

**DETERMINATION DU COMPLEXE ECHANGEABLE
DANS LES SOLS SALES ET/OU GYPSEUX**

JOURNEES LABORATOIRES

19-22 SEPTEMBRE 1989

MONTPELLIER

**J.A. PETARD
Responsable du Laboratoire
de Nouméa**

20 Septembre 1989

La nature des sols étudiés par M. Podwojewski (vertisols calcimagnésiens à gypse) et les amendements gypseux effectués par M. Bonzon, pour l'étude des vertisols hypermagnésiens (rôle du calcium dans les sols magnésiens) nous ont conduits à rechercher une méthode d'extraction des bases échangeables ne dissolvant pas le gypse ou le dissolvant le moins possible.

D'autre part nous avons cherché quel agent d'extraction permettrait d'apprécier les sels présents dans le sol sans dissoudre le gypse et éviter ainsi les échanges entre les cations, au sein du complexe absorbant.

Le profil étudié comporte 12 horizons ; 8 d'entre eux ont été utilisés pour notre étude :

1	0 - 15 cm	horizon humifère de surface : A11
3	35 - 50 cm	horizon humifère, mélangé avec horizon moins humifère : A31 (B)
5	65 - 90 cm	horizon verticale minéral (B)1
6	90 - 125 cm	horizon verticale minéral (B)2
7	125 - 140 cm	horizon verticale minéral à concentration de gypse B1 _{gy}
9	150 - 175 cm	horizon verticale minérale à concentration de gypse, de teinte noire due au MnO ₂ : B1 _{Mn gy}
11	195 - 240 cm	horizon verticale minéral, petits amas pulvérulents carbonatés : B _{Ca}
12	240 - 250 cm	horizon verticale à croûte calcaire BC _{Ca}

TABLEAU I : SOLUBILITE DE DIFFERENTS SELS (g/100 ml.) DANS L'EAU

ANIONS	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	CO ₃ ⁼	
CATIONS				
Na⁺				
Anhydre	35,7°	4,7°	7,1°	
H ₂ O			33	
7H ₂ O		19,5°	16,9	
10H ₂ O		11°	21,52°	
Mg⁺⁺				
Anhydre	54,25 ²⁰	26°	0,0106	Magnésite
H ₂ O		68,4 ¹⁰⁰		Kieserite
3H ₂ O			0,178 ¹⁶	
5H ₂ O			0,176 ⁷	
6H ₂ O	167			
7H ₂ O		71 ²⁰		Epsomite
3MgCO ₃ Mg(OH) ₂ 3H ₂ O			0,04	Hydromagnésite
(Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺)			0,032 ¹⁸	Dolomite
Ca⁺⁺				
Anhydre	74,5 ²⁰	0,209 ³⁰	0,00153 ²⁵	Anhydrite Aragonite
			0,0014 ²⁵	Calcite
0,5H ₂ O		0,3 ²⁰		Plâtre
H ₂ O	76,8°			
2H ₂ O	97,7°	0,241		Gypse
6H ₂ O	279°			

Les mesures de solubilité sont généralement effectuées dans l'eau froide ; la température de l'eau est précisée en exposant.

Réf : WEAST, R.C. - 1976-1977. Handbook of chemistry and physics, 57th Edition, Cleveland : CRC PRESS.

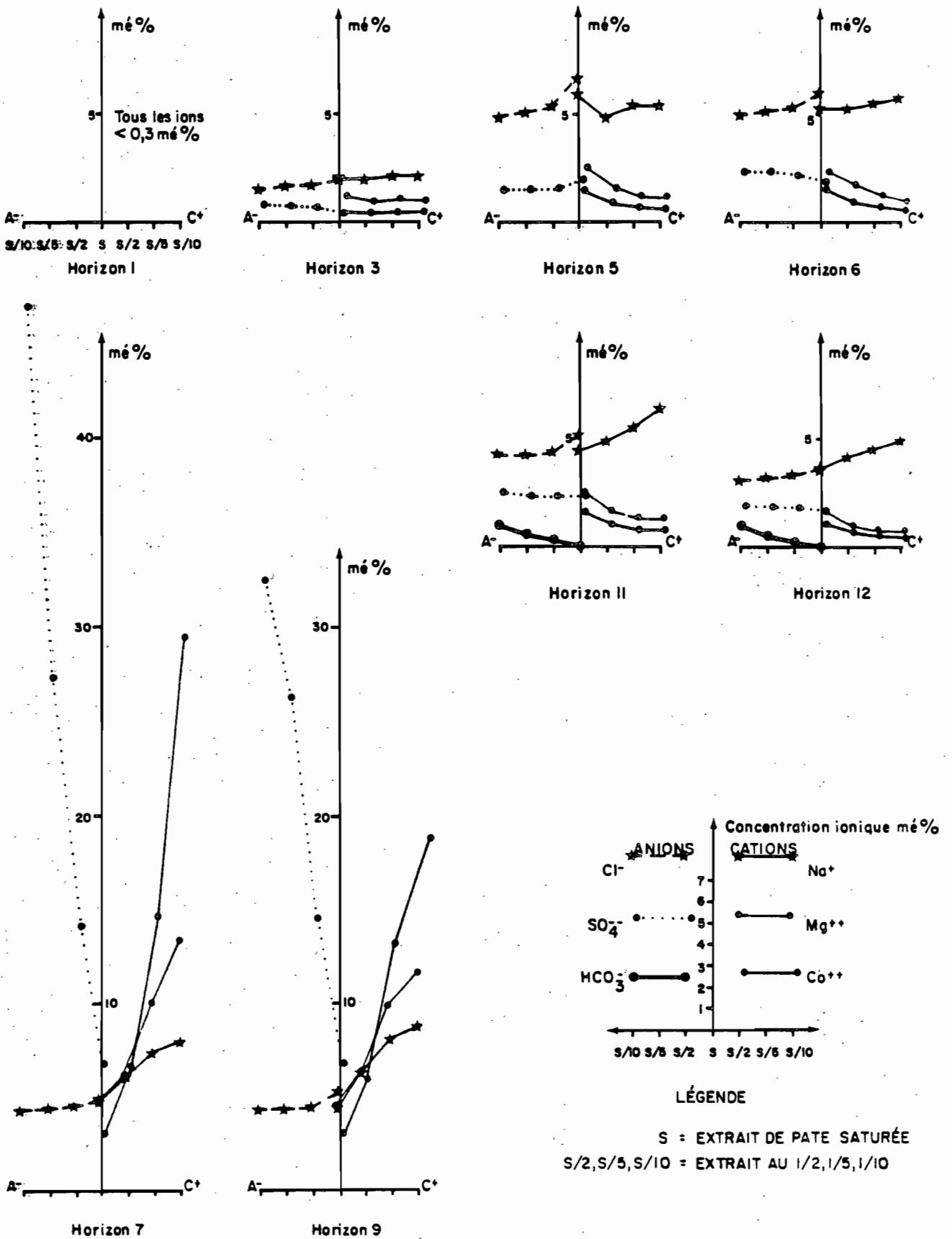


Fig. 1. CONCENTRATION EN SELS D'UN PROFIL DE VERTISOL MAGNÉSIEEN A GYPSE

EXTRACTION DES SELS PAR L'EAU

L'étude bibliographique de l'extraction des bases échangeables sur sols salés et/ou gypseux nous a orientés vers l'application des travaux de Tucker (1954, 1974, 1985) et Loveday (1974).

Dans une première démarche nous avons procédé à l'extraction des sels par l'eau, dans différents rapports sol solution : pâte saturée, extrait au 1/2, au 1/5 au 1/10 (au 1/20 et au 1/50 pour extraire la totalité du gypse).

Le tableau I rappelle la solubilité dans l'eau des chlorures, sulfates et carbonates, de sodium, magnésium et calcium.

La figure 1 permet de suivre les concentrations en sels dissous selon le rapport sol/solution.

Dans les horizons de surface (1 et 3), les concentrations en sels sont faibles (< 2 mmol eq/l). Les concentrations augmentent dans les horizons 5 et 6. On peut constater que les quantités de sodium sont constantes quelque soit le rapport sol solution, les teneurs en chlorure sont équivalentes à celles du sodium, on remarquera cependant une légère rétention du chlorure lorsque le rapport sol/solution croît. Tous les sels sont extraits dans la pâte saturée.

Dans les horizons à gypse (7 et 9) les teneurs en chlorure décroissent légèrement alors que les teneurs en sodium varient du simple au double. Le potassium et le bicarbonate extraits étant très faibles, ils participent peu au bilan ionique, on a donc



Les teneurs en sulfate, calcium, magnésium et sodium croissent avec la dilution, la pente est faible pour le sodium, moyenne pour le magnésium, forte pour le calcium, pour être très forte pour le sulfate.

La quantité de calcium contenu dans les différents extraits (tant qu'il reste du gypse dans le sol) correspond sensiblement à la quantité théorique de gypse pouvant être dissous (2,41 g/l). On notera qu'il y a plus de sulfate extrait que de calcium. La solution apparaît saturée en sulfate de calcium, mais il est dissous plus de gypse que le calcul ne le prévoit dans des conditions idéales. Tout semble

se passer comme s'il y avait échange entre le calcium issu du gypse et le magnésium (et pour une moindre part du sodium) du complexe échangeable.

Dans les deux derniers horizons (11 et 12) les courbes ont des allures semblables, on notera l'apparition de bicarbonate due à la présence de carbonate de calcium dans ces deux horizons.

On notera que l'extrait de pâte saturée contient la totalité des chlorures.

Pour une extraction complète des sels solubles dans l'eau, une solution aqueuse sans alcool semble nécessaire quand les sulfates sont présents.

TABLEAU II

Solubilité en mole/l

	G Ethanol/glycol : 9/1	E Ethanol 70 % - eau
NaCl	52	T
KCl	17	T
MgCl ₂	T	T
CaCl ₂	T	T
Na ₂ SO ₄	0	16
K ₂ SO ₄	0	3
MgSO ₄	4	13
CaSO ₄	0	0
NaNO ₃	90	T
KNO ₃	10	T
Mg(NO ₃) ₂	T	T
Ca(NO ₃) ₂	T	T
NaHCO ₃	3	40
Na ₂ CO ₃	3	30
KHCO ₃	4	90
K ₂ CO ₃	50	T

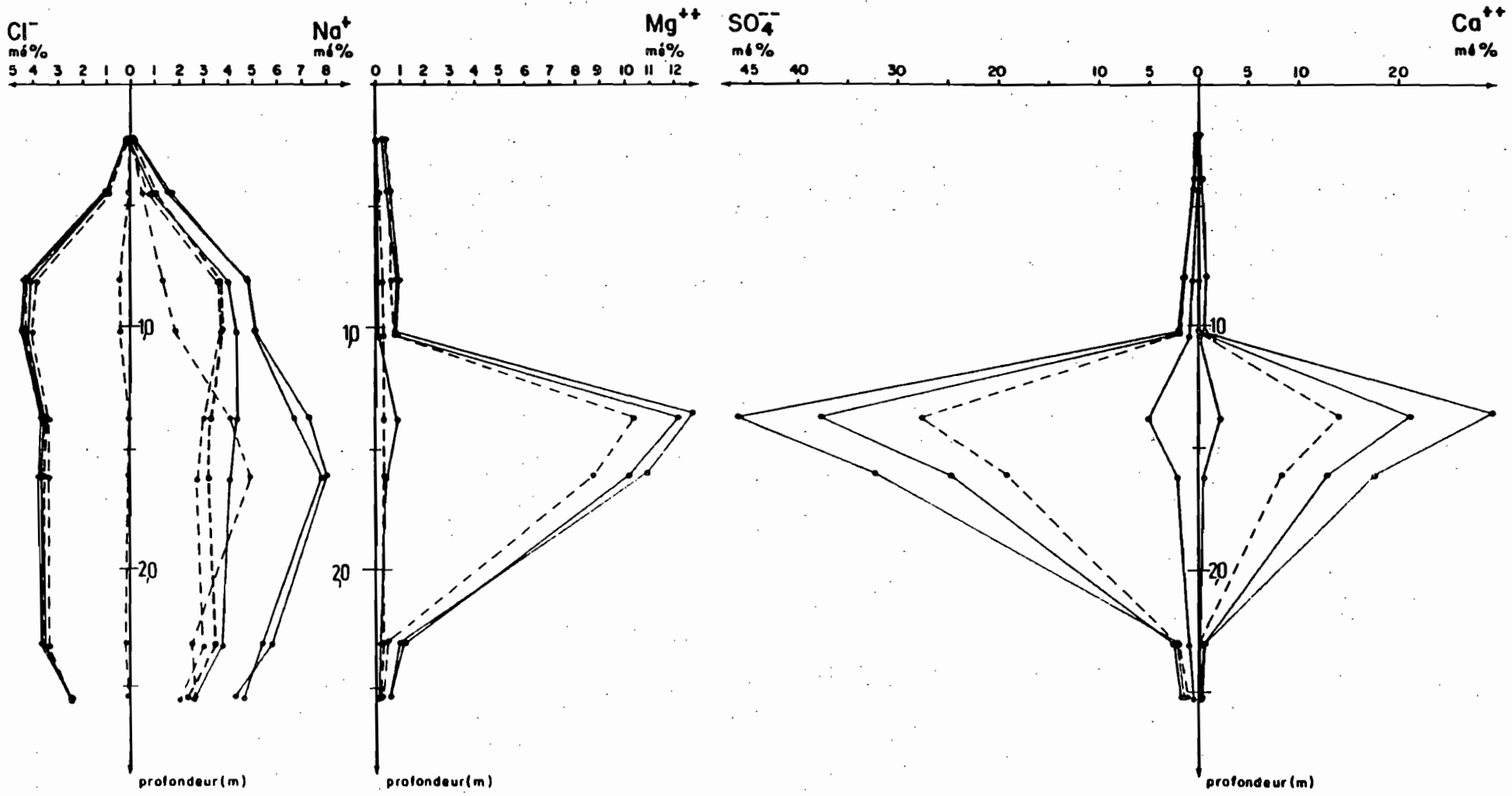
T : Totalité

TUCKER, B.M. - 1985. Laboratory procedures for soluble salts and exchangeable cations in soils. CSIRO : Div. Soils Tech. Paper., 21.

Fig 2

EXTRACTION DES SELS SOLUBLES PAR DIFFÉRENTES SOLUTIONS RAPPORT SOL/SOLUTION : 1/10

- Ethanol
- Glycérol (17%), Eau (83%) APRES Ethanol
- Glycol - Ethanol 1/9
- Eau
- Glycérol (17%), Eau (83%)
- Glycol - Ethanol 3/1



EXTRACTION DES SELS PAR DES SOLVANTS ORGANIQUES

Selon Tucker, sont dissous dans :

glycol éthanol 1/9	aucun sulfate à l'exception de $MgSO_4$
éthanol à 70 %	quelques sulfates Mg, Na et K
glycol éthanol 3/1	tous les sulfates à l'exception de $CaSO_4$
glycérol eau 1/4	tous les sels solubles dans l'eau

Le tableau (II) suivant nous permet d'apprécier la dissolution des sels les plus courants, dans une solution d'éthanol/glycol 9/1 et dans une solution d'éthanol à 70 %.

Pour des raisons de simplicité nous appellerons la solution glycol/éthanol 1/9 "G" et la solution d'éthanol "E".

Tous les chlorures sont dissous dans E, alors que le chlorure de sodium et de potassium ne le sont pas totalement dans G.

Les sulfates sont pratiquement insolubles dans G, les sulfates de sodium potassium et magnésium sont légèrement plus soluble dans E. Il faut remarquer que le sulfate de calcium n'est pas solubilisé ni par E ni par G.

Les nitrates sont entièrement dissous dans E. Dans G le nitrate de sodium n'est dissous qu'à 90 % alors que le nitrate de potassium est peu dissous (10 %).

Seul le carbonate de potassium a été en partie solubilisé dans G (50 %), les autres carbonates et bicarbonates sont très peu solubilisés. Dans E carbonate et bicarbonate de potassium sont pratiquement totalement dissous alors que les sels de sodium le sont beaucoup moins (30 et 40 %).

Nous avons effectué des extractions dans le rapport au 1/10 avec les solutions suivantes :

éthanol à 70 % :	E
glycérol eau 1/4 après l'extraction à l'éthanol	
glycérol eau 1/4	
glycol éthanol 1/9 :	G
glycol éthanol 3/1	

La figure 2 résume les résultats obtenus.

- Tous les chlorures sont extraits quelque soit la solution (chevauchement des courbes).

Fig. 3

SELS SOLUBLES

Rapport entre Na^+ et Cl^-
dans les extraits

$$\Delta = \frac{\text{Na} - \text{Cl}}{\text{Na}} \%$$

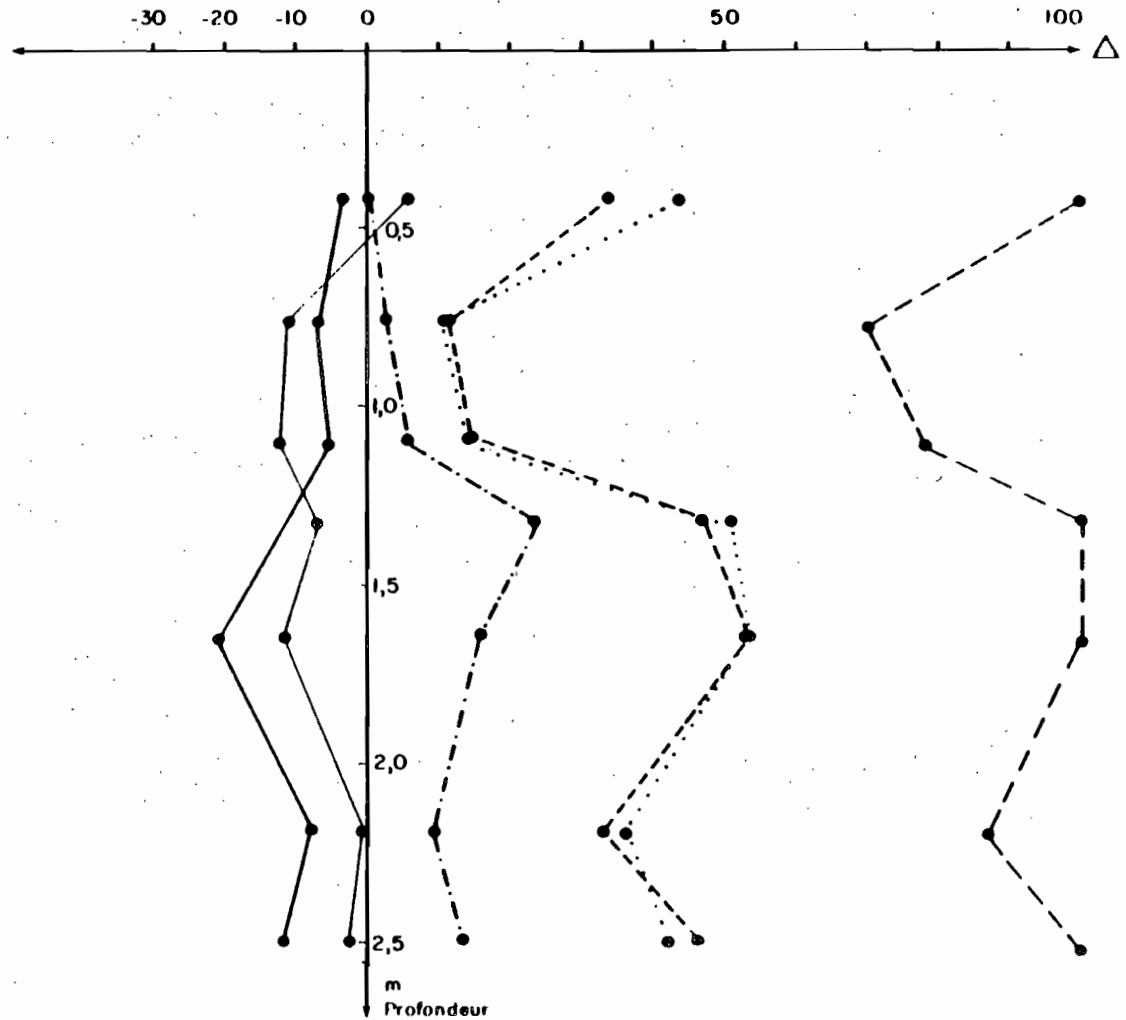
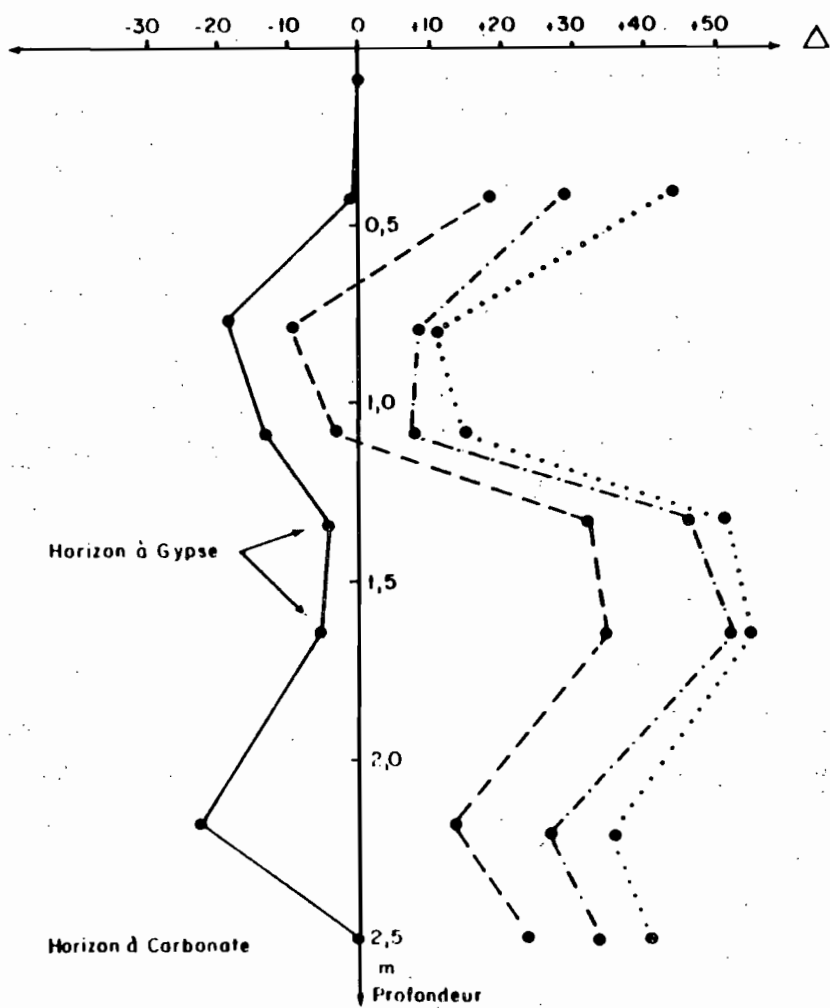
EXTRACTION PAR L'EAU

- Extraction par la pâte saturée
- - -● Extraction au 1/2 (rapport sol/eau)
- · - ·● Extraction au 1/5
- · · · ·● Extraction au 1/10

Rapport sol/solution : 1/10

EXTRACTION PAR DIFFÉRENTES SOLUTIONS

- Ethanol
- - -● Glycérol (17%), eau (83%) APRÈS Ethanol
- · - ·● Glycérol (17%), eau (83%)
- Glycol - Ethanol : 1/9
- - -● Glycol - Ethanol : 3/1
- · · · ·● Eau



- L'action du mélange glycérol-eau est analogue à l'action de l'eau, les quantités de calcium et de sulfate extraits sont cependant inférieures à celles extraites dans l'eau.

- La solution de glycol éthanol (3/1) extrait quelques sulfate, calcium et magnésium.

- L'éthanol extrait un peu plus de magnésium que la solution glycol éthanol 1/9. Les concentrations de sulfate de calcium sont inférieures à 0,2 m mole eq %.

- L'éthanol est le seul agent d'extraction pour lequel la balance sodium chlorure est proche de l'équilibre (Cf. fig. 3). La solution glycol éthanol 1/9 donne des résultats voisins.

- Les pics de Ca, Mg et SO_4 correspondent aux niveaux 7 et 9 riches en gypse.

- Le sodium extrait par l'eau ou la solution de glycérol fait apparaître un ventre à ces mêmes niveaux alors que les teneurs en chlorure restent égales. On peut supposer que cet accroissement du sodium provient de réactions d'hydrolyse.

L'eau est l'agent le plus efficace pour extraire les sels, il faut toutefois adapter le rapport sol/solution à la concentration estimée de gypse, pour extraire la totalité des sulfates. L'eau engendre des réactions d'hydrolyse.

L'éthanol et la solution de glycol éthanol (1/9) n'extraient pratiquement aucun sulfate.

TABLEAU III

SOLUBILITE (en m mole eq/l)
à partir de 1 g de sel dans 100 ml de solution

	Calcium carbonate			Calcium sulfate			Magnésium carbonate		
	7.0	8.5	9.0	7.0	8.5	9.0	7.0	8.5	9.0
pH:									
Eau:	0.4			22			0.3		
Ammonium Acétate N dans eau	16	6.0	3.8						
Ammonium chlorure N dans éthanol à 60 %	2.6	0.3	0.2	3.8	3.8	4.4	0.5	0.3	0.3

TUCKER, B.M. - 1954. The determination of exchangeable calcium and magnesium in carbonate soils. (Div. of Soils, CSIRO) Aust. J. Agric. Res., 5, 709.

Fig. 4 - Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, ECHANGEABLES - EXTRACTIONS SUR SOL BRUT

Extrait Tucker = Tu
Extrait Acétate = Ac

- Ca⁺⁺ (Tu)
- Ca⁺⁺ (Tu) - SO₄²⁻ (Tu)
-● Ca⁺⁺ (Ac)
- Ca⁺⁺ (Ac) - SO₄²⁻ (Ac)

- Mg⁺⁺ (Tu)
-● Mg⁺⁺ (Ac)

- Na⁺ (Tu)
-● Na⁺ (Ac)
- Na⁺ (Ac) - Cl⁻ (Ac)

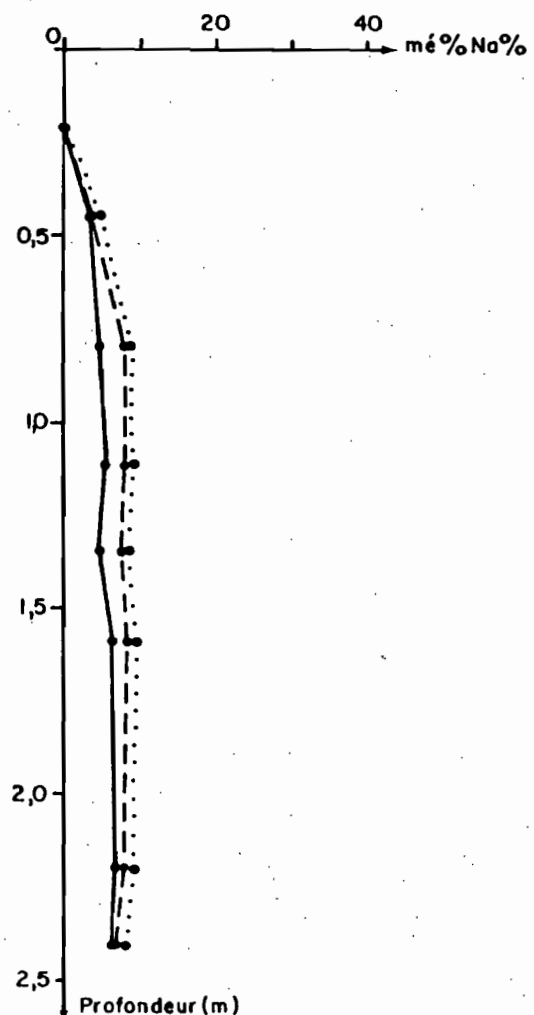
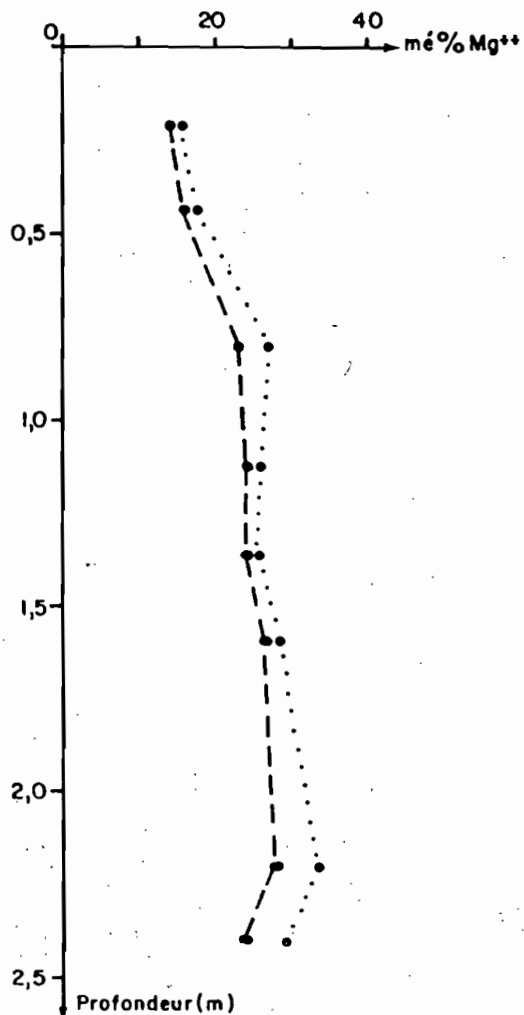
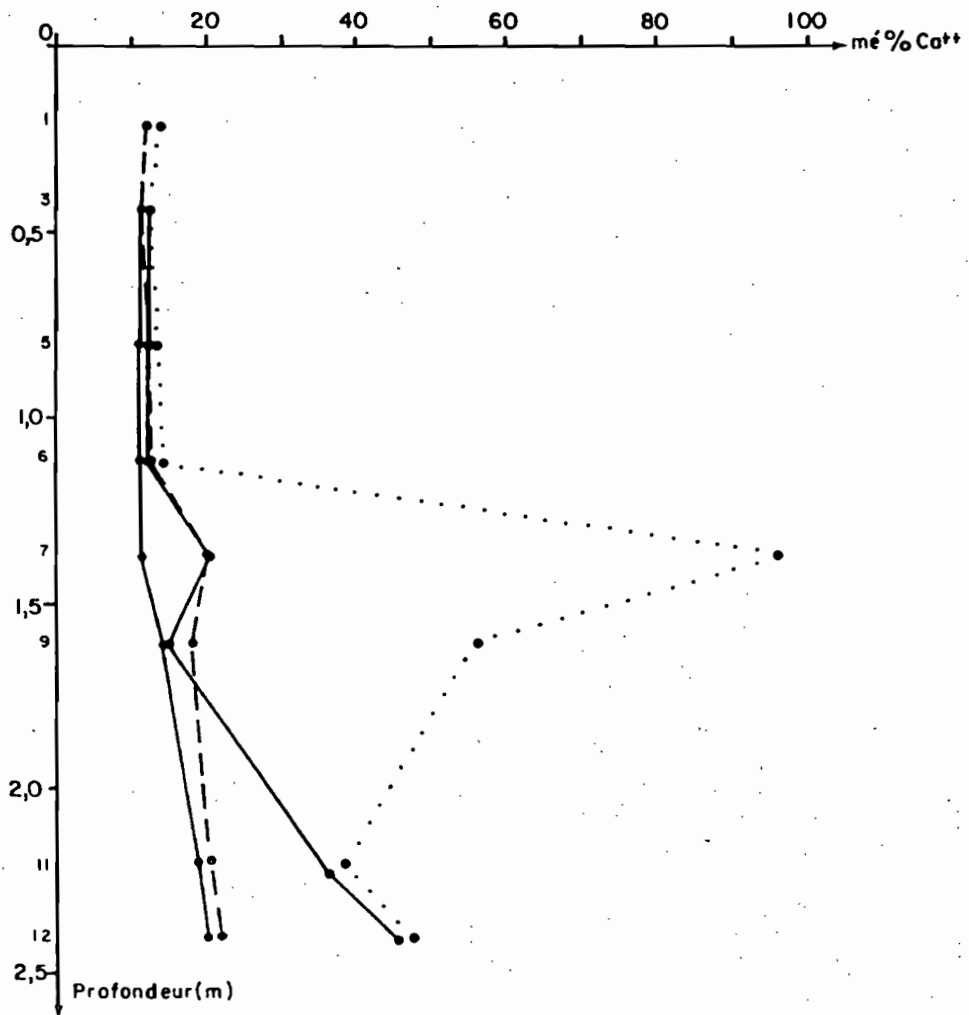


TABLEAU IV : RECAPITULATIF DES RESULTATS DES BASES ECHANGEABLES
 Comparaison entre deux methodologies d'extraction

HORIZON	Ca ⁺⁺			Ca ⁺⁺ - SO ₄ ⁻⁻		
	TUCKER	ACETATE	δ %	TUCKER	ACETATE	δ %
1	12,00	13,70	14	11,69	13,57	16
3	11,93	12,60	6	11,16	11,80	6
5	12,98	13,58	5	11,43	12,23	7
6	13,07	14,10	8	11,29	12,07	7
7	20,10	96,00	378	11,87	20,65	74
9	18,33	56,05	206	14,75	15,32	4
11	21,40	38,50	80	19,46	35,93	85
12	20,80	49,40	138	19,09	47,62	149

HORIZON	Mg ⁺⁺		
	TUCKER	ACETATE	δ %
1	14,70	15,50	5
3	16,30	17,15	5
5	23,53	26,98	15
6	24,51	26,00	6
7	24,33	25,30	4
9	27,30	28,25	3
11	28,57	33,45	17
12	23,70	29,30	24

HORIZON	Na ⁺			Na ⁺ - Cl ⁻ ACETATE
	TUCKER	ACETATE	δ %	
1	0,65	0,68	5	0,68
3	4,06	4,24	4	3,32
5	8,37	8,71	4	5,00
6	8,80	8,86	1	5,10
7	7,88	8,12	3	4,97
9	9,12	9,34	2	6,22
11	8,83	9,05	2	6,48
12	8,06	7,86	-2	6,08

EXTRACTION DES BASES ECHANGEABLES

A - SUR SOL NON TRAITE (BRUT)

La méthode habituellement utilisée (méthode à l'acétate d'ammonium) ne convient pas du tout lorsque l'on est en présence de gypse ou de calcaire, en effet la solubilité du carbonate de calcium et du sulfate de calcium est plus grande dans l'acétate d'ammonium que dans l'eau.

Tucker en 1954 a établi une comparaison de la solubilité de ces sels dans l'eau, l'acétate d'ammonium et le chlorure d'ammonium dans l'éthanol à 60°. Cf. tableau III.

La figure 4 nous permet d'analyser les résultats. Il apparaît clairement que l'acétate d'ammonium dissout des quantités importantes de gypse dans les horizons 7 et 9 (respectivement 75 et 40 m mole eq %) et de carbonates dans les horizons de profondeur 11 et 12 (les carbonates sont difficilement dosable dans la solution d'acétate.

Si l'on considère qu'il n'y a que du gypse dans le sol, On peut apprécier une valeur de calcium "échangeable" en retranchant les sulfates du calcium.

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont alors plus proches (jusqu'aux horizons carbonatés pour lesquels la méthode Tucker dissout moins de carbonates). Notons la présence d'un pic au niveau 7 (horizon le plus riche en gypse > 100 m mole eq %).

Les résultats de magnésium sont proches quant aux résultats de sodium ils sont très voisins.

Si l'on considère que nous sommes uniquement en présence de chlorure de sodium (ce qui semble être démontré dans les extraits éthanol et glycol éthanol 1/9) on peut apprécier le sodium échangeable en déduisant les chlorures du sodium (ce qui évidemment n'est possible que dans l'extrait acétate.

Dans le tableau IV, la valeur

$$S \% = (\text{valeur acétate} - \text{valeur Tucker}) / \text{valeur Tucker}$$
nous permet de comparer les deux méthodes .

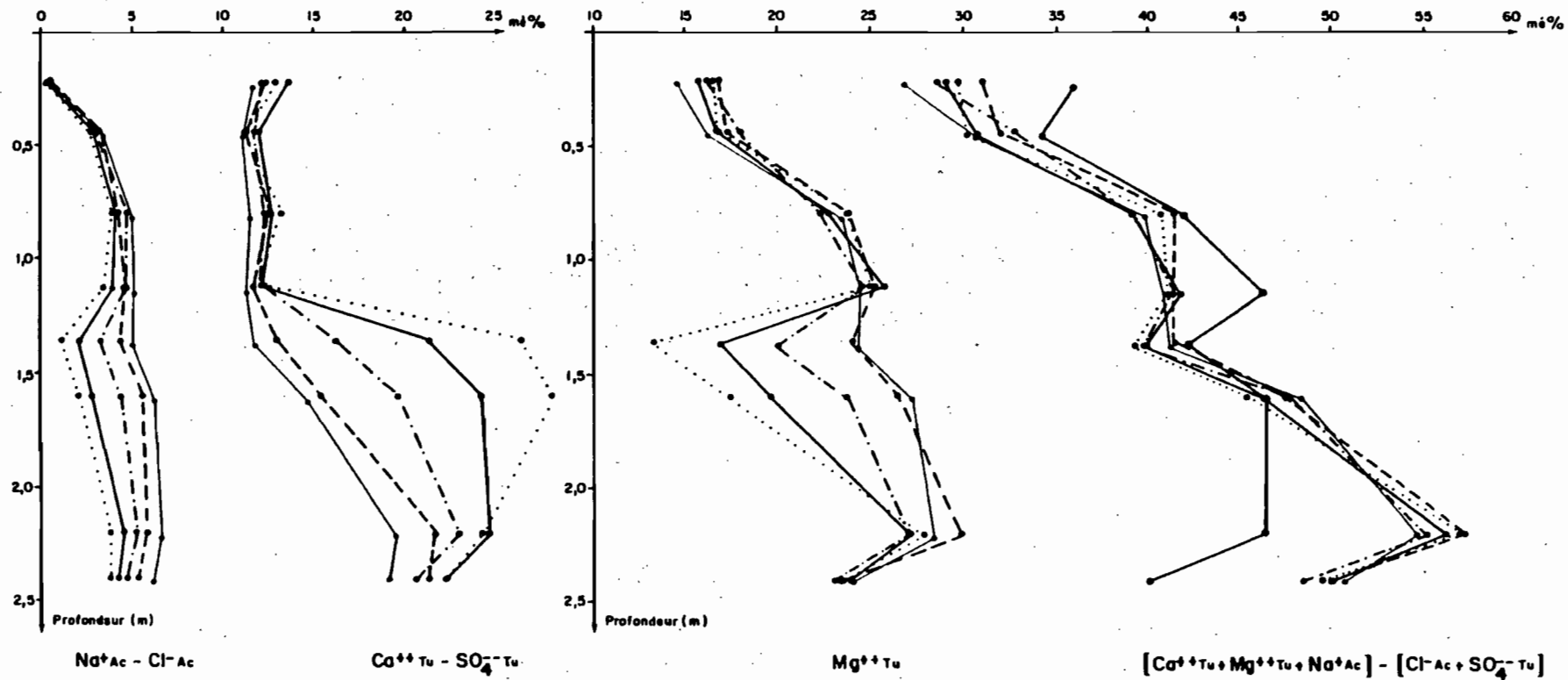
Dans le cas de la différence Ca-SO₄, cet écart est élevé pour l'horizon humifère (nous avons remarqué une plus grande dissolution de la matière organique par l'acétate d'ammonium que par le chlorure d'ammonium en milieu alcoolique, l'excès de calcium semblerait provenir du complexe calco-humique) mais reste constant, aux environs de 7 %, jusqu'aux horizons gypseux pour lesquels δ atteint 74 % dans l'horizon très riche en gypse. Le gypse n'a pas été totalement dissout dans l'horizon 7 puisqu'il a été extrait 75 m mole eq % de SO₄ alors que la concentration du sulfate dans le sol est de 106 m mole eq %. Dans l'horizon 9 le gypse a été totalement dissout la concentration du sulfate dans le sol est de 40 m mole eq %, pour cet horizon δ est de 4 %. La valeur de δ s'accroît de nouveau de façon importante dans les horizons carbonatés. (ceci est lié à une plus grande dissolution du carbonate dans l'acétate que dans le réactif de Tucker, Cf. le tableau III des solubilités du carbonate de calcium).

Pour le magnésium, l'écart reste faible (\approx 5 %) et croît dans les horizons carbonatés. On note une valeur plus élevée pour l'horizon 5 (encore inexplicée).

Les écarts calculés pour le sodium sont très faibles (3 % en moyenne).

Fig. 5 CALCIUM, MAGNÉSIUM ET SODIUM ÉCHANGEABLE SUR SOL BRUT ET APRÈS EXTRACTIONS DES SELS SOLUBLES

- Sol brut
- - -●- - - Après extraction des sels à l'n pte saturée
- · - · - · - · - · Après extraction des sels au 1/2
- Après extraction des sels au 1/5
- · · · · ● · · · · · Après extraction des sels au 1/10
- Capacité d'échange Cationique



B - APRES EXTRACTION DES SELS PAR L'EAU

Nous avons ensuite procédé à l'extraction des bases échangeables sur les sols après extraction des sels par l'eau, à différents rapports, en appliquant les méthodes utilisées précédemment.

La figure 5 nous permet d'apprécier, l'influence du rapport sol/eau pour l'extraction des sels dans la détermination du complexe échangeable.

- sodium

Le taux de sodium "échangeable" décroît avec le rapport d'extraction (sol/eau) des sels, le phénomène est accentué dans les horizons à gypses.

- calcium

La réaction est l'inverse de celle du sodium, on assiste à un accroissement du calcium "échangeable" alors que le rapport d'extraction des sels décroît. Cet accroissement du calcium "échangeable" est très amplifié au niveau des horizons à gypse, et est encore important dans les horizons carbonatés.

- magnésium

Les teneurs en magnésium sont relativement voisines dans le profil à l'exception des horizons à gypses où elles décroissent, nous assistons à l'effet inverse du calcium.

Si l'on déduit de la somme des cations ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na}$), la somme des anions ($\text{SO}_4 + \text{Cl}$), appelons ce résultat "Somme des bases échangeables", pour chaque horizon, cette Somme des bases est sensiblement la même quelque soit le rapport d'extraction des sels.

Il s'opère vraisemblablement des échanges entre le calcium issu du gypse dissous et le magnésium échangeable, le calcium prenant la place de ce dernier dans le complexe échangeable.

Nous savons tous que le calcium est généralement le cation le plus facilement fixé par les argiles. L'ordre préférentiel est le suivant $\text{H}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+ \approx \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$.

Cette observation tend à expliquer pourquoi dans les extraits aqueux, les teneurs en sulfate sont beaucoup plus importantes que celles de calcium, et les teneurs en magnésium croissent alors que la dilution augmente.

Cet échange entre calcium et magnésium reste limité dans l'extrait saturé.

RAPPORT SOL/SOLUTION : 1/10

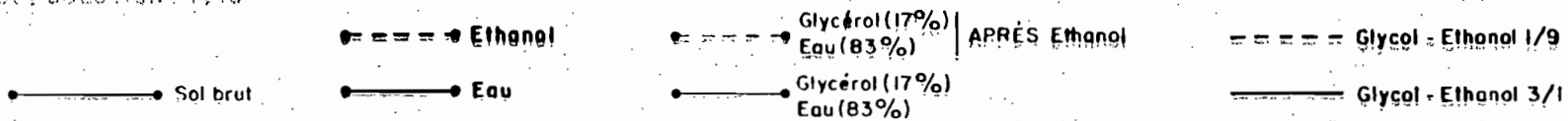


Fig 6
CALCIUM, MAGNÉSIUM ET SODIUM ÉCHANGEABLE SUR SOL BRUT APRÈS EXTRACTION DES SELS SOLUBLES PAR DIFFÉRENTES SOLUTIONS

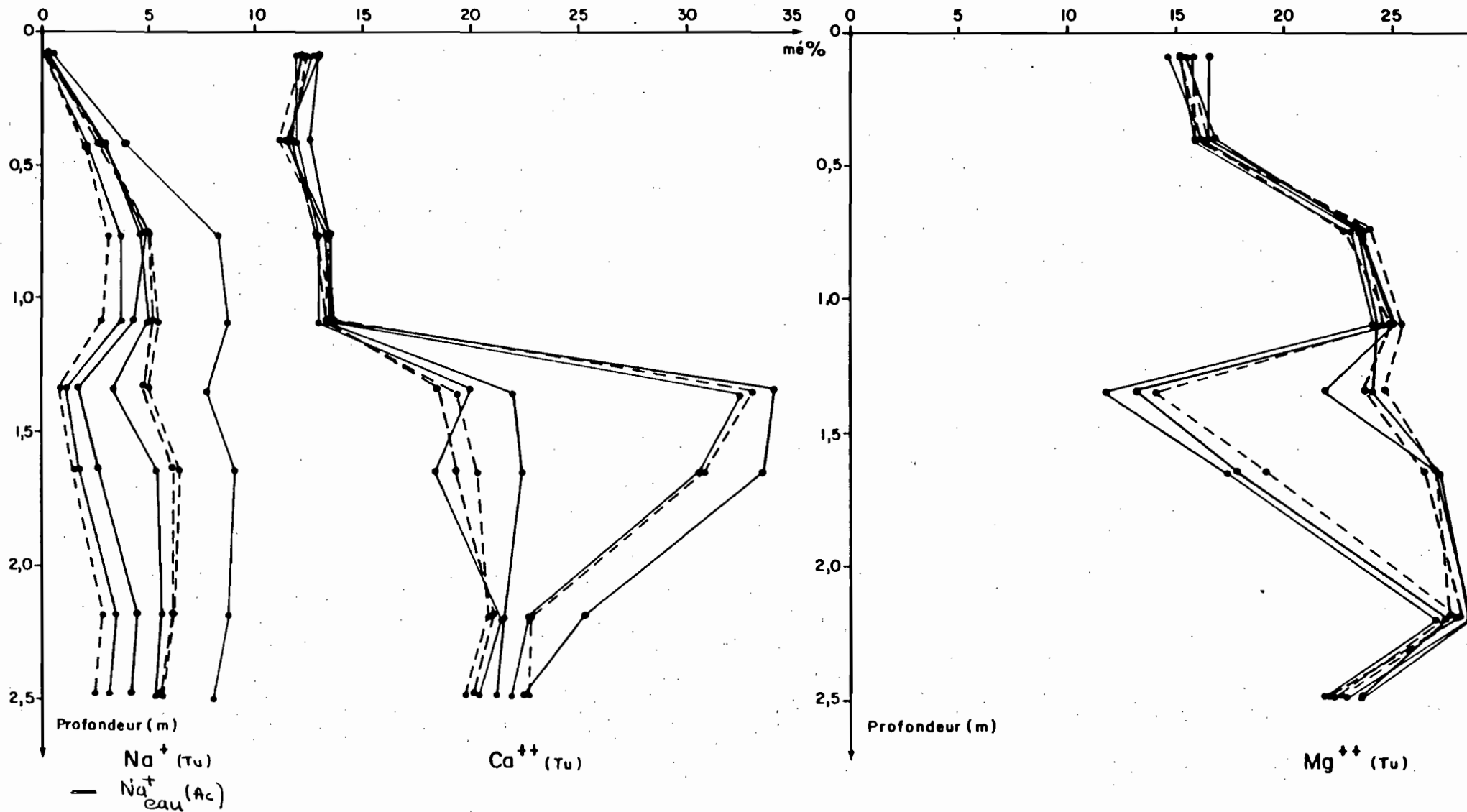
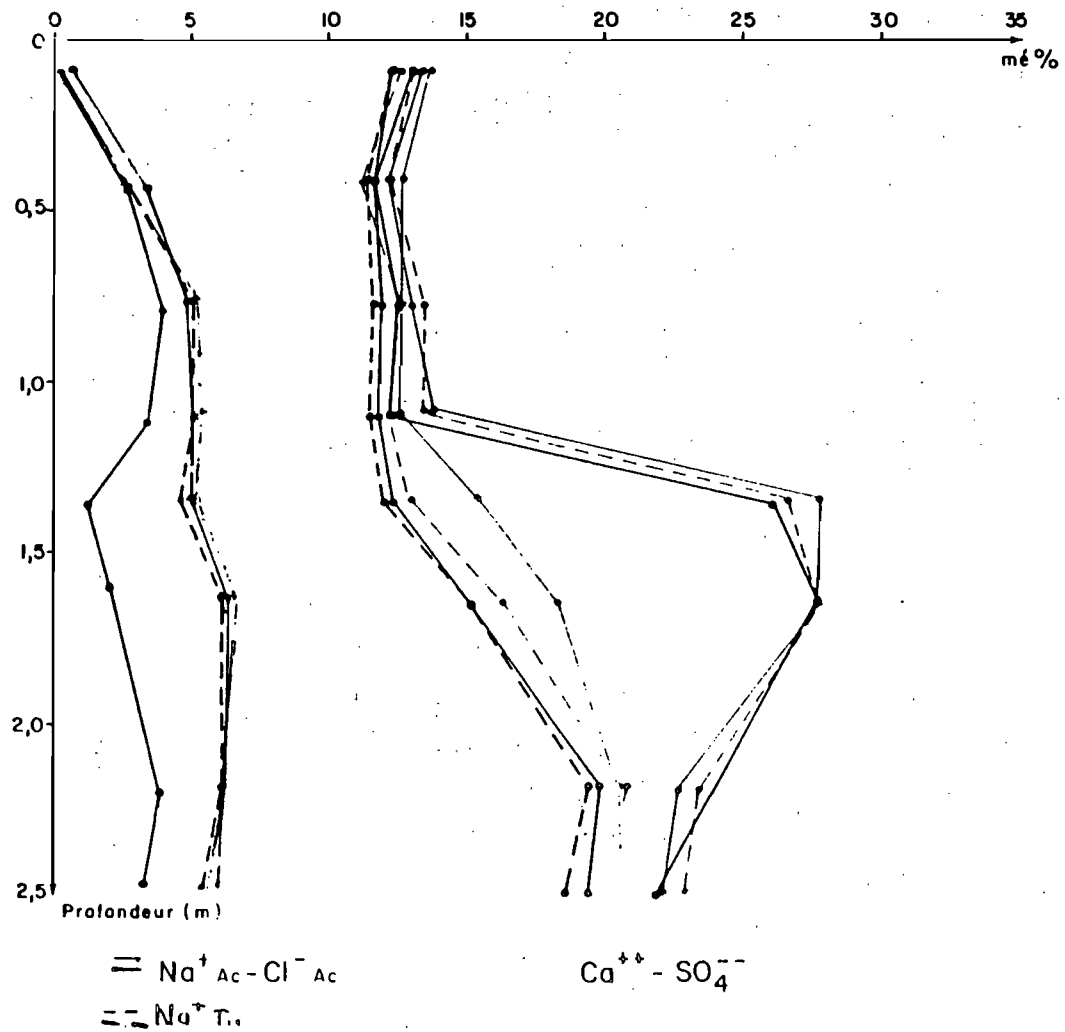


Fig. 7

CALCIUM ET SODIUM ÉCHANGEABLE APRÈS SOUSTRACTION DES ANIONS CORRESPONDANTS SUR SOL BRUT ET
 ET APRÈS EXTRACTION DES SELS SOLUBLES PAR DIFFÉRENTES SOLUTIONS.



C - APRES EXTRACTION DES SELS PAR LES SOLVANTS ORGANIQUES

L'extraction des bases échangeables après extraction des sels par différents solvants, dans un même rapport sol solution 1/10, nous fournit les éléments de réponse quant aux réactifs à utiliser pour déterminer dans un sol gypseux les sels et les bases échangeables.

La figure 6 nous permet d'apprécier l'action des différents réactifs organiques sur le complexe échangeable. L'éthanol et les deux solutions éthanol-glycol ont peu d'effet. (rappelons que ces solutions ne dissolvent pas, ou très peu les sulfates).

Dans la figure 7 nous avons tracé les courbes du sodium échangeable :

Na-Cl - sur sol brut, (méthode à l'acétate) et sur sol après extraction des sels par l'eau (extraction par l'acétate d'ammonium).

Na - après extraction des sels par l'éthanol et la solution de glycol éthanol 1/9 (ces deux courbes se retrouvent avec celles des autres réactifs organiques dans la figure précédente : fig. 6).

Les courbes de l'éthanol, glycol éthanol 1/9, et sol brut (Na-Cl méthode acétate) se chevauchent ; sauf pour les deux premiers horizons, la méthode à l'acétate nous donne des valeurs légèrement supérieures (respectivement 0,35 et 0,50 me%).

De même pour le calcium, nous avons tracés les courbes de calcium "échangeable" (Ca-SO₄) selon la méthode Tucker pour le sol brut et après extraction des sels.

Les courbes pour le sol brut, et après traitement à l'éthanol sont très voisines. Les valeurs de calcium "échangeable" après traitement par la solution glycol éthanol 1/9 sont supérieures de 5 % en moyenne par rapport aux valeurs obtenues sur sol brut ou après traitement à l'éthanol.

En résumé :

- 1) Tous les chlorures sont extraits par l'eau quelque soit la dilution.
- 2) Tous les chlorures sont extraits quelque soit l'agent d'extraction, pour un rapport sol solution 1/10.
- 3) L'éthanol à 70 % donne la meilleure balance Na-Cl.
- 4) La solution de chlorure d'ammonium 1 mole/l dans l'éthanol à 60 % dissout de faibles quantités de sulfate et de carbonate de calcium et très peu de sulfate de magnésium. Les sulfates pouvant être dosés dans l'extrait de bases, il est possible de déterminer le calcium "échangeable" par différence Ca-SO₄, dans les sols ne contenant pas de carbonates.
- 5) La dissolution du gypse par l'eau favorise les échanges entre le calcium en solution et le magnésium du complexe absorbant.
- 6) En appliquant la méthode Tucker on obtient des valeurs très voisines du calcium "échangeable" à partir du sol brut ou après extraction des sels par l'éthanol à 70 % et la solution de glycol éthanol 1/9. Les résultats sur sol brut ou après traitement à l'éthanol sont semblables.
- 7) Les sodium échangeables (méthode Tucker) sont semblables pour les sols après extractions des sels par l'éthanol, par la solution du glycol éthanol 1/9 et le sodium "échangeable" (Na-Cl) sur sol brut extrait par l'acétate d'ammonium.

CONCLUSION

- Extraction des sels :

L'éthanol ou la solution glycol éthanol 1/9 extraient l'ensemble des sels à l'exception du gypse et du calcaire. Ces solutions génèrent peut d'échange entre les cations dissous et le complexe absorbant. L'éthanol sera préférable à la solution glycol éthanol 1/9 car il est d'un usage plus aisé et peut s'éliminer facilement par séchage à l'air.

- Extraction des bases échangeables :

La solution de chlorure d'ammonium 1 mole/l dans l'éthanol à 60 %, à pH 7,0 dissout peu de gypse et de carbonate de calcium. La quantité de gypse dissout peut être mesurée par le dosage du sulfate dans l'extrait. Cette solution ne permet pas de doser les chlorures, il est donc nécessaire d'effectuer préalablement une extraction des sels pour éliminer les chlorures.

Nous pouvons donc, effectuer, sur une seule prise d'échantillon, l'extraction des sels par l'éthanol à 70 % puis l'extraction des bases échangeables par le réactif de Tucker à pH 7,0, immédiatement suivie par l'extraction de la capacité d'échange (déplacement de l'ammonium fixé) par une solution de nitrate de calcium 0,25 mole/l et de potassium 1,5 mole/l.

Nous pouvons ainsi avoir une idée plus juste des sels et du complexe échangeable en minimisant la dissolution du gypse et du carbonate de calcium et en évitant les phénomènes d'hydrolyses qui apparaissent avec l'utilisation des solutions aqueuses.