LA DYNAMIQUE DU LESSIVAGE DES SELS D'UN SOL BRUN-ROUGE STEPPIQUE *

G. BRYSSINE, J. GAILLARDO et A. GROENEMAN

SOMMAIRE

Introduction

Etude de la dynamique de l'élimination des sels solubles au cours des lavages

— pH et turbidité des filtrats

— la dynamique des anions

— la dynamique des cations

— influence mutuelle des cations et des anions sur la dynamimique de leur lessivage

Introduction

1. But de l'étude

La mise en exploitation du futur périmètre irrigable de la Basse Moulouya pose des problèmes quant à la conduite des irrigations dans la plaine du Zebra, située sur la rive gauche de l'oued Moulouya. En effet, dans son travail sur les sols salés et alcalisés de cette plaine, A. RUELLAN [4] signale « la présence très fréquente en profondeur, à

---

* Etude réalisée sur les différents horizons de ce sol prélevé dans la plaine du Zebra.

Al Awamia, **14**, pp. 47-71, janvier 1965.

partir de 30-40 cm ou plus, d'assez fortes quantités de sels solubles, les horizons salés étant, d'autre part, en général alcalisés ».

Pour faciliter la tâche des futurs utilisateurs du périmètre, l'Institut national de la recherche agronomique a entrepris dans cette plaine, à la demande de l'Office national des irrigations (à l'époque, Division de la mise en valeur et du génie rural), une série d'études sur les différents aspects du problème de la mise en valeur de cette plaine, aussi bien du point de vue écologique que du point de vue génétique. Cette étude prévoyait des recherches sur le comportement des cultures dans les conditions écologiques de cette région d'une part, et des investigations sur la technique agricole à préconiser dans le cadre des cultures irriguées du Maroc oriental, d'autre part.

Dans ce but, nous avons entrepris une étude préliminaire sur la dynamique du dessalage des différents horizons d'un sol brun-rouge steppique prélevé dans la parcelle d'essai créée par l'O.N.I. dans cette plaine [5-6]. Cette étude devait nous servir de base pour l'établissement du programme de recherches agro-pédologiques à réaliser dans les parcelles expérimentales à installer dans la plaine du Zebra. En effet, il serait utile de connaître, avant l'établissement de ce programme :

a. la vitesse d'élimination des différents composants de la salure au cours de l'arrosage du sol, soit à l'eau pure (eau de pluie), soit à l'eau contenant une certaine quantité de sels,

b. la dynamique et les caractères de cette élimination,

c. l'effet produit par le départ de sels sur les propriétés physico-chimiques du sol, et, en particulier, sur le pH et sur le degré de dispersion des colloïdes.

Les résultats obtenus au cours de cette étude apportent quelques éléments nouveaux pour la compréhension du problème de la salure des sols. Il nous a donc paru intéressant de les présenter au grand public. La première partie (lavage à l'eau douce) a fait l'objet d'un exposé à la réunion commune de la Section de Pédologie de la Société des sciences naturelles et physiques du Maroc et de la Section de Pédologie de l'Institut national de la recherche agronomique du Maroc.

2. *Technique de l'étude*

Pour réaliser une telle étude nous nous sommes inspirés de la technique déjà employée par l'un de nous pour l'étude expérimentale de l'irriga-

tion du sol des Beni-Amir [1]. Elle consiste a arroser périodiquement l'échantillon de terre soit à l'eau pure, soit à l'eau contenant des sels, et à analyser ensuite les eaux de percolation.

200 g de terre de chaque horizon ont été versés dans un entonnoir. Chaque essai comportait 20 lavages successifs de 50 cm^3 chacun. Le filtrat de chaque lavage a été analysé en vue de déterminer sa composition chimique. Nous avons d'abord mesuré le pH et la turbidité du filtrat, et ensuite nous avons déterminé les taux de chlorures, de carbonates, de bicarbonates, de sulfates, ainsi que de sodium. La somme du calcium-magnésium a été estimée par différence entre la somme globale des anions et le taux du sodium. Le potassium n'a pas été déterminé directement, sa teneur dans les horizons profonds salés étant relativement faible par rapport aux autres cations.

La première série d'essais consistait dans l'étude de la dynamique du lavage des échantillons à l'eau pure (distillée). Au bout de 10 lavages à l'eau distillée, nous avons arrêté l'opération pour un certain temps afin de pouvoir dessécher nos échantillons. Après leur dessiccation, nous les avons remis à nouveau dans les entonnoirs pour continuer nos essais.

Les terres dessalées ont été traitées ensuite par de l'eau contenant du sulfate de calcium N/100 (résultats non encore publiés).

Dans la deuxième série d'essais nous avons comparé les effets de l'arrosage à l'eau distillée, à l'eau contenant du sulfate de calcium N/100, et à l'eau de l'oued Moulouya, source de l'irrigation de la plaine du Zebra.

Dans la présente note nous donnons les résultats de la première série (lavage à l'eau douce).

Les analyses ont été effectuées au Laboratoire de Pédologie de l'Institut national de la recherche agronomique sous la direction de Mme J. GAILLARDO (analyse chimique du sol et analyse des filtrats), et de A. GROENEMAN (analyse physique du sol).

Les résultats des analyses sont représentés sous forme de graphiques. Nous avons porté sur l'axe des abscisses le nombre de lavages et sur l'axe des ordonnées les valeurs numériques des différentes déterminations.

Dans le cas des courbes du pH et de la turbidité, à chaque valeur de x correspond une valeur réelle de y. Par contre, les courbes des composants de la salure (chlorures, sulfates, bicarbonates, sodium, calcium + magnésium) sont des courbes « soustractives ».

Ces courbes ont été établies de la manière suivante : nous avons d'abord calculé le taux global de chaque élément analysé au cours de l'opération en additionnant les taux partiels déterminés dans le filtrat de chaque lavage. Ensuite, pour chaque valeur de x (nombre de lavages), nous avons recherché la valeur correspondante de y, en retranchant de la somme globale la quantité de chaque élément passé dans le filtrat au cours du lavage donné. Cette différence représenterait la « salure restante » dans le sol après chaque lavage. Ainsi, à $x = 0$ (début de l'opération), la valeur de y correspond au taux global de l'élément extrait au cours de l'essai ; à $x = 1$ (premier lavage), y est égal à la quantité de l'élément donné resté dans le sol après le premier lavage, etc.

Pour pouvoir suivre les variations mutuelles des différents composants de la salure au cours de l'essai, nous avons calculé différents rapports (SO_4^{--}/Cl^-, HCO_3^-/Cl^-, etc.). Pour des raisons de commodité graphique, nous convenons d'intervertir les termes des rapports pour que ces derniers aient toujours une valeur numérique égale ou supérieure à l'unité (2 au lieu de 0,5 ; 4 au lieu de 0,25 ; etc.).

Les résultats chiffrés de ces essais ont été soumis à l'analyse statistique. Nous avons recherché la corrélation existant soit entre les caractères de l'élimination des composants de la salure et le nombre de lavages, soit entre leurs rapports respectifs et le nombre de ces lavages. Comme dans la plupart des cas les caractères des courbes de ces rapports étaient différents entre le début et la fin de l'expérience, nous avons calculé les valeurs de la corrélation et des moyennes pour les portions des courbes comprises entre le 1er et le 10e lavage, d'une part, et entre les 11e et 20e lavages, d'autre part. Pour ne pas surcharger la présente note nous ne reproduisons pas les résultats de ces calculs. Nous indiquons seulement dans le texte si ces résultats sont significatifs ou non.

Pour pouvoir comparer les courbes théoriques aux courbes expérimentales, nous avons évalué d'abord les surfaces comprises entre l'axe des abscisses, l'axe des ordonnées et les courbes théoriques, d'une part, et les surfaces comprises entre les axes des coordonnées et les courbes expérimentales, d'autre part.

Nous avons calculé ensuite S, rapport des valeurs des surfaces des courbes théoriques et des surfaces des courbes expérimentales : $S = Sth/Sex$. Pour comparer les droites de régression calculées aux courbes expérimentales, nous avons utilisé aussi le rapport P des valeurs du taux global des composants de la salure trouvés au cours de l'expérience

et de ceux calculés d'après le coefficient « a » de l'équation de régression : $y = a + bx$. $P = a/$ taux global. Nous verrons l'utilité de ces rapports au cours de notre exposé.

3. Caractères du sol et de l'eau d'arrosage

Dans le TABLEAU I nous reproduisons les données analytiques du profil E - 130 prélevé dans la tranchée de la parcelle expérimentale de l'O.N.I. située dans la plaine du Zebra.

Les horizons supérieurs de ce profil (de 0 à 45 cm) sont nettement limoneux ; à partir de 65 cm le profil devient argileux (TAB. I, col. 3-8). Ce sol moyennement calcaire a un taux de calcaire qui varie peu suivant la profondeur. Toutefois, on observe un certain enrichissement en cet élément à partir de 120 cm (TAB. I, col. 7).

La structure du sol à l'état humide paraît favorable. En effet, la grosseur moyenne des agrégats stables dans l'eau oscille autour de 0,55 mm (TAB. I, col. 9). L'étude de la composition granulométrique de ces agrégats nous montre que la dernière fraction du tamisage humide (< 0,2 mm) est composée en majeure partie d' « agrégats sableux fins », surtout en profondeur, comme il ressort des chiffres du tableau ci-dessous.

Agrégats

(% de la fraction < 0,2 mm)

HORIZONS cm	SABLEUX FINS 0,2 - 0,02 mm	LIMONEUX 0,02 - 0,002 mm	ARGILEUX < 0,002 mm
1-5	23,5	23,5	3,0
5-15	80,4	17,0	2,6
35-45	85,0	11,5	3,5
65-75	81,5	14,9	3,6
120-140	81,3	14,9	3,8

L'argile « libre » n'apparaît pratiquement pas au cours du tamisage, et le taux des agrégats limoneux est faible dans tout le profil, sauf dans l'horizon superficiel.

TABLEAU I

Caractères analytiques du

Horizons cm	Cx	Analyse mécanique						Structure					pH	Complexe	
		A	L	Sf	Sg	$CaCO_3$	CS	Gaf mm	Gt cm	Am %	Gm cm	Gm/Gaf		CEB	% Ca+
1-5	3,1	21	21	29	1	22	32	0,71	0,25	28	0,68	9,5	7,95	13	85
5-15	2,5	—	—	—	—	—	—	0,56	0,20	29	0,48	8,5	8,80	13	72
35-45	1,6	21	33	22	-1	22	32	0,58	0,26	45	0,46	8,0	8,75	9	61
65-75	3,5	48	14	13	-1	24	66	0,68	0,30	63	0,41	6,0	7,95	11	81
120-140	0	33	14	21	-1	29	51	0,57	0,42	72	0,54	9,5	7,80	11	73
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)

Cx : cailloux
A : argile
L : limon
Sf : sable fin
Sg : sable grossier
CS : compositon granulométrique

A l'état sec la structure reste très fine (TAB. I, col. 10-13), la grosseur moyenne des mottes étant inférieure à 0,5 cm. Le taux d'agrégation (rapport Gt/Gaf) est bas (< 10).

Le pH est bien basique (TAB. I, col. 14). Il est surtout très élevé dans le 2e et le 3e horizon ($> 8,5$). Pour compléter ces renseignements sur la réaction du profil étudié, nous avons également déterminé les variations éventuelles du pH en fonction du changement des conditions de milieu suivant la technique que nous avons adoptée pour l'étude des propriétés physiques des sols [3]. Dans ce but, nous avons mesuré le pH des suspensions basiques (NaOH à N/100) et salines ($CaSO_4$ à N/100) en faisant varier leurs concentrations. Les résultats sont reproduits dans le GRAPHIQUE I. Les horizons supérieurs sont peu tamponnés : les variations du pH atteignent 1,5 unités dans le premier horizon, 1,25 dans le deuxième et 0,95 dans le troisième. Par contre, les horizons profonds sont bien tamponnés : les variations du pH ne dépassent pas 0,35 unité dans le quatrième, et 0,25 dans le cinquième.

I

du profil E 130

XE ABSORBANT			SALURE											
% de la CEB			ES	% des anions				% des cations				SO_4^{--} / Cl	HCO_3^- / Na^+	$Ca^{++}+Mg^{++}$ / Cl
+Mg	Na	K	‰	Cl	CO_3^{--}	HCO_3^-	SO_4^{--}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+			
-1	13		2,05	12	0	88	0	73	0	14	13	—	7,96	5,13
6	21		2,36	7	0	93	0	28	0	47	25	—	8,15	0,60
21	16		4,77	53	6	35	6	6	6	84	4	0,10	0,66	0,15
8	10		8,47	75	2	16	7	13	17	68	2	0,09	0,21	0,44
17	9		10,95	72	0	11	17	26	28	55	1	0,16	0,20	0,79
(17)	(18)		(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)

Gaf : grosseur moyenne des agrégats fictifs (tamisage humide)
Gt : grosseur moyenne des fractions tamisées (tamisage sec)
Am : % des mottes (tamisage sec)
Gm : grosseur moyenne des mottes (tamisage sec)
CEB : capacité d'échange des bases
ES : extrait sec

Dans les solutions salines le pH tend à baisser légèrement, surtout dans le premier et le deuxième horizon.

La capacité d'échange des bases est faible, surtout en profondeur (TAB. I, col. 15-18). Le complexe absorbant est riche en éléments alcalino-terreux. Toutefois, le troisième horizon contient des doses élevées de sodium échangeable dont le taux reste relativement important, même en profondeur.

Si la salure (TAB. I, col. 19-30) des deux premiers horizons est faible, elle augmente brusquement à partir du troisième horizon pour atteindre 10,95 ‰ en profondeur (120-140 cm). Parmi les composants de la salure, ce sont les bicarbonates et l'ion calcique qui prédominent dans les deux premiers horizons. Ils cèdent la place aux chlorures et à l'ion sodique à partir du troisième horizon. Il faut noter aussi l'apparition dans ces horizons de sulfates et de l'ion magnésien qui font défaut dans les horizons superficiels. On constate aussi la richesse relative en ion potassique, aussi bien à l'état soluble, qu'à l'état échangeable, dans les horizons superficiels.

TABLEAU III

Analyse de l'eau de la Moulouya

(*extrait sec 0,83*)

ANIONS %	CATIONS %	RAPPORTS
Cl^- : 22	Ca^{++} : 51	SO_4^{--}/Cl^- : 2,84
CO_3^{--} : 3	Mg^{++} : 22	HCO_3^-/Cl^- : 0,57
HCO_3^- : 12	Na^+ : 26	$\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{Na^{++}}$: 2,84
SO_4^{--} : 63	K^+ : 1	

analyse effectuée le 21.6.60

Dans le TABLEAU III, nous donnons la composition chimique de l'eau de l'oued Moulouya utilisée au cours de la deuxième série d'essais. Elle est relativement peu chargée en sels. C'est une eau sulfatée (SO_4^{--} : 63 % des anions) et calcique (Ca^{++} : 51 % des cations). Le taux des sulfates est trois fois plus élevé que celui des chlorures ($SO_4^{--}/Cl^- = 2,84$). Il en est de même, en ce qui concerne les cations alcalino-terreux et le sodium ($[Ca^{++} + Mg^{++}]/Na^+ = 2,84$). La composition chimique de cette eau paraît donc favorable à l'irrigation des sols salés de la plaine du Zebra.

Etude de la dynamique de l'élimination des sels solubles au cours des lavages

1. pH et turbidité des filtrats (GRAPH. II)

Le lavage à l'eau distillée a provoqué l'abaissement sensible du pH des filtrats des deux premiers horizons au cours de l'expérience. Cet abaissement a été régulier dans l'horizon de surface (1-5), ce qui se traduit par une bonne corrélation entre les variations des valeurs du pH des filtrats et le nombre de lavages. Cette corrélation peut être représentée par une droite de régression. Par contre, dans le 2e horizon il semble qu'on peut discerner une légère augmentation du pH des filtrats au début du lavage (5-6 lavages), suivie d'une diminution sensible au cours des lavages suivants. Après le 16e lavage, le pH des filtrats paraît de nouveau augmenter légèrement. Du point de vue statistique, ces résultats ne sont pas significatifs.

GRAPHIQUE I

GRAPHIQUE II

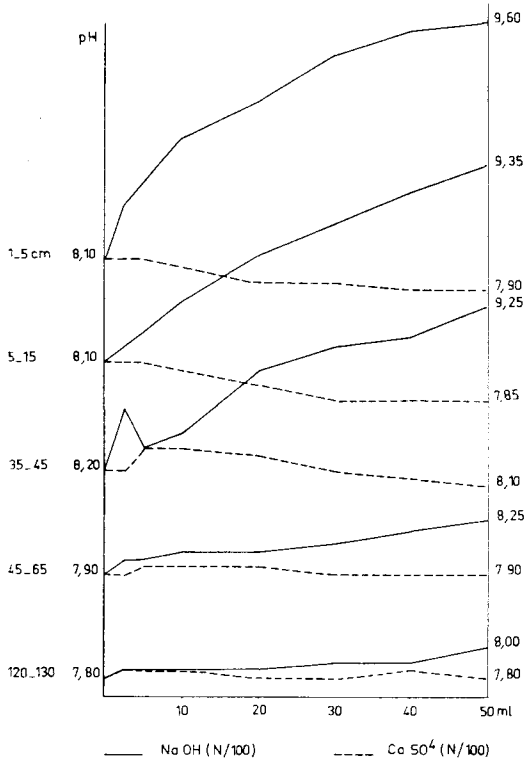
GRAPHIQUE III

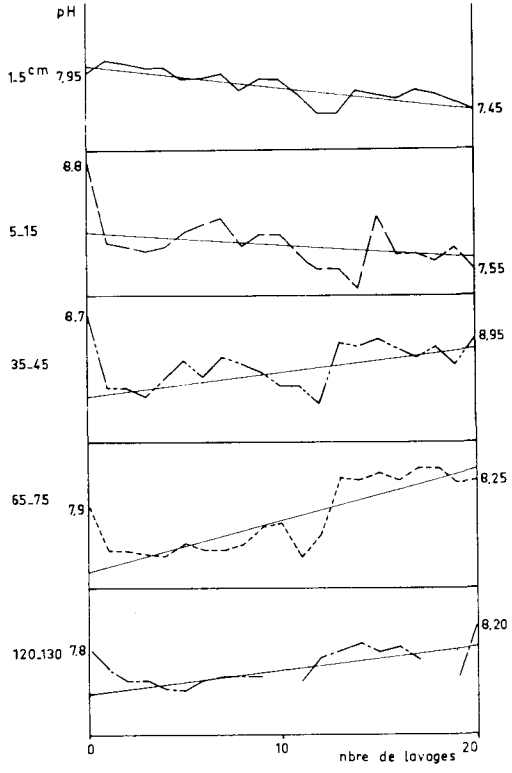
Variations du pH

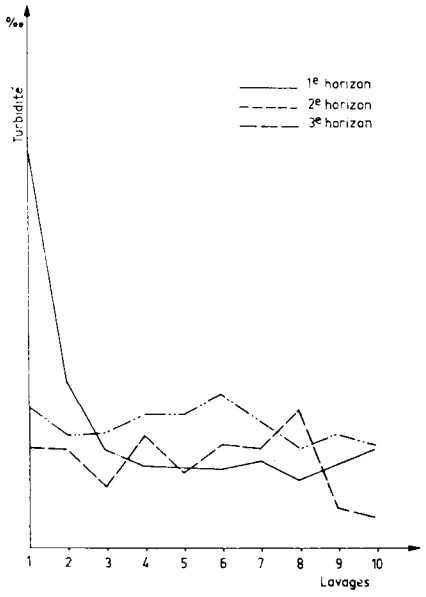
en fonction des conditions du milieu

au cours du lavage à l'eau distillée

Turbidité des filtrats







Dans les horizons profonds le lavage du sol à l'eau pure a provoqué l'augmentation sensible du pH des filtrats. Les résultats des calculs sont hautement significatifs dans le 3e (35-45) et dans le 4e (65-75) horizon. Toutefois, si l'on étudie de près les variations du pH au cours de l'opération dans le 3e horizon, on observe que les droites de régression partielles ne sont pas significatives (du 1er au 10e lavage et du 11e au 20e lavage). Comme dans l'horizon précédent, la courbe du pH des filtrats paraît passer par un maximum au cours des 10 premiers arrosages. Elle monte ensuite brusquement vers la fin de l'opération et se maintient enfin autour du pH = 8,8. Dans le 4e horizon, la courbe du pH des filtrats monte suivant une droite de régression hautement significative (les droites partielles d'ailleurs le sont aussi). Enfin, dans le 5e horizon le pH des filtrats restait sensiblement au même niveau au cours des 10 premiers lavages (corrélation non significative). Il est monté ensuite vers la fin de l'opération suivant la droite de régression significative. Toutefois, l'ensemble des résultats concernant le lavage du 5e horizon n'est pas significatif.

Cette opposition apparente entre les résultats de la détermination du pouvoir-tampon en milieu basique et les résultats du lavage du sol à l'eau distillée (pouvoir-tampon élevé, grosse augmentation du pH dans les horizons fortement tamponnés) s'explique par le fait que dans le 1er cas (mesure du pouvoir-tampon), nous avons déterminé le pH dans les suspensions du sol qui contenait des sels solubles, tandis que dans le 2e cas (lavage du sol), nous l'avons mesuré dans les filtrats de lavage non tamponnés. La présence de sels neutres dans une solution diminue le degré de sa dissociation et abaisse le pH. Il est donc possible que le pouvoir-tampon élevé des horizons profonds du profil du Zebra soit dû à la présence de sels neutres dans ces horizons. Le taux de sels dans les filtrats s'abaissant progressivement au fur et à mesure du lessivage de la masse du sol, le pouvoir-tampon propre du sol pourrait entrer en jeu. On peut supposer que ce pouvoir-tampon des horizons profonds (celui des horizons supérieurs non salés est peu élevé) n'a pas pu empêcher l'augmentation du pH, soit du sol, soit du filtrat, augmentation due aux réactions physico-chimiques qui ont eu lieu au cours des lavages, comme nous le verrons plus loin.

Le filtrat des trois premiers horizons passait toujours trouble au cours de l'opération. Il faut noter le départ massif des colloïdes du 1er horizon au début de l'essai à l'eau distillée, avec la stabilisation de la turbidité des filtrats à partir du 3e lavage (GRAPH. III). Les filtrats des horizons profonds passaient par contre clairs et limpides pendant toute la durée de l'opération.

TABLEAU IV

Comparaisons entre les données théoriques et résultats obtenus

Horizons cm	Cl^-				SO_4^{--}				HCO_3^-				$Ca^{++} + Mg^{++}$				Na^+			
	S	P	EA	F	S	P	EA	F	S	P	EA	F	S	P	EA	F	S	P	EA	F
1-5	—	0,91	0,110	0,077		0,86	tr.	0.166	7,00	1,00	1,319	0,572		0,94	0,400	0,129		0,90	0,090	0,087
					6,94								4,38				4,00			
5-15	—	0,71	0,075	0,110		0,93	tr.	0,141	7,41	0,98	1,545	0,426		0,86	0,150	0,112		0,71	0,308	0,098
35-45	1,62	0,49	1,339	0,783	6,78	0,95	0,184	0,284	8,18	1,07	1,579	0,684	3,20	0,65	0,132	0,161	4,71	0,69	1,313	0,630
65-75	1,72	0,46	3,705	3,074	3,65	0,71	0,459	0,589	9,17	1,15	1,333	0,640	2,08	0,50	0,650	0,689	2,79	0,54	2,185	1,629
120-140	2,31	0,61	4,605	3,615	4,65	0,89	1,483	0,865	7,74	1,05	1,239	0,365	2,44	0,59	1,200	0,879	3,65	0,66	2,338	1,773
(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)

S : rapport des surfaces ; P : rapport a/« salure restante » ; EA : extraits aqueux ; F : filtrats

2. La dynamique des anions

a. Chlorures (GRAPH. IV a, TAB. IV, col. 3-6)

Les courbes de lavage des chlorures des horizons supérieurs non salés (1-5 et 5-15) se rapprochent de la droite, tandis que celles des horizons inférieurs suivent la loi de la fonction exponentielle du type $y = \frac{S^*}{\left(\frac{Q}{R}\right)^x}$ [2]. La corrélation entre l'entraînement des chlorures et le nombre d'arrosages est hautement significative.

Toutefois, les courbes expérimentales des horizons inférieurs s'éloignent assez sensiblement de la courbe théorique, calculée d'après l'équation précédente en prenant $Q/R = 2$ (GRAPH. IV a). Ceci est confirmé par les valeurs du rapport S (TAB. IV, col. 3), assez différentes de 1 : elles oscillent entre 1,62 et 2,31. Les valeurs du coefficient « a » de l'équation de régression se rapprochent des valeurs expérimentales dans les deux premiers horizons (la courbe expérimentale est une droite) et sont très distinctes pour les horizons profonds (TAB. IV, col. 4) ; les courbes expérimentales de ces horizons ne sont plus des droites.

Il résulte de ces chiffres que l'élimination des chlorures dans les horizons non salés s'effectue suivant une droite de régression : le taux de chlorure passé dans chaque filtrat reste toujours le même. Dans les horizons profonds salés on constate au début du dessalage, un départ massif des chlorures qui diminue ensuite progressivement au cours de l'opération. Toutefois, cette élimination des chlorures a été moins rapide dans le cas de l'expérience que dans le cas théorique, et il devait rester encore des chlorures dans la masse du sol même après 20 lavages. Ceci est confirmé par la comparaison des résultats de l'analyse de l'extrait aqueux et ceux des filtrats. En effet, le taux global des chlorures passés dans les filtrats au cours des 20 lavages est nettement inférieur à leur taux dans les extraits aqueux, sauf dans les essais effectués sur les horizons supérieurs (TAB. IV, col. 5 et 6).

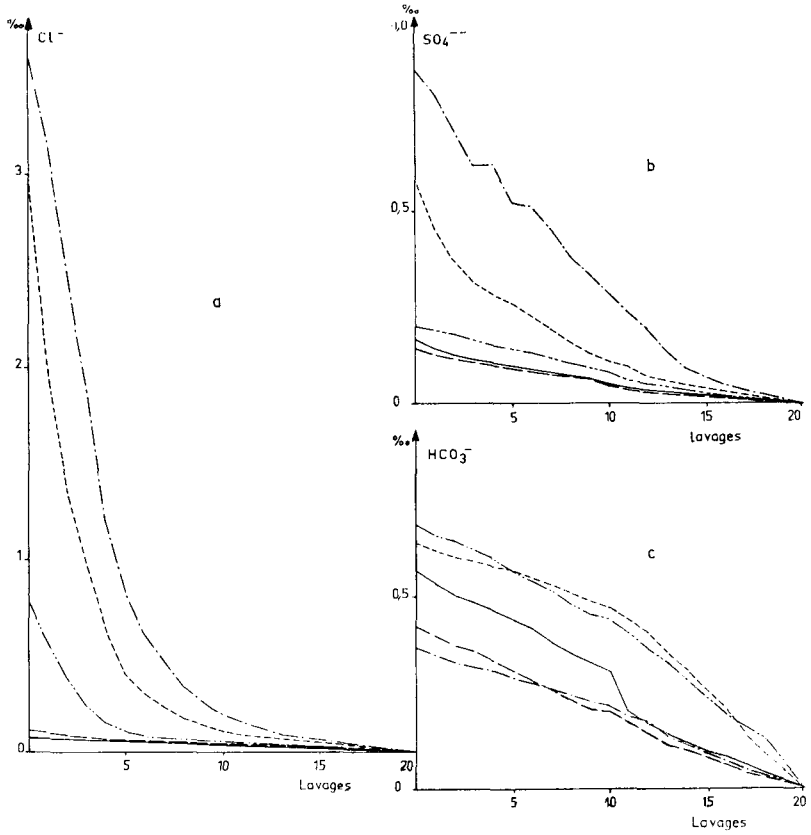
b. Sulfates (GRAPH. IV b, TAB. IV, col. 7-10)

Les courbes de l'élimination des sulfates sont très différentes des courbes exponentielles théoriques, les valeurs du rapport S étant supé-

* S : Salure du sol ; Q : volume d'eau d'arrosage ; R : volume d'eau d'arrosage retenue dans le sol ; x : nombre d'arrosages.

rieures à 6 (TAB. IV, col. 8) sont hautement significatives et se rapprochent des droites ; les valeurs du rapport P étant voisines de 1 (TAB. IV, col. 8), seule la courbe de l'élimination des sulfates du 4e horizon rappelle un peu la courbe exponentielle théorique.

GRAPHIQUE IV



On peut expliquer ce caractère spécial de l'élimination des sulfates par leur dissolution progressive au cours des lavages et par leur passage ultérieur dans les filtrats à taux constant déterminé par l'équilibre entre de différents composants de la salure. Ce point de vue paraît être confirmé par la comparaison entre les valeurs des résultats fournis par l'analyse chimique des extraits aqueux et celles des filtrats. La somme globale des sulfates (SO_4^{--}) recueillis au cours des lavages, dépasse nettement, sauf dans le 5e horizon, le taux de cet élément dans l'extrait aqueux (TAB. IV, col. 9-10).

c. Bicarbonates (GRAPH. IV c, TAB. IV, col. 11-14)

Nous n'avons pas trouvé de carbonates libres (CO_3^{--}) au cours de cette série d'essais. En ce qui concerne les bicarbonates (HCO_3^-), les courbes de la dynamique de leur élimination du sol sont très différentes des courbes théoriques : les valeurs du rapport S dépassant nettement 7 (TAB. IV, col. 11), sont hautement significatives et se rapprochent bien des droites avec des valeurs du rapport P légèrement supérieures à 1 (TAB. IV, col. 12). Toutefois, on peut observer une certaine différence entre l'allure de la droite théorique et celle des courbes expérimentales : celles-ci présentent une légère concavité dans la direction des $y < 0$. Le lavage des bicarbonates paraît donc plus lent au début et plus rapide à la fin. C'est pour ces raisons que les valeurs du rapport P dépassent 1.

La dynamique de l'élimination des bicarbonates paraît légèrement différente de celle des sulfates. De plus, le taux global des bicarbonates des filtrats reste inférieur au taux de cet élément décelé dans les extraits aqueux (TAB. IV, col. 13 et 14). La présence de sels solubles (chlorures, sulfates) paraît gêner leur entraînement lors du lavage du sol. En effet, l'élimination des bicarbonates, assez lente au début de l'opération, devient plus rapide quand la majorité d'autres sels a été déjà éliminée de la masse du sol (comparer les courbes des bicarbonates et des chlorures).

d. Influence mutuelle des anions sur la dynamique de leur lessivage

— Rapport SO_4^{--}/Cl^- (GRAPH. V a)

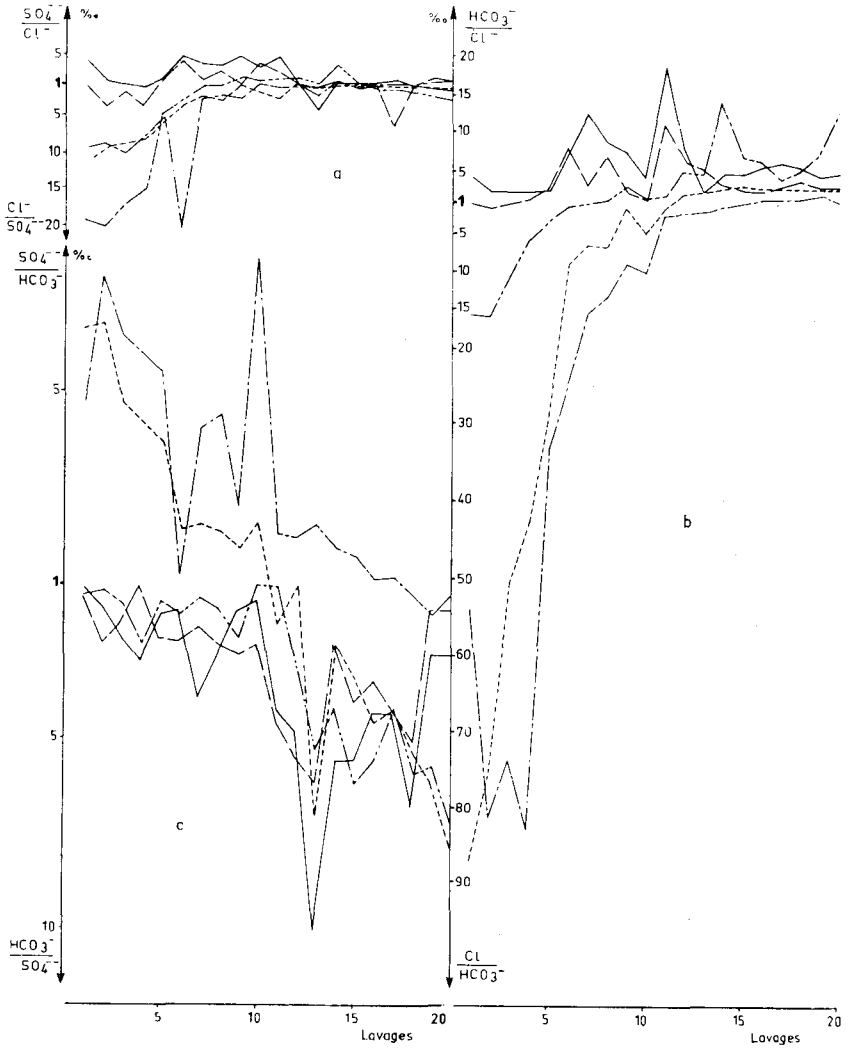
Les valeurs du rapport SO_4^{--}/Cl^- qui varient autour de 2 dans les extraits de l'horizon supérieur (1-5), diminuent avec la profondeur, où elles baissent jusqu'à 0,55 dans le 4e horizon : ce sont donc les sulfates qui prédominent dans les filtrats des horizons supérieurs et les chlorures dans les filtrats des horizons profonds.

D'une manière générale, les courbes de ce rapport se présentent comme des courbes « en cloche », dissymétriques, avec le maximum vers le milieu de l'opération. La branche montante, au début de l'opération, est assez rapide, tandis que la branche descendante, vers la fin de l'opération, est en pente très douce. Ceci est bien visible lorsqu'on étudie les droites de régression de deux branches (entre le 1er et le 10e lavage, d'une part, et entre le 11e et le 20e lavage d'autre part). Les droites de régression des branches ascendantes sont significatives dans la plupart des horizons ; par contre, celles des branches descendantes ne le sont pas.

Dans les horizons supérieurs non salés, cette courbe « en cloche » est très étalée, avec un maximum peu visible. Les résultats obtenus ne

GRAPHIQUE V

Variations des rapports anions/anions



sont pas significatifs. On peut assimiler la courbe générale à une droite parallèle à l'axe des abscisses : le rapport SO_4^{--}/Cl^- restant pratiquement constant au cours de l'opération avec les valeurs oscillant autour de 2,10 pour le 1er horizon et 1,44 pour le 2e. Toutefois, la branche ascendante est bien visible dans le 2e horizon.

A partir du 3e horizon, la branche ascendante est bien prononcée (les résultats sont peu sûrs en ce qui concerne le 4e horizon) : le taux des sulfates augmente dans les filtrats au fur et à mesure de l'élimination des chlorures de la masse d'un sol. Au-delà des 7e et 8e lavages, les valeurs de ce rapport oscillent autour de 1 (1,49, 0,75, 1,13, suivant l'horizon pour les 10 derniers lavages), c'est-à-dire qu'il est passé dans les filtrats presque autant de chlorures que de sulfates (avec une légère prédominance pour ces derniers).

— Rapport HCO_3^-/Cl^- (GRAPH. V b)

Dans les deux premiers horizons ce rapport varie peu ; les bicarbonates l'emportent nettement sur les chlorures avec des valeurs élevées pour ce rapport : 5,99 pour le premier horizon, 3,84 pour le 2e. Toutefois, on observe un certain maximum vers le milieu de l'opération, bien que les résultats ne soient pas significatifs.

Dans les horizons profonds salés, les courbes du rapport HCO_3^-/Cl^- ont une autre allure : au début de l'opération les chlorures l'emportent nettement sur les bicarbonates, surtout dans le 4e et le 5e horizon. Puis, au fur et à mesure du lavage des chlorures, le taux des bicarbonates augmente dans les filtrats, et à partir du 10e - 12e lavage dans le 3e et le 4e horizon, et 16e lavage dans le 5e horizon, les bicarbonates l'emportent nettement sur les chlorures avec des valeurs moyennes du rapport, dans les filtrats, égales à 7,24 et 2,66. La supériorité du taux des bicarbonates sur celui des chlorures continue à augmenter régulièrement au cours de la seconde moitié de l'expérience, quoique moins rapidement qu'au début de l'opération. Tous les résultats des calculs de la corrélation, aussi bien pour la courbe générale que pour les courbes partielles, sont significatifs.

— Rapport SO_4^{--}/HCO_3^- (GRAPH. V c)

L'allure du rapport SO^4/CO^3H est très différente de celle des rapports SO_4^{--}/Cl^- et HCO^{3-}/Cl^-.

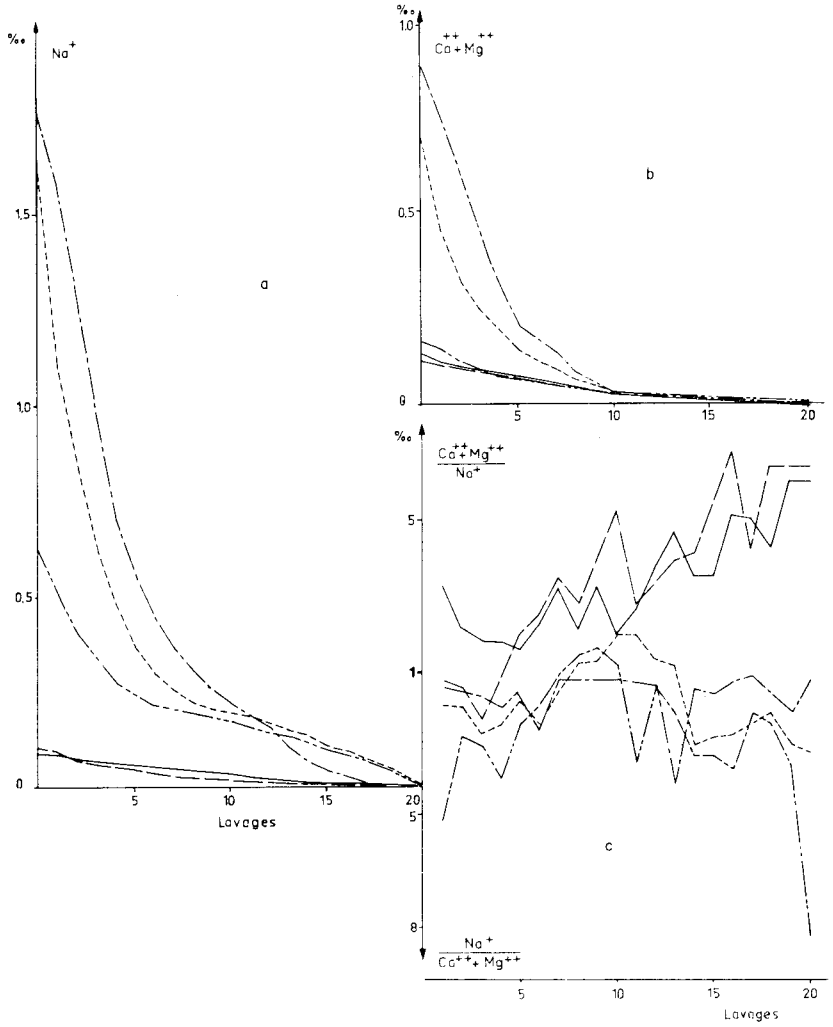
Au début de l'opération, les bicarbonates et les sulfates paraissent être éliminés du sol dans des proportions bien définies, et la courbe du rapport paraît être une droite parallèle à l'axe des abscisses avec des valeurs oscillant autour de 0,50 (la corrélation n'étant pas significative). A partir du 8e - 10e lavage le taux des bicarbonates augmente rapidement dans la solution des filtrats et la branche droite de la courbe devient rapidement descendante (la droite de régression pour cette branche de la courbe est significative).

En ce qui concerne les horizons profonds, les courbes du rapport

SO_4^{--}/HCO_3^- se rapprochent d'une droite de régression décroissante hautement significative. Ceci veut dire que l'accroissement du taux des bicarbonates par rapport aux sulfates s'effectue progressivement, au fur et à mesure du lessivage. Il faut noter que dans le dernier horizon le taux des sulfates par rapport aux bicarbonates est plus élevé que dans le 4e.

GRAPHIQUE VI

Dynamique d'élimination des cations



3. La dynamique des cations

a. Le sodium (GRAPH. VI a, TAB. IV, col. 19-22)

Les courbes du lessivage du sodium sont assez différentes. Celles des deux horizons supérieurs sont très proches des droites avec des valeurs du rapport P proches de 1 (TAB. VI, col. 16). Elles sont bien significatives. La courbe de l'élimination du sodium du 3e horizon, toujours significative, s'éloigne déjà de la droite avec des valeurs du rapport P égales à 0,69. Mais elle est assez différente de la courbe théorique exponentielle avec S égal à 4,71 (TAB. VI, col. 15). Les courbes des horizons profonds, ayant l'allure de courbes exponentielles, sont par contre très différentes de la droite (rapport P variant autour de 0,60). Mais elles ne coïncident pas avec la courbe théorique du lessivage. Les valeurs du rapport S sont respectivement pour ces deux horizons 2,8 et 3,7. Le lavage du sol à l'eau distillée a été, dans les conditions de l'expérience, moins rapide que dans le cas théorique.

Si le sodium soluble paraît être bien éliminé de l'horizon superficiel, celui passé dans les filtrats du lavage des autres horizons reste inférieur à celui des extraits aqueux de ces horizons (TAB. IV, col. 21-22).

b. La somme calcium + magnésium (GRAPH. VI b, TAB. IV, col. 15-18)

Les courbes de lavage de la somme $Ca^{++} + Mg^{++}$ sont analogues à celles de Na^{+}. Celles des trois premiers horizons se rapprochent de la droite et celles des horizons profonds, de la courbe théorique exponentielle (TAB. IV, col. 15-16). Notons toutefois, à ce propos, que ces courbes sont beaucoup plus proches de la courbe théorique que celles de l'extraction du sodium, avec des rapports S pour les trois derniers horizons respectivement égaux à 3,2, 2,1 et 2,4 contre 4,7, 2,8 et 3,7 pour le cas du sodium.

Le taux global de ces cations extraits au cours de l'opération est voisin de celui trouvé au cours de l'analyse de l'extrait aqueux.

c. Influence mutuelle des cations sur la dynamique de leur lessivage

— Rapport $Ca^{++} + Mg^{++}/Na^{+}$ (GRAPH. VI c)

Le rapport $Ca^{++} + Mg^{++}/Na^{+}$ des premiers horizons augmente régulièrement au cours de l'expérience suivant une droite de régression significative, c'est-à-dire que le taux des cations alcalino-terreux dans les filtrats a augmenté régulièrement par rapport à celui du sodium ; au début de l'opération, le taux des alcalino-terreux dépassait celui du sodium.

Dans les filtrats du 3e et du 4e horizon, le taux de l'ion sodique a diminué progressivement jusqu'aux 8e et 10e lavages. Au-delà, son taux dans le filtrat a augmenté progressivement par rapport à la somme des ions calcique et magnésien. La corrélation est bien significative pour les branches ascendantes et descendantes.

Dans le 5e horizon, ce rapport reste dans les filtrats sans grands changements au cours de l'expérience, oscillant autour de 0,67 (prédominance nette du sodium).

4. *Influence mutuelle des cations et des anions sur la dynamique de leur lessivage*

a. Rapports anions/sodium

— Rapport Cl^-/Na^+ (GRAPH. VII a)

Dans les filtrats des deux premiers horizons ce rapport a peu varié au cours de l'opération. Il a diminué au cours de la première partie de l'expérience (jusqu'aux 7e - 8e lavages) pour augmenter ensuite. L'allure des deux branches de la courbe de ce rapport est significative. Ce rapport augmente progressivement dans les filtrats du 2e horizon, tout en restant assez proche des courbes du rapport des filtrats des horizons profonds se comportant différemment.

Au début de l'expérience les valeurs de ce rapport étaient voisines de 1, c'est-à-dire que la quantité des chlorures exportés a été équivalente à 1, quantité du sodium passée dans le filtrat. A partir du 8e - 10e lavage, le taux du sodium passé dans les filtrats a augmenté par rapport aux chlorures, surtout dans le 3e horizon. On peut supposer qu'au cours du lavage le sodium a passé d'abord sous forme de chlorures. Après l'élimination des chlorures son exportation s'est poursuivie sous forme d'autres sels, tels que les sulfates ou bicarbonates.

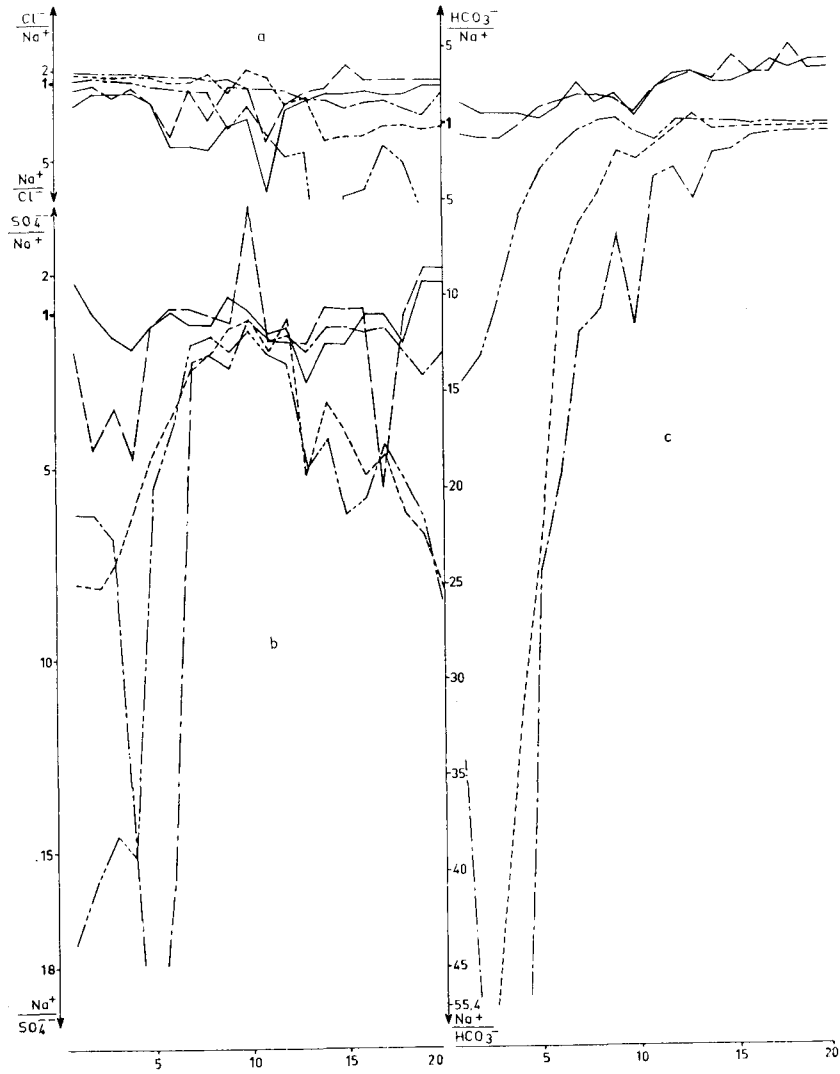
— Rapport SO_4^{--}/Na^+ (GRAPH. VII b)

Dans le premier horizon, les valeurs de ce rapport ont varié autour de 1, les taux du sodium et des sulfates passés dans les filtrats étant équivalents. A partir du 2e horizon, le taux du sodium l'a emporté sur le taux des sulfates dans les filtrats au début de l'expérience, surtout dans les horizons profonds salés. Les valeurs de ce rapport ont augmenté ensuite en se rapprochant de 1. Dans les filtrats du 2e et du 5e horizon, elles sont restées stables tout au long de l'opération, à partir du 3e lavage dans les filtrats du 2e horizon, à partir du 10e lavage dans le 5e horizon.

Par contre, dans les filtrats du 3e et du 4e horizon, ce rapport ayant atteint son maximum vers le 10e lavage a diminué ensuite au cours des lavages suivants.

GRAPHIQUE VII

Variations des rapports anions/sodium



— Rapport HCO_3^-/Na^+ (GRAPH. VII c)

Dans les filtrats des horizons supérieurs, ce rapport paraît augmenter au cours de l'opération, en partant des valeurs voisines de 1 pour aboutir vers la fin de l'opération aux valeurs voisines de 4. Cet anion a donc prédominé nettement le sodium dans les filtrats de ces horizons. En profondeur par contre, les filtrats des horizons profonds contenaient beaucoup de sodium par rapport aux taux des bicarbonates, et son taux a diminué progressivement au cours de l'opération. Pour ces raisons, les valeurs du rapport ont augmenté elles aussi progressivement pour se rapprocher de 1 à partir du 10e lavage dans les filtrats du 3e et du 4e horizon. Elles se maintenaient à des valeurs plus basses (< 1) dans les filtrats du 5e horizon.

Nous pouvons supposer que les bicarbonates ont passé en solution dans ces horizons sous forme de bicarbonates de sodium, et ceci d'autant plus que l'on observe justement l'augmentation progressive du pH dans les filtrats de ces horizons, surtout à partir du 10e - 11e lavage.

b. Rapports anions/(calcium + magnésium)

— Rapport $Cl^-/(Ca^{++} + Mg^{++})$ (GRAPH. VIII a)

Le taux des chlorures dans les filtrats des deux premiers horizons a été faible par rapport au taux de la somme $Ca^{++} + Mg^{++}$, le rapport variant autour de 0,19 dans le premier horizon, autour de 0,37 dans le 2e. D'après l'allure des courbes, ce rapport paraît diminuer d'abord (quoique les résultats ne soient pas significatifs) jusqu'aux 10e - 12e lavages (augmentation relative du taux de $Ca^{++} + Mg^{++}$), pour remonter jusqu'aux valeurs du rapport égales à 0,17 - 0,20 depuis le 12e lavage.

Dans les filtrats des horizons profonds ce rapport a diminué progressivement suivant la droite de régression significative au fur et à mesure du déroulement de l'opération. Dans les premières portions des filtrats, ce sont les chlorures qui prédominaient (rapport > 1), à partir des 10e - 12e lavages le rapport devenait inférieur à 1 (prédominance de la somme $Ca^{++} + Mg^{++}$). Il faut noter que ce rapport se maintenait autour des valeurs 0,50 - 0,70 (courbes parallèles à la droite de 1). Ces courbes sont similaires.

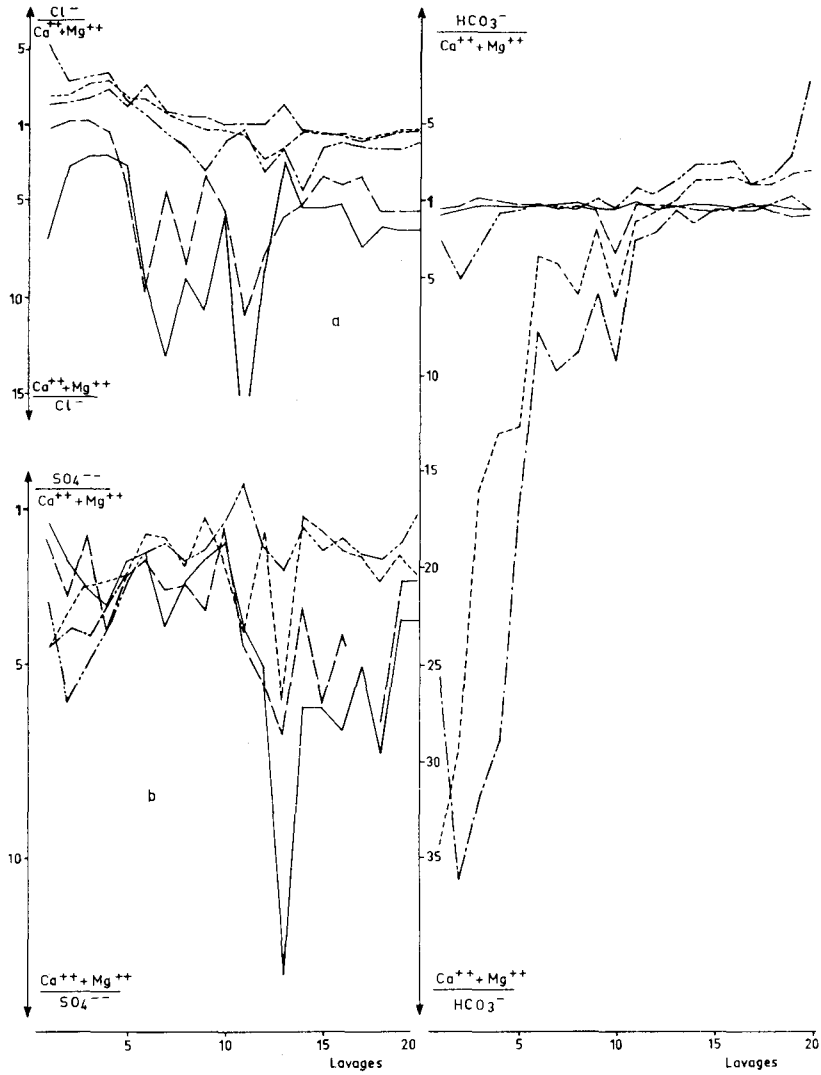
— Rapport $SO_4^{--}/(Ca^{++} + Mg^{++})$ (GRAPH. VIII b)

D'une manière générale, les courbes de ce rapport des différents horizons se ressemblent beaucoup, surtout pour la première moitié de

l'opération. On n'observe pas de corrélation entre les valeurs de ce rapport et le nombre des lavages (sauf pour le dernier horizon).

GRAPHIQUE VIII

Variations des valeurs des rapports anions/(calcium + magnésium)



D'après l'allure des courbes, il semble que ce rapport, toujours inférieur (sauf quelques exceptions) à 1 — prédominance de la somme $Ca^{++} + Mg^{++}$ par rapport au taux des sulfates dans le filtrat — ait augmenté au cours de la première partie de l'expérience. A partir du 10e - 12e lavage, les valeurs de ce rapport dans les filtrats des deux premiers horizons ont diminué (prédominance de $Ca^{++} + Mg^{++}$) tandis que dans les filtrats des horizons profonds elles se maintenaient autour des valeurs suivantes : 0,70 et 0,50 dans les filtrats du 3e et du 4e horizon (prédominance des sulfates), et autour de 1 dans le 5e : 1,02 (équivalence entre ces deux composants).

— Rapport $HCO_3^-/(Ca^{++} + Mg^{++})$ (GRAPH. VIII c)

Dans les filtrats des horizons supérieurs (1er et 2e horizons), ce rapport a varié autour de 1 au cours de l'expérience : respectivement 0,85 et 0,83 ; les bicarbonates paraissaient passer sous forme de bicarbonates de calcium et de magnésium dans les filtrats. Par contre, dans les filtrats du 3e et du 4e horizon, ce rapport a augmenté d'une manière significative au cours de l'opération. Au début de l'expérience, ce sont les cations alcalino-terreux qui prédominaient dans les filtrats par rapport aux bicarbonates, tandis qu'au cours de la deuxième partie de l'expérience ce sont les bicarbonates qui prédominaient par rapport aux cations alcalino-terreux. Dans les filtrats du 5e horizon ce rapport a été très bas au début de l'opération (comme d'ailleurs dans les filtrats du 4e horizon). Il a augmenté ensuite au cours de l'opération très rapidement. A partir du 8e - 9e lavage les valeurs de ce rapport se rapprochaient de 1 et se maintenaient autour de 0,74 jusqu'à la fin de l'expérience : une partie des bicarbonates est passée donc sous forme de bicarbonates alcalino-terreux dans les filtrats de cet horizon.

(*à suivre*)

Manuscrit déposé le 19.3.62

ملخص

حركة غسل املاح ارض بنية حمراء Steppique

يدرس المؤلفون في هذه الدراسة الحالية كيفيات غسل ارض بنية حمراء Steppique اخذت من سهل زبرا (المغرب الشرقي) تختص هذه الارض بالوجود الغالب في العمق لكميات كبيرة نسبيامن الاملاح القابلة للانحلال. ان هذه الافاق عادة قلوية. منحنيات حدف الكلورير والصديوم تقترب من المنحنيات الاسية. وبالعكس فمنحنيات حدف السليفات وبيكاربونات من جهة والمهابط القلوية المختلطة بالتراب من جهة اخرى تقترب من الخطوط المستقيمة. لا يظهر زوال الاملاح مساعدا على تفريق فروانيس الافاق القلوية.

Résumé

Dans le présent article les auteurs étudient les modalités du lessivage d'un sol brun-rouge steppique prélevé dans la plaine de Zebra (Maroc Oriental). Ce sol est caractérisé par la présence très fréquente en profondeur d'assez fortes quantités de sels solubles. Ces horizons sont en général alcalisés. Les courbes d'élimination des chlorures et du sodium se rapprochent des courbes exponentielles ; par contre les courbes d'élimination des sulfates et des bicarbonates, d'une part, et des cations alcalino-terreux d'autre part, se rapprochent des droites. Le départ de sels ne paraît pas provoquer la dispersion des colloïdes des horizons alcalisés.

Resumen

La dinámica de la lixiviación de sales en un suelo castaño-rojo de estepa

En el presente artículo los autores estudian las modalidades de lixiviación de un suelo castaño-rojo de estepa situado en la llanura del Zebra (Marruecos Oriental).

Este suelo se caracteriza por la presencia muy frecuente de cantidades bastante grandes de sales solubles en sus capas profundas. Generalmente estos horizontes están alcalinizados. Las curvas de remoción de los cloruros y del sodio se aproximan a curvas exponenciales, mientras que las correspondientes a los sulfatos y bicarbonatos así como las de los cationes alcalino-terrosos son casi lineales. La remoción de sales no parece que ocasione la dispersión de los coloides de los horizontes alcalinizados.

Summary

Dynamics of salt leaching from a brown-red steppe soil

In the present article leaching relationships are studied from a brown-red steppe soil, samples of which were taken in the Zebra Plain (East Morocco).

This soil is characterized by the very frequent presence in the deeper layers of rather high amounts of soluble salts. In general these horizons are alkalized. The removal curves of chlorides and sodium approximate to the exponential curves ; on the other hand, the removal curves of sulphates and bicarbonates, as well as those of the alkaline soil cations, approximate to the straights. The leaching of the salt appears to cause no dispersion of the colloids of the alkalized horizons.

BIBLIOGRAPHIE

1. BRYSSINE, G. — 1945. Etude expérimentale de l'irrigation du sol des Beni-Amir. — Dir. de l'Agr., C. R. A., Rabat, 115 p.

2. BRYSSINE, G. & G. CHEROTZKY — 1951. Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations. — 70° Congrès de l'Ass. Tr. Av. Sc., fasc. IV, 4 p., 1 Tab., Tunis (id. Tr. Sect. Péd. Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc, t. 4/5).

3. BRYSSINE, G. — 1952. Contribution à l'étude de l'évolution des sols sableux. — Note sur la dispersion et la migration de l'argile. — Tr. Sect. Péd. Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc, t. 4/5, pp. 11-33, Rabat.

4. RUELLAN, A. — 1958-1959. Les sols salés et alcalisés de la plaine du Zebra. — Tr. Sect. Péd. Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc, t. 13/14, pp. 159-164, Rabat.

5. RUELLAN, A. — 1960. Expérimentation sur les sols salés et alcalisés en profondeur de la plaine du Zebra, 10 p. dact.

6. RUELLAN, A. — 1961. Note sur l'expérimentation entreprise sur les sols salés et alcalisés de la plaine du Zebra (Basse Moulouya). — Min. Agr. Dir. Mise Val. Gén. Rur., Orstom., Mission pédologique au Maroc, Lab. Berkane, 25 p. ronéo, 2 Tab., 10 fig.