que S/T augmentent en passant de T_2 à T_3 puis à T_4 . Ensuite les valeurs ont tendance à croître avec le temps pour T_2 , à diminuer pour T_4 et restent stables pour T_3 .

En fin de compte, au bout de 2 mois, les traitements T_2, T_3 et T_4 sont très proches et se trouvent à des valeurs nettement plus fortes que pour le sol témoin (saturation de l'ordre de 55% au lieu de 20% dans T_1) (cf tabl. 27).

Ces résultats concordent bien avec les variations du pH qui ont été vues au paragraphe B₁.

En résumé, la saturation du complexe absorbant augmente fortement avec les trois traitements T_2, T_3 et T_4 (tableau 27). Comme pour les pH ou les bases échangeables, l'effet de la chaux est rapide et immédiat ; celui du calcaire est plus progressif et se trouve activé par la présence de la matière végétale fraîche.

5. l'Aluminium échangeable (tableau 28)

On remarque ici l'action des amendements calcaïques sur la réduction de l'Aluminium échangeable

Tableau 28 : Tenueurs d'Aluminium échangeable dans les sols (en $\mu\text{e}/100\text{g}$ de sol)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	1,08	1,23	1,35	1,13
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,02	0,03	0,06	0,03
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,04	0,05	0,05	0,03
T ₄ : SOL + CHAUX	0,03	0,04	0,04	0,02

Tableau 29 : Tenueurs de Manganèse échangeable dans les sols (ppm)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	39	27	25	51
T ₂ : SOL + CALCAIRE	10	32	18	67
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	64	115	193	136
T ₄ : SOL + CHAUX	15	32	53	82

Tableau 30 : Tenueurs de Manganèse facilement réductible dans les sols (en ppm)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	545	527	462	416
T ₂ : SOL + CALCAIRE	509	533	449	421
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	492	418	308	312
T ₄ : SOL + CHAUX	520	456	396	371

Comme on l'a vu sur l'acidité du sol. Dans les trois traitements T_2 , T_3 et T_4 , on a des teneurs en Al^{3+} échangeable très faibles par rapport aux témoins. Dès 0 jour ces teneurs en Al^{3+} sont en rapport inverse avec le pH du sol ; si le pH est bas (comme dans T_1) on a de teneurs en Al^{3+} élevées et si par contre les pH sont élevés ($pH \geq 5,8$), on a de faibles teneurs en Al^{3+} . Dans chaque traitement, l' Al échangeable ne varie pas significativement en fonction du temps (tableau 28).

6. le Manganèse (tableaux 29 et 30) :

Le manganèse échangeable (tabl. 29) diminue par rapport à T_1 dès 0 jour dans les deux traitements T_2 et T_4 où l'élévation du pH a été importante. Malgré l'élévation de pH qui a été également sensible pour le traitement T_3 (matière organique), le Mn échangeable est le plus élevé pour ce traitement et il le restera ensuite en augmentant avec le temps. L'apport de Mn au sol dans la paille de maïs représente 0,6 ppm (tableau 3) et cette quantité est bien inférieure à l'élévation de Mn échangeable dans le traitement T_3 . Cette élévation doit résulter de la modification des conditions d'oxydo-réduction sous l'effet de la minéralisation de la matière végétale et de la forte production de CO_2 dans les colonnes qui recevaient deux apports d'eau par semaine.

Pour les deux traitements T_2 et T_4 les valeurs de Mn échangeable retrouvent dès la 1^{ère} semaine le niveau de celles du témoin (T_1). Pour les trois traitements T_1 , T_2 et T_4 , le Mn échangeable se trouve également supérieur au bout de 2 mois, mais l'augmentation a été plus nette pour T_4 (chaux) que pour T_3 (calcaire) qui reste proche du témoin (T_1).

S'agissant du Mn facilement réductible (tableau 30) on observe, pour tous les traitements, une diminution des valeurs avec le temps et l'évolution se fait en sens inverse de ce que l'on a constaté pour le Mn échangeable ; Mais

les différents traitements s'ordonnent de la même façon : T₃ (M.O.) enregistre la plus forte diminution, celle de T₄ (chaux) est relativement moins importante, enfin T₂ (calcaire) ne montre pas de différence significative par rapport à T₁ (témoins).

En résumé, la diminution de Mn facilement réductible correspond à une augmentation de Mn échangeable du sol et aussi de Mn lixivie dans les percolats (cf paragraphe A7). La matière organique (T₃) et dans la moindre mesure la chaux (T₄) favorisent une telle évolution.

7. le phosphore (tableau 31)

Tableau 31: le phosphore total et le phosphore assimilable dans le sol (en ‰)

Traitements	P ₂ O ₅ total ‰		P ₂ O ₅ assimilable ‰	
	0 JOUR	60 JOURS	0 JOUR	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	0,733	0,756	0,045	0,058
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,756	0,756	0,048	0,058
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,801	0,795	0,065	0,073
T ₄ : SOL + CHAUX	0,750	0,761	0,053	0,058

Le phosphore total ne varie presque pas dans les sols de 0 à 60 jours. Les amendements calciques n'ont apporté que 0,00075 ‰ (soit 0,75 ppm) et cette valeur est très faible pour avoir un effet important avec le traitement T₂, T₃ et T₄. Seul le traitement T₃ a un peu plus de phosphore total et celui-ci doit provenir de la matière végétale qui a été apportée (0,041 ‰ de P₂O₅) dans le sol: ce complément se retrouve en totalité au bout des 2 mois.

Quant au phosphore assimilable (tabl. 31), on observe une légère augmentation à 60 jours et les teneurs

Tableau 32 : Carbone organique dans le sol
(en ‰)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	13,67	13,76	13,65	13,77
T ₂ : SOL + CALCAIRE	13,41	13,58	13,5	13,67
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	16,16	15,79	15,41	15,21
T ₄ : SOL + CHAUX	13,86	13,60	13,55	13,10

Tableau 33 : Azote organique dans le sol (‰)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	1,16	1,09	1,06	1,05
T ₂ : SOL + CALCAIRE	1,14	1,09	1,10	1,06
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	1,38	1,21	1,24	1,18
T ₄ : SOL + CHAUX	1,09	1,05	1,03	1,04

Tableau 34 : Rapports C/N

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	11,8	12,7	12,9	13,1
T ₂ : SOL + CALCAIRE	11,8	13,1	12,4	12,7
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	11,8	13,1	12,4	12,7
T ₄ : SOL + CHAUX	12,7	13,0	13,2	12,6

restent toujours élevés dans le traitement T₃ où la matière organique doit jouer un rôle dans la libération du phosphore puisque même dans les percolats, le P₂O₅ hydrosoluble est prédominant dans les percolats de T₃.

A l'exception du cas de la matière organique (T₃), les teneurs en P₂O₅ assimilable sont peu variables suivant les traitements ; ces résultats montrent bien la faible mobilité du phosphore.

8- la matière organique (tableaux 32, 33 et 34).

On ne distingue pas de variations nettes des teneurs en carbone ou en Azote dans différents traitements, sauf dans T₃ où il y a un peu plus de carbone et d'Azote liés probablement à la matière végétale apportée dans le sol.

Pour le carbone (tabl. 32), on a une diminution du taux de C. organique dans T₃ en fonction du temps : 1‰ au bout de 2 mois. Au bout de ce temps T₄ présente également une légère diminution, mais guère significative par rapport aux deux traitements T₁ et T₂. Cette évolution pourrait être, en T₄, en relation avec une minéralisation plus active mais il aurait fallu confirmer ce résultat en continuant l'étude. Rappelons que le carbone hydrosoluble (organique et bicarbonates) a également été sensiblement supérieur dans T₄ par rapport à T₂.

Pour l'Azote (tabl. 33), la faible décroissance des teneurs en fonction du temps, qui s'observe pour tous les traitements, n'est guère significative ; excepté pour le traitement T₃ où la baisse est de 0,20‰ au bout de 2 mois, résultant de la décomposition de la paille de maïs. Dans tous les cas les diminutions enregistrées sont nettement plus importantes que les pertes mesurées dans les percolats (tableau 17), ce qui laisse penser que des pertes par voie gazeuse ont pu avoir lieu.

9- les Agrégats stables et éléments dispersés, dans l'eau

Les amendements calciques n'interviennent pas de façon significative dans l'amélioration de la structure du sol sauf dans le cas de la matière organique où l'on remarque un effet positif de la MO qui augmente le taux d'agréats stables à l'eau et diminue les éléments fins dispersés, par rapport aux traitements; cet effet est le plus net à 30 jours (tableaux 35 et 36).

Tableau 35 : Taux d'agréats stables à l'eau, des échantillons de sol (%)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	43,6	46,1	46	41,3
T ₂ : SOL + CALCAIRE	42,3	44,4	43,5	42,4
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	46,8	48,7	49	45
T ₄ : SOL + CHAUX	43,9	44,9	43,3	43,1

Tableau 36 : Taux d'éléments fins (Argile + limons) dispersés dans l'eau. (%)

Traitement \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	10,2	8,6	8,1	8,1
T ₂ : SOL + CALCAIRE	9,4	9,4	8,6	8,9
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	9,1	8,6	7,3	9,1
T ₄ : SOL + CHAUX	9,9	8,3	8,6	9,1

IV - CONCLUSIONS

1. Effets des différents traitements

Au bout de deux mois d'expérimentation on a pu quand même noter les effets qu'ont apportés les différents traitements. Dans l'ensemble, les amendements calciques et la matière végétale apportés, ont permis de modifier les caractéristiques du sol qu'il est souhaitable d'améliorer pour des raisons agronomiques : correction de l'acidité et augmentation du stock des bases échangeables du sol.

Du fait de la présence des carbonates dans le sol, l'étude de l'effet des amendements calciques sur les bases échangeables du sol pose un problème méthodologique auquel nous avons tenté d'apporter une solution en comparant trois méthodes différentes.

Les amendements calciques utilisés selon les trois traitements, comparés, agissent dans le sol avec des vitesses d'action et des effets qui ne sont pas identiques.

Les témoins (T₁) n'ont pas beaucoup varié au cours des deux mois ni ce n'est qu'ils ont toujours conservé des valeurs faibles pour le pH, les bases échangeables, et les éléments lixiviés et des valeurs très élevées en Aluminium échangeable dans le sol. Les teneurs en Manganèse échangeable sont restées du même ordre de grandeur tandis que celles du Mn facilement réductible ont diminué avec le temps.

Le Calcaire broyé (T₂) a réagi progressivement au cours du temps. Par rapport au témoin, le Calcaire élève le pH de 0,9 unité pH et en fonction du temps ce pH croît jusqu'à stabilisation vers le 2^e mois. La somme des bases échangeables augmente aussi progressivement avec le temps. L'exportation en solution de Fe, Al et Mn est sensiblement plus faible que celle de témoins. Pour Al ceci est bien normal puisque la quantité d'Al échangeable a fortement diminué dans le sol par l'augmentation du pH. Dans le sol, le Calcaire induit aussi une diminution immédiate de Mn échangeable mais celui-ci reprend ensuite

des valeurs proches de celle du sol non amendé. Le Mn réductible qui diminue aussi avec le temps, reste du même ordre de grandeur que dans le sol témoin.

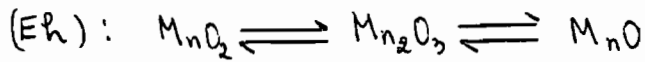
La matière végétale, associée au calcaire (T₃), active l'effet de celui-ci en favorisant sa solubilisation, l'exportation des bases et des cations métalliques (Mn et Fe) en solution et en saturant le complexe absorbant. Avec la matière végétale, l'augmentation du pH et de bases échangeables, qui restent stables par la suite, est plus nette dès le départ ; il en est de même avec les autres éléments, excepté le manganèse facilement réductible qui diminue plus fortement avec le temps. Dans ce traitement, on obtient les teneurs les plus élevées pour tous les éléments lixiviés (bases, P₂O₅, Mn, Fe, Carbone minéral et organique, Azote total) dans les percolats, dépassant parfois les quantités apportées comme dans le cas du potassium. Ces quantités de potassium lixiviés dans les solutions pourraient provenir soit des constituants argileux micacés secondaires existants dans ces sols de la vallée du Niari, soit de la minéralisation de la matière organique préexistante dans le sol. En dehors du potassium on a aussi de grandes quantités de Fer et de Mn dans ces percolats des sols enrichis en matière végétale et calcaire, mais ces éléments doivent être liés aux phénomènes de complexation ou chélation par la matière organique (BOYER, 1982). On a constaté que les lixiviats étaient fortement colorés par la matière organique avec une élévation progressive du pH, au cours des quatre premières semaines, alors que le milieu étant tamponné ne permettait pas de doser les bicarbonates. La présence de bicarbonates en solution a été la plus importante avec ce traitement contenant la paille de maïs. Dans ce traitement, avec matière végétale, l'Aluminium échangeable très faible dans le sol, est légèrement élevé dans les percolats par rapport au calcaire seul mais cet Aluminium serait complexé par les acides humiques ou les acides fulviques, qui forment des complexes organo-aluminiques.

mobiles dans les solutions du sol (BOYER, 1982 ; SEGALLEN, 1974).

La chaux (T₄) réagit le plus vite dans le sol (dès le départ) et une partie s'est rapidement carbonatée (27%). On remarque son effet sur l'augmentation du pH, qui dès le premier jour augmente de 1,5 unité par rapport au témoin. Le pH reste stable et élevé dans ce traitement jusqu'à deux mois. Les bases échangeables, qui s'élèvent, le plus rapidement au départ, diminuent ensuite progressivement pour se retrouver après 2 mois à un niveau comparable à celui des deux autres traitements amendés. Cette augmentation du pH dans le sol a certainement favorisé la minéralisation de la matière organique et on a dans les percolats de ce traitement (chaux) davantage de bicarbonates, de bases (Ca, Mg, K), de manganèse et de Fer que dans le traitement avec calcaire seul (T₁) mais pas autant que dans le traitement avec calcaire + matière végétale (T₃).

Comme le calcaire, la chaux réduit rapidement l'aluminium échangeable ainsi que le manganèse échangeable. Sous certains aspects cependant elle agit dans le même sens que la matière végétale + calcaire mais avec des effets moins marqués : composition des lixivats comme nous venons de l'indiquer, augmentation du Mn échangeable et diminution du Mn facilement réductible.

Pour le cas du Manganèse dans les sols, l'effet des amendements n'a pas été net. On note une baisse du Mn facilement réductible lorsque le Mn échangeable augmente. Au début de l'expérimentation, le Mn échangeable diminue avec l'augmentation du pH; mais au cours du temps, malgré les pH élevés, le taux en Mn échangeable reste élevé. Il y a une légère baisse au cours du temps du Mn facilement réductible mais les teneurs sont toujours grandes. Cette évolution inverse des deux formes de Mn est plus nette avec le calcaire + matière végétale, et relativement moins avec la chaux. Nous savons que l'existence du Mn dans le sol dépend des conditions du pH mais aussi des conditions d'oxydo-réduction



logiquement le Mn diminue avec l'augmentation du pH mais quand on est en présence d'une hydromorphie accidentelle ou permanente, les teneurs de Mn peuvent être élevées (BOYER, 1982). Ainsi on suppose que le problème du Mn dans nos colonnes doit être lié à une baisse du potentiel d'oxydo-réduction provoquée d'une part par la production importante de CO_2 provenant de la biodégradation de la matière organique du sol ou celle qui a été apportée (davantage pour T3 qu'pour T4), d'autre part cette réduction de Mn peut-être due au fait que nos colonnes de terre, étant soumises à un régime de percolation bi-hebdomadaire, pouvaient développer des conditions d'hydromorphie temporaire et favoriser ainsi, au moins localement, une baisse de Eh entraînant la réduction du Manganèse.

2- Conséquences agronomiques

Malgré la durée, très courte, de l'étude, on peut tirer, de nos résultats, quelques conclusions sur le plan agronomique. On voit que sur ce sol étudié les doses d'amendements apportés* favorisent une très bonne augmentation du pH (d'une unité), ce qui est favorable pour les plantes cultivées. Cette élévation du pH du sol entraîne une baisse considérable de Al échangeable dans les sols. On remarque que dans les sols témoins, les teneurs en Al^{3+} échangeable dépassent 1.1 mé/100g de sol, limite au delà de laquelle il ya toxicité pour beaucoup de plantes dans les sols de Landes (SEGALLEN, 1974).

Le rapport de KAMPRATH, $\frac{Al \times 100}{Al+S}$ (tableau 37) évalue les risques de toxicité de Al échangeable sur les végétaux. Au delà de 60% on a une toxicité qui se manifeste sur toutes les plantes mais pour les légumineuses,

* Equivalent à 3.6 t/ha de calcaire broyé ; à 1.9 t/ha de chaux et à 12 t/ha de matière sèche de paille de maïs.

Tableau 37 : Rapport de KAMPRATH : $\frac{Al \times 100}{Al+S}$

Traitements \ Temps	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	35	41	43,4	40,4
T ₂ : SOL + CALCAIRE	0,5	0,7	1,2	0,6
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MO	0,8	1,0	1,0	0,6
T ₄ : SOL + CHAUX	0,6	0,8	0,8	0,4

elles sont affectées lorsque le rapport est supérieur à 30% (DABIN, 1984). On remarque que les témoins ont des rapports qui sont de l'ordre de 40% alors que les sols amendés donnent des rapports voisins de 0,8%. Dans les sols témoins, il peut donc y avoir une toxicité Aluminium pour certaines plantes. Ainsi les amendements apportés contribuent efficacement à la réduction de l'acidité du sol et de Al échangeable.

S'agissant de l'équilibre entre les bases échangeables, on constate que le rapport $\frac{K \times 100}{Ca+Mg}$ dans le sol

(tableau 38) est très élevé dans le traitement à matière végétale et faible pour le calcaire et la chaux, les témoins ayant une valeur intermédiaire. On remarque, dans tous les traitements, que ce rapport diminue au cours du temps, ceci montre ainsi le phénomène grave de lessivage des bases, en particulier du potassium. Pour ce rapport, le seuil de carence en K est de 2% (DABIN, 1984); Dans les traitements avec calcaire (T₂) et chaux (T₄) on est bien au voisinage de cette valeur. Ceci indique qu'il faudrait aussi penser à apporter une fertilisation potassique avec les amendements calciques.

Si les valeurs du rapport paraissent correctes avec le sol témoin (15%) les teneurs en Al échangeable ($\frac{0,12}{42 \text{ mg/100g}}$) sont de toute façon très proches du seuil de carence absolue qui est de l'ordre de 0,1 mg/100g de sol et tout enrichissement

en Ca+Mg du sol risque de conduire à une carence en K. On note ici tout l'intérêt de la paille de maïs qui apporte un complément de K et permet d'assurer un équilibre satisfaisant entre les bases échangeables. Il faut cependant tenir compte du fait que la matière végétale apportée pour cette expérimentation est supérieure d'environ le double aux restitutions d'une culture de maïs.

Le Manganèse échangeable présente des teneurs relativement élevées dans les échantillons incubés mais ces teneurs doivent être considérées par rapport aux teneurs du Mn du sol témoin et à la diminution du Mn réductible. On ne trouve pas dans la littérature des données précises sur les seuils de toxicité ou de carence en Mn et l'on admet que ces phénomènes dépendent avant tout de la valeur du pH. On sait que ces sols du Niari sont relativement riches en Manganèse (FRANQUIN, 1958) mais la valeur de 1220 ppm, dans le cas du sol étudié n'est pas une valeur anormale pour les sols ferallitiques acides où des teneurs en Mn total de 500 à 2000 ppm sont fréquentes (DABIN, 198). Ainsi les valeurs de Mn actif (échangeable + réductible) qu'on retrouve dans les sols amendés, avec des pH ≥ 6 , peuvent certainement convenir pour les plantes. On a d'ailleurs constaté dans les sols du Niari qu'il n'y avait pas de toxicité manganésique si le pH est supérieur à 5,5 (FRANQUIN, 1958 et G. MARTIN, 1962).

Tableau 38 : Rapport $\frac{K}{Ca+Mg} \times 100$

Traitements	Temps			
	0 JOUR	7 JOURS	30 JOURS	60 JOURS
T ₁ : TEMOINS	7,2	6,6	6,7	5,0
T ₂ : SOL + CALCAIRE	3,0	2,4	1,9	2,0
T ₃ : SOL + CALCAIRE + MD	13,3	11,7	8,0	6,4
T ₄ : SOL + CHAUX	2,3	2,1	1,9	1,8

Quant au problème de l'utilisation des amendements calcaires on remarque que la chaux réagit très vite au départ ; le calcaire a plutôt un effet plus progressif et cet effet est activé par l'apport de la matière végétale. Au bout de 2 mois il n'y a pas de différence bien significative entre les 3 traitements pour le pH, les bases échangeables et l'Aluminium échangeable.

Si l'on a besoin d'une action rapide, par exemple pour la réussite d'un semis urgent on pourra préciser l'utilisation de la chaux à des doses modérées (de façon à éviter une remontée de pH trop brutale). Dans des conditions d'utilisation régulière, le calcaire peut être très satisfaisant et l'on pourrait l'appliquer quelques temps (1 mois) avant l'installation de la culture. On peut également tenter d'accélérer l'action avec l'enfouissement d'un engrais vert par exemple.

La lixiviation des bases est très importante pour le traitement avec matière végétale ; cette lixiviation au-dessous de l'horizon superficiel (11 cm) serait bénéfique pour les horizons sous-jacents, en particulier pour l'enrichissement en bases et l'élevation des pH dans ces sols du Niari où l'on sait que l'acidité ne diminue pas avec la profondeur. Ainsi le traitement calcaire + matière végétale (T₃) et dans une moindre mesure la chaux (T₄) seraient les plus favorables pour les plantes dont le racine s'enfonce en profondeur.

Les bases échangeables et particulièrement le potassium sont assez fortement lixiviés dans ce sol ; et outre la fumure NPK classique il importe donc de pratiquer des amendements réguliers afin de maintenir le pH du sol et la saturation du complexe absorbant à un niveau satisfaisant.

Pour un effet durable à long terme on pourrait essayer d'augmenter la granulométrie du calcaire broyé

BIBLIOGRAPHIE

- AMEDEE Gaston, 1974 - Liming of highly weathered soils of the humid tropics. (Thèse).
- AUBERT (G.), BRUGRIERE (J.M.), OLLAGNIER (H.), PREVOT (P.), 1955
Dégradation du sol et toxicité manganique.
Oligineux, 10^e Année n°4 PP. 239-243
- BOISSEZON (P. de) et MARTIN (G.), 1965 - Quinze ans de travaux et de recherches dans le pays du Niari (1949-1964).
Les sols de la Vallée du Niari : Etude Pédologique et Agropédologique.
- BOISSEZON (P. de), MOUREAUX (C.), BOQUEL (G.) et BACHELIER (G.), 1973 - Tome III : la matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques.
Paris, ORSTOM : série Initiations - Documents - Techniques n°21
- BOYER (Jean), 1970 - Essai de synthèse de connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale Francophone.
- BOYER (Jean), 1978 : le Calcium et le Magnesium dans les sols des régions tropicales humides et sub-humides.
Paris - ORSTOM, série : Initiations - Documents - Techniques n°35
- BOYER (Jean), 1982 - Les Sols Ferrallitiques Tome X
Facteurs de fertilité et utilisation des sols -
ORSTOM série Initiations - Documents - Techniques n°52.
- BOULDIN (David R.), RITCHEY (K.D.) and LOBATO (Edson), 1985
Management of soil acidity.
- BRUGRIERE (J.M.), 1953 - Etude Pédologique de la vallée du Niari
tomes I et II ORSTOM - IEC

- COMBEAU (André), 1977 - Erosion et conservation de sols (plus particulièrement en zone tropicale).
Paris, ORSTOM.
- COMBEAU (A.), MONNIER (G.), 1961 - Méthode d'étude de la stabilité structurale. Application aux sols tropicaux.
Sols Africains, vol. VI n°1.
- DABIN (B.) - Facteurs de fertilité chimique et utilisation des sols tropicaux.
(Cours de B. DABIN).
- DELVIGNE (J.), 1965 - Pedogénèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferralitique.
ORSTOM, Dunod Paris (Mémoires ORSTOM n°13).
- DEMOLON (Albert), 1952 - Principes d'Agronomie. Tome I: Dynamique du sol. 5^e ed. Paris, Dunod.
- DOMMERGUES (Yvon) et MANGENOT (François), 1970 - Ecologie microbienne du sol. Paris, Masson et C^{ie}
- GIREFFE (P.), JAMET (R.), 1982 - Essai de fertilisation de la culture de manioc par des sédiments marins glauconieux du Congo.
Cahiers ORSTOM, série Pédiologique, XIX, 3; 283-292.
- HENIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.) - l'Etat physique du sol et ses conséquences agronomiques.
2^e ed. Paris, Masson et C^{ie}
- HENIN (S.), MONNIER (G.) et al. - Le Profil Culturel :
Principes de physique du sol.
- IBELL (R.F.) - Pedological Research in relation to soil fertility.
(Australia).

- LEDIN (S.), 1981 - physical and micromorphological studies of the effects of lime on a clay soil.
(Thèse Uppsala.
- LEE CHAI HAI, 1985 - The correction of Acidity on sedimentary soils used to grow Cocoa in Sabah.
in planter, Kuala Lumpur, 61, n° 709 154-161.
- MARTIN (D.), 1975 - Complexe agro-industriel de Mantsoumba (Etude pédologique de la Ferme de Mantsoumba).
ORSTOM
- MARTIN (G.), 1961 - Essai d'appréciation des pertes en calcium et en Magnésium après un apport d'amendement calcaire dans les sols de la Vallée du Niari.
ORSTOM - I.E.C
- MARTIN (G.), 1962 - Etude d'un essai d'apport de matières organiques à la station IRCT de la N'Kenkó (Vallée du Niari).
ORSTOM, Inst. Recherches Sci. Congo, Brazzaville.
- MARTIN (G.), 1963 - Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la Vallée du Niari.
Cah. ORSTOM, série Pédol. n° 2 PP: 8-14.
- MARTIN (G.), 1958 - Essai de bilan de quatre années d'études pédologiques dans la vallée du Niari. ORSTOM
- MEHLICH (A.), 1948 - Determination of cation- and Anion-exchange properties of soils.
soil science Vol. 66. Dec 1948, 6.
- MONNIER (G.), 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.
in : Annales Agronomiques, XVI 4 PP. 327-400
5 PP. 471-534

PEARSON (R.W.) and ADAMS (Fred) - Soil acidity and liming
American Society of Agronomy Publisher
Madison, Wisconsin, USA, 1967.

PRADHAN (N.K.), MISRA (C.) and NIELSER (D.R.), 1985 - Leaching
Behaviour of calcium in a lime Amended Acid soil.
Journal Indian Soc. Soil Sci. Vol 33: 110-17, 1985

RATAN SINGH and D.V. SINGH, 1985 - Effectiveness of liming
materials, their doses and Fineness on some physicochemi-
cal Properties of acidic soil.
J. Indian Soc. Soil Sci. Vol 33: 218-20, 1985.

RIMMER (D.L.) and GREFLAND (D.S.), 1976 - Effects of calcium Carbo-
nate int the swelling behaviour of a soil acidity.
J. of soil science, 27, 129-139.

SANCHEZ (Pedro A.) - Properties and management of soils
in the tropics.

John Wiley and sons, 1976

SEGALLEN (P.), 1973 - L'Aluminium dans les sols.

ORSTOM, serie: Initiations - Doc. Techniques n°22 Paris.

SHOEMAKER (H.E), Mc LEAN (E.O.) and PRATT (P.F.), 1961 - Buffer
Methods for determining lime requirement of soils with
Appreciable amounts of extractable Aluminium.
Soil science society Proceeding, 1961.