

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

Direction des Ressources en Eau et en Sol

CENTRE DE GEOMORPHOLOGIE DU CNRS CAEN

Convention D.R.E.S. - O.R.S.T.O.M.

J. BONVALLOT, Géographe ORSTOM

J. P. DELHOUME, Pédologue ORSTOM

J. L. DUMONT, Ingénieur C.N.R.S.

**ETUDES EXPERIMENTALES
SUR LA DYNAMIQUE DU CALCAIRE**
RESULTATS D'UNE EXPERIENCE PRELIMINAIRE

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Mission en Tunisie



Décembre 1978

REPUBLIQUE TUNISIENNE
Ministère de l'Agriculture
Direction des Ressources
en Eau et en Sols

CENTRE DE GEOMORPHOLOGIE
du CNRS de Caen

MISSION ORSTOM
en TUNISIE

ETUDES EXPERIMENTALES SUR LA DYNAMIQUE
DU CALCAIRE
RESULTATS D'UNE EXPERIENCE PRELIMINAIRE

J. BONVALLOT Géographe ORSTOM
J.P. DELHOUME Pédologue ORSTOM
J.L. DUMONT Ingénieur Chimiste du CNRS.

Décembre 1978

S O M M A I R E

INTRODUCTION

I - PROTOCOLE DE L'EXPERIENCE PRELIMINAIRE.

I-1- Principe

I-2- Dispositif expérimental.

II - DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE PRELIMINAIRE.

II-1- Composition de l'eau introduite

II-2- Cycles réalisés.

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

III-1- Composition des eaux de drainage.

III-2- Teneurs en CO₂.

III-3- Bilan ionique partiel.

III-4- Etat de la colonne en fin d'expérience.

IV - INTERPRETATIONS.

V - CONCLUSION.

BIBLIOGRAPHIE.

Dans le cadre des programmes de recherches de l'ORSTOM, les travaux entrepris par deux d'entre nous en Tunisie centrale montrent qu'il existe une dynamique actuelle du calcaire dans le paysage (BONVALLOT H., DELHOUME J.P., 1978).

Une station de mesures "in situ" a été installée sur le piedmont sud-est du djebel Semmama (Tunisie centrale) afin de déterminer les paramètres physico-chimiques qui régissent la mise en mouvement du carbonate de calcium : régime hydrique, température, pH, pression partielle de CO_2 .

Mais, pour étudier séparément l'influence de chacun de ces paramètres sur les mouvements du calcaire et accélérer les processus, il est apparu nécessaire d'entreprendre des expérimentations en laboratoire qui sont réalisées au Centre de Géomorphologie du CNRS de Caen.

Une expérience préliminaire s'est déroulée du 15 novembre 1977 au 31 janvier 1978, dont le but était de définir un protocole rigoureux en vue des expérimentations ultérieures, et de mettre au point les techniques de mesures.

I. PROTOCOLE DE L'EXPERIENCE PRELIMINAIRE

I-1- Principe

On soumet un sol brun isohumique de Tunisie centrale, reconstitué dans une colonne à des cycles humectation-dessiccation, en réalisant des percolations périodiques "per descensum" et un chauffage continu en surface. Les eaux introduites ont une composition voisine de celle des eaux de ruissellement recueillies sur le terrain.

Durant l'expérimentation, les paramètres physico-chimiques sont mesurés sur le sol (température, pression partielle de CO_2) dans les eaux de drainage (éléments dissous, pH)

I-2- Dispositif expérimental (Fig.1)

I-2-1- Garnissage de la colonne

On utilise une colonne en plexiglas (diamètre intérieur : 94 mm., hauteur 100 cm.) dans laquelle on dispose l'échantillon de sol en couches successives de 5 cm. d'épaisseur, sans damer ni tasser, la colonne étant couchée horizontalement pour éviter le tri granulométrique du matériau.

I-2-2- Sol utilisé

Pour cette première expérience, nous n'avons utilisé que la partie supérieure (10 à 20 cm. de profondeur) de l'horizon A1 d'un sol brun isohumique, provenant du piedmont du djebel Semmama (bio-climat méditerranéen semi-aride supérieur)

Les caractères analytiques de cet échantillon sont donnés dans le tableau I.

La texture est sablo-limoneuse, avec une forte proportion de sable grossier, par rapport aux éléments les plus fins (argiles et limons) Les éléments supérieurs à 2 mm, peu abondants, sont essentiellement des graviers de calcaire dont la taille est comprise entre 2 mm et 2 cm.

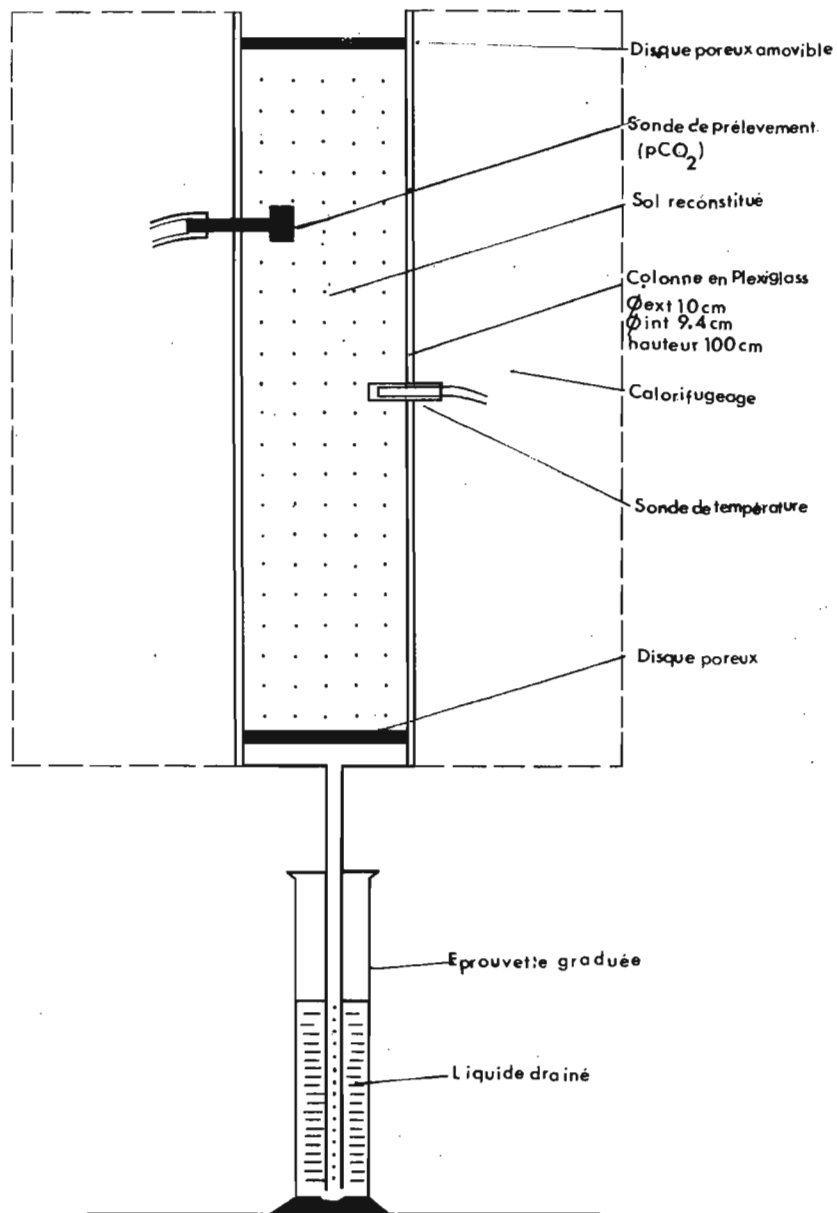


FIG 1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

<u>Granulométrie de la terre fine %</u>	<u>Matière organique totale %</u>
Argile : 14,2	= 1,6
Limon fin : 8,2	Carbone % = 0,9
Limon grossier : 2,6	Azote % = 0,07
Sable fin : 17,5	C/N = 13
Sable grossier : 56,5	
<u>% Eléments grossiers</u> : 4,1	Calcaire total % = 22
	Calcaire actif % = 7
	Gypse = traces
Phosphore total (P_2O_5 ppm) = 740	Densité apparente = 1,5
Potassium total (K_2O %) = 0,16	Densité réelle = 2,58
Fer total (Fe_2O_3 %) = 3,95	Porosité (%) = 42
Fer libre (Fe_2O_3 %) = 1,82	pF 2,8 (%) = 7,6
	pF 4,2 (%) = 4,2
Capacité d'échange (mé/100g.) = 4,2	
Conductivité (mmhos/cm 25°C) = 0,4	pH eau 1/2,5 = 7,2
<u>Pâte saturée (mé/l.)</u>	
$Ca^{++} = 2,64$	$Cl^{-} = 0,86$
$Mg^{++} = 0,23$	$SO_4^{--} = 0,68$
$K^{+} = 0,064$	* Alc = 2,06
$Na^{+} = 0,713$	pH = 7,19
** pCO_2 calculée avec ces valeurs = 0,0098 atm.	

Nota = * Alc (ou TAC) = $(HCO_3^{-}) + 2(CO_3^{--}) + (OH^{-}) + (A^{-}) - (H_3O^{+})$

(A^{-}) est la concentration en anions d'acides faibles, due probablement aux acides organiques.

Si on néglige (CO_3^{--}), (OH^{-}) et (H_3O^{+}) aux pH observés :

$$Alc = (HCO_3^{-}) + (A^{-})$$

$$** pCO_2 = \frac{(CO_3H^{-})(H^{+})}{K_1 Kh} = \frac{Alc (H^{+})}{K_1 Kh} \text{ avec } K_1 = \frac{(CO_3H^{-})(H^{+})}{(CO_2)} = 10^{-6,45} \text{ mol/l/}$$

Kh = constante de Henry du $CO_2 = 38 \times 10^{-3}$ mole/l/atm. à 20°C

Tableau I - Caractères analytiques de l'échantillon de sol utilisé pour l'expérience préliminaire.

La teneur en matière organique est faible. Le rapport C/N relativement bas indique un humus évolué.

Le tiers du carbonate de calcium est très fin (calcaire actif), le restant se présentant sous forme plus grossière (limon grossier et sables) d'origine lithique. Nous n'observons en effet aucune accumulation de calcaire secondaire de type pseudo-mycélium, amas, nodules...

L'échantillon ne présente aucun caractère de salinité (conductivité très faible) et ne contient pas de gypse.

La capacité d'échange est très faible du fait de la pauvreté en éléments fins (argiles et limon fin) et en matière organique.

La porosité est élevée, en rapport avec la texture sableuse, avec corrélativement une capacité de rétention en eau peu élevée.

I-3- Equipement de la colonne

De bas en haut de la colonne, on a disposé 31 sondes régulièrement espacées (tous les 3 cm.) pour la mesure des pressions partielles de CO_2 ($p\text{CO}_2$), et 7 sondes pour la mesure des températures (tableau IV). Une lampe à infra-rouges, installée au sommet, permet de créer un gradient thermique dans le sol. L'ensemble du dispositif est calorifugé.

Les eaux percolent "per descensum" à travers le sol, le liquide de drainage étant recueilli dans une éprouvette graduée.

I-4- Méthodes de mesures et d'analyses

I-4-1- Température

La température est mesurée à l'aide de sondes en platine, noyées dans des gaines collées à l'intérieur de la colonne.

I-4-2- Teneurs en gaz carbonique

Le prélèvement de l'atmosphère du sol est effectué au moyen d'aiguilles hypodermiques fixes enfoncées de 3 cm. dans le sol et reliées à une seringue à gaz par un tube souple. 1 cm³ de gaz est soutiré et injecté ensuite dans un appareil de mesures de $p\text{CO}_2$ sanguine, type Radiometer (D.613).

I-4-3- Analyses de l'eau de drainage

Le pH est immédiatement mesuré sur le liquide soutiré à l'aide d'une seringue à la base de la colonne. Lorsque de prélèvement n'a pu être effectué, le pH a été déterminé sur l'eau de drainage. Mais cette dernière mesure est moins fiable, par suite des échanges rapides de CO_2 avec l'air ambiant.

Les eaux de drainage sont récupérées à la base de la colonne. Al c et Ca sont analysés, dans la mesure du possible, au début du drainage. Le reliquat, après acidification par HCl concentré pour éviter la précipitation de Ca CO_3 , est conservé à 5°C en vue des analyses ultérieures..

Les éléments suivants sont déterminés :

- Ca⁺⁺, par volumétrie EDTA-calcéine,
- Mg⁺⁺, par absorption atomique,
- Na⁺ et K⁺, par spectrométrie de flamme,
- SO₄⁻⁻, par néphélométrie.
- Al c , par acidimétrie ou par titrage potentiométrique.

II- DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE PRELIMINAIRE

II-1- Composition de l'eau introduite

Pour chacune des phases d'humectation du sol, on a utilisé la même eau dont la composition chimique est précisée dans le tableau II.

Sa préparation est obtenue de la manière suivante : à une solution diluée de bicarbonate de calcium, on ajoute à l'état solide de l'oxyde de magnésium, du chlorure de sodium et du sulfate de potassium. Après barbottage sous courant de CO_2 pur et agitation (temps de contact 24h à 20°C), la solution est agitée sous courant de mélange gazeux gaz carbonique-azote à 1% de CO_2 en volume ($p\text{CO}_2 = 0,01 \text{ atm.}$) correspondant à la saturation en carbonate de calcium à 20°C. Cette solution est conservée sous un courant de ce gaz.

La composition est voisine de celle des eaux qui ont été prélevées sur le terrain au cours de l'été 1976 lors des périodes de ruissellement, sous températures ambiantes comprises entre 30°C et 40°C.
(tableau III)

Eléments	Quantité introduite	Quantité mesurée
Ca ⁺⁺	2,56	2,70
Mg ⁺⁺	0,18	0,272
Na ⁺	0,16	0,168
K ⁺	0,084	0,085
SO ₄ ⁻⁻	0,084	0,104
Cl ⁻	0,16	0,172
Alc [*]	2,74	2,97
Fe ⁺⁺⁺	0	0,003
Al ⁺⁺⁺	0	0,036
SiO ₃ ⁻⁻	0	0,006
pCO ₂ (atm.)	0,01	0,01
pH	théorique ^{**} = 7,31	mesuré = 7,34

Tableau II. Composition de l'eau introduite au sommet de la colonne.
(teneurs exprimées en m.é./litre).

* Dans ce cas Alc = (CO₃H⁻)

** Calculé à 20°C pour les concentrations introduites selon le nota du tableau I.

Eléments	22/07/1976	10/08/1976	10/08/1976	22/08/1976	22/08/1976
Ca ⁺⁺	2,36	2,00	2,20	2,36	2,36
Mg ⁺⁺	0,08	0,08	0,08	0,40	0,08
Na ⁺	0,22	0,13	0,13	0,09	0,09
K ⁺	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
SO ₄ ⁻⁻	0,10	0,04	0,04	0,06	0,06
Cl ⁻	0,11	0,17	0,14	0,14	0,20
CO ₃ H ⁻	2,30	1,90	2,30	2,71	2,30
pH	7,5	7,5	7,4	7,2	7,1

Tableau III. Composition d'eaux de ruissellement de Tunisie centrale.
(Teneurs exprimées en m.é./litre).

II-2- Cycles réalisés (Fig.2)

Les opérations suivantes ont été réalisées du 15 novembre 1977 au 31 janvier 1978 (tableau IV).

Phases 0-1 = 15/XI/1977 au 21/XI/1977

Ces phases sont destinées à parfaire le tassement du sol et à humidifier l'échantillon introduit à l'état sec dans la colonne. Pour cela, le sol est saturé avec l'eau "reconstituée", en ambiance isotherme à 20°, par un écoulement "per descensum" à charge constante.

Phase 2-3-4 = du 21/XI/1977 au 14/XII/1977

On réalise, sur le sol ainsi amené à sa capacité de rétention, trois cycles humectation-dessiccation par application tous les 8 jours de 100 cm³. d'eau *. Entre chaque humectation, le chauffage crée un gradient thermique du haut en bas, constant tout au long des phases 2-3-4.

Profondeur (cm.)	Température (°C)
0,5	59,1
2	55,5
5	44,8
10	39,1
20	31,3
40	23,4
80	20,1
Température ambiante	19,8

Tableau V - Gradient thermique du sol de la colonne.

* 100 cm³. introduits au sommet de la colonne correspondent à une hauteur de 14 cm.

Phase	Date	Heure	Quantité d'eau appliquée au sommet de la colonne (cm ³)	Quantité d'eau ayant drainé (cm ³)	Quantité d'eau accumulée dans la colonne et évaporée (cm ³)	Conditions thermiques
0	15.XI.77	9h15 10h45 16h45	2500	début drainage a : 400 b : 150 fin drainage (total 550)	1950	Isotherme à 20°C
1	18 XI.77 19.XI.77	9h15 11h15 14h15 14h45 15h30 17h00 18h00 9h00	100 100 300 (total 500)	0 0 début drainage a : 70 b : 80 c : 65 d : 155 fin drainage (total 370)	130	Isotherme à 20°C
2	21.XI.77 22.XI.77	14h00 14h10 17h20 10h00	100	début drainage a : 35 b : 65 fin drainage (total 100)	0	Gradient thermique 60° - 20°C
3	28.XI.77	18h30	100	0	100	60° - 20°C
4	7.XII.77	18h30	100	0	100	60° - 20°C
55	14.XII.77 15.XII.77 16.XII.77 17.XII.77 18.XII.77	12h20 13h35 15h15 14h25 16h50 19h30 9h30 18h30 11h00 10h30 12h00	100 100 200 (total 400)	début drainage a : 50 b : 65 c : 130 d : 40 e : 40 f : 14 g : 21 (total 360)	40	Isotherme à 20°C
6	18.XII.77 19.XII.77	13h00 10h20	200	a : 75	125	Gradient thermique 60°-20°C
7	28.XII.77	11h30	200	a : 78	172	60°-20°C
8	3.I.78	9h30	100	0	100	60°-20°C
9	18.I.78		100	0	100	60°-20°C
10	25.I.78		100	0	100	60°-20°C

Tableau IV - Déroulement de l'expérience préliminaire - Cycles réalisés.

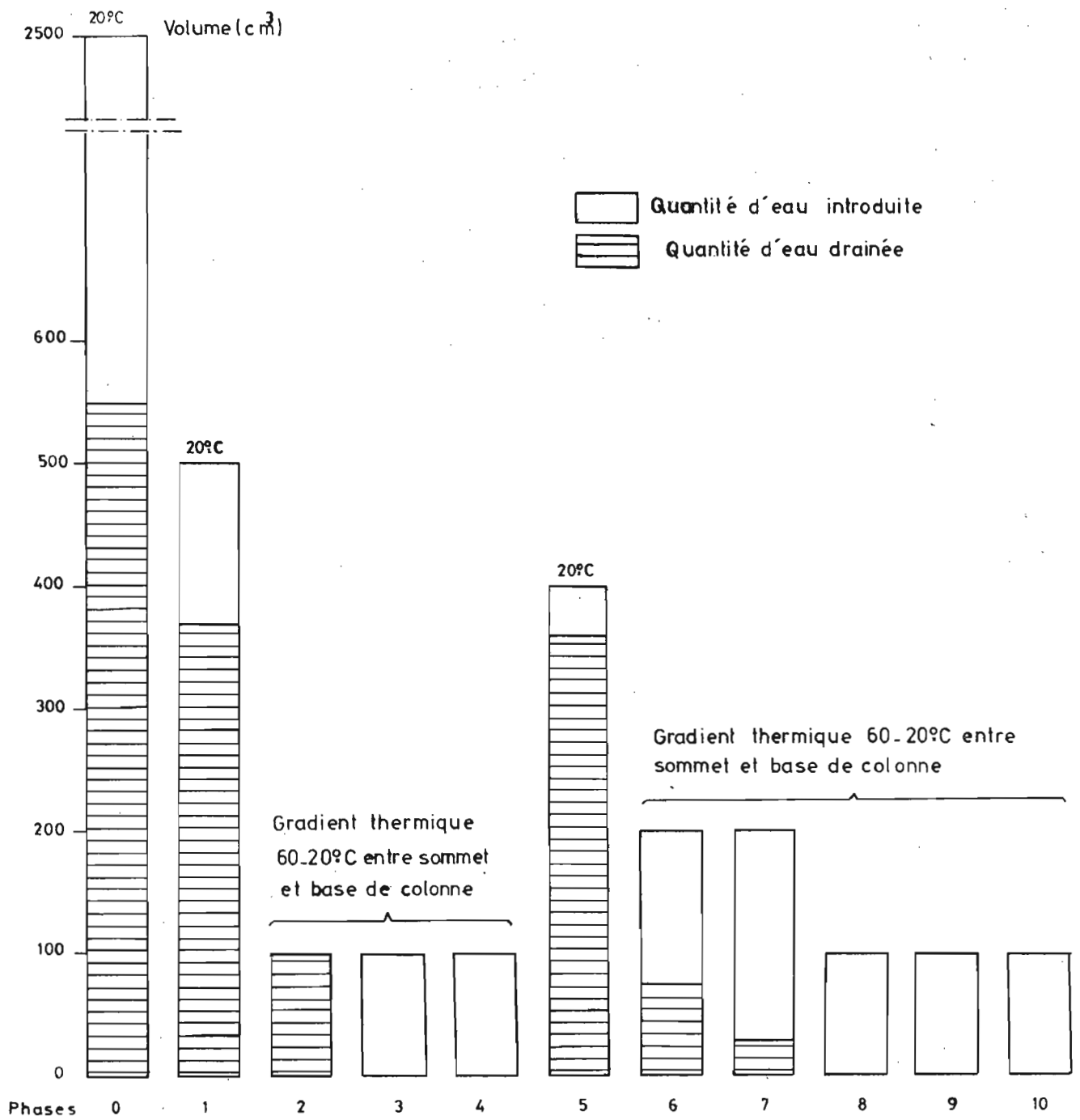


Fig. 2. Déroulement de l'expérience

Phase 5 - du I4/XII/1977 au I8/XII/1977

N'obtenant plus de drainage lors des phases précédentes, il est apparu utile de resaturer le sol, en ambiance isotherme à 20°C.

Phase 6 à IO - du I8/XII/1977 au 3I/I/1978

Une nouvelle succession de cycles humectation-dessiccation a été réalisée avec un gradient thermique identique à celui des phases 2, 3 et 4.

En résumé, se succèdent : une période humide isotherme à 20°C (phase 0 et 1), trois cycles humectation-dessiccation (phases 2-3-4) avec chauffage (60-20°C), une période humide isotherme à 20°C (phase 5), cinq cycles humectation-dessiccation avec chauffage (phases 6 à IO).

III - RESULTATS EXPERIMENTAUXIII-1- Composition des eaux de drainage

Les résultats des analyses des eaux qui ont percolé lors de chacune des phases, sont présentés dans le tableau VI.

On constate qu'elles sont plus concentrées que celles qui sont utilisées pour les percolations.

Les teneurs en calcium sont, au début de drainage, presque deux fois supérieures et atteignent ensuite 3 à 4 fois la valeur initiale aussi bien en période isotherme à 20°C qu'en période de chauffage.

On note la même évolution pour la magnésium, le sodium et l'alcalinité. Par contre, la concentration en potassium est plus faible dans les eaux de drainage que dans l'eau introduite. La teneur en SO_4^{--} est plus forte au début mais décroît ensuite au cours de l'expérience.

Lors de la phase C, il y a eu exportation de fer, de silice et d'alumine, donc dissolution par les eaux introduites puisque dans celles-ci, ces éléments sont absents. Au cours des phases suivantes, ces analyses n'ont pas été effectuées.

Phases	Fraction drainée	Ca ⁺⁺	M ⁺⁺ g	Na ⁺	K ⁺	Alc	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	pH
0	a	4,50	0,31	0,47	0,05	<u>3,9</u>	0,90		8,02
	b	5,50							7,95
1	a								7,59
	d	4,20	0,27	0,48	0,06	<u>4,03</u>	0,44		7,90
2	b	4,80							<u>7,46</u>
	*	4,80							<u>7,65</u>
	*	4,80	0,33	0,50	0,05	<u>4,84</u>	0,29		
	*	8,00							7,37
5	a	10,70	1,30			12,0 - <u>12,47</u>	0,270	0,153	7,14
	b	10,40				11,6 - <u>11,43</u>			7,09
	c	9,20				10,4 - <u>10,9</u>	0,228	0,077	7,06
	d	8,90	1,22			9,0 - <u>9,91</u>			7,36
	e	8,20	1,10			8,0 - <u>9,07</u>		0,0145	7,20
	*	9,00					0,228		<u>6,90</u>
	f	8,90	1,14			<u>9,77</u>		0,0403	
6	a		1,10			8,5 - 8,79		0,0403	
	*	7,90							<u>7,00</u>
7	a	9,56				12,0			7,04

Teneurs exprimées en milli-équivalent par litre. Les valeurs de Alc soulignées sont déterminées par calcul. (voir tableau I; A^- étant négligé). Les valeurs de pH soulignées sont mesurées "in situ" sur des prélèvements effectués à la base de la colonne, ainsi que les analyses précédées d'un *.

Les valeurs de pH non soulignées sont mesurées directement sur les eaux de drainage.

Fe, Si et Al ont été dosés uniquement lors du drainage "a" de la phase zéro :

$$Fe^{+++} = 0,0177 \text{ mé/l.}$$

$$SiO_3^{--} = 0,480 \quad "$$

$$Al^{+++} = 0,050 \quad "$$

Tableau VI - Composition des eaux de drainage.

Le pH des premières eaux de drainage est de 8. Il baisse ensuite régulièrement et devient voisin de 7, inférieur à celui de l'eau introduite (7,3).

III-2- Teneurs en CO₂ (tableau VII)

Les teneurs en gaz carbonique de l'atmosphère du sol ont été mesurées à la fin de chacune des phases de dessiccation, juste avant l'humectation suivante.

D'une manière générale (Fig.3 et 4), elles augmentent toujours du haut vers le bas de la colonne. Dans la moitié inférieure de celle-ci, la pression partielle de CO₂ dépasse largement celle de la solution introduite et peut atteindre, à la base, des concentrations dix fois supérieures.

A mesure que les cycles humectation-dessiccation se poursuivent, on constate à chaque profondeur, une diminution générale des teneurs en CO₂. Mais alors que cette diminution s'effectue régulièrement sur les 60 cm. supérieurs de la colonne, dans les 30 cm. inférieurs, les teneurs présentent deux maxima les 7/XII/77 et 17/I/78; ce qui fait supposer que l'humidité du sol a une influence sur la production de CO₂, puisqu'elle est plus forte à la base de la colonne.

III-3- Bilan ionique partiel

Seuls les dosages de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, SO₄⁻⁻, et Alc qui ont été effectués à chacune des phases ayant donné lieu à un drainage font l'objet d'un bilan, présenté dans le tableau VIII et sur la figure 5.

En fin d'expérience, le bilan global est positif pour Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et Alc : il y a eu une accumulation qui représente, pour le calcium 25% des quantités introduites, pour le magnésium 27% et pour Alc 30%. Par contre pour l'ion sulfate, le bilan est négatif : sur 0,454 m.é./l. introduit, 0,794 m.é./l. ont été exportés. Il y a eu dissolution de ce sel du fait de sa plus grande solubilité.

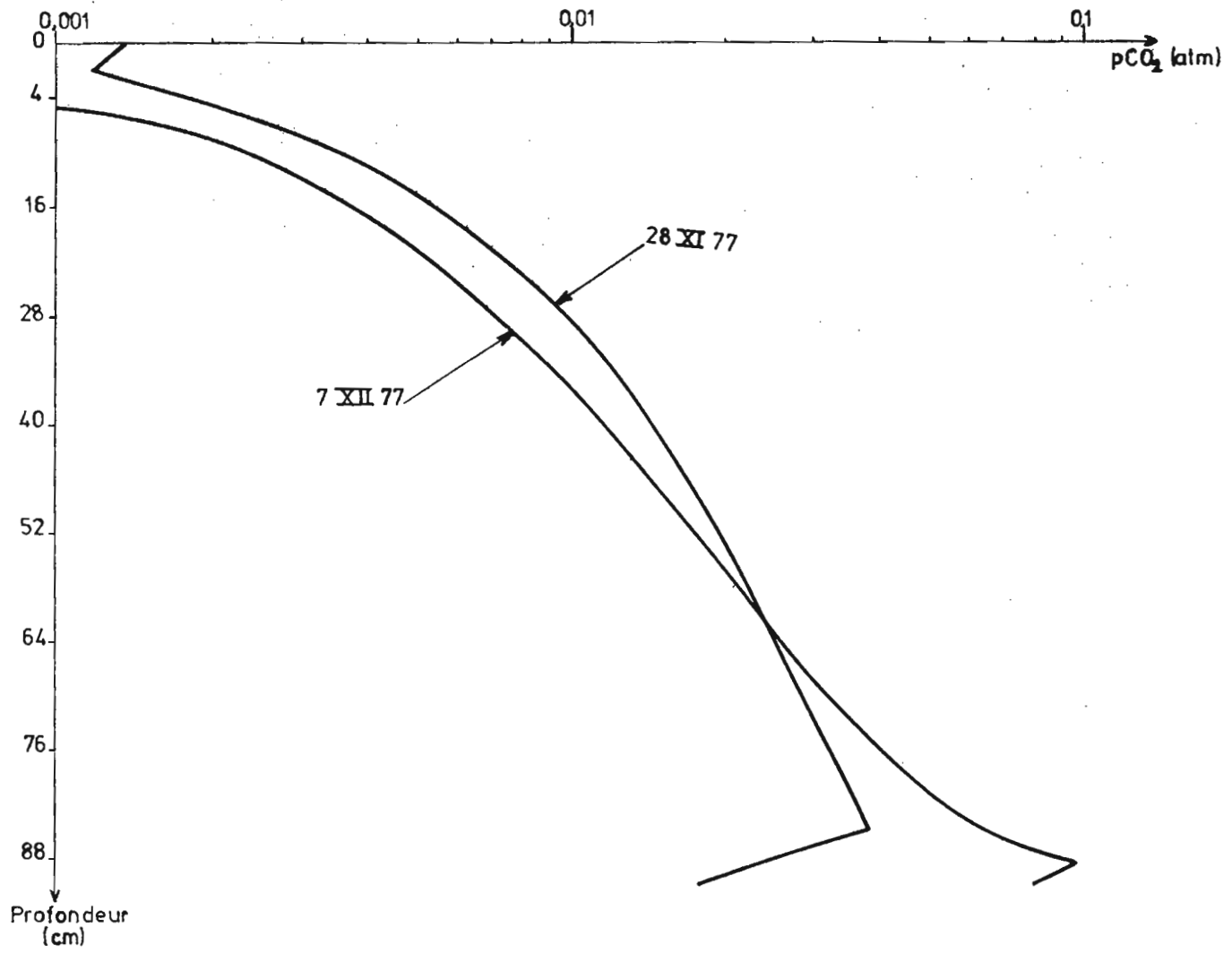


Fig.3 Teneur en CO₂ de l'atmosphère du sol

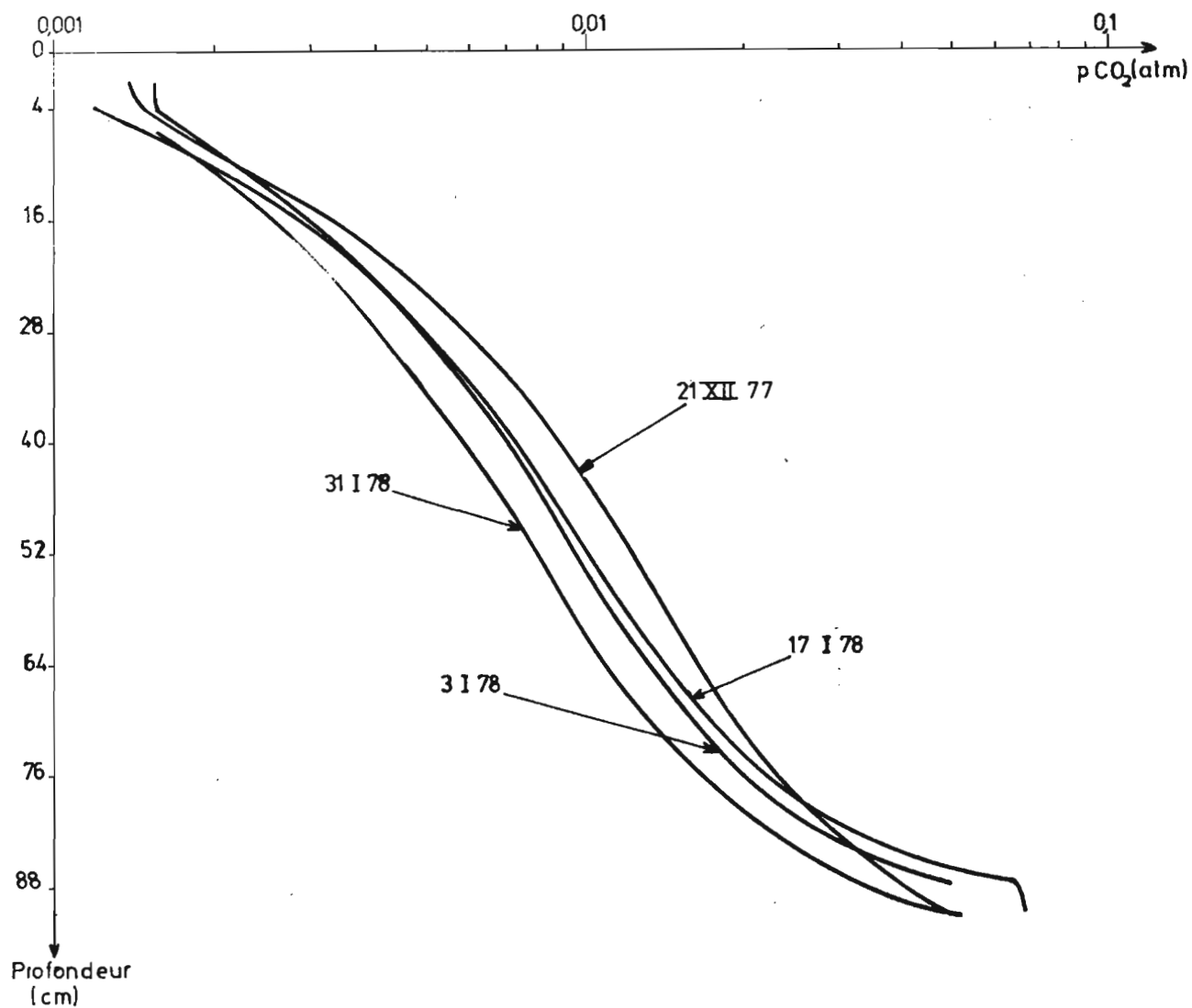


Fig.4 .Teneur en CO₂ de l'atmosphère du sol

Profondeur (cm)	Température (°C)	PCO ₂ en atmosphère					
		28.XI.77	7.XII.77	21 XI.77	3.I.78	17.I.78	31.I.78
7	42	0,0026	0,0015	0,0018	0,0015	0,0018	0,0016
13	36,5	0,0045	0,003	0,0028	0,0024	0,00265	0,0022
19	32	0,0062	(0,0044)	0,0039	(0,0024)	(0,0034)	0,0029
25	28,8	0,0087	0,0061	0,0056	0,0045	0,00435	0,00375
34	25,1	0,0125	0,0097	0,0075	0,0060	0,0058	0,0050
46	22,5	0,017	0,015	0,0105	0,0081	0,0085	0,0066
58	21,2	0,0215	0,021	0,0140	0,0110	0,0110	0,0086
70	20,4	0,0285	0,0325	0,0190	0,0155	0,0165	0,0125
82	20	0,0350	0,050	0,0295	0,0260	0,0285	0,0220
85	20	0,0375	0,070	0,027	0,037	0,043	0,028
88	20	0,024	0,095	0,045	0,049	0,064	0,031

Tableau VII - Teneurs en CO₂ de l'atmosphère du sol de la colonne à différentes profondeurs.

(Les valeurs entre parenthèses sont obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs antérieures et postérieures).

		Régime isotherme à 20°C		Chauffage 60 - 20°C			Régime isotherme à 20°C		Chauffage 60 - 20°C	
Phases		0	1	2	3	4	5	6	7	8-9-10
Ca ⁺⁺	a	6,750	1,350	0,270	0,270	0,270	1,080	0,540	0,540	0,810
	b	2,625	1,555	0,480	0	0	3,400	0,595	0,270	0
	c	+ 4,125	- 0,205	- 0,210	+ 0,270	+ 0,270	- 2,320	- 0,055	+ 0,270	+ 0,810
	d	+ 4,125	+ 3,920	+ 3,710	+ 3,980	+ 4,250	+ 1,930	+ 1,875	+ 2,145	+ 2,955
Mg ⁺⁺	a	0,680	0,135	0,028	0,028	0,028	0,108	0,054	0,054	0,082
	b	0,172	0,100	0,034	0	0	0,448	0,082	0,036	0
	c	+ 0,508	+ 0,036	- 0,006	+ 0,028	+ 0,028	- 0,340	- 0,028	+ 0,018	+ 0,082
	d	+ 0,508	+ 0,544	+ 0,538	+ 0,566	+ 0,594	+ 0,254	+ 0,226	+ 0,244	+ 0,326
Alc	a	7,425	1,480	0,297	0,297	0,297	1,188	0,594	0,594	0,891
	b	2,145	1,490	0,484	0	0	3,929	0,659	0,336	0
	c	+ 5,280	- 0,010	- 0,187	+ 0,297	+ 0,297	- 2,741	- 0,065	+ 0,258	+ 0,891
	d	+ 5,280	+ 5,270	+ 5,083	+ 5,380	+ 5,677	+ 2,936	+ 2,871	+ 3,129	+ 4,020
SC ₄ ⁻⁻	a	0,260	0,052	0,010	0,010	0,010	0,042	0,020	0,020	0,045
	b	0,494	0,182	0,028	0	0	0,088	0,016	0,006	0
	c	- 0,234	- 0,110	- 0,018	+ 0,010	+ 0,010	- 0,046	+ 0,004	+ 0,014	+ 0,045
	d	- 0,234	- 0,344	- 0,362	- 0,352	- 0,342	- 0,388	- 0,384	- 0,370	- 0,325

Tableau VIII - Bilan ionique des éléments (teneurs exprimées en milli-équivalent)

- a = quantité introduite
b = quantité exportée lors du drainage
c = bilan de phase (a - b)
d = bilan cumulé.

III-4- Etat de la colonne en fin d'expérience (Fig.6)

III-4-1- Humidité du sol (Fig.6A)

Les teneurs en eau ont été déterminées du haut en bas de la colonne en fin d'expérience (tableau IX).

Profondeur (cm.)	Humidité pondérale (%)
0 - 1	0
3 - 6	0
6 - 11,5	8,7
11,5 - 20,5	9,4
20,5 - 30	10,3
30 - 39	11,3
39 - 47,5	11,4
47,5 - 56,5	11,7
56,5 - 65,5	13,0
65,5 - 74,5	12,5
74,5 - 83	14,9
83 - 89	17,2
89 - 92	16,1

Tableau IX - Humidité pondérale du sol en fin d'expérience.

Sous l'influence du chauffage, les six centimètres supérieurs du sol sont secs. La teneur en eau croît ensuite jusqu'à la base de la colonne où elle présente un maximum à 85 cm.

III-4-2- pH du sol (Fig.6B)

L'ensemble des cycles humectation-dessiccation a provoqué d'une part une différenciation importante du pH du sol qui passe régulièrement (sauf de 40 à 50 cm.) de 8,54 au sommet à 7,15 à la base, et d'autre part une augmentation des valeurs par rapport au pH du sol de départ. (7,2).

III-4-3- Activité bactérienne (Fig.6C)

Le nombre de bactéries a été déterminés en fin d'expérimentation sur des échantillons du sol de la colonne : tableau X.

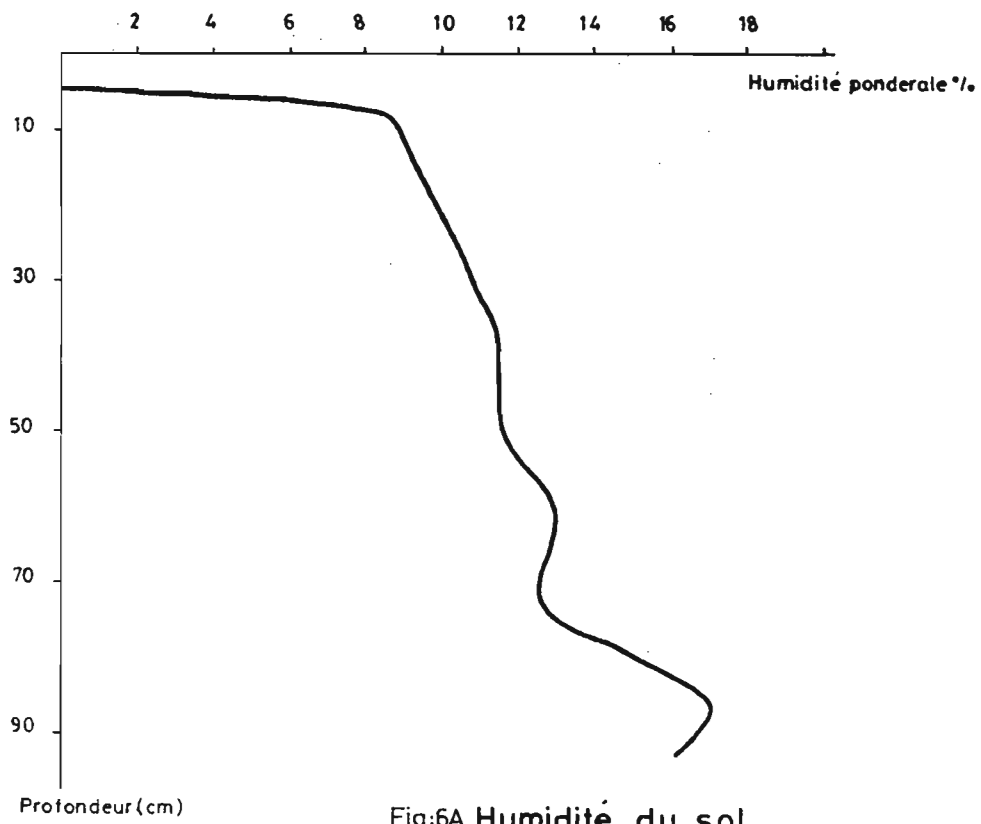


Fig:6A Humidité du sol

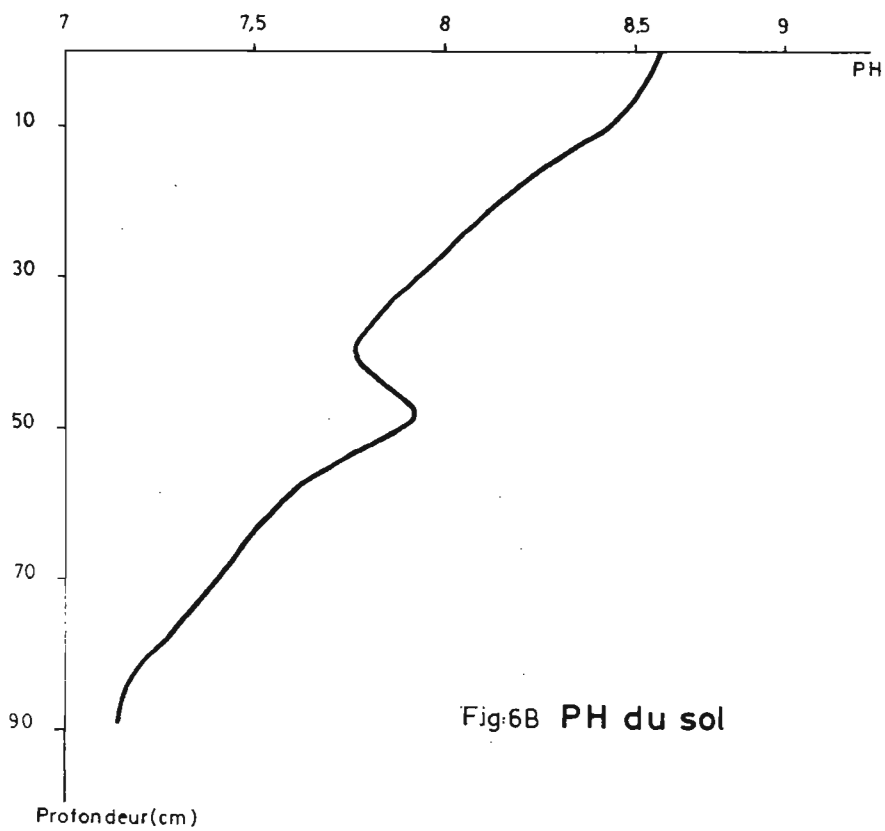


Fig:6B PH du sol

Profondeur (cm.)	Nombre de bactéries ($\times 10^3$)		Activité nitrifiante
	Milieu PV	Milieu M	
3	19	180	0
6	8	100	0
11,5	1296	1070	0
20,5	82	200	0
30	141	230	0
39	8424	14350	0
47,5	91	150	0
56,5	283	230	0
65,5	861	760	0
74,5	574	320	0
83	5740	12910	0
89	3560	7240	0

Tableau X - Nombre de bactéries en fin d'expérience de haut en bas de la colonne ($\times 10^3$, pour 1 ml. d'échantillon).

(Milieu PV = peptone-viande.
Milieu M = milieu minéral).

L'activité biologique est surtout importante à 2 niveaux (39 cm. et 83-90 cm.).

IV - INTERPRETATIONS

IV-1- Teneurs en CO_2 dans le profil vertical - Corrélation avec les teneurs en eau.

Les teneurs en CO_2 supérieures à celles de l'eau introduite, mesurées dans la moitié inférieure de la colonne, tendent à prouver l'existence de sources de CO_2 ayant comme origine une vie biologique qui a été mise en évidence en fin d'essai.

De haut en bas, l'enrichissement en CO_2 suit celui des teneurs en eau. L'influence de l'humidité du sol pourrait jouer sur les teneurs en CO_2 de deux façons : ou bien elle est favorable à la production biologique du CO_2 , ou bien elle atténue l'évasion de ce gaz vers l'extérieur (vers le sommet du tube). Cette diffusion étant d'autant plus intense que le sol est mieux aéré donc plus sec.

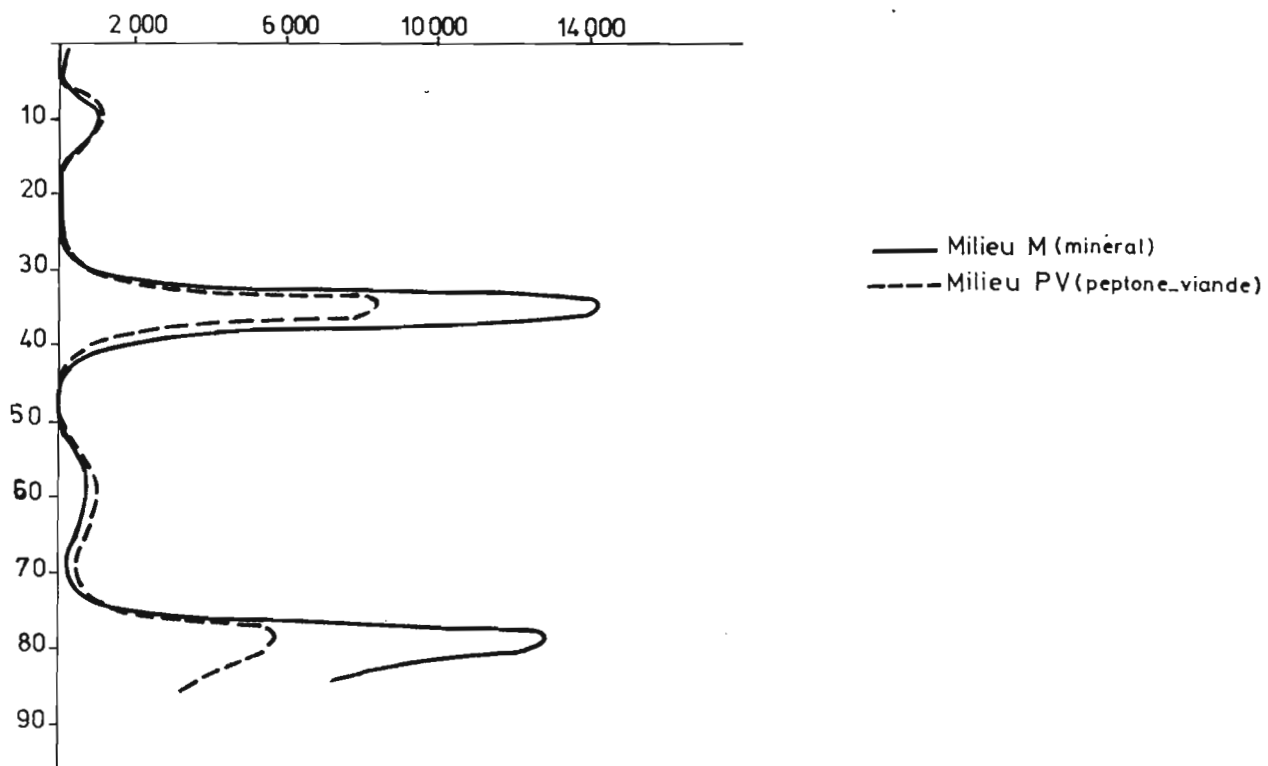


Fig.6C Nombre de bactéries

IV-2- Corrélation entre le pH, le $p\text{CO}_2$, l'alcalinité - Conséquence sur la précipitation et la dissolution des carbonates.

A l'issue de cette expérience, on constate une importante différenciation du pH : 7,15 à la base passant progressivement à 8,54 au sommet par rapport au pH initial du sol : 7,2, homogène sur l'ensemble de la colonne.

Pour interpréter ce gradient de pH, on est obligé, par souci de simplification, de faire l'hypothèse préalable que les équilibres chimiques entre phases (CO_2 de l'atmosphère du sol-solution-carbonate de calcium solide) sont toujours réalisés à chaque niveau de la colonne ce qui est d'autant plus vraisemblable que les mouvements liquides sont plus lents (phase de dessiccation). Le pH est alors fonction décroissante de la $p\text{CO}_2$ et de la teneur en bicarbonate, ce qui est vérifié dans les deux cas suivants :

a) Pendant la phase d'humectation

Le profil des $p\text{CO}_2$ relevé avant chaque humectation présente deux zones : la zone supérieure délimitée grossièrement entre 0 et 50 centimètres où $p\text{CO}_2 \leq 10^{-2}$ atm. et la sous-jacente où $p\text{CO}_2$ est $\geq 10^{-2}$ atm. Dans ces conditions, la solution introduite initialement en équilibre avec une $p\text{CO}_2$ de 10^{-2} atm. aura tendance à précipiter dans la première zone, d'où un relèvement constaté de son pH (à des valeurs supérieures à 7,34, son pH d'équilibre initial) et, ensuite à dissoudre du calcaire dans la seconde puisque la $p\text{CO}_2$ y est supérieure. Les eaux de drainage présentent bien, par rapport aux eaux introduites, une augmentation de l'alcalinité et une diminution du pH.

b) Pendant la phase de dessiccation

Au cours de cette phase, le liquide enrichi en bicarbonate à la base du tube, peut remonter jusqu'en surface grâce aux forces capillaires entretenues par l'évaporation au sommet et les fortes teneurs en eau à la base.

Pendant ce trajet ascendant, comme on le vérifie, la $p\text{CO}_2$ s'affaiblit de plus en plus et la température s'élève, d'où le gradient de pH observé; il y aurait, en conséquence dépôt de carbonate tout le long de la colonne, et dépôt de tous les éléments dissous, en surface par évaporation.

En résumé, premièrement pendant les phases d'humectation, on aurait dépôt de carbonate probable sur les cinquante premiers centimètres et dissolution, ensuite, dans les couches plus profondes; deuxièmement pendant la phase sèche, on aurait tendance au dépôt dans tout le profil du sol.

Dans l'un comme dans l'autre cas, l'allure du profil des pH mesurés en fin d'expérience vérifie celui des $p\text{CO}_2$, mesurées en cours d'expérience.

V - CONCLUSION

Les techniques de mesure utilisées au cours de cette expérience préliminaire donnent des résultats cohérents (évolution de la teneur en CO_2 , dynamique du calcaire, différenciation des pH...) et permettent de conclure à leur fiabilité.

Ces premiers résultats permettent d'envisager des expériences futures dans lesquelles les différents paramètres qui régissent la mise en mouvement de CaCO_3 (débits d'évaporation et d'humectation, fréquence de ceux-ci, température) seront étudiés séparément.

Les analyses n'ayant pas été effectuées tout au long de l'expérience préliminaire le seront alors systématiquement, en particulier la silice, le fer, l'alumine et les nitrates.

B I B L I O G R A P H I E

BONVALLOT (J.), DELHOUME (J.P.) - 1978 -

Etude de différentes accumulations carbonatées d'une toposéquence du centre tunisien (Djebel Semmana).
Communication au 103e Congrès des Sociétés Savantes,
Metz, Nancy, avril 1978.

BONVALLOT (J.), DELHOUME (J.P.), DUMONT (J.L.) - 1977 -

Projet de collaboration entre le centre de Géomorphologie du CNRS de Caen et la Mission ORSTOM de Tunisie.
Programme - Rapport ORSTOM, TUNIS, 14 p.

CALLOT (G), CHAMAYOU (H.), DUPUIS (M.) - 1978 -

Variations du pH de la solution de matériaux calcaires en relation avec la dynamique de l'eau. Eléments d'analyse d'un système carbonaté Ann. agron, 29, 1, pp. 37-57.

CRAHET (M.) - 1967 -

Le pH des sols calcaires. Etude bibliographique. Bull. AFES, 4, pp. 17-34.

DUMONT (J.L.) - 1975 -

Les croûtes calcaires : cimentation de sable par dépôt de calcaire.

In colloque "Types de croûtes calcaires et leur répartition régionale", Strasbourg, 9-11 janvier 1975, pp. 65-70.

GRAS (F.) - 1974 -

Application d'une méthode expérimentale à la détermination du pH et de la solubilité du carbonate de calcium dans les sols calcaires.

Science du sol, 1, pp. 33-48.

GREZES (G.), BASSET (M.) - 1965 -

Contribution à l'étude de la solubilité du carbonate
de calcium.

C.R. Acad. Sci., Paris, t.260, pp. 869-872

PEDRO (G) - 1968 -

Contribution expérimentale à l'étude du rôle du calcaire
dans l'évolution géo-chimique des sols.

Comptes rendus IXe Congrès Intern. Sci , Sol, Adelaide,
vol.IV, pp. 511-522.