

Contribution à l'étude du comportement des sols très calcaires
du LIBAN-SUD sous l'effet de l'irrigation.

Premiers résultats d'études effectuées en lysimètres
sur la dynamique du calcium. juillet 1972

F. GRAS

Collaboration Technique de M. L. FIKANI, M. ISMAIL et E. KADARO.

PLAN

Introduction

- 1 - Objectifs de l'étude.
- 2 - Rappel de la théorie simplifiée concernant le système $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$
- 3 - Le matériel d'étude
 - 3-1 données morphologiques
 - 3-2 données analytiques
- 4 - Le dispositif expérimental
- 5 - Méthodes d'analyses
 - 5-1 prélèvement et dosage du gaz carbonique
 - 5-2 analyses des eaux
- 6 - Premiers résultats
 - 6-1 teneur en CO_2 de l'atmosphère des lysimètres
 - 6-2 variations saisonnières de la concentration en calcium des eaux de drainage.
 - 6-3 relations entre la concentration en calcium des eaux de drainage et la teneur en CO_2 de l'atmosphère du sol.
 - 6-3-1 étude comparative pour les profondeurs de 40 et 60cm
 - 6-3-2 corrélations partielles pour les mois pluvieux et pour la période d'irrigation.
 - 6-4 comparaison entre les teneurs en calcium observées et les solubilités théoriques.
 - 6-4-1 droites théoriques
 - 6-4-2 excès de calcium dans les eaux de drainage au cours de l'année.
 - 6-5 apports et pertes de calcium dans les lysimètres au cours de l'année.
- 7 - Conclusion.

Les sols très calcaires représentent une part non négligeable des sols cultivables du Liban. Ainsi sur le versant Ouest du Liban Sud (zone de SAIDA) l'enquête pédologique effectuée par la FAO (8) a révélé que sur une surface irrigable de 36.915 hectares, 16.770 hectares (soit 45%) étaient recouverts de sols très calcaires (20 à 30% de calcaire actif). Dans la Békaa et en particulier dans la plaine de EL KAA, elle aussi irrigable, les sols très calcaires sont assez bien représentés.

C'est pourquoi il est de la plus haute importance, avant que les programmes d'irrigation prévus pour ces zones ne soient appliqués, de savoir comment exploiter au mieux ces sols pour rentabiliser les coûteux travaux qui auront été entrepris et comment éviter les effets nocifs qui peuvent résulter d'une irrigation intensive.

Conscients de l'importance des problèmes agronomiques posés par la mise en valeur de ces sols les responsables des différents organismes concernés (Office du Litani, Institut de Recherche Agronomique du Liban) ont décidé la création, d'une station d'essais sur sols calcaires à Lébna près de Saïda. En outre sur les conseils d'experts, une requête est en cours auprès de la FAO pour obtenir l'aide de cet organisme. Un des points de cette requête concerne les activités de la station de Lébna et en particulier l'étude de l'utilisation et de l'évolution des sols calcaires.

1 - Objectifs de l'étude

L'utilisation des sols très calcaires se heurte en premier lieu au problème de la chlorose calcaire. Malgré les nombreux travaux qui ont pu être effectués sur cette maladie physiologique, on ignore encore bien de des choses sur ses causes exactes et sur ses mécanismes. Tout au plus peut on affirmer (3) qu'il s'agit d'une insuffisance de l'utilisation du fer provoquée par la réaction de la plante aux conditions du milieu. Cette réaction se manifesterait en particulier par des désordres des systèmes enzymatiques.

Les progrès à attendre dans la connaissance des mécanismes qui interviennent dans la chlorose calcaire et des moyens pour accroître la résistance des végétaux, ne pourront provenir que des études physiologiques. En particulier il semble que seules des expériences menées en pots de végétation ou sur des solutions, permettent de contrôler les conditions du milieu et apportent des indications sur les facteurs déterminant la chlorose pour différents végétaux.

De plus pour certaines plantes les symptômes extérieurs de chlorose (jaunissement internervaire des feuilles) peuvent ne pas être très visibles. Néanmoins les rendements sont inférieurs à ceux obtenus sur des sols non calcaires de la même région. Il est alors difficile de faire la part de l'excès de calcaire et des autres éléments du milieu conditionnant la production. Il peut être indispensable dans ce cas de confronter les résultats des essais d'irrigation, par exemple, avec ceux des analyses de terre.

On voit donc que seule une collaboration soutenue entre chercheurs de disciplines différentes peut aboutir à des résultats exploitables.

Dans ce contexte quelle peut-être la contribution du pédologue à ce genre de recherches ? Il peut tout d'abord intervenir en étudiant les mécanismes physico-chimiques qui règlent la dynamique du calcium et le pH dans les sols calcaires. Sur un autre plan sa collaboration avec l'agronome peut être utile pour tester l'influence des divers modes d'interventions agricoles sur l'évolution des sols calcaires, qu'ils s'agissent de l'apport de matière organique, de travaux culturaux ou de techniques d'irrigation. Enfin en tenant compte des résultats des essais agronomiques et des études physiologiques il peut établir une classification des différentes unités de sols calcaires suivant leur aptitude aux différentes cultures. C'est dans cette optique que nous avons entrepris nos travaux sur les sols calcaires du Liban. La présente étude concerne plus particulièrement le problème de la solubilisation du calcium dans un sol calcaire.

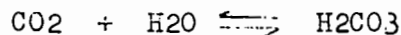
2 - Rappel de la théorie simplifiée concernant le système CaCO₃ - CO₂ - H₂O

Nous empruntons à l'exposé de Madame MUXART (4) à un colloque de karstologie et de spéléologie, la démonstration des lois régissant la solubilité du calcaire. Lorsque du carbonate de calcium solide se trouve en contact avec de l'eau pure en présence d'anhydride carbonique, il s'établit au bout d'un temps plus ou moins long un équilibre entre le CO₂ en phase gazeuse et les ions en solution. On peut établir des relations théoriques entre la pression partielle du CO₂, le pH et l'activité des ions. Pour simplifier la démonstration nous admettons en première approximation que les activités des ions sont égales à leurs concentrations, c'est à dire que les solutions sont suffisamment diluées.

Une partie de l'anhydride carbonique présent dans l'atmosphère est dissoute dans l'eau. La concentration de CO₂ dans l'eau : [CO₂] est fonction de la pression partielle du gaz : PCO₂ dans l'atmosphère au contact de la solution. Elle suit la loi de HENRY :

$PCO_2 = D [CO_2]$ où D est une constante qui ne dépend que de la température.

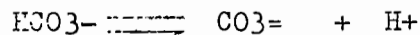
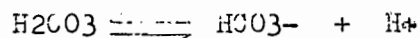
L'anhydride carbonique dissout s'hydrate en partie en acide carbonique suivant la réaction d'équilibre



La constante d'équilibre K du système est définie par l'expression :

$$K = \frac{[H_2CO_3]}{[CO_2]} \quad (1)$$

Comme tout acide faible, l'acide carbonique s'ionise partiellement dans l'eau suivant les deux réactions de dissociation suivantes :

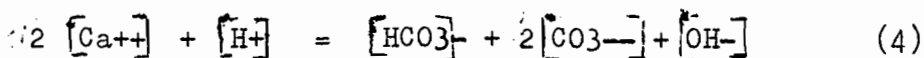


À ces deux réactions correspondent la constante de dissociation K₁ (constante de dissociation apparente qui s'exprime directement par rapport à la concentration de CO₂) et la constante de dissociation K₂

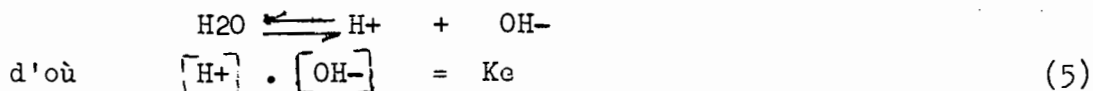
$$\frac{[HCO_3^-] \cdot [H^+]}{[CO_2]} = K_1 \quad (2)$$

$$\frac{[CO_3^{2-}] \cdot [H^+]}{[HCO_3^-]} = K_2 \quad (3)$$

Par ailleurs la condition de neutralité électrique de la solution impose que la somme des charges des cations sont égale à la somme des charges des anions. Ceci se traduit en concentration par la relation suivante :



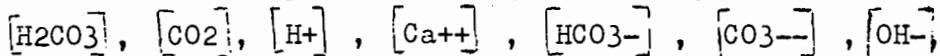
La concentration des ions H^+ et OH^- dans le milieu est conditionnée par la dissociation de l'eau



enfin la concentration en ions Ca^{++} et CO_3^{--} dans le milieu est limitée par le produit de solubilité de $CaCO_3$

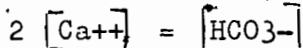


les constantes K , K_1 , K_2 , K_e et K_s ne dépendent que de la température. Il existe donc un système de 6 équations à 7 inconnues :

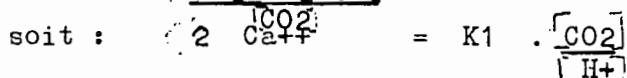
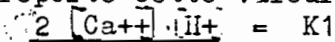


On peut se fixer une variable libre et calculer en fonction de celle-ci toutes les autres variables. Les relations les plus utilisées sont celles qui existent entre le pH : $\text{colog } [H^+]$, la concentration en calcium $[Ca^{++}]$ et la concentration en anhydride carbonique dans l'eau : $[CO_2]$. Nous nous contenterons d'établir celle qui nous intéresse plus particulièrement dans cette étude et qui concerne $[Ca^{++}]$ et $[CO_2]$

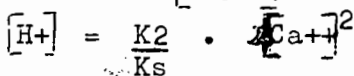
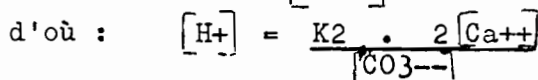
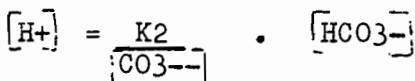
Il faut tout d'abord souligner que dans les conditions habituelles de pH (entre 7 et 8,4), les concentrations de CO_3^{--} , H^+ et OH^- à l'équilibre sont faibles et négligeables devant celles de Ca^{++} et HCO_3^- . L'expression (4) se réduit alors à :



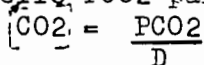
et si on reporte cette valeur de $[HCO_3^-]$ dans l'équation (2) on obtient :



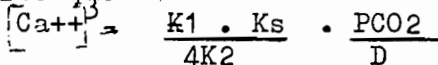
$[H^+]$ peut être déterminée en fonction de $[Ca^{++}]$ à partir des équations (3) et (6)



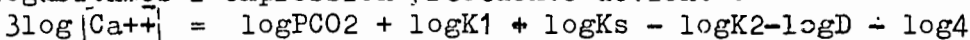
La concentration en anhydride carbonique $[CO_2]$ étant liée à la pression partielle PCO_2 par la relation :



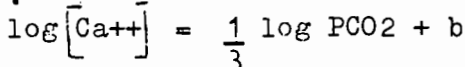
il en résulte que :



A l'équilibre la concentration en calcium de la solution est proportionnelle à la racine cubique de la pression partielle de CO_2 . Si on passe aux logarithmes l'expression précédente devient :



Il existe donc une relation linéaire assez simple entre $\log [Ca^{++}]$ et $\log PCO_2$:



dans laquelle b est une constante dépendant des équilibres simultanés en cause.

Puisque par définition $pK = \text{colog } K = -\log K$, on a la relation :

$$b = 1/3 (pK_2 - pK_1 - pK_s - \log D - \log 4)$$

b est une constante qui ne dépend que de la température. Graphiquement, la solubilité du carbonate de calcium en fonction de la pression partielle du gaz carbonique est à l'équilibre représentée par une série de droites parallèles de pente $1/3$ dont les ordonnées à l'origine varient avec la température.

Les courbes de solubilité de la calcite sont très voisines des droites théoriques. Nous nous sommes référés aux résultats expérimentaux obtenus par T. Stchouzkoy-Muxart (4) à partir de la calcite pure. Les droites sont sensiblement parallèles et leur pente très voisine de 0,33 ; quant aux valeurs de b elles varient entre 2,65 à 5° et 2,40 à 30°.

3 - Le matériel expérimental

Le matériau qui sert de support à nos essais provient de la station d'essai de l'Office National du Litani située à 12 kms à l'Est de Saïda à une altitude de 350mètres. Les sols de cette station, tous très calcaires, appartiennent à deux des séries de sols calco-magnésiques cartographiés dans le Liban-Sud ; la série de Kafar-Falouss (ensemble B) et la série de Daoudiyé (ensemble A). Les sols de la 1ère série sont très calcaires (calcaire actif 25%), peu évolués, de couleur grise (rendzine blanche) et reposent à faible profondeur sur un calcaire moyennement tendre ou marneux. La teneur en argile est le plus souvent inférieure à 30% et la capacité d'échange comprise entre 10 et 20 me.

Les sols de la série de Daoudiyé sont également très calcaires (20 à 25% de calcaire actif) mais leur teinte est brun foncé (sol brun calcaire) et ils reposent à une profondeur variant entre 50 et 80cm sur un calcaire moyennement dur avec des poches plus tendres appartenant à l'éocène inférieur. En outre la teneur en argile est généralement supérieure à 40% et la capacité d'échange toujours élevée (30 à 40 me). Le matériau que nous avons utilisé appartient uniquement à cette dernière série.

3-1 : Données morphologiques.

Nous présentons ci-après la description d'un profil bien représentatif.

- 0-20cm : brun foncé (10YR 4/3) à l'état sec, 15% de graviers calcaires, argileux, structure polyédrique subangulaire moyenne peu développée et éléments granulaires fins. très collant et plastique à l'état trempé, ferme à l'état humide, dur à l'état sec très calcaire ; limite distincte et régulière.
- 20-70cm : brun foncé (10YR 4/3) à l'état sec ; cailloux polyédrique à angles émoussés disséminés jusqu'à 40cm (15%), plus denses au dessous (25%) ; texture argileuse ; structure polyédrique angulaire assez bien développée moyenne et grossière à sec ; très collant et plastique à l'état trempé, ferme à l'état humide ; dur à l'état sec ; très calcaire : présence de pollicule d'altération au contact des cailloux ; limite abrupte et irrégulière.
- +70cm : roche calcaire moyennement dure avec des poches plus tendres ; zone d'altération de quelques centimètres seulement.

3-2 Données analytiques.

3-2-1 Caractéristiques générales.

Le sol qui sert de support à nos essais a été maintes fois remanié au cours des travaux d'aménagements de sorte que les différences qui auraient pu exister entre les horizons ont disparu comme en témoignent les résultats suivants :

TABLEAU 1

	: 0 à 20cm	: 20 à 40cm	: 40 à 70cm	:
argile %	: 48,3	: 47,8	: 46,7	:
limon %	: 32,8	: 34,0	: 33,9	:
calcaire total %	: 50,0	: 52,3	: 54,3	:
calcaire actif %	: 22,5	: 23,0	: 23,6	:
C E C me p 100g	: 36,4	: 33,6	: 33,3	:
Somme des bases	: 35,1	: 32,8	: 32,4	:
Matière organique %	: 1,46	: 1,41	: 1,5	:
Humidité équivalente (He)	: 35,7	: 34,9	: 31,5	:
% d'eau à pF 2,5	: 36,4	: 38,0	: 33,7	:
" " " pF 3,0	: 31,3	: 31,9	: 28,8	:
" " " pF 4,2 (Hf)	: 21,5	: 23,0	: 21,0	:
Réserve en eau utile (He-Hf)	: 12,7	: 11,3	: 10,5	:

Il faut préciser que 94% de la garniture cationique du complexe absorbant est constitué par du calcium.

3-2-2 Répartition des carbonates dans les différentes fractions granulométriques.

Pour déterminer les quantités de carbonates de calcium et de magnésium dans les fractions granulométriques du matériau calcaire nous avons adopté la méthode suivante.

Un échantillon de 100g de terre a été attaqué par de l'eau oxygénée à 20 volumes (destruction de la matière organique) puis soumis à l'action d'un agent dispersant : le pyrophosphate de sodium. La dispersion complète a été obtenue à l'aide d'un appareil émetteur d'ultra-sons. Les sables grossiers (0,2 à 2mm) et les sables fins (0,05 à 0,2mm) ont été séparés par tamisage. Les fractions les plus fines (sables très fins 0,02 à 0,05mm - limon : 0,002 à 0,02mm - argile : moins de 0,002mm) ont été recueillies à la suite de siphonnages successifs. Pour le dosage des carbonates, nous avons pour chaque fraction attaqué la prise d'essai avec de l'acide chlorhydrique dilué jusqu'à solubilisation complète de Ca et Mg sous forme de chlorures. Après filtration les deux cations ont été dosés par complexométrie (5).

Dans la colonne A du tableau 2 figurent les résultats de l'analyse granulométrique, dans la colonne B le pourcentage de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium dans chaque fraction et dans la colonne C les quantités de carbonate pour 100g de terre fine compte tenu de la composition granulométrique.

Il faut d'abord remarquer que la somme des teneurs en carbonates de calcium et en carbonates de magnésium figurant dans la colonne C est légèrement inférieure à la quantité de calcaire total figurant dans le tableau 1 (47,8g contre 50 et 52g). Cet écart s'explique par l'imprécision de la méthode du calcimètre Bernard.

TABLEAU 2

!	: A :		: B :		: C :	
	: CaCO ₃ :		: MgCO ₃ :		: CaCO ₃ : MgCO ₃ :	
! argile	: 48,0 :	: 21,8 :	: 6,05 :	: 10,46 :	: 2,90 :	:
! limon	: 33,6 :	: 68,5 :	: 1,94 :	: 23,0 :	: 0,93 :	:
! sable très fin	: 8,8 :	: 63,0 :	: 2,78 :	: 5,5 :	: 0,24 :	:
! sable fin	: 4,9 :	: 50,7 :	: 2,59 :	: 2,50 :	: 0,12 :	:
! sable grossier	: 4,0 :	: 50,0 :	: 2,60 :	: 2,04 :	: 0,11 :	:
!	:	:	:	:	:	:

Il ressort de la colonne B que la fraction argileuse est celle qui contient le moins de CaCO₃ (21,8%) et la fraction limoneuse celle qui en contient le plus (68,5%). Par contre on assiste au phénomène inverse pour MgCO₃ (6,05% contre 1,94%). Une partie du magnésium de la fraction argileuse proviendrait de la montmorillonite qui est l'argile la mieux représentée. On constate également (colonne C) que dans 100g de terre fine il n'y a que 10,4 g de carbonate de calcium sous forme de particules inférieures à 0,002mm et 23g soit plus du double sous forme de particules comprises entre 0,002 et 0,02mm. Le calcaire dit actif (23%) provient donc moins de la fraction argileuse que des fractions plus grossières et tout particulièrement de la fraction limoneuse. Ceci est corroboré par les résultats d'une autre étude concernant la teneur en calcaire actif d'une roche calcaire identique au substratum du sol de Lebaa concassée plus ou moins finement, en fonction de la taille des grains. La teneur en calcaire actif, si elle était maximum dans la fraction argile + limon, était loin d'être négligeable dans les sables et même dans les graviers (2 à 5mm).

Dès lors, il n'y a rien d'étonnant à ce que dans les sols calcaires du Liban, les quantités de calcaire actif soient souvent indépendantes des teneurs en argile et que par contre la fraction limoneuse bien représentée et riche en carbonates joue à cet égard un rôle important.

3-2-3 Composition chimique et minéralogique de la fraction argileuse.

Voici les résultats de l'analyse des éléments totaux contenus dans la fraction argileuse après attaque aux triacides (suivant une méthode adaptée aux terres calcaires par Monsieur THIEBAULT)

Perte au feu	8,60
Quartz	3,34
Silice des silicates	44,00
Al ₂ O ₃	22,60
Fe ₂ O ₃	3,48
TiO ₂	0,62
MnO	0,04
CaO	12,20
MgO	2,90
K ₂ O	0,42
Na ₂ O	0,40
Total	98,60

Il ressort de cette analyse que les éléments les plus importants de la fraction argileuse sont la silice et l'alumine. La valeur du rapport moléculaire (3,30) laisse prévoir la prédominance de minéraux argileux 2/1. C'est bien ce qui a été confirmé par l'analyse diffractométrique aux R.X.

La montmorillonite est abondante ; la kaolinite existe en faible quantité et il y a probablement un peu d'attapulгите. En outre la CaCO₃ semble être sous forme de calcite.

La présence d'argile gonflante dans ce matériau calcaire a sans nul doute des effets non seulement sur les propriétés physiques (par exemple la compacité) mais à travers elles sur la dynamique du calcium.

4 - Le dispositif expérimental

Il comporte une batterie de six lysimètres analogues à celui qui est schématisé sur la figure 1.

Au remplissage on s'est efforcé de reconstituer le profil en apportant de 0 à 40cm de la terre provenant des 50 premiers centimètres du sol en place et de 40 à 68cm de la terre sous jacente. De plus des échantillons ont été prélevés tous les dix cm afin d'établir exactement la nature de la terre couche par couche dans chaque lysimètre. L'objectif de ces études en lysimètres est de déterminer l'influence que peuvent avoir sur l'atmosphère du sol, sur la dynamique de l'eau et sur celle des éléments dissous (en particulier le calcium) les facteurs suivant : épierrage, apport d'eau contenant du bicarbonate de calcium pendant la période d'irrigation, apport d'engrais minéraux.

Voici les traitements effectués sur chaque lysimètre :

Lysimètres n°	cailloux		irrigation		engrais minéraux		!
	avec	sans	avec	sans	avec	sans	
1	+		+			+	!
2		+	+			+	!
3	+		+		+		!
4		+	+		+		!
5		+		+		+	!
6	+			+		+	!

De la fétuque (*Festuca arundinacea*) a été semée en juin 1970 sur les lysimètres 1,2,3,4; Les lysimètres 5 et 6 sont demeurés constamment sans aucune couverture végétale.

Les quantités d'eaux d'irrigation ont été les mêmes pour les quatre premiers lysimètres. Elles ont été très importantes puisque entre le 1er mai et le 19 octobre 1971, on a apporté à chaque lysimètre 426 litres soit une moyenne de 10mm par jour. Cette valeur est nettement supérieure à l'évapotranspiration potentielle de la région (A TYR celle-ci varie entre 2,8mm/jour en mai et octobre et 6mm/jour en juin, juillet et août). Il faut également souligner que la qualité de l'eau utilisée (eau provenant du barrage de Karoun) est assez bonne puisque les concentrations en ions chlore et sodium sont respectivement de 17,7mg/l et 8,5 mg/l ; par contre elle est sursaturée en bicarbonate de calcium. La concentration en calcium a varié au cours de l'été 1971 de la façon suivante :

date	concentration en calcium (mg/l)
19/5	59,2
19/6	58,0
19/7	63,4
3/9	60,0
20/9	65,6
19/10	51,2

En 1970 deux apports d'engrais ont été effectués sur les deux lysimètres destinés à les recevoir, en Kgs par hectare :

	Nitrate d'ammoniac 26%	Superphosphate 46%	Chlorure de potassium 48%
Mai 1970	400	2000	480
Novembre 70	600		

Les quantités d'eau ayant drainé à travers chaque lysimètre ont été mesurées journellement. Des échantillons moyens de ces eaux de drainage ont été prélevés et analysés environ une fois par mois. La teneur en CO₂ de l'atmosphère du sol a été déterminée tous les mois à l'aide de tubes Drager branchés sur les tuyaux de cuivre introduits latéralement aux profondeurs de 10, 40 et 59cm (voir figure 1).

5 - Méthodes d'analyses

Nous avons voulu savoir si les lois énoncées dans le paragraphe 2 reliant la concentration en calcium des eaux d'une part, la pression partielle en CO₂ d'autre part, se vérifiaient dans les sols calcaires et dans quelle mesure ces lois pouvaient être modifiées par certains traitements imposés à ces sols (apport d'engrais - travaux culturaux - irrigation).

Pour atteindre ce but nous avons du adopter un certain nombre de méthodes d'extraction et de dosage.

5-1 : prélèvement et dosage du gaz carbonique de l'atmosphère du sol :

Nous avons adopté la méthode préconisée par G. BACHELIER (1) et qui fait appel au détecteur de gaz Dräger. Il s'agit d'une pompe à main étalonnée permettant de faire passer un volume d'air connu au travers de tubes à réactifs gradués. Le gaz carbonique existant dans l'air réagit dans le tube réactif avec un dérivé de l'hydrazine. La transformation de ce dernier est mise en évidence par un réactif coloré.

Les prélèvements d'air sont effectués grâce à des tubes de cuivre de diamètre 10-14mm enfoncés dans des trous de 14mm forés au préalable. Les trous sont de 2cm plus longs que les tubes de cuivre de telle sorte qu'une petite cavité est aussi aménagée à l'extrémité des sondes. L'extrémité extérieure de celles-ci est fermée par un bouchon.

Les prélèvements et dosages du gaz carbonique sont effectués chaque mois en raccordant l'extrémité de la sonde à la pompe Dräger avec un petit tuyau de caoutchouc. Nous mesurons en même temps la température à l'intérieur du tube de cuivre.

5-2 : analyse des eaux :

Résistivité et Conductivité

La résistivité des eaux est déterminée avec un conductimètre METROHM dont la cellule a une constante de 10,32. Elle permet de calculer la teneur totale en sels dissous connaissant la température.

Dosage du Calcium et du Magnesium.

Nous avons adopté la méthode classique de dosage par complexomètre avec comme indicateur le calcon pour le calcium et le noir d'ériochrome pour la somme des cations calcium et magnésium. Cette méthode simple et rapide a l'inconvénient d'exiger des quantités assez importantes de solutions (25 à 50ml).

Dosage du potassium et du sodium par la photométrie de flamme.

Dosage des carbonates et bicarbonates.

Nous faisons appel à la méthode traditionnelle qui consiste à neutraliser les deux sels de l'acide carbonique par une solution N/20 d'acide chlorhydrique. Ce sont d'abord les carbonates qui sont neutralisés et la fin de la réaction est indiquée par le virage au rose de la phénol-phtaléine (pH 8). C'est ensuite au tour des bicarbonates d'être neutralisés. On utilise comme colorant le vert de Bromocrésol dont le virage du rose au vert très clair a lieu à un pH voisin de 4.

Figure 1 - Coupe d'un Lysimètre

\varnothing : 57 Cm
 S : 25.5 dm²

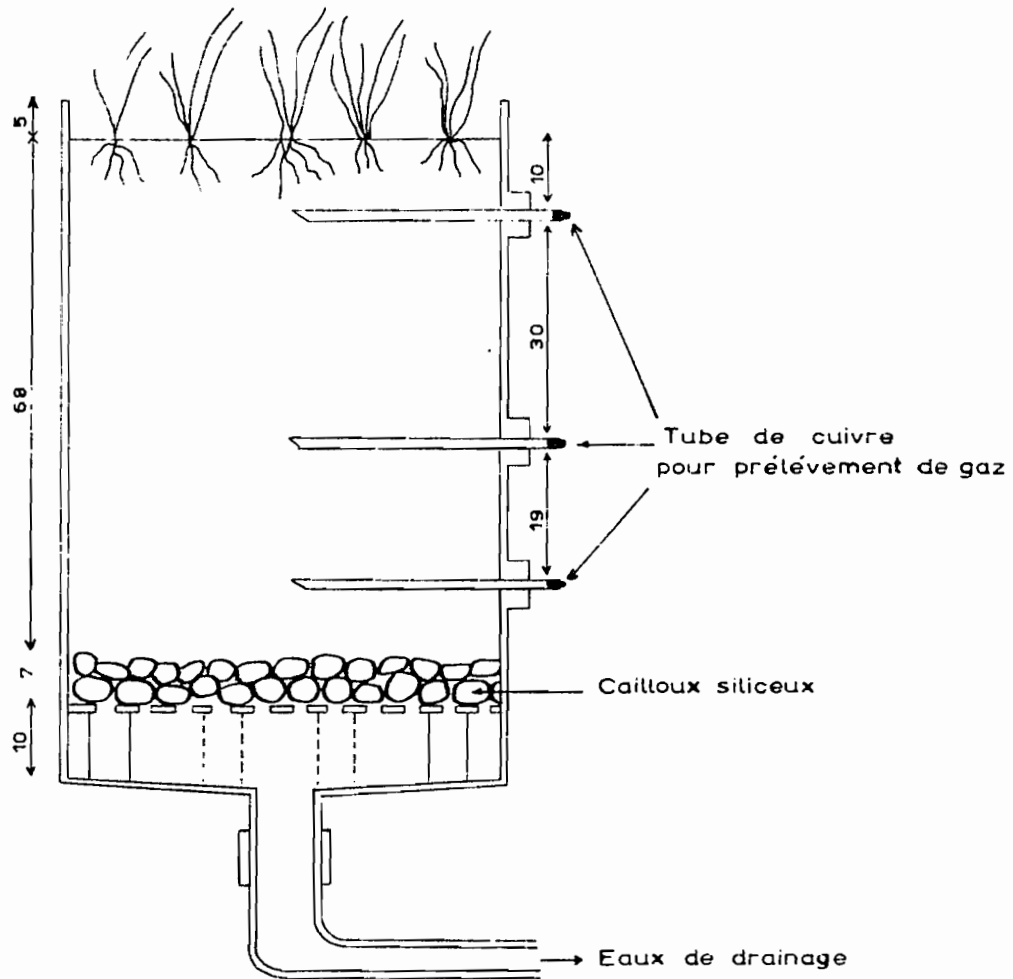
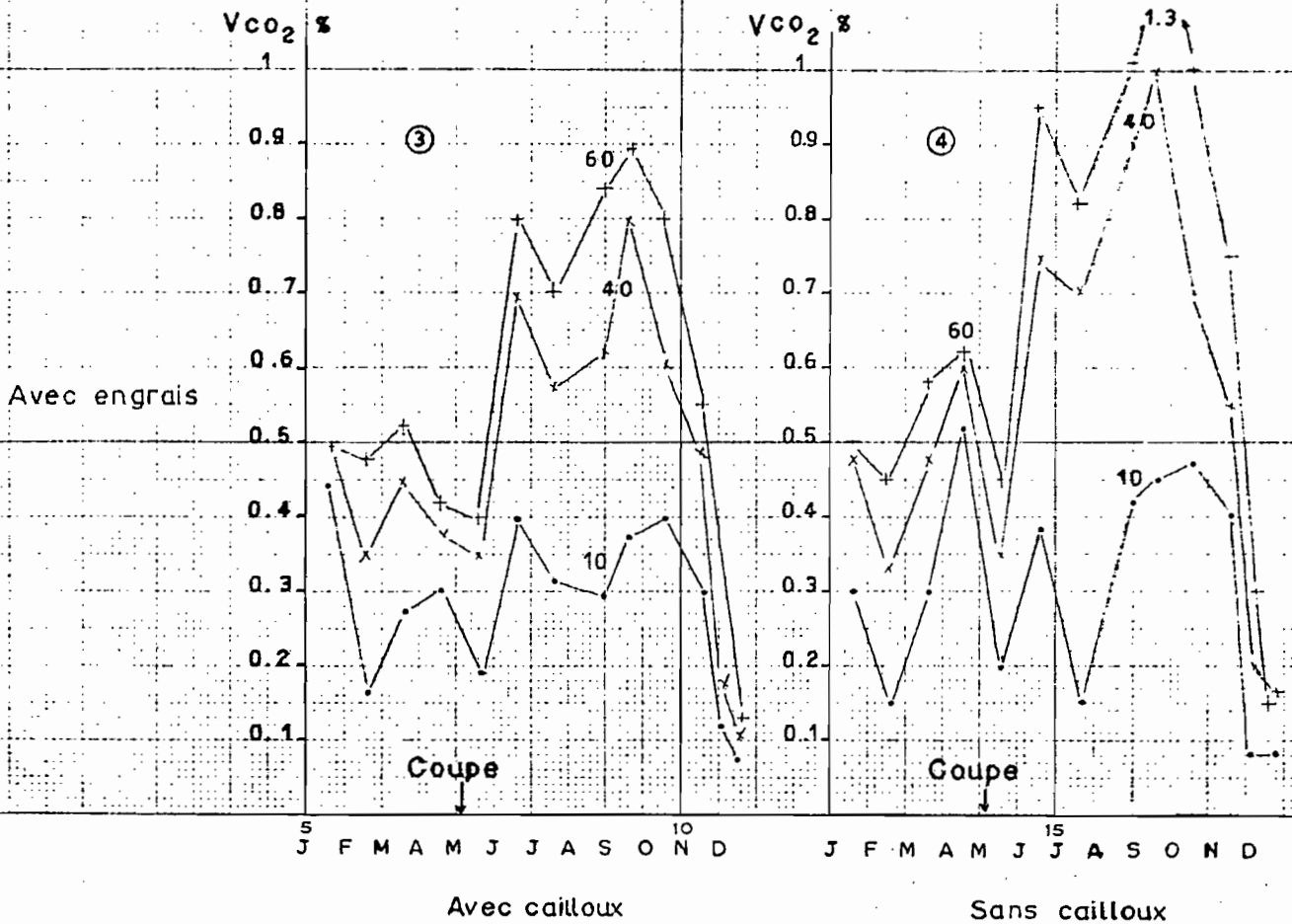
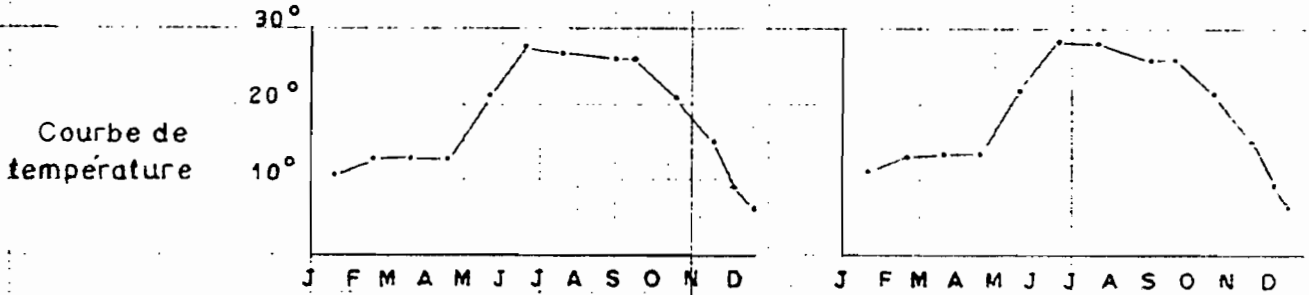
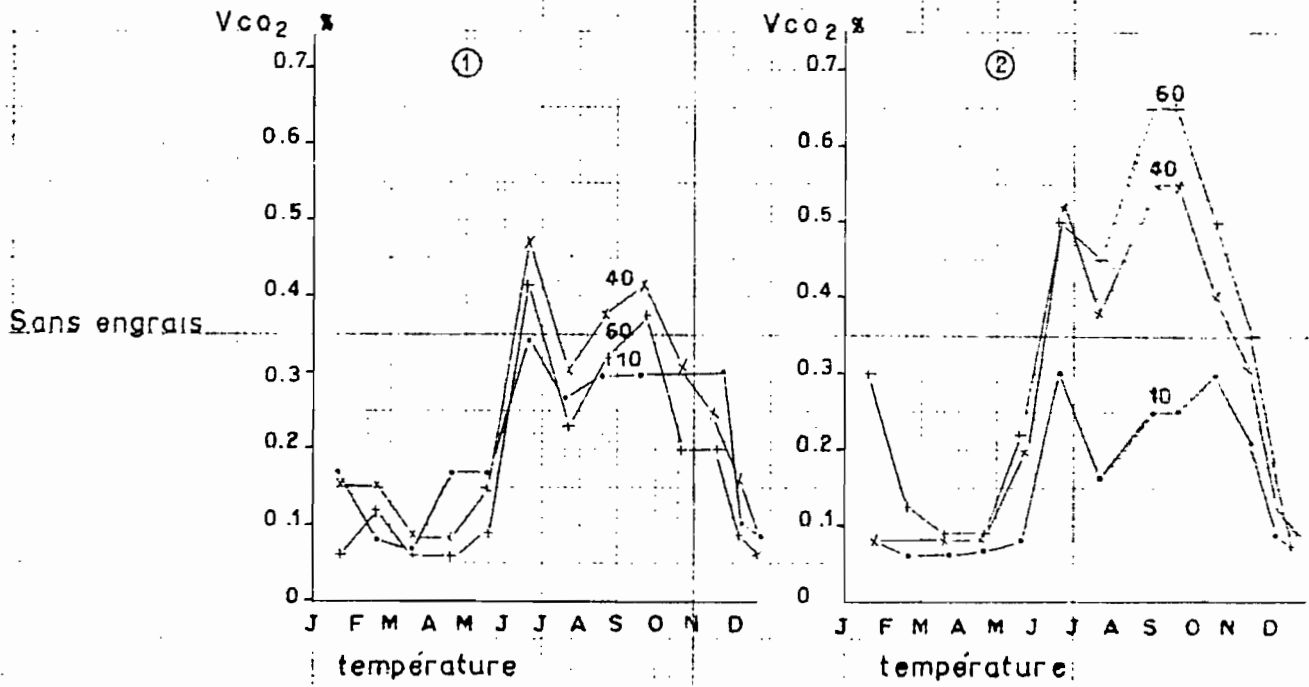


Fig. 2. Teneur en CO₂ de l'Atmosphère des Lysimètres
à 10 Cm - 40 Cm - 60 Cm



5 J F M A M J J A S O N D 10

15 J F M A M J J A S O N D 20

Avec cailloux

Sans cailloux

6 - Premiers résultats

6 - 1 : Teneur en CO₂ de l'atmosphère des lysimètres (fig. 2)

Nous n'avons pas représenté la teneur en CO₂ dans les deux lysimètres témoins (5 et 6) car les écarts ont été faibles entre l'été (0,03%) et l'hiver (0,08%).

Plusieurs constatations s'imposent lorsqu'on observe les courbes de la figure 2.

1. A l'exception du lysimètre 1, la teneur en CO₂ croît avec la profondeur quelle que soit la saison. Les différences sont plus accentuées entre 10 et 40cm, qu'entre 40 et 60cm. Pour des raisons difficiles à discerner le lysimètre 1 échappe souvent à la règle : la teneur en CO₂ est plus élevée à 10cm qu'à 40 et 60cm entre janvier et mai. De juin à septembre elle est maximum à 40cm, moyenne à 60 et minimum à 10cm.

2. A une époque donnée et à une profondeur donnée la teneur en CO₂ est toujours plus élevée dans les lysimètres 3 et 4 ayant reçu des engrais, que dans les lysimètres 1 et 2 qui n'en ont pas reçu. Les différences sont surtout nettes à 40 et 60cm. En première hypothèse nous pensons qu'il s'agit du résultat d'une activité racinaire plus élevée dans 3 et 4 dont la végétation est d'ailleurs beaucoup plus abondante.

3. aux profondeurs de 40 et 60cm la teneur en CO₂ présente incontestablement des variations saisonnières qui peuvent être mises plus ou moins en relation avec la courbe des températures relevées au moment des prélèvements.

Dans les lysimètres 1 et 2 la teneur en CO₂ est minimum en mars et avril et en décembre. Elle est maximum en juin et surtout en septembre. En juillet-août il y a une diminution nettement observable dans les 2 lysimètres et aux trois profondeurs de prélèvement.

Dans les lysimètres 3 et 4 la teneur en CO₂ présente deux minima de même valeur en février et mai (juste après la coupe), et une augmentation assez nette entre les deux. Juin et septembre sont les mois durant lesquels les quantités de CO₂ sont les plus élevées. Il y a également une légère diminution en juillet-août.

La chute brutale observée en novembre-décembre correspond à un refroidissement rapide du climat (de 20°C à 6°C).

À 10cm, la teneur en CO₂ ne présente un accroissement net et persistant que dans les lysimètres n'ayant pas reçu d'engrais en 1970, au point qu'entre juin et septembre elle y atteint à peu près la même valeur que dans les lysimètres 3 et 4.

On peut penser que la coupe de la fétuque effectuée début mai dans les lysimètres 3 et 4 et non dans les deux autres a eu un effet dépressif assez prolongé sur la teneur en CO₂ à 10cm. D'ailleurs en septembre et octobre on constate que la teneur en CO₂ à 10cm est à nouveau plus élevée dans 3 et 4 que dans 1 et 2.

4. En dernier lieu il faut noter que de mai à septembre les teneurs en CO₂ à 40 et 60cm sont toujours plus élevées dans les lysimètres 2 et 4 contenant de la terre sans cailloux que dans les lysimètres 1 et 3 dont la terre n'a pas été épierrée. La quantité de CO₂ étant à peu près la même dans la partie supérieure des lysimètres c'est à dire là où la densité racinaire est la plus importante, on peut penser que la diffusion du CO₂ se réalise mieux dans les lysimètres contenant des cailloux.

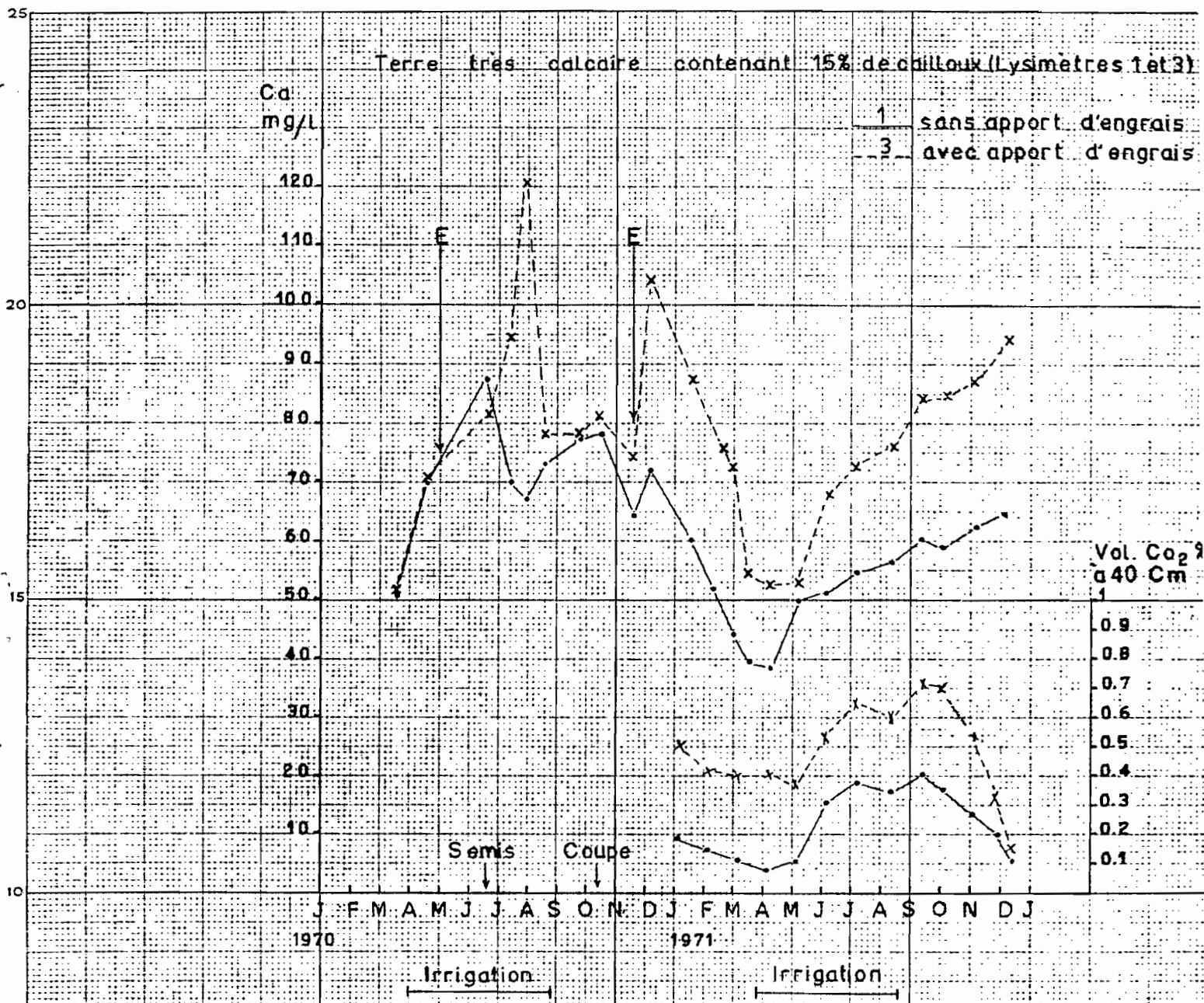


Figure 3 Concentration du calcium dans les eaux de drainage
Teneur moyenne en Co₂ de l'atmosphère des Lysimètres (à 40 Cm)

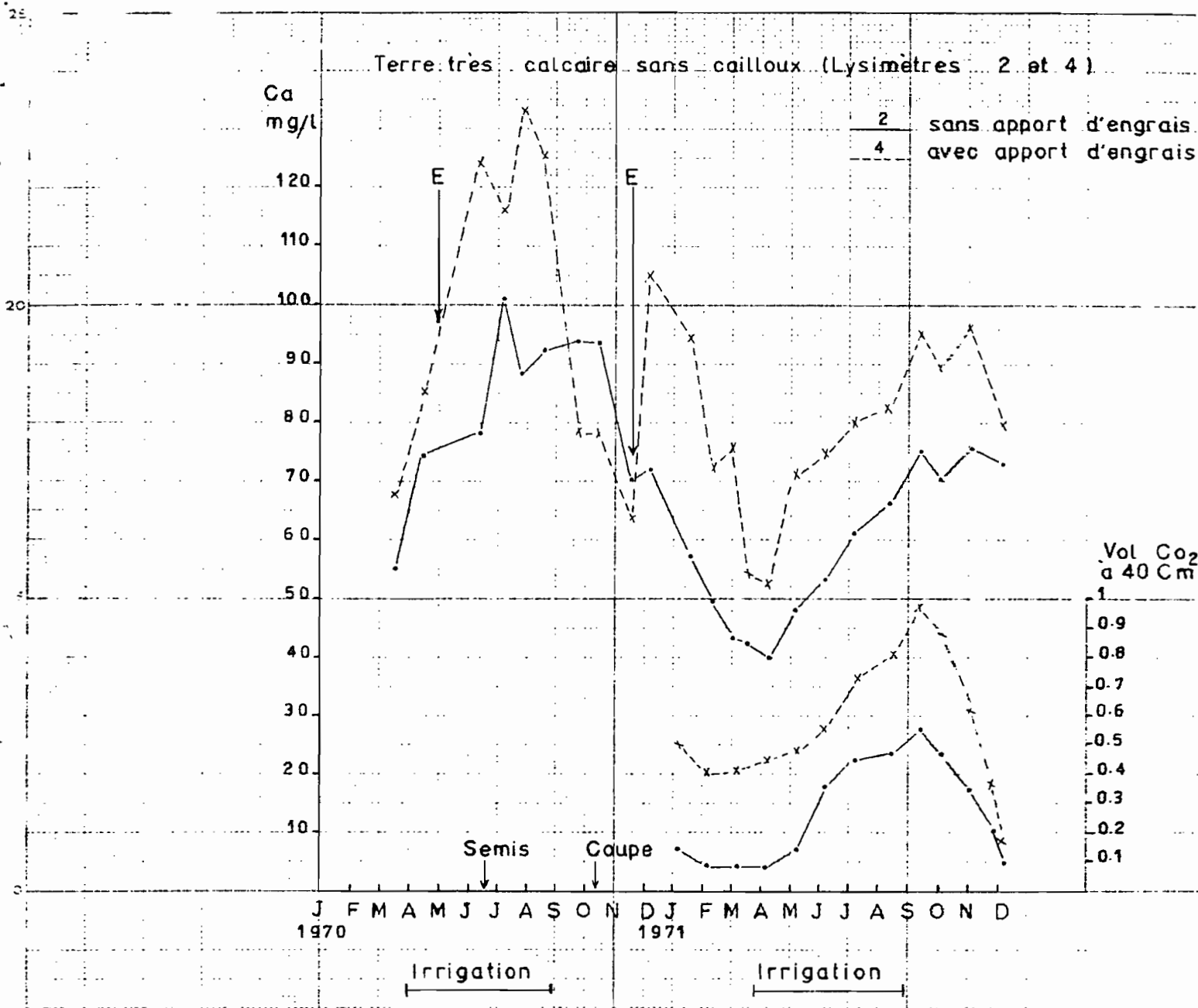


Figure 4. Concentration du calcium dans les eaux de drainage
Teneur moyenne en Co₂ de l'atmosphère des Lysimètres (à 40 Cm)

6 - 2 : Variations saisonnières de la concentration en calcium des eaux de drainage (fig. 3 et 4)

On peut tirer des courbes représentant les variations de la concentration en calcium des eaux de drainage (en mg/l) entre mars 1970 et décembre 1971 les conclusions suivantes :

1. Quel que soit le matériau (terre avec ou sans cailloux) et qu'il y ait eu apport ou non d'engrais, on constate des variations périodiques de cette concentration en calcium. En 1971 comme en 1970 le minimum se situe en avril. Ceci apparaît clairement sur les courbes 1 et 2 représentatives des lysimètres n'ayant pas reçu d'engrais.

Il est par contre plus difficile d'établir avec précision les périodes pendant lesquelles la concentration en calcium des eaux de drainage est maximum.

En 1970 les maxima dans les lysimètres 1 et 2 ont été observés entre juillet et octobre et ont été respectivement de 75 mg/l et de 90 mg/l. en 1971, dans les mêmes lysimètres, les maxima n'étaient plus que de 60 mg/l et de 70 mg/l pendant une période s'étalant d'août à décembre.

Pour expliquer ces différences d'une année sur l'autre, faut-il incriminer la fréquence d'arrosage adoptée (tous les jours en 1970, tous les 2 jours en 1971) ou bien les variations climatiques (les premières pluies sont apparues dès le 12 octobre en 1970 et seulement le 19 novembre en 1971), ou encore l'évolution dans le temps du matériau sous l'effet de l'irrigation et de la végétation ?

2. L'apport d'engrais en mai 1970 puis en novembre 1970 provoque dans les deux cas, une forte élévation de la concentration en calcium des eaux de drainage. Celle-ci suit de quelques jours seulement le deuxième épandage. Par contre le délai de 45 jours et plus qui sépare l'accroissement de (Ca++) du premier épandage est dû au fait que le sol n'a été arrosé que 1 mois environ après celui-ci.

Cette influence de l'engrais sur la teneur en calcium dans les eaux de drainage semble de courte durée. En effet en 1971, année où les lysimètres 3 et 4 n'ont pas reçu d'engrais aucun pic ne vient perturber les courbes représentatives.

Cette influence momentanée peut résulter d'une double action :

- action directe du superphosphate de calcium (en mai seulement) dont les ions calcium seraient très vite solubilisés et entraînés avec les eaux de drainage.

- action indirecte due à la prolifération des microorganismes du sol à la suite de l'apport d'engrais et en particulier d'engrais azotés (novembre 1970). Le gaz carbonique résultant de cette activité microbienne provoquerait une solubilisation intense du carbonate de calcium.

3. Dès le premier apport d'engrais dans les lysimètres 3 et 4 la concentration en calcium des eaux qui les ont traversés est presque toujours plus élevée que celle des eaux provenant des lysimètres 1 et 2. Ce fait apparaît particulièrement sur la figure 4. Les deux courbes (1 et 3) sont confondues jusqu'à l'apport d'engrais ; puis la courbe 3 demeure constamment au dessus de la courbe 1.

4. Nous avons reporté également sur les graphiques les moyennes mensuelles (moyenne de deux mesures consécutives) des teneurs en CO₂ de l'atmosphère du sol à 40cm. On peut voir que les variations dans le temps se fait en général dans le même sens que les variations de la concentration en calcium des eaux de drainage. C'est pourquoi nous avons cherché à savoir s'il y avait une corrélation entre les deux valeurs.

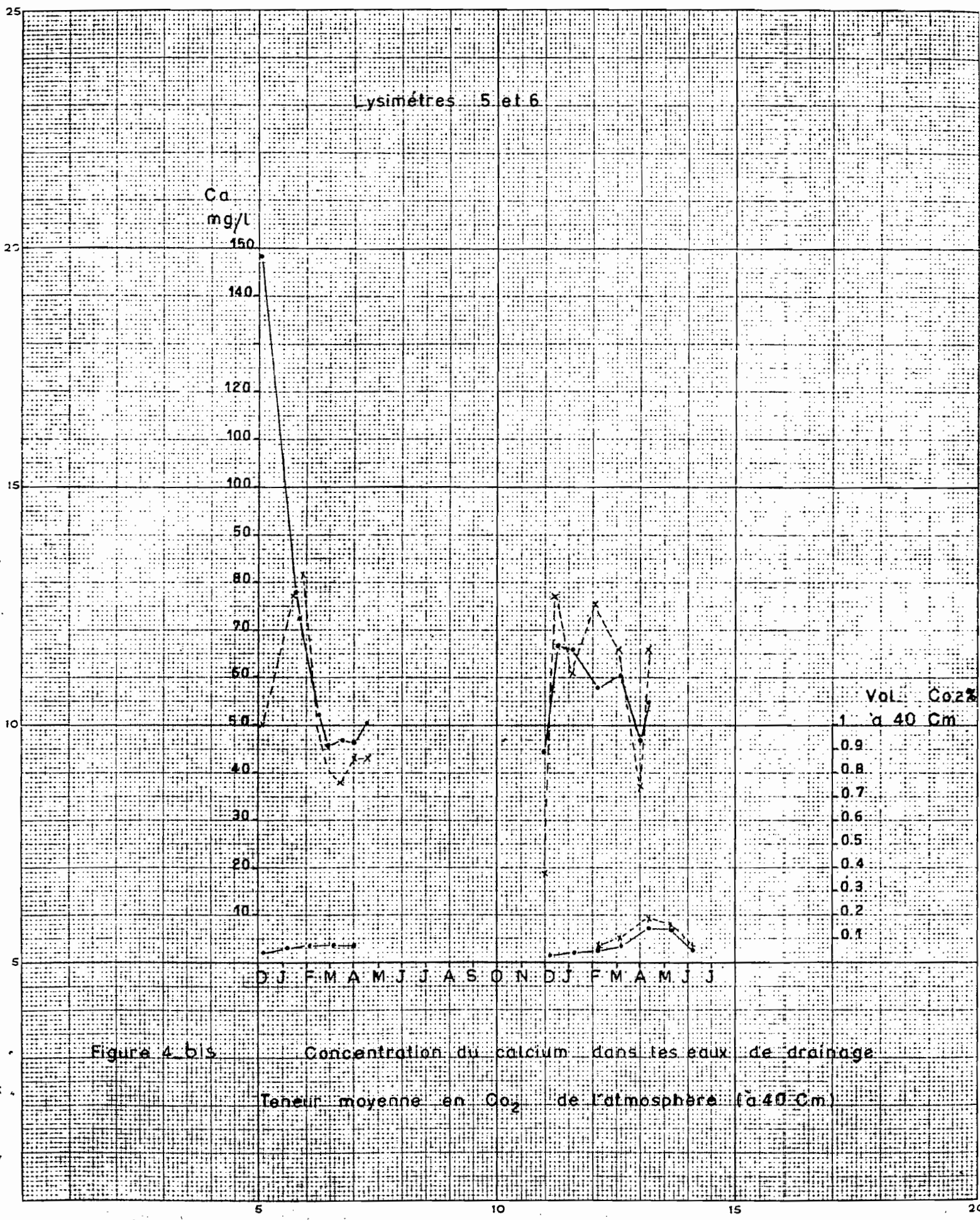


Figure 4 bis Concentration du calcium dans les eaux de drainage
 Teneur moyenne en Co₂ de l'atmosphère (à 40 Cm)

Cas des lysimètres non cultivés et non irrigués (figure 4 bis)

Les seules données obtenues pendant l'hiver 1970-1971 s'étant révélées insuffisantes nous avons voulu les compléter par les données beaucoup plus "parlantes" recueillies au cours de l'hiver 1971-1972.

Au moment des premières pluies de décembre, on constate que les eaux qui s'écoulent des lysimètres 5 et 6 sont beaucoup plus troubles que les autres eaux de drainage. Si on les filtre et si l'on pèse les matières solides on s'aperçoit qu'elles sont nettement plus abondantes dans les eaux provenant du lysimètre 6 (terre caillouteuse ; 3,4 g) que dans celles provenant du lysimètre 5 (terre sans cailloux ; 0,70 g). Ces matières en suspension sont constituées, comme en témoigne une analyse effectuée dans d'autres circonstances, non seulement de calcaire mais aussi d'argile minéralogique.

Par contre, comme on peut le constater sur les graphiques de la figure 4 bis, la concentration en calcium est nettement plus élevée dans l'eau de drainage du lysimètre 5 que dans celle du lysimètre 6 ; surtout en décembre 1970.

Puis très rapidement les particules en suspension disparaissent. Jusqu'à la fin de janvier les concentrations en calcium sont identiques dans 5 et 6 et leurs valeurs sont sensiblement égales aux concentrations observées dans les eaux provenant des lysimètres 3 et 4 bien que les teneurs en CO₂ dans l'atmosphère de ces derniers soient trois fois plus élevées.

En février et surtout en mars, on assiste à une chute de la concentration en calcium : le minimum atteint fin mars se situe entre 35 et 50 mg/l.

Enfin en avril les dernières pluies d'hiver qui sont toujours abondantes ont provoqué une dissolution importante du calcium. Le phénomène est particulièrement net en 1972, puisque la concentration en calcium passe dans un cas (lysimètre 5) de 46 à 53 mg/l et dans l'autre cas de 36 à 65 mg/l. Parallèlement on observe un enrichissement en gaz carbonique de l'atmosphère du sol, particulièrement visible en avril 1972, puisque les teneurs à 60 cm sont de 0,25 % et 0,30 %.

Ainsi dans les sols calcaires non cultivés la dissolution du calcaire serait particulièrement intense en décembre et en avril. Au cours des premières pluies elle est à mettre en relation avec la dessiccation que la terre a subie au cours de l'été et avec le tassement qui en est résulté. En effet la densité apparente moyenne était en octobre 1971 de 1,06 dans les lysimètres 1, 2, 3, 4 et de 1,18 dans les lysimètres 5 et 6. Dans ces deux derniers, et en particulier dans celui qui contient des éléments grossiers mélangés à la terre, intervient certainement le mécanisme de l'altération pelliculaire décrit par M. Lamouroux dans sa thèse sur les sols formés sur roches carbonatées au Liban (9). D'ailleurs le matériau utilisé possède les qualités qui

d'après Lamouroux, favorisant cette altération pelliculaire : débris calcaires peu durs et relativement poreux, sol gonflant riche en montmorillonite et pauvre en matières organiques.

Il est intéressant de constater que d'une part la nature calcaire du sol n'empêche pas l'altération pelliculaire et que d'autre part, l'entraînement du calcaire qui s'ensuit, s'effectue dans une atmosphère pratiquement dépourvue de gaz carbonique : ce calcaire est mis en suspension plutôt que dissous dans l'eau. Au mois d'avril, par contre, c'est la présence du gaz carbonique qui provoque une nouvelle dissolution de la "réserve carbonatée" ayant subsisté dans le sol au cours de l'hiver.

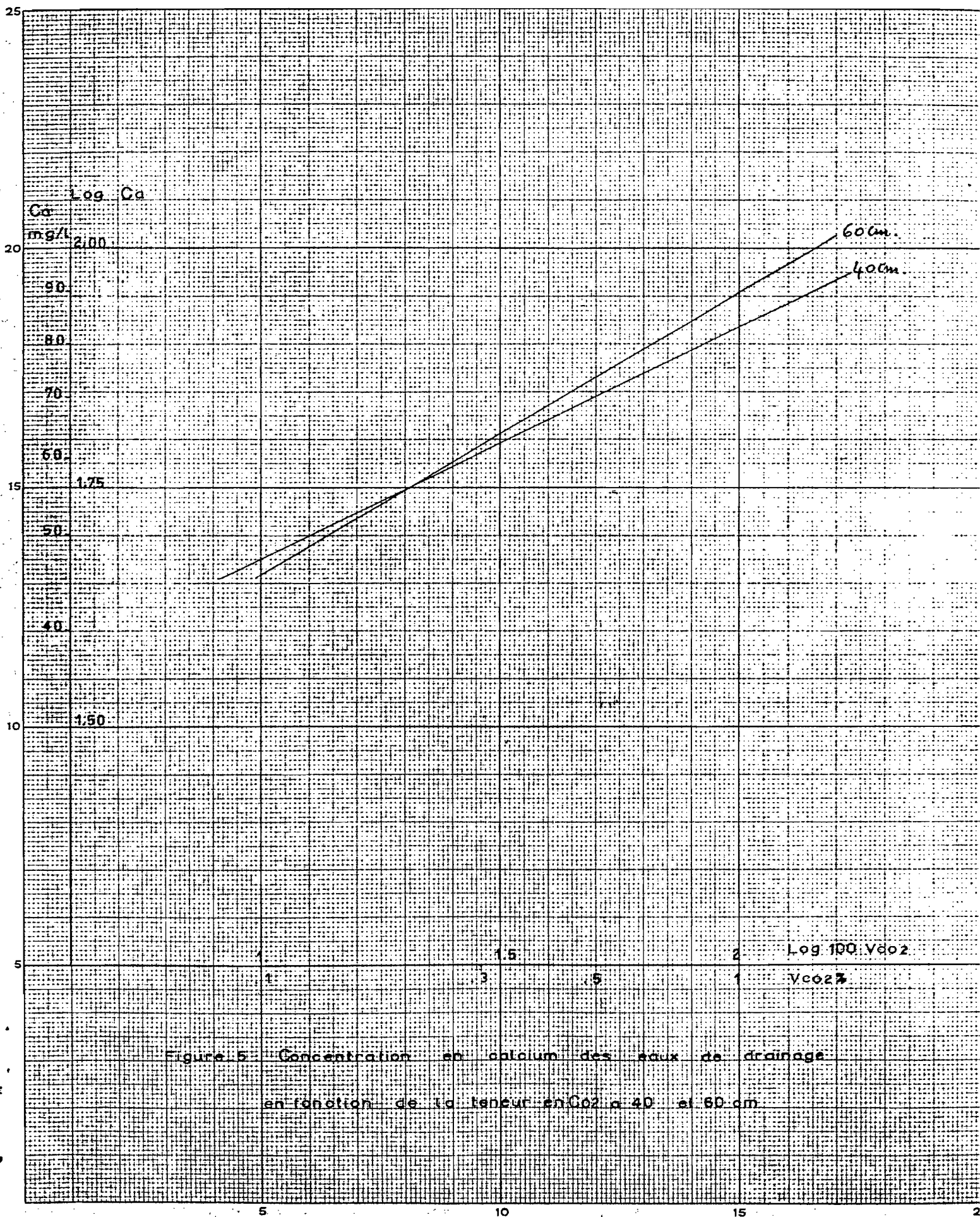


Figure 5 - Concentration en calcium des eaux de drainage
 en fonction de la teneur en CO_2 à 40 et 60 cm

6 - 3 : Relations entre la concentration en calcium des eaux de drainage et la teneur en CO₂ de l'atmosphère du sol.

Dans le tableau figurent les résultats des mesures effectuées entre le 19 décembre 1970 et le 20 décembre 1971 :

- concentration en calcium des eaux de drainage (Ca⁺⁺) en mg/l
- teneur moyenne du CO₂ en % à 40cm (V1) et à 60cm (V2)

Nous avons également reporté Log Ca⁺⁺, Log 100 V1 et Log 100 V2, dont les valeurs ont servi à établir les corrélations ci-après .

6-3-1. Etude comparative pour les profondeurs de 40 et 60cm.

Nous avons trouvé des corrélations linéaires significatives aussi bien entre Log Ca⁺⁺ et Log 100 V1 qu'entre Log Ca⁺⁺ et Log 100 V2

$$\text{Log Ca}^{++} = 0,288 \text{ Log } 100 \text{ V1} + 1,38 \quad \text{avec } r = 0,78$$

$$\text{Log Ca} = 0,234 \text{ Log } 100 \text{ V2} + 1,45 \quad \text{avec } r = 0,79$$

L'égalité entre les températures à 40 et 60cm tout au long de l'année autorise à comparer entre elles les deux séries de mesures.

Les droites représentatives des deux équations (figure 5) sont presque confondues pour les valeurs de Log 100 V1 inférieures à 1,6 (VCO₂ = 0,4%). Ensuite elles s'écartent progressivement, la droite correspondant aux teneurs V1 de CO₂ à 40cm étant au dessus de celle correspondant aux teneurs V2 de CO₂ à 60cm. autrement dit, pour une valeur donnée de Log Ca, la valeur de V1 est inférieure à la valeur de V2. Ceci signifie que lorsque la différence entre V1 et V2 est suffisante (c'est le cas lorsque la teneur moyenne dans les lysimètres est supérieure à 0,4%) du carbonate de calcium peut encore être solubilisé dans la tranche de sol comprise entre 40 et 60cm. Plus généralement on peut penser que la dissolution ou la précipitation du carbonate de calcium à un moment donné dans un sol calcaire cultivé suit assez étroitement les variations de la teneur en CO₂ dans ce sol.

6-3-2. Corrélations partielles pour les mois pluvieux et pour la période d'irrigation.

Nous avons également effectué les calculs de régression pour les couples de mesures obtenues pendant la saison des pluies (janvier-avril et novembre-décembre) d'une part et pendant la saison d'irrigation (mai-novembre) d'autre part. A 60cm on obtient les équations suivantes :

saison des pluies :

(1) $\text{Log Ca} = 0,254 \text{ Log } V2 + 1,44 \quad \text{avec } r = 0,77$

saison d'irrigation :

(2) $\text{Log Ca} = 0,28 \text{ Log } V2 + 1,35 \quad \text{avec } r = 0,90$

A vrai dire la corrélation n'est valable que si la température demeure constante. On peut en première approximation considérer que ce fut le cas pour la relation 2 car pendant la période mai-novembre la température s'est, presque toujours, maintenue entre 22 et 28°. Par contre il est impossible de ne pas tenir compte de ce facteur pour les autres mesures qui ont été effectuées entre 6° et 22°. C'est pour cette raison que r est nettement plus faible pour l'équation 1 que pour l'équation 2.

Seule est donc permise la comparaison entre la droite D représentative de l'équation 2 avec les droites représentant la concentration en calcium d'une solution saturée en équilibre en fonction de la teneur en CO₂ pour des températures comprises entre 20 et 30° (figure 6).

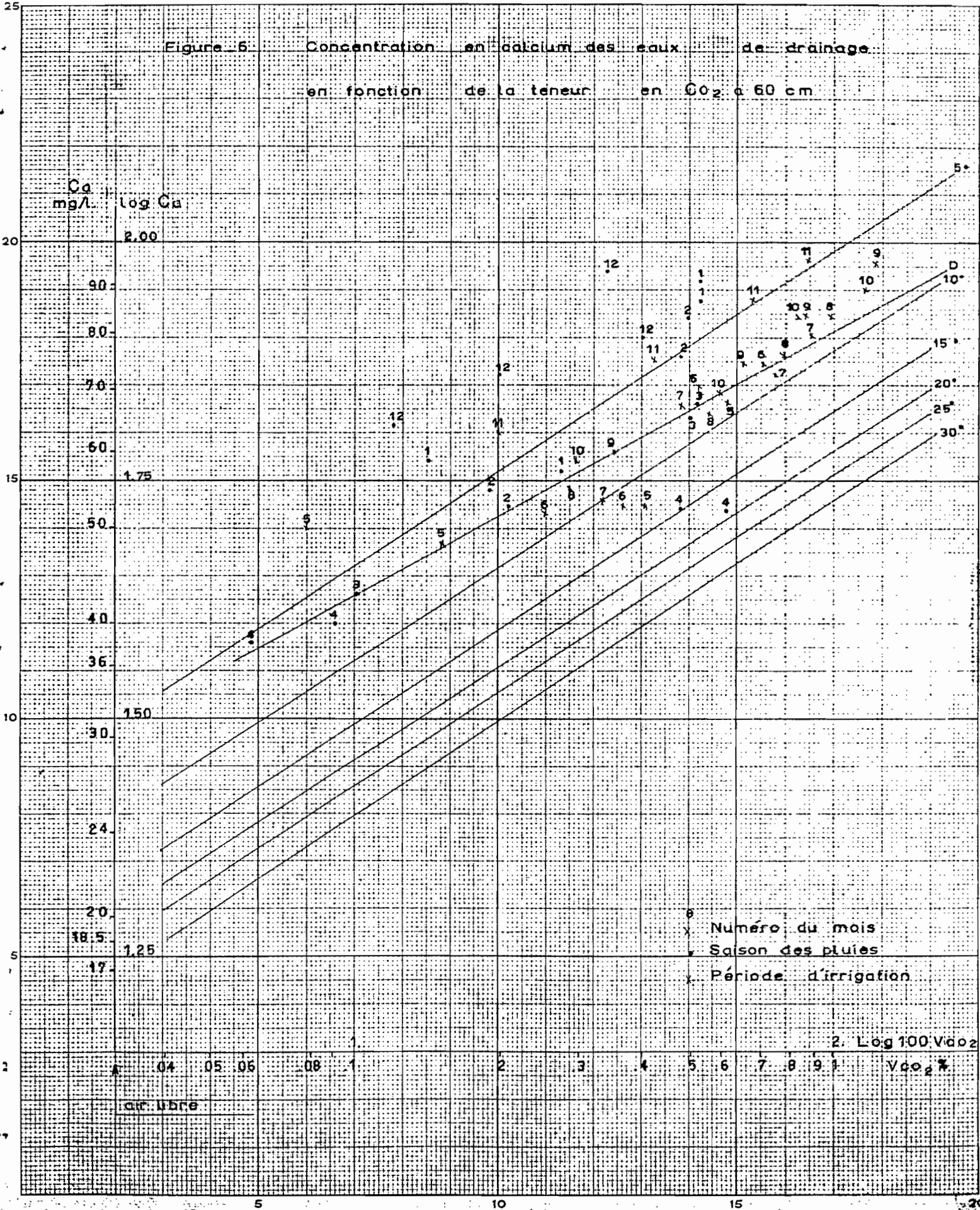
Pour juger du degré de saturation des eaux de drainage il est préférable de discuter la position des différents points représentatifs par rapport aux droites théoriques en tenant compte à chaque fois de la température.

TABLEAU 3

Période	(Ca++) mg/l	Log(Ca++)	V1=VC02% à 40cm	Log100V1 à 40cm	V2=VC02% à 60cm	Log100V2 à 60cm
20/12/70	59,5	1,77	0,19	1,28	0,14	1,15
au	57,2	1,76	0,15	1,17	0,27	1,43
19/1/71	87,2	1,94	0,50	1,70	0,52	1,72
	90,4	1,96	0,51	1,71	0,52	1,72
20/1au19/2	55,1	1,74	0,15	1,18	0,19	1,28
	52,3	1,72	0,09	0,95	0,21	1,32
	82,8	1,92	0,42	1,62	0,49	1,69
	76,3	1,88	0,40	1,60	0,48	1,68
20/2au19/3	42,6	1,63	0,12	1,04	0,10	1,00
	43,1	1,63	0,08	0,92	0,10	1,00
	65,7	1,82	0,40	1,60	0,50	1,70
	68,2	1,83	0,40	1,60	0,51	1,71
20/3au19/4	38,1	1,58	0,08	0,90	0,06	0,78
	40,0	1,60	0,08	0,90	0,09	0,45
	52,4	1,72	0,42	1,62	0,48	1,68
	52,4	1,72	0,54	1,73	0,60	1,78
20/4au19/5	50,0	1,70	0,12	1,04	0,08	0,90
	47,6	1,68	0,14	1,15	0,15	1,18
	52,8	1,72	0,35	1,56	0,41	1,61
	70,8	1,85	0,48	1,68	0,53	1,72
20/5au19/6	51,2	1,71	0,31	1,49	0,25	1,40
	52,8	1,72	0,36	1,56	0,36	1,56
	67,6	1,83	0,53	1,72	0,60	1,78
	74,6	1,87	0,55	1,74	0,70	1,85
20/6au19/7	54,4	1,73	0,38	1,58	0,33	1,52
	60,8	1,78	0,45	1,65	0,48	1,68
	72,8	1,86	0,64	1,81	0,75	1,88
	79,2	1,90	0,72	1,86	0,88	1,95
20/7au3/9	55,2	1,74	0,34	1,53	0,28	1,45
	66,4	1,82	0,46	1,67	0,55	1,74
	76,0	1,88	0,60	1,78	0,77	1,89
	82,4	1,92	0,80	1,90	0,98	1,99
4/9au19/9	60,4	1,78	0,40	1,60	0,35	1,54
	75,2	1,87	0,55	1,74	0,65	1,81
	83,6	1,92	0,71	1,85	0,87	1,94
	95,0	1,98	0,98	1,99	1,22	2,08
20/9au19/10	58,8	1,77	0,36	1,56	0,29	1,46
	70,4	1,84	0,48	1,68	0,57	1,76
	84,4	1,92	0,70	1,84	0,85	1,92
	89,4	1,95	0,88	1,94	1,15	2,06
20/10au17/11	62,6	1,80	0,28	1,45	0,20	1,30
	75,6	1,88	0,35	1,54	0,42	1,62
	87,6	1,94	0,54	1,73	0,68	1,83
	95,0	1,98	0,63	1,80	0,88	1,94
18/11au20/12	64,5	1,81	0,16	1,20	0,12	1,08
	72,8	1,86	0,17	1,23	0,20	1,30
	94,0	1,97	0,25	1,41	0,38	1,52
	79,3	1,90	0,30	1,48	0,40	1,60

Figure 5. Concentration en calcium des eaux de drainage

en fonction de la teneur en CO_2 a 60 cm



6-4 : Comparaison entre les teneurs en calcium observées et les solubilités théoriques de la calcite.

6-4-1. Droites théoriques

Nous avons dit précédemment que la concentration en calcium d'une solution saturée en contact avec la calcite pure était à l'équilibre liée à la pression partielle P_{CO_2} dans la phase gazeuse par l'équation.

$$(3) \quad \log Ca = 0,53 \log P_{CO_2} + b$$

dans laquelle 'b' est une valeur qui ne dépend que de la température si en première approximation on considère que la pression atmosphérique est constante et égale à l'atmosphère ; on a la relation

$$P_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{100}$$

V_{CO_2} étant le volume du gaz carbonique dans l'atmosphère du sol exprimé en %

l'équation (3) devient

$$\log Ca = 0,33 \log \frac{V_{CO_2}}{100} + b$$

$$\text{ou } \log Ca = 0,33 \log V_{CO_2} + (b-0,66)$$

Pour simplifier les calculs nous avons utilisé la variable $\log 100 V_{CO_2}$ à la place de $\log V_{CO_2}$

$$\log Ca = 0,33 (\log 100 V_{CO_2} - \log 100) + b - 0,66$$

$$\log Ca = 0,33 \log 100 V_{CO_2} + b - 1,32$$

Pour calculer $b' = b - 1,32$ nous nous sommes référés aux résultats de l'étude de STCHCUZKCY-MUXART (1) déjà citée. Nous avons obtenu pour les températures qui nous intéressent les valeurs suivantes :

<u>température</u>	<u>b'</u>
5°	1,33
10°	1,23
15°	1,17
20°	1,13
25°	1,10
30°	1,08

on a tracé sur la figure 6 les droites représentatives de la solubilité du calcium à l'équilibre pour chacune des 6 températures précédentes.

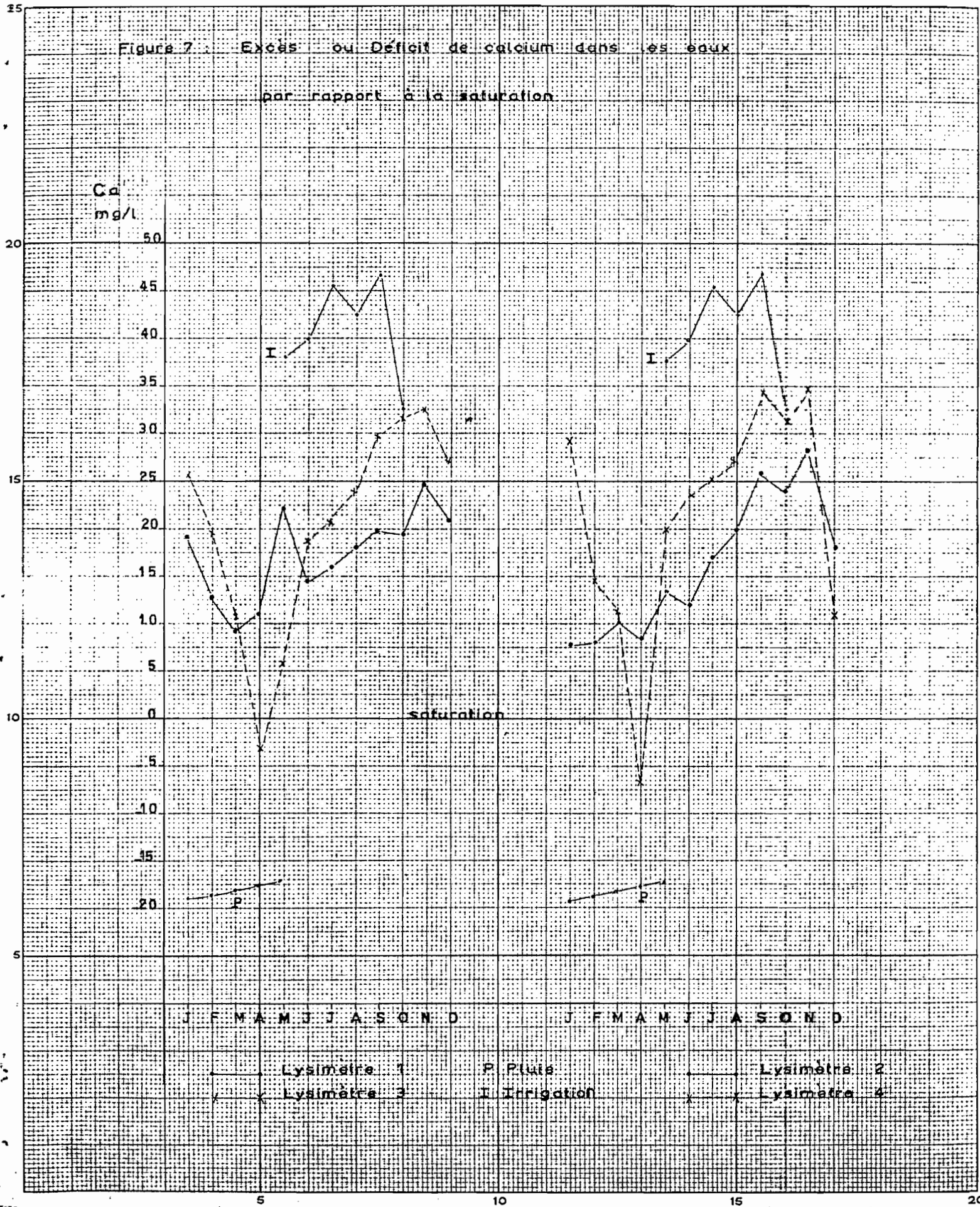
6-4-2. Excès de calcium dans les eaux de drainage au cours de l'année 1971

On peut en premier lieu constater que la droite D se trouve constamment au-dessus de la droite théorique correspondant à la température de 20° qui, nous l'avons déjà dit, est inférieure à la température minimum (22°) du sol observée pendant la période d'irrigation. Les eaux de découlement sont donc tou-

TABEAU 4

! Numéro du : ! mois ! l'obser- ! vations	température : : moyenne entre : : 4C et 6C cm : : en degré C :	concentration : : en CA++ des : : eaux : C :	concentration : : théorique à : : l'équilibre : : S :	différence : : C - S :
1	11°	59,5	40	19,5
		57,2	49	8,2
		87,2	61	26,2
		90,4	61	29,4
		5	21	- 19,0
2	12	55,1	42	13,1
		52,3	44	8,3
		82,8	63	19,8
		76,3	62	14,3
		5	23,5	- 18,5
3	13	42,6	33	9,6
		43,1	33	10,1
		65,7	55	10,7
		68,2	57	11,2
		5	22,5	- 17,5
4	13,5	38,1	27	11,1
		40,0	31,5	8,5
		52,4	55	- 3,6
		52,4	59,5	- 7,1
		5	22	- 17
5	18	50,0	27,5	22,5
		47,6	34	13,6
		52,8	47	5,8
		70,8	51	19,8
		59,2	21	38,2
6	25	51,2	36,5	14,7
		52,8	41	11,8
		67,6	49	18,6
		74,6	51	23,6
		58,2	18,5	39,7
7	27,5	54,4	38,5	15,9
		60,8	43,5	17,3
		72,8	52	20,8
		79,2	54	25,2
		63,4	17,7	45,7
8	27	55,2	37	18,2
		66,4	46,5	19,9
		76,0	52	24
		82,4	55	27,4
		60,0	17,5	47,5
9	26	60,4	40,5	19,9
		75,2	49	26,2
		83,6	53,5	30,1
		95,0	60,5	34,5
		65,6	18,2	42,5
10	23,5	58,8	39,5	19,3
		70,4	46,5	23,9
		84,4	52,5	31,9
		89,4	58,0	31,4
		51,2	19,0	32,2
11	18	62,6	37,5	25,1
		75,6	47	28,6
		87,6	55	32,6
		95	60	35,0
12	6	64,5	43,5	21,0
		72,8	55	17,8
		94,0	67	27,0
		79,3	68,5	10,8
		5	30	- 25

Figure 7. Excès ou Déficit de calcium dans les eaux
par rapport à la saturation



jours sursaturées pendant cette période, tout comme les eaux d'irrigation elles-mêmes dont les teneurs en calcium (voisines de 60 mg/l) sont supérieures à la concentration d'une solution saturée en équilibre à l'air libre pour des températures comprises entre 20 et 30°C (environ 20 mg/litre).

Nous avons aussi comparé dans le système de représentation de la figure 6 la position de chaque point représentatif des couples de mesures effectuées mois par mois, par rapport au point de la droite théorique (pour la température moyenne du mois) ayant le même abscisse. Ce point correspond donc à la solubilité à l'équilibre de la calcite à la même température et pour une même teneur en CO₂ de l'atmosphère.

Dans le tableau n° 4 figurent les mesures de la concentration en calcium C des eaux de drainage, la concentration théorique correspondante S et la différence C-S qui permet de juger l'excès de calcium dans les eaux de drainage.

Pour chaque mois les quatre premières séries de chiffres concernent les lysimètres 1, 2, 3 et 4 ; la cinquième et dernière série concerne l'eau de pluie ou l'eau d'irrigation suivant le cas.

Les valeurs de C-S obtenues mois par mois pour chaque lysimètre ont été reportées sur les graphiques de la figure 7.

On peut faire à partir de ces courbes un certain nombre de constatations intéressantes.

Tout d'abord dans les lysimètres 3 et 4 ayant reçu les engrais en 1970 et sur lesquels la végétation est abondante, C-S varie exactement de la même façon que la concentration en calcium C des eaux de drainage avec un minimum bien visible en avril correspondant à un léger déficit de calcium et avec un maximum entre septembre et novembre. Pendant toute l'année sauf en avril, les eaux de drainage sont sursaturées.

Dans les lysimètres 1 et 2 les courbes sont un peu différentes. Il n'y a jamais de déficit en calcium mais un minimum de l'excès de calcium en mars-avril et un maximum en novembre. Par contre pendant la période d'irrigation l'excès de calcium est moins élevé que dans les lysimètres 3 et 4.

Quelle interprétation peut-on donner de ces résultats ? Il faut surtout tenir compte de la nature différente des eaux d'irrigation et des eaux de pluie. Ces dernières sont nettement sous-saturées, comme on peut le constater sur la figure 7. En automne le sol renferme une réserve en calcaire facilement solubilisable importante de sorte que les eaux de pluie qui sont agressives se chargent, pendant le transit à travers le sol, d'une quantité importante de calcium, au point de dépasser très nettement la saturation. Puis au fur et à mesure que la réserve en calcaire facilement solubilisable se trouve entamée, l'excès de calcium diminue jusqu'au printemps.

Cette réserve serait plus rapidement attaquée dans les lysimètres 3 et 4, et atteindrait en avril un niveau tel que les dernières eaux ne puissent atteindre la saturation.

Par contre les eaux d'irrigation sont très nettement sur-saturées puisque l'excès de calcium varie entre 32 et 47 mg par litre. Tout se passe comme si le passage de l'eau à travers les lysimètres entraînait la réduction de cet excès de calcium. Il ne s'agit plus en été de solubilisation mais au contraire de précipitation d'une partie du carbonate de calcium apportée par les eaux d'irrigation. Cette précipitation est un phénomène complexe sur lequel nous ne nous attarderons pas. Il semble en tous cas que cette précipitation soit plus lente dans les lysimètres 3 et 4 que dans les lysimètres 1 et 2 puisque les eaux d'écoulement de ces derniers sont moins saturées.

Une dernière question se pose : quelle est la nature de la réserve facilement solubilisable dont nous venons de parler ? Il semble qu'elle soit essentiellement constituée par le carbonate de calcium qui a précipité au cours de la période d'irrigation auquel il convient d'ajouter une petite quantité du calcaire initial ayant subi durant la saison chaude une certaine altération.

6-5 : Apports et pertes de calcium dans les lysimètres entre le 1^{er} juin 1970 et le 15 octobre 1971
(tableau 5)

Des chiffres présentés dans le tableau 5 on peut tirer quelques résultats intéressants sur les apports et pertes de calcium.

1. - Pendant l'hiver 1970-1971, les eaux de pluie contenant en moyenne 5 mg de calcium par litre, l'apport de cet élément est faible (1,3 g). Par contre les quantités de calcium entraînées avec les eaux de drainage sont beaucoup plus importantes, surtout pour les lysimètres 3 et 4.
On peut aussi noter que dans les lysimètres 5 et 6 où les teneurs en CO₂ de l'atmosphère demeurent faibles, les quantités de calcium entraînées sont loin d'être négligeables et se manifestent surtout au cours les premières pluies, en particulier sous forme de particules argileuses en suspension.
En définitive c'est un poids de 9 à 13 g. de calcium qui est abandonné aux eaux de drainage durant la période hivernale.
2. - Pendant les deux étés, les lysimètres 1, 2, 3, 4 ont été arrosés avec des quantités d'eau très importantes: 3 litres par jour en 1970 et 6 litres tous les deux jours en 1971. Du fait de l'évapo-transpiration, le volume des eaux de drainage ne représente qu'une faible partie du volume des eaux d'arrosage. Il en résulte que les quantités de calcium perdues sont peu importantes, bien que les concentrations en calcium soient plus élevées en été qu'en hiver. De plus elles représentent un

TABLEAU 5

		1-6-70	11-11-70	20-4-71	1-6-70	
		au	au	au	au	
		10-11-70	19-4-71	19-10-71	19-10-71	
		irrigation	pluie	irrigation		
Eaux reçues en l.		355	231	426	1042	
Eaux perdues	1	64	198	142	404	
par	2	66	200	149	115	
drainage	3	66	194	126	386	
en l.	4	67	198	129	394	
	5		174		174	
	6		174		174	
CALCIUM apporté en g.	avec eaux	1-2	20,2	1,3	24,8	
		3-4				
		5-6	-	1,3	-	
	avec engrais	3-4	9,35	-	-	
	Total	1-2	20,2	1,3	24,8	16,3
		3-4	29,6	1,3	24,8	55,6
	5-6		1,3	-	1,3	
CALCIUM exporté en g.	avec les	1	4,9	10,2	7,8	22,9
	eaux de	2	6,1	10,6	10,0	26,7
	drainage	3	5,8	14,5	9,4	29,7
		4	6,9	14,7	10,7	32,3
		5	-	11,0	-	11,0
		6	-	9,8	-	9,8
	avec les	1	0,58	-	-	0,58
	récoltes	2	0,33	-	-	0,33
		3	0,79	1,20	-	1,99
		4	1,06	1,60	-	2,66
Total	1	5,5	10,2	7,8	23,5	
	2	6,4	10,6	10,0	27,0	
	3	6,6	15,7	9,4	31,7	
	4	8,0	16,3	10,7	35,0	
	5	-	11,0	-	11,0	
	6	-	9,8	-	9,8	
différence entre	1	+ 14,7	- 8,9	+ 17,0	+ 22,8	
les quantités de	2	+ 13,8	- 9,3	+ 14,8	+ 19,3	
calcium apportées	3	+ 23,0	- 14,4	+ 15,4	+ 23,9	
et	4	+ 21,6	- 15,0	+ 14,0	+ 20,6	
celles exportées	5		- 10,7		- 9,7	
	6		- 8,5		- 8,5	

peu plus du tiers seulement (13 à 17,5 g.) les quantités apportées par l'eau d'irrigation (45 g) qui, nous l'avons déjà dit, est sursaturée en bicarbonate de calcium. Les quantités de calcium qui en 1971 sont mesurées dans le sol après les six mois d'irrigation, varient entre 14 et 17 g. Cela correspond à un poids de carbonate de calcium pur de 2400 à 1700 kilogrammes par hectare. Ce qui est loin d'être négligeable.

Au calcium apporté par les eaux d'irrigation il convient d'ajouter pour les lysimètres 3 et 4 celui qui se trouvait dans le superphosphate répandu en mai 1970. Celui-ci contenant 18,7 % de calcium, l'apport de calcium avec la fumure a donc été de 9,35 g par lysimètre.

3. - Pour la période s'étalant du 1er juin 1970 au 19 octobre 1971 et comportant une saison des pluies et deux périodes d'irrigation, on constate un net enrichissement des lysimètres ayant été irrigués (entre 19,3 et 33,9 g.). Il correspond à un apport de CaCO_3 de 2.000 kilogrammes à l'hectare environ.

Cet enrichissement est encore plus net si on se réfère aux lysimètres non irrigués qui, eux, ont subi une perte en calcium d'environ 9 g.

L'excès de calcium à la fin de l'été 1970 est plus important dans les lysimètres 3 et 4 que dans les lysimètres 1 et 2 (respectivement 23, 21,6, 14,7, et 23,8 g.). Cette différence s'explique par l'action du superphosphate contenant 18,7 % de calcium.

Mais l'exportation du calcium avec les eaux de drainage d'une part et avec la récolte d'autre part pendant l'hiver ayant été plus élevée dans les lysimètres 3 et 4, à la fin de l'été 1971 l'excès de calcium est à peu près le même dans les 4 lysimètres : 23 g. environ pour 1 et 3 (avec cailloux), 20 g. pour 2 et 4 (sans cailloux).

En définitive l'irrigation de la terre calcaire avec de l'eau sursaturée en bicarbonate de calcium, entraîne un enrichissement en calcium qui n'est pas compensé par la lixiviation en hiver sous l'influence de l'eau de pluie. L'augmentation de la teneur en calcium sous l'effet de l'irrigation a lieu aussi bien lorsqu'on n'apporte pas d'engrais que lorsqu'on apporte des engrais contenant du calcium.

L'emploi d'un engrais phosphaté non calcique, phosphate ammoniacal par exemple, serait sans doute la nature à réduire cet accroissement.

Par ailleurs, la quantité de calcium allant en s'accumulant au fur et à mesure que l'on irrigue, il est sans doute préférable de pratiquer en début de saison les cultures les plus sensibles à la chlorose (haricots, tomates) et en fin de saison les cultures les plus résistantes (aubergines, courgettes, concombres).

7. CONCLUSION

En résumé on a pu mettre en évidence à partir des expériences sur lysimètres un certain nombre de faits intéressants :

- La teneur en CO₂ de l'atmosphère d'un sol irrigué varie au cours de l'année en fonction de l'activité biologique : elle est nettement plus élevée pendant la période d'irrigation que pendant l'hiver. L'apport d'engrais a pour effet d'accroître la quantité d'anhydride carbonique.
- La concentration en calcium des eaux ayant traversé les lysimètres est également soumise à des variations saisonnières qui se font dans le même sens que les variations de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Il y a, en outre, une corrélation assez étroite, en particulier en été, entre les quantités des deux corps.
- Il y a presque toujours excès de calcium dans les eaux de drainage par rapport à la saturation d'une solution de calcite pour la même température. Mais cet excès est beaucoup moins important pendant la saison des pluies, en particulier à la fin de celle-ci, que pendant la période d'irrigation. Tout se passe comme si en hiver il y avait dissolution par les eaux de pluie du calcaire le plus facilement solubilisable contenu dans le sol et inversement, en été, précipitation d'une partie du calcaire apportée avec les eaux d'irrigation.
- En définitive l'apport de calcaire par l'eau d'irrigation n'est pas compensé par les pertes intervenant en hiver sous l'effet de la pluie.

Comment s'effectue la précipitation du carbonate de calcium ainsi apporté ?; y a-t-il une zone de précipitation préférentielle dans le sol ?; comment ce carbonate de calcium est-il en partie redissout en hiver sous l'action de l'eau de pluie ? telles sont les questions qui maintenant se posent. C'est pour répondre à ces questions que nous envisageons d'effectuer des expériences, faisant intervenir de l'eau contenant du calcium radio-actif (Ca 45), d'abord en laboratoire dans des colonnes de terre calcaire et par la suite sur les lysimètres eux-mêmes.

Dans la présente étude nous avons assimilé les courbes de solubilité du calcaire contenu dans la terre servant aux essais, aux courbes de solubilité de la calcite pure. Ce n'est là qu'une hypothèse que nous chercherons à vérifier, en même temps que nous étudierons en laboratoire l'influence de la pression partielle du gaz carbonique et de la température sur le pH les différents sols calcaires du Liban-Sud.

Enfin ces recherches risqueraient d'être académiques si elles ne s'accompagnaient pas d'observations sur le terrain et d'expériences in situ dans les conditions mêmes de l'agriculture de ce pays.

Pour cette raison nous avons entrepris quelques essais en parcelles afin de tester l'influence de l'apport de matière organique (fumier et engrais vert enfoui) et du mode d'irrigation (irrigation par gravité et irrigation par aspersion) sur les rendements de quelques cultures d'une part et sur l'évolution du sol calcaire servant à ces essais d'autre part.

Bibliographie

- 1- Bachelier G. Problèmes relatifs à l'atmosphère du sol et utilisation possible d'un détecteur de gaz pour la mesure de sa teneur en gaz carbonique
Cah. CRSTOM ser. Pédol. Vol VI N° 1 - 1968
- 2- Crachet H. Le pH des sols calcaires
Bulletin AFES juillet-août 1967 N° 4
- 3- Drouineau G. La chlorose calcaire.
Bulletin de la société française de physiologie végétale T9 N°4 - décembre 1963
- 4- Stchouzkoy-Muxart T. Contribution à l'étude de la solubilité de la calcite dans l'eau en présence d'anhydride carbonique, à 20° et 30°C
Bulletin de l'association de géographes français N° 389-390 mai-juin 1971
- 5- Thiebault H. - SaYouni M. - Lamouroux M.
Analyses quantitatives de roches silicatées, calcaires ou dolomitiques et de leurs produits d'altération
Rapport Roneo IRAL-CRSTOM 1968
- 6- Yaalon D.H. Physico-chemical relationship of CaCO_3 , pH and CO_2 in calcareous soil
Trans. intern. Cong. Soil Ser. Leopoldville N° 2 356-369 1954
- 7- Yaalon D.H. Problems of soil testing on calcareous soils
Plant and Soil VIII N°3 mars 1957
- 8- Enquête Pédologique et programmes d'irrigation connexes.
Rapport final volume II pédologie
FAO/SF : 51/LEB-IC Rome 1969
- 9- Lamouroux M. Etude des sols formés sur roches carbonatées
pédogénèse fersiallitique au Liban
collection mémoires CRSTOM N°56 Paris 1972