

UNE CAUSE DE LA SATURATION MAGNÉSIENNE DES ARGILES DANS LE SOL : L'HYDROMORPHIE TEMPORAIRE DE SAISON CHAUDE

par B. LEPOUTRE* et A. SAUVAGEOT**

RÉSUMÉ

Après avoir constaté une très forte saturation magnésienne du complexe absorbant dans les sols hydromorphes sous peuplier au Maroc, les auteurs constatent parallèlement un concrétionnement essentiellement calcaire là où les argiles ont fixé le magnésium. Ces horizons correspondent au niveau de battement de la nappe phréatique, en été, sous irrigation.

L'analyse du phénomène conduit alors les auteurs à considérer la différence de solubilité des carbonates de calcium et de magnésium en fonction du pH et de l'évaporation.

La solution du sol serait déséquilibrée avec de plus fortes teneurs en magnésium et de plus faibles teneurs en calcium au niveau de la frange capillaire sous évaporation intense. Dans ces conditions l'équilibre sol-eau s'établit dans le sens d'une saturation magnésienne du complexe adsorbant.

Cette hypothèse, qui s'accorde avec les observations, est vérifiée par l'établissement d'une relation pH - Ca/Mg, d'une relation entre le pH et la décalcification du complexe, et enfin par une désaturation calcique et une resaturation magnésienne réalisée artificiellement au laboratoire.

Le parallélisme entre la présence d'argiles très magnésiennes et celle d'une nappe phréatique évaporante est soulignée par les auteurs qui proposent d'introduire le caractère « saturation magnésienne » comme critère d'hydromorphie.

(*) Directeur de Recherches de pédologie de l'ORSTOM détaché au Ministère des Affaires étrangères pour servir à la station de Recherches Forestières de Rabat (Maroc).

(**) Licenciée ès Sciences, chef du laboratoire d'étude du sol de la Station de Recherches forestières du Maroc.

ABSTRACT

Having observed a very great magnesian saturation of the absorbent complex in hydromorphic soils developed under poplars in Morocco, the authors notice with parallel a chiefly lime concretion in the parts where clays have kept magnesium. These horizons answer to the level of fluctuation of the ground water table, in summer, through irrigation.

Having analyzed the phenomenon, the authors therefore examine the difference of solubility of calcium and magnesium carbonates depending upon pH and evaporation.

Soil solution would be unbalanced with greater amounts of magnesium and smaller amounts of calcium at the level of the capillar fringe through strong evaporation. Under these circumstances, soil-water equilibrium is established towards a magnesian saturation of the adsorbent complex.

This hypothesis, agreeing to observations, is checked by the drawing up of a pH - Ca/Mg connection, a pH and decarbonation connection and finally by a limy and magnesian desaturation artificially carried out in laboratory.

Connection between occurrence of very magnesian clays and an evaporating ground water table is outlined by the authors who suggest to introduce the feature « magnesian saturation » as hydromorphic criterium.

INTRODUCTION

On ne s'étonnera pas de ce que l'objet initial des travaux de recherche qui ont conduit à l'élaboration de cette note ne concernait pas directement le sujet qui va être traité. En effet, la recherche forestière aborde tout naturellement les problèmes sous l'angle forestier, les autres aspects de la recherche ne s'inscrivent qu'ensuite à l'intérieur de ce cadre.

C'est ainsi que l'étude des causes d'échec et de succès d'une plantation des peupliers noirs et blancs, faite à M'Krazza sur limons quaternaires de la plaine du Tadla, fut soumise à la section de pédologie et d'écologie de la Station de Recherches ; au cours de cette étude, les caractères particuliers de certains profils de sols ont amené à étendre les recherches dans le domaine pédologique et à mettre en évidence des phénomènes dont une explication a été tentée. C'est celle-ci qui fait l'objet de ce mémoire.

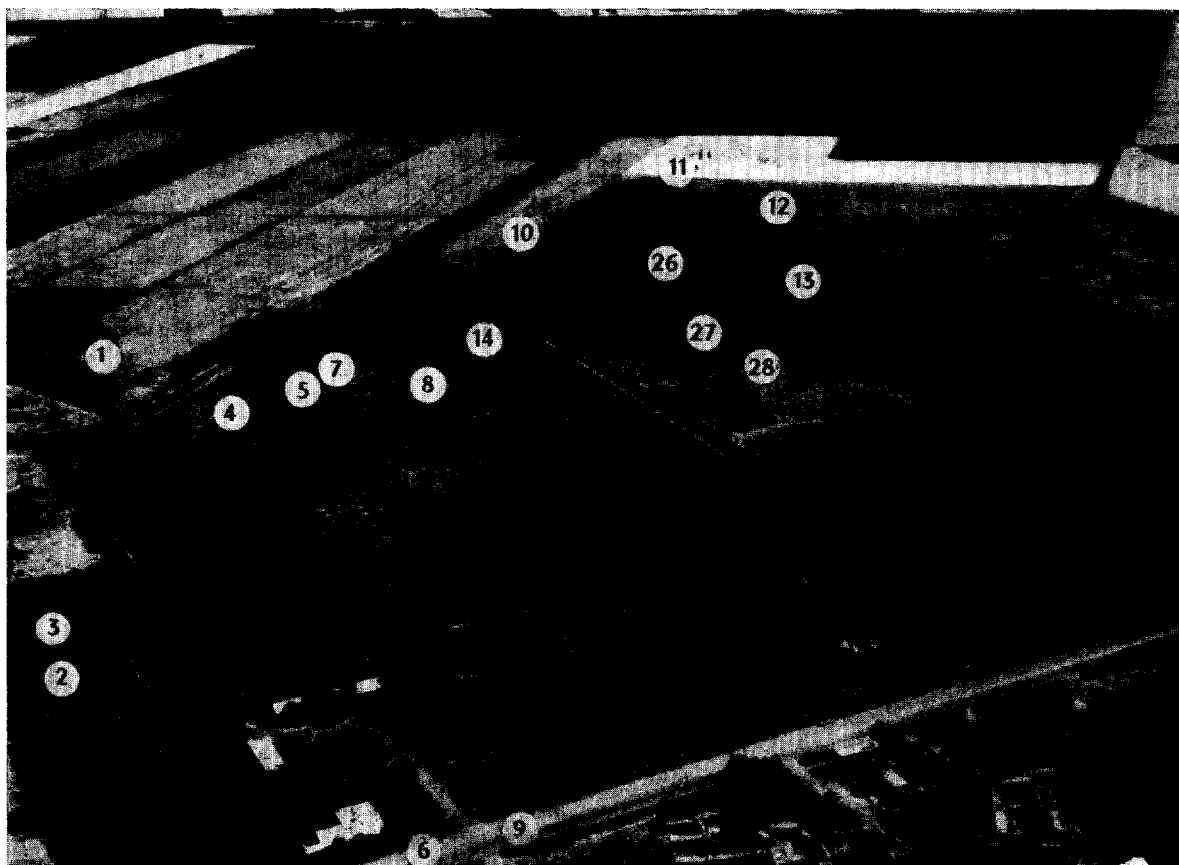
1. LES PROBLÈMES FORESTIERS ET PÉDOLOGIQUES

Ils sont parfaitement illustrés sur le cliché joint. On y aperçoit la plantation sur un terrain rectangulaire, presque plat, situé derrière les bâtiments de la ferme ; on notera que le quart de la surface situé à droite au premier plan, est planté avec *Populus alba* tandis que les trois autres quarts le sont avec *Populus nigra*. C'est surtout dans cette dernière partie qu'une très nette hétérogénéité de la plantation se manifeste, pouvant aller de la réussite totale à l'échec complet.

Les questions que l'on peut se poser sont les suivantes :

1° Quelles sont les causes de l'hétérogénéité de la plantation ?

2° Pour quelle raison le peuplier blanc réussit-il si bien ? Est-ce une adaptation spécifique, ou le sol est-il de nature différente ?



Plantation expérimentale de peupliers à M'KRAZZA et emplacements de quelques sondages pédologiques.

On notera la meilleure réussite de *Populus alba* à droite des sondages 26, 27 et 28.

(Photo aérienne Verbelke)

2. LE SOL

L'ensemble de la parcelle plantée est situé sur un ancien emplacement de zone inondée de la plaine du Tadla, aujourd'hui assainie par des réseaux de drains. Partout alentour, les sols, formés sur limons quaternaires ou sur calcaires lacustres, sont cultivés dans le cadre d'un aménagement général et irrigués en

été grâce aux réserves d'eau du barrage de Bin el Ouidane, lui-même situé dans le massif du Moyen Atlas voisin. Le cliché donne un aperçu de cette mise en valeur avec, au dernier plan, des plantations d'agrumes.

Les sols paraissent identiques sur les 28 profils examinés. Il s'agit de sols hydromorphes à très faible tendance vertique en surface sur 40 à 50 cm de profondeur (7,5 YR-5/2) et à horizon grumosolique sur les deux premiers centimètres (7,5 YR-5/1).

En dessous d'une profondeur de 50 cm on trouve un horizon humide sans structure caractérisée, brun rougeâtre à orange sombre (5 YR-6/4) qui s'éclaircit au niveau de la nappe phréatique. On y trouve quelques petites concrétions calcaires ferrugineuses (5 YR-4/1) dans lesquelles il semble que le fer ait précipité plus facilement à un premier stade, donnant un noyau sombre et le calcaire plus fortement ou plus isolément à un deuxième stade, donnant sur la coupe d'une concrétion une auréole plus claire. Il s'agit toujours de petites concrétions plus ou moins arrondies, dont la taille dépasse rarement 5 à 6 mm de diamètre. On les trouve surtout à partir de 50 cm de profondeur et davantage à 80, mais on peut en isoler de plus petites et de plus rares entre 30 et 50 cm ;

Le chroma de /1 (code Munsell), la présence des concrétions ferrugineuses calcaires, et, à un moindre degré, la structuration grossière des horizons organiques sont les indices qui autorisent à classer ces sols dans la classe des sols hydromorphes. Nous verrons plus loin qu'un autre caractère pourrait être pris en considération pour motiver ce choix.

Le profil se résume finalement à la description suivante :

Description du profil

Profondeur

0 à 2 cm	: Grumosolique, gris brunâtre (7,5 YR-5/1)
2 à 45 cm	: Argileux, humifère gris, brunâtre (7,5 YR-5/1) à structure prismatique moyenne, les fentes de retraits s'atténuant progressivement jusqu'à 40 cm.
45 à 90 cm	: Argileux humide (frange capillaire) paraissant massif, de couleur nettement et brutalement plus claire et plus rougeâtre (5 YR-6/4 à 5,5 YR-6/4) avec début de concrétionnement ferrugineux calcaire à 50 cm, qui s'accroît vers 80 cm. Ces argiles mises à sécher se rétractent très fortement.
100 cm	: Nappe phréatique temporaire estivale.

Il n'est pas sans intérêt de signaler aussi que, du fait de l'irrigation, souvent surabondante, de la plaine en été, la nappe phréatique remonte à cette période de l'année jusqu'à 0,80 - 1,00 m de la surface du sol, alors qu'elle se situe vers 1,50 m en hiver.

En ce qui concerne la variation des facteurs édaphiques à l'intérieur de la plantation, on note simplement un très léger abaissement de la surface topographique vers la partie centrale de la parcelle (profil 9). Des emplacements comme ceux des profils 14 et 4 ne sont pas marqués sur le terrain par une dénivellée topographique visible.

Dans le sol, la nappe phréatique d'été semble se stabiliser partout à la même profondeur à 10 cm près, tout au moins à la date des observations. On notera cependant qu'avant l'assainissement les parties plus basses (emplacements des profils 9, 13 et 28) étaient submergées en hiver.

Enfin, les enracinements de trois peupliers noirs mal venants qui ont été examinés, montrent une localisation du système racinaire dans les 50 cm de surface du sol avec de très rares racines descendant au-delà. Il semble à première vue que les systèmes racinaires trouvent, à ce niveau un obstacle à une pénétration plus profonde bien que le sol soit humide.

3. HYPOTHÈSES

Ces hypothèses de travail ont été examinées successivement afin d'orienter la recherche analytique ; on peut les formuler et les discuter de la façon suivante :

a - La mortalité des peupliers pourrait être causée par une remontée excessive de la nappe phréatique

Cette hypothèse ne semble pas pouvoir être retenue car il n'a pas été noté de variations de profondeur de cette nappe supérieure à 10 cm en été. D'autre part il existe un horizon humide dégagé de la nappe et qui reste inexploité par les racines quand les arbres sont mal venants, c'est-à-dire dans les zones d'échec. Par ailleurs, les renseignements oraux, recueillis auprès du gérant d'exploitation, confirment que d'autres cultures saisonnières sans enracinement profond, telles que les céréales, ont déjà subi l'échec sur ces mêmes emplacements. Enfin, il n'est pas concevable, dans le cas où on voudrait retenir cette hypothèse, que les peupliers blancs, réputés plus sensibles à l'excès d'eau se soient mieux adaptés aux mêmes conditions de nappe comme le montre le cliché aux abords des profils 26, 27 et 28 et précisément en limite de la zone d'échec du peuplier noir (emplacements 11, 12 et 13).

b - Si l'hypothèse précédente ne peut être retenue, il faut alors invoquer des facteurs propres à la chimie du sol

On peut penser à la salure d'autant que la culture de l'artichaut a pu être réussie, sur les mêmes emplacements.

L'analyse des sels solubles faite sur quatorze profils n'a pu confirmer cette nouvelle hypothèse (voir tableau II).

En effet, non seulement les taux de chlorures sont faibles, mais encore, ils sont plus élevés dans les 50 premiers cm, c'est-à-dire dans les zones d'enracinement, et, il n'est d'ailleurs pas possible de les relier statistiquement à l'échec ou à la réussite du peuplier noir. Inversement, ils sont toujours plus faibles là où les racines accèdent plus difficilement.

c - L'hypothèse d'une compacité due à une teneur en argile supérieure en profondeur

Dans les zones d'échec cette hypothèse doit être rejetée également au vu de l'homogénéité texturale révélée par l'analyse (voir tableau I).

d - La réaction du sol

Elle paraît particulièrement basique puisque les pH mesurés sur *pate saturée* s'échelonnent presque tous entre 7,7 et 8,8. Cette réaction mesurée au laboratoire passe très souvent par un maximum dans les prélèvements faits au voisinage de 50 cm de profondeur, et les valeurs les plus fortes se situent dans les sols où le peuplier noir subit l'échec.

Compte tenu de cette dernière constatation, il est normal de supposer un milieu édaphique très défavorable à la nutrition minérale et susceptible de provoquer des chloroses.

Cette conclusion paraît d'autant plus plausible que ces chloroses se sont effectivement manifestées pour d'autres essences arbustives, dont les agrumes, qu'elles ont lieu en été, et qu'en fin, on a pu y remédier (pour cette dernière culture en particulier) à l'aide de pulvérisation de sulfate de zinc mais surtout de chélates de fer.

Sur le plan agronomique, cette très forte basicité des sols, qui s'accroît dans les zones d'échec, fournit un argument solide pour expliquer l'hétérogénéité et l'échec de la plantation sans qu'il soit sans doute nécessaire de pousser davantage les recherches. Il est cependant curieux de constater une différence aussi importante dans le comportement des essences. Dans ces conditions l'absence d'une corrélation nette ne nous a pas satisfait du point de vue de la recherche proprement dite. D'autres résultats devaient éclaircir davantage le problème.

4. ÉTUDE DES COMPLEXES ABSORBANTS

Orientée dans l'espoir de trouver des caractères propres au type d'argile, cette étude devait aboutir rapidement à constater une saturation anormalement élevée en magnésium et relativement basse en calcium dans les horizons humides. Le dépouillement des analyses est traduit graphiquement pour chaque profil dans la figure 1.

Deux observations sont frappantes dans cette figure :

a - La forme très régulière et très particulière, pour chaque profil, des courbes du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ en fonction de la profondeur

On constate en effet l'existence de valeurs élevées sinon fortes de ce rapport dans les horizons de surface, puis une décroissance régulière du même rapport vers la profondeur, avec un minimum qui s'accroît presque systématiquement à 50 cm, précisément dans les horizons suspects quant au développement du système racinaire des arbres. Plus en profondeur, le rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ tend à reprendre des valeurs un peu plus élevées, jusqu'au niveau de la nappe phréatique estivale.

La valeur minimale de $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ est exceptionnellement basse pour certains profils.

b - Si on regroupe les différentes courbes par classes de croissance des arbres

Comme il a été fait sur la même figure, on constate curieusement que toutes les stations de bonne venue du peuplier noir sont représentées par les courbes dont les valeurs de Ca/Mg sont les plus élevées dans

tous les horizons des profils. A l'inverse, les zones d'échec se signalent par les valeurs les plus faibles du même rapport.

Sans vouloir prétendre qu'il y a là une relation directe de cause à effet entre le type de saturation des argiles et la plus ou moins bonne réussite des peupliers, il convient de constater le parallélisme remarquable entre les résultats analytiques et le comportement de l'essence.

Il convient, aussi, de penser que les mêmes facteurs écologiques qui font disparaître les arbres sont ceux qui ont créé cette remarquable disparité dans les variations du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$. Il nous faut donc rechercher à présent des facteurs dont l'action peut aboutir à une telle modification du type de saturation des argiles.

5. ESSAI D'INTERPRÉTATION

Si on se fonde sur la répartition des valeurs basses du rapport d'absorption $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ dans les profils, les facteurs qui en sont la cause (ou qui en ont été la cause) doivent avoir un effet maximum là où ces valeurs sont les plus basses : c'est donc dans l'horizon 50 - 60 cm puisque, pour chaque profil, c'est à ce niveau que la saturation magnésienne est la plus forte. Or, nous venons précisément de voir que ce niveau correspond au sommet de la frange capillaire. Il est donc probable que les facteurs que nous recherchons se situent au niveau où l'évaporation de la nappe phréatique se fait en été ; il faut d'ailleurs noter que ceci est aussi probable dans les profils où l'échec se manifeste (en traits pleins sur la figure 1) que dans les autres où les phénomènes perdent de leur intensité.

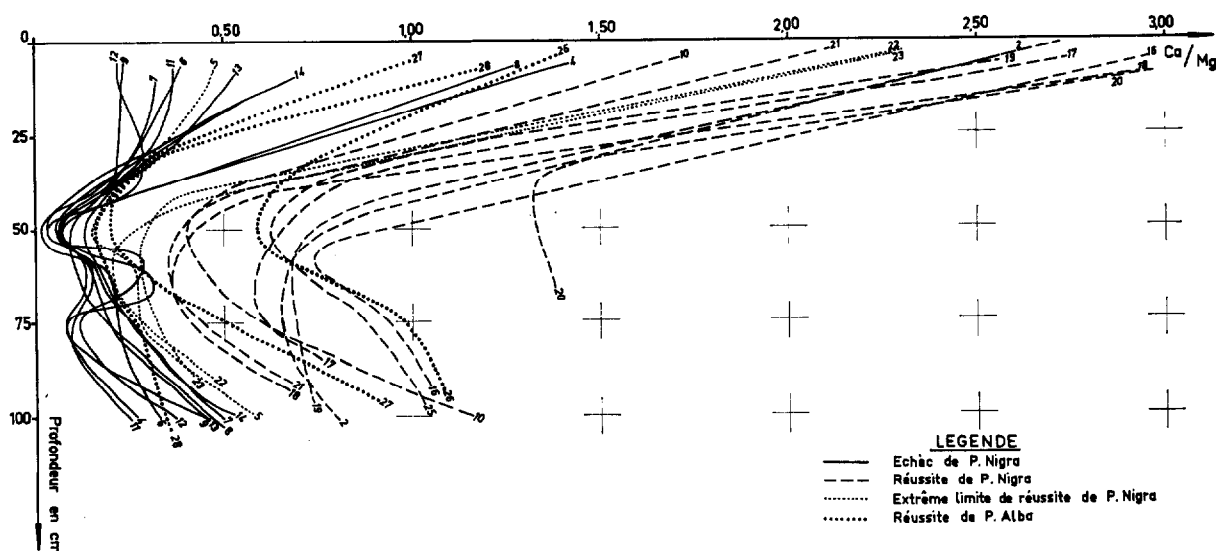


FIG. 1. — Variations du rapport Ca/Mg dans le sol en fonction de l'intensité de l'hydromorphie et de la réussite de *populus alba* et *populus nigra*.

TABLEAU I. — RÉSULTATS ANALYTIQUES DES PROFILS DE M'KRAZZA.

N° d'enregistrement SRF	N° sondage	Profondeur	ClNa ‰	CO ₂ Ca %	Matière organique %	Complexe absorbant mé/100 g							Analyse granulométrique %				pH
						Ca	Mg	Ca Mg	K	Na	S	T	Argile	Limons	S fins	S gros	
6 431	1	0,25	0,292	33,4	1,81	7,7	9,3	0,83	0,24	0,26	17,5	17,0	46,8	26,6	19,0	2,8	8,5
2		0,50	0,292	36,9	0,91	2,0	12,3	0,16	0,19	0,29	14,8	14,5	48,6	24,8	17,3	3,3	
3		0,75	0,0	44,6	0,44	1,9	11,1	0,17	0,15	0,21	13,4	13,5	48,4	27,2	16,6	3,2	
4		1,00	0,0	50,1	0,31	4,6	7,3	0,63	0,14	0,30	12,3	12,0	42,0	32,8	15,5	6,0	
6 441	2	0,25	traces	28,7	2,70	20,3	5,5	3,69	0,34	0,30	25,1	25,0	47,0	25,5	17,8	2,5	8,0
2		0,50	0,444	34,3	1,36	8,8	11,8	0,77	0,20	0,34	21,1	20,5	51,2	23,4	14,8	3,2	
3		0,75	0,175	42,0	0,60	7,1	10,7	0,66	0,17	0,24	18,2	18,5	51,9	24,8	15,3	3,5	
4		1,00	0,0	48,0	0,31	7,1	8,8	0,80	0,16	0,41	16,9	17,0	46,2	27,8	15,7	5,3	
6 451	3	0,25	traces	32,6	1,96	3,7	14,0	0,26	0,20	0,43	18,3	18,4	49,6	25,1	16,2	2,9	8,4
2		0,50	0,234	42,0	1,05	1,8	12,0	0,15	0,20	0,43	14,4	14,6	52,4	24,3	17,5	2,1	
3		0,75	0,175	53,1	0,60	2,6	9,9	0,26	0,14	0,29	12,9	12,0	50,8	30,6	11,8	2,9	
4		1,00	0,100	51,4	0,31	3,4	8,1	0,42	0,14	0,26	11,9	11,3	39,4	35,4	14,9	6,9	
6 461	4	0,25	traces	30,8	2,67	7,7	8,0	0,90	0,56	0,43	16,7	16,0	44,5	26,9	19,9	2,9	8,65
2		0,50	—	37,3	1,05	0,8	11,8	0,06	0,30	0,50	13,4	13,0	48,3	27,7	14,9	3,4	
3		0,75	—	45,0	0,45	1,2	14,0	0,08	0,33	0,21	15,7	16,0	47,0	31,2	14,7	3,9	
4		1,00	—	51,0	0,31	2,6	8,9	0,28	0,26	0,18	11,9	12,0	40,0	35,6	14,1	7,1	
6 471	5	0,25	0,292	29,6	3,28	6,5	13,5	0,46	0,53	0,24	20,8	20,8	43,2	26,8	19,3	3,9	8,5
2		0,50	0,175	37,7	1,05	2,1	14,4	0,14	0,34	0,35	17,2	17,6	51,8	23,3	15,1	2,9	
3		0,75	traces	47,6	0,44	2,8	11,2	0,25	0,29	0,24	14,5	15,0	49,0	30,8	11,5	3,5	
4		1,00	—	54,0	0,31	5,0	8,6	0,58	0,28	0,28	14,2	14,5	38,0	38,5	11,9	7,3	
6 481	6	0,25	0,374	30,8	2,82	5,0	13,8	0,36	0,33	0,83	20,0	20,5	46,0	25,6	17,7	2,8	8,75
2		0,50	0,100	38,2	0,89	0,3	15,1	0,02	0,21	0,82	16,4	16,8	52,4	23,6	15,7	3,0	
3		0,75	traces	47,1	0,44	2,6	11,9	0,22	0,16	0,50	15,2	15,0	50,4	26,5	14,6	3,6	
4		1,00	—	51,4	0,31	3,2	9,6	0,33	0,15	0,35	13,3	13,5	41,0	34,0	13,7	7,6	
6 491	7	0,25	traces	—	1,91	4,0	13,6	0,29	0,66	0,26	17,5	18,4	45,0	26,4	18,3	3,5	8,35
2		0,50	0,175	—	1,03	1,8	13,5	0,13	0,53	0,16	16,0	16,5	48,2	25,8	16,9	2,9	
3		0,75	0,397	—	0,58	2,5	12,0	0,20	0,29	0,30	15,1	15,0	45,8	28,9	16,0	4,8	
4		1,00	1,000	—	0,38	4,6	9,4	0,49	0,26	0,17	14,4	14,5	38,8	32,0	15,5	9,2	
6 501	8	0,25	traces	—	2,58	7,6	6,7	1,13	1,51	0,23	16,0	16,5	41,8	29,8	18,3	3,4	8,8
2		0,50	—	—	0,77	0,6	10,3	0,06	1,41	0,33	12,6	12,5	48,0	28,9	16,0	4,2	
3		0,75	—	—	0,46	0,8	10,6	0,07	0,65	0,13	12,2	12,8	51,2	24,0	18,2	2,5	
4		1,00	—	—	0,31	3,9	8,3	0,47	0,33	0,26	12,8	12,5	40,0	35,0	15,1	7,4	
6 511	9	0,25	0,351	31,7	2,24	3,3	14,0	0,23	0,66	0,56	18,5	18,0	47,4	24,0	19,2	2,6	8,6
2		0,50	traces	50,7	0,69	1,2	12,8	0,09	0,33	0,24	14,6	14,5	45,0	23,4	14,9	2,6	
3		0,75	—	47,6	0,46	2,4	12,0	0,20	0,24	0,17	14,8	15,0	53,6	26,1	13,2	2,9	
4		1,00	—	50,6	0,31	4,5	9,4	0,47	0,21	0,20	14,3	14,0	41,8	30,8	15,6	8,2	
6 521	10	0,25	0,187	26,6	2,89	12,0	8,4	1,42	0,42	0,41	21,2	21,0	44,4	24,8	2,15	3,0	8,1
2		0,50	0,421	27,4	1,82	6,0	14,7	0,40	0,28	0,30	21,3	21,0	45,0	24,2	19,6	3,2	
3		0,75	traces	36,0	0,90	5,9	9,7	0,60	0,25	0,19	16,0	16,5	44,0	25,5	19,9	4,6	
4		1,00	4	45,0	0,60	7,2	6,4	1,16	0,24	0,19	14,0	14,4	39,2	30,8	17,3	7,9	
6 531	11	0,25	0,292	—	2,44	4,1	11,1	0,36	1,02	0,22	16,4	16,6	41,6	28,0	19,0	3,7	8,7
2		0,50	0,234	—	1,22	0,7	12,3	0,05	0,51	0,71	14,2	14,5	47,1	25,7	15,4	3,5	
3		0,75	0,234	—	0,53	1,0	12,1	0,09	0,28	0,39	13,8	14,0	46,4	28,0	16,4	4,7	
4		1,00	0,234	—	0,45	2,6	9,9	0,26	0,25	0,30	13,1	13,0	39,2	30,6	16,6	9,1	
6 541	12	0,25	0,234	—	1,75	2,7	11,6	0,23	0,81	0,78	15,9	16,0	46,4	25,8	19,4	3,3	8,6
2		0,50	0,234	—	0,76	0,4	10,6	0,03	0,39	0,56	12,0	12,5	49,0	26,0	16,3	3,3	
3		0,75	0,292	—	0,38	1,2	9,8	0,12	0,25	0,44	11,7	12,0	44,2	31,5	15,8	5,0	
4		1,00	0,234	—	0,22	3,1	8,2	0,37	0,23	0,15	11,7	11,5	38,0	36,0	15,9	8,0	
6 551	13	0,25	0,585	—	2,05	5,4	90,7	0,50	0,77	0,43	17,3	17,5	40,2	28,6	19,7	3,3	8,55
2		0,50	0,292	—	0,77	0,9	13,4	0,06	0,43	0,52	15,3	15,5	49,6	24,6	16,3	2,9	
3		0,75	0,234	—	0,62	1,1	11,9	0,08	0,29	0,54	13,8	14,0	49,4	28,8	14,2	3,4	
4		1,00	0,175	—	0,46	4,7	10,2	0,46	0,24	0,31	15,5	16,0	43,0	31,2	16,8	6,3	
6 561	14	0,25	0,100	27,8	2,32	6,7	10,9	0,61	0,68	0,28	18,6	19,0	42,4	26,6	19,2	3,7	8,5
2		0,50	0,292	33,4	0,77	0,7	12,7	0,05	0,51	0,47	14,4	14,5	48,0	24,0	19,1	2,9	
3		0,75	0,100	40,7	0,44	2,3	11,0	0,21	0,30	0,24	13,8	14,0	43,2	28,0	18,6	5,2	
4		1,00	traces	46,7	0,31	4,1	7,7	0,53	0,23	0,17	12,2	12,0	33,4	33,6	19,0	10,5	

TABLEAU II. — RÉSULTATS ANALYTIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE.

Sondage	Sodium mé/l	Calcium mé/l	Magnésium mé/l	Ca/Mg	Chlore mé/l	Bicarbonate mé/l	Sulfate mé/l	Profond. de nappe
1	1,5	1,40	4,90	0,28	1,12	7,0		1,27 m
2	1,1	1,44	4,66	0,30	1,12	6,3		1,25 m
3	1,7	2,00	6,00	0,33	1,0	7,6	1,1	1,25 m
4	1,4	1,08	5,88	0,18	0,88	7,6	1,0	1,28 m
5	1,3	1,08	4,48	0,24	0,88	5,8	1,0	1,23 m
6	1,6	1,94	5,54	0,16	0,84	6,6		1,20 m
7	1,3	1,20	4,40	0,27	1,04	5,8		1,26 m
8	1,2	1,12	4,76	0,23	0,92	6,2		1,27 m
9	1,3	1,06	4,80	0,22	0,92	6,2		1,19 m
10	0,8	1,38	4,12	0,33	0,08	5,2		1,12 m
11	0,9	1,14	4,66	0,30	0,04	5,6		1,22 m
12	1,0	1,12	4,42	0,25	0,80	5,8		1,17 m
13	1,3	1,24	4,84	0,25	0,92	6,1		1,27 m
14	1,0	1,22	5,02	0,24	1,04	6,0		1,17 m

Que peut-il se passer à ce niveau, qui contribue ainsi à faire baisser le rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ des quantités de calcium et de magnésium fixées sur le complexe absorbant ?

5.1. RECHERCHE D'UN ÉQUILIBRE SOL-EAU

Il est normal de concevoir d'abord un équilibre entre la composition cationique des eaux de la nappe et celle de l'argile. Si on étudie cet équilibre, on s'aperçoit que celui-ci tend à s'établir pour la majorité des mesures dans les horizons profonds qui sont au contact de la nappe proprement dite suivant une relation de la forme

$$\left(\frac{\text{Ca}^{++}}{\text{Mg}^{++}} \right)_{\text{sol}} = 0,208 \left(\frac{\text{Ca}^{++}}{\text{Mg}^{++}} \right)_{\text{eau}}^{2,06}$$

(11 horizons profonds suivent cette loi sur 14 analysés). Les eaux de la nappe sont en effet très magnésiennes avec un rapport de Mg^{++} à Ca^{++} soluble de l'ordre de 4.

Un tel équilibre n'apparaît par contre d'aucune manière dans les horizons situés à 75 cm ou à 50 cm de profondeur. On peut donc affirmer que la saturation magnésienne du complexe dans ces horizons est provoquée par des phénomènes d'échange avec une solution du sol dont la composition doit être nécessairement différente. Quelle est-elle ? en quoi diffère-t-elle de ce que l'on peut observer dans la nappe et pourquoi ? Telles sont les questions que l'on peut se poser et auxquelles on va essayer de répondre.

5.2. ÉLABORATION D'UN MÉCANISME

Si on inventorie les phénomènes physico-chimiques qui se manifestent dans les horizons situés à 50 cm de profondeur, on peut dire :

- 1° que l'évaporation de l'eau de la nappe se produit à ce niveau ;
- 2° que le concrétionnement calcaire y débute pour s'accroître plus en profondeur ;
- 3° que le pH y est souvent plus élevé ;
- 4° que le rapport d'absorption $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ y est très faible.

Il va sans dire que l'évaporation et sans doute aussi l'élévation de température — surtout l'été — libèrent une certaine quantité de CO_2 , provoquant en premier lieu la formation de carbonate, puis leur précipitation. Ce premier mécanisme paraît bien se traduire dans les profils par la présence des concrétions calcaires que nous y avons observées.

L'analyse de ces concrétions donne cependant des résultats curieux puisque sur 8 échantillons analysés les taux de Ca^{++} et de Mg^{++} sont les suivants :

Sondage	1	2	3	4	5	6	7	8
CO_3Ca %	81,0	73,2	78,4	76,8	73,8	76,2	78,0	73,6
CO_3Mg %	2,6	2,4	2,7	3,0	3,0	2,7	2,0	2,4

Ainsi donc, le concrétionnement est essentiellement calcique et très peu magnésien, à l'inverse de la composition de la nappe. Ceci nous amène à considérer les taux de solubilité de CO_3Mg et de CO_3Ca ; on sait que le premier est plus soluble que le second : $10^{-1,8}$ g/l de Mg^{++} pour le premier contre 10^{-4} g/l de Ca^{++} pour le second.

Par ailleurs, ce taux de solubilité varie en fonction du pH, le calcaire devenant insoluble (10^{-2}M^2) au voisinage de pH 8,2 contre pH 9,5 pour la même concentration de Mg^{++} (10^{-2}M).

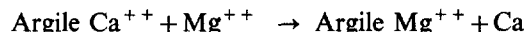
L'alcalinité du milieu, surtout si on atteint pH 8,2 doit donc accuser encore la précipitation plus facile de CO_3Ca par rapport à CO_3Mg .

La figure 2 nous montre cette variation de solubilité réalisée au laboratoire par adjonction de CO_3Na_3 en quantité croissante dans une solution équimoléculaire de Ca^{++} et Mg^{++} . On y constate la précipitation plus accusée de CO_3Ca par rapport à CO_3Mg en fonction de l'élévation de pH.

Il y a donc bien lieu de croire à l'existence de phénomènes analogues dans les horizons du sol où la nappe s'évapore, puisque, précisément, nous y avons des pH particulièrement élevés et un concrétionnement essentiellement constitué par du carbonate de calcium. On notera que la simple concentration au niveau d'évaporation peut suffire à la précipitation préférentielle du CO_3Ca .

Dès lors, on peut imaginer facilement que la solution du sol dans les niveaux d'évaporation est particulièrement déséquilibrée en ce qui concerne le rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ soluble, puisqu'elle se décharge progressivement en calcium et beaucoup moins en magnésium. En même temps, la présence de CO_3Mg va faire monter le pH et la disproportion entre les ions Ca^{++} et Mg^{++} solubles va s'accuser.

Dans de telles conditions, le sol qui sera en contact d'une solution plus magnésienne que calcique va nécessairement céder du calcium et fixer du magnésium suivant la réaction d'équilibre :



Le calcium qui est ainsi cédé par le sol ne peut rester en solution et va précipiter sous forme de CO_3Ca en présence du CO_2 libéré par l'oxydation de la matière organique ou par la décomposition des bicarbonates.

Finalement, on doit aboutir à la formation d'un complexe absorbant saturé en plus grande partie par le magnésium, et à la formation de concrétions calcaires sous forme de CO_3Ca . C'est bien là l'aboutissement que nous constatons dans les sols étudiés.

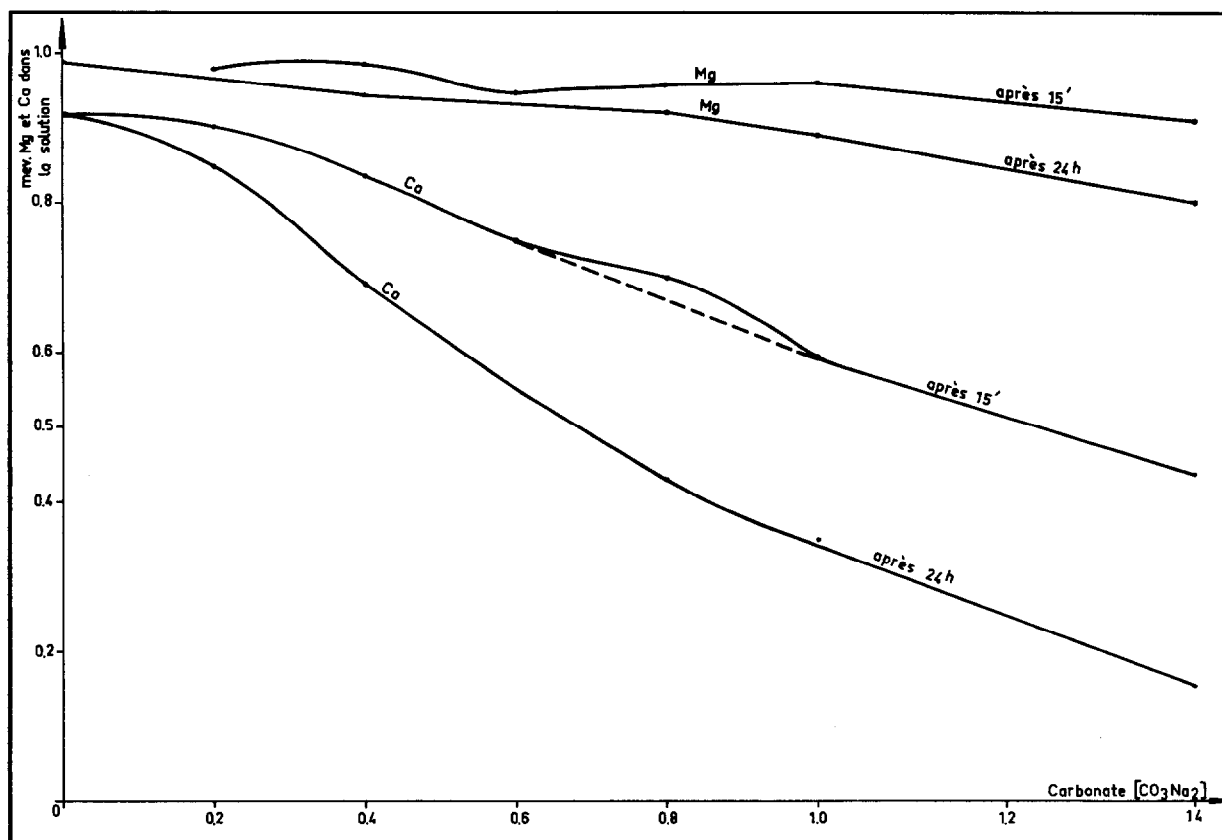


FIG. 2. — Précipitation de Co_3Mg et de Co_3Ca en milieu alcalin.
 CO_3Na_2 ajouté à une solution équimoléculaire de Ca/Mg .

Entre le point de départ du raisonnement qui se fonde sur les données fournies par l'observation, et son aboutissement qui paraît conforme à la réalité, nous allons voir maintenant qu'il est possible de trouver ou de faire un certain nombre de vérifications des mécanismes physico-chimiques invoqués.

6. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES FAITES SUR LE MÉCANISME DE SATURATION MAGNÉSIEUNE DU COMPLEXE ABSORBANT

6.1. RELATION ENTRE LE pH DU SOL ET LA VALEUR DU RAPPORT D'ABSORPTION $\text{Ca}^{++}:\text{Mg}^{++}$ DU COMPLEXE ABSORBANT

Cette relation est traduite par la figure 3. On peut y constater une diminution de la valeur du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ lorsque le pH s'élève ce qui correspond bien à la théorie qui fait intervenir la variation parallèle de la solubilité de CO_3Ca et CO_3Mg . On remarquera d'ailleurs que la chute des valeurs du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ s'accuse particulièrement à partir de pH 8,2 vers pH 9,0 ce qui est conforme aux courbes de solubilité des carbonates.

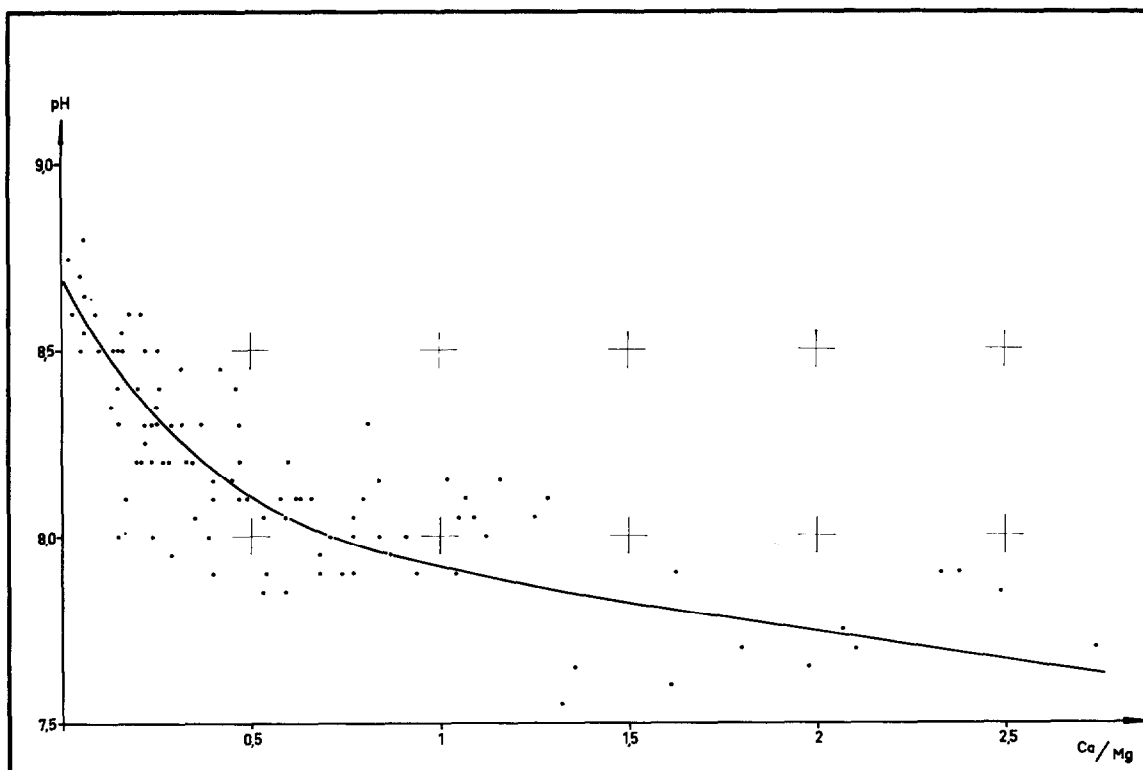


FIG. 3. — Relation entre le rapport Ca/Mg des teneurs en Ca et Mg échangeables du complexe absorbant et le pH du sol.
(Mesures faites à saturation)

6.2. RELATION ENTRE LE pH DU SOL ET LA DÉSATURATION CALCIQUE DU COMPLEXE ADSORBANT

Dans la figure 4 on peut constater la relation entre le pH et la teneur en calcium échangeable ; cette dernière diminue lorsque le pH augmente. Ce résultat montre que la diminution du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ qui vient d'être étudiée est certainement imputable, en partie, à la décalcification du complexe absorbant. Ce dernier point confirme le mécanisme de désaturation calcique qui aboutit au concrétionnement calcaire (CO_3Ca).

6.3. VÉRIFICATION GLOBALE AU LABORATOIRE

a - Désaturation calcique en présence de CO_3Na_2

5 g de sol ont été agités avec 25 cc d'une solution contenant 0,5 mé de Mg^{++} , sous forme du sulfate et des quantités variables de CO_3^{--} (CO_3Na_2) de 0 à 1 mé. On a fait deux agitations successives à chaque fois et on a analysé ensuite l'état du complexe adsorbant. La figure 5 donne les résultats de cette expérience.

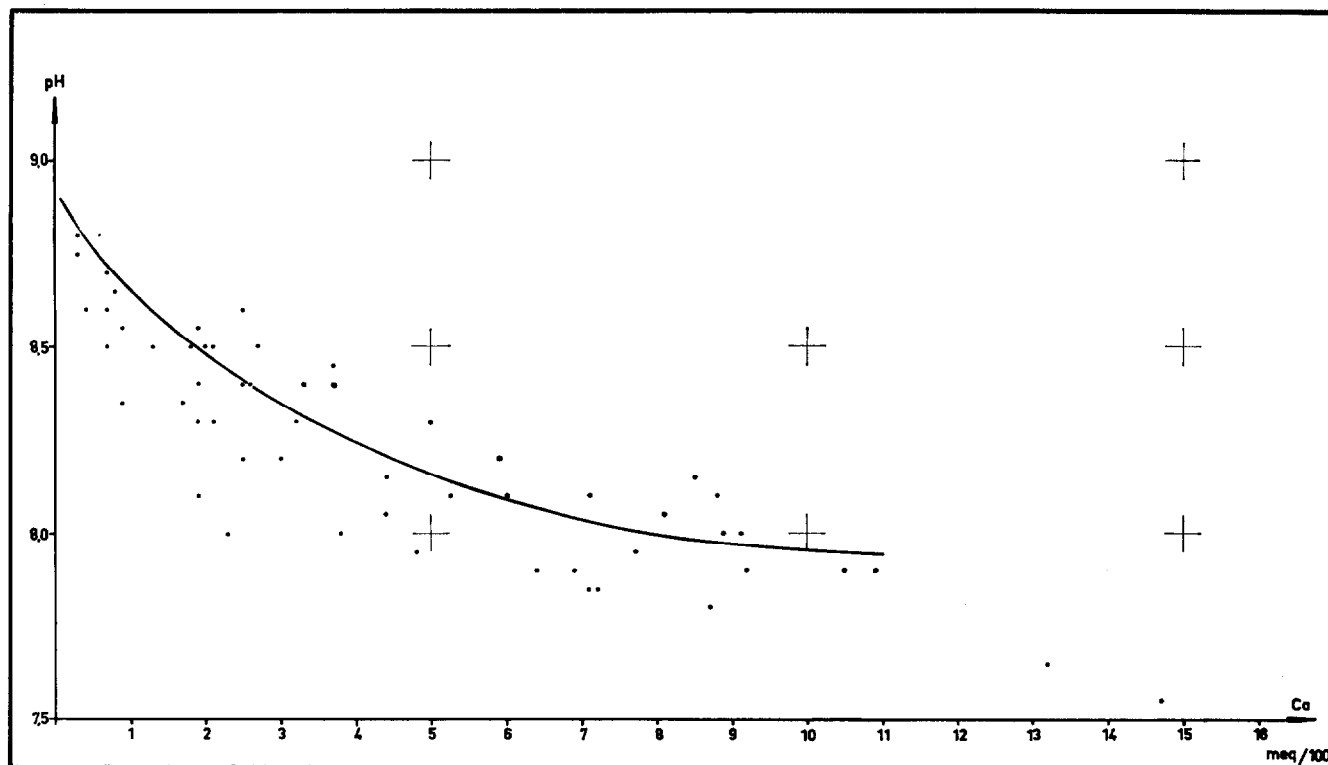


FIG. 4. — Relation entre le Ca échangeable et le pH du sol.
(Mesures faites à saturation).

Sans qu'il soit besoin de faire varier le taux de magnésium de la solution, mais simplement en faisant varier le pH on s'aperçoit que les taux de Mg^{++} et de Ca^{++} fixés varient dans un sens tel que le calcium précipite tandis que le magnésium se fixe lentement. C'est exactement ce qui paraît se produire dans le sol dans les conditions naturelles.

b - Evolution de l'eau de la nappe soumise à l'évaporation

50 cc d'eau de la nappe phréatique prélevée en décembre et analysée préalablement ont été soumis à une évaporation lente. Le volume s'est ainsi réduit pour passer successivement à 38,30 et 18 cc. A chacun de ces stades des analyses ont été faites dont les résultats sont réunis dans le tableau page suivante :

On y constate l'apparition de carbonates et la diminution du taux des bicarbonates, tandis que le rapport Ca^{++}/Mg^{++} décroît du fait de la plus forte précipitation du calcium.

Il y a donc bien modification de la composition de l'eau dans le sens qui a été supposé, et ceci, sous le simple effet de l'évaporation.

VARIATION DE LA COMPOSITION DE L'EAU DE LA NAPPE
SOUmise A L'ÉVAPORATION (mé/litre)

Volumes en cc	50	38	30	18
Ca ⁺⁺ valeur théorique calculée d'après la concentration	3,2	4,2	5,3	8,9
Ca ⁺⁺ dosé après évaporation		1,2	1,2	1,0
Mg ⁺⁺ valeur théorique calculée d'après la concentration	5,1	6,7	8,5	14,2
Mg ⁺⁺ dosé après évaporation		6,5	7,4	11,4
CO ₃ H ⁻ valeur théorique calculée d'après la concentration	7,4	9,7	12,3	20,5
CO ₃ H ⁻ dosé après évaporation		7,2	6,6	7,6
CO ₃ ⁻⁻ valeur théorique calculée d'après la concentration	0	—	—	—
CO ₃ ⁻⁻ dosé après évaporation		0,4	1,2	2,2
Ca/Mg	0,68	0,18	0,16	0,09

c - Comparaison entre les compositions de l'eau de la nappe en été et en hiver

Cette eau a été prélevée une fois en juillet, et une autre fois en décembre, c'est-à-dire en pleine saison chaude et en pleine saison froide. Les analyses ont donné les résultats suivants :

COMPOSITION DE L'EAU DE LA NAPPE
mé/litre

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	CO ₃ H ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Ca/Mg
Décembre 1967	3,2	5,1	1,1	7,4	0,22	1,7	0,63
Juillet 1966	1,4	4,7	1,1	6,3	1,1	—	0,30

Sans que l'on puisse considérer cette variation des teneurs de l'eau de la nappe comme une véritable preuve des mécanismes invoqués, en particulier en ce qui concerne la variation du rapport Ca/Mg qui peut être provoquée, aussi bien par un équilibre nouveau au contact d'horizons différents plus chargés en magnésium, que par l'évaporation estivale, dans un cas comme dans l'autre, il faut constater une variation qui se produit dans le sens où elle appuie la théorie et où elle confirme l'existence généralisée d'horizons à saturation plus magnésienne au niveau d'évaporation de la frange capillaire.

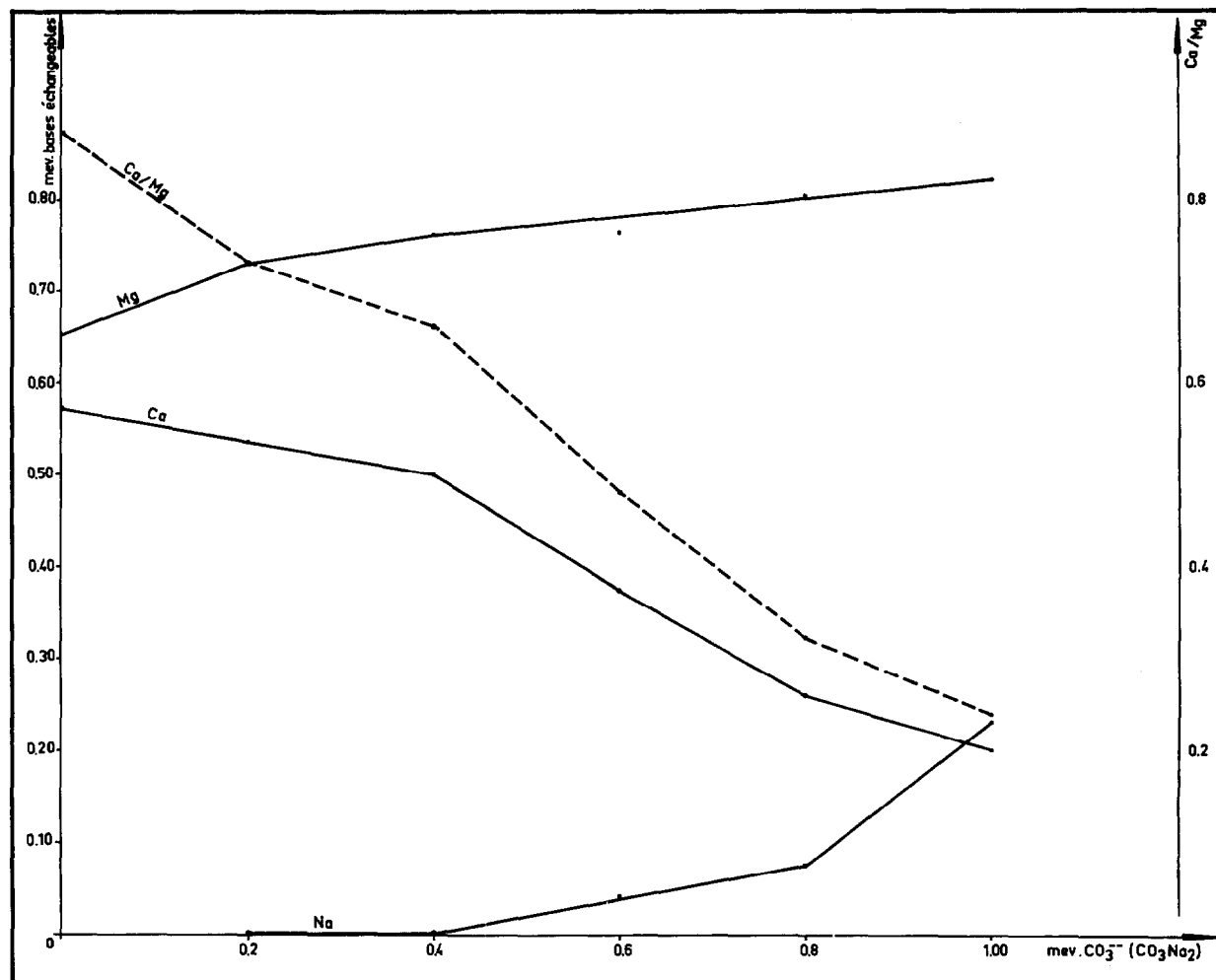


FIG. 5. — Désaturation calcique du complexe adsorbant en présence de CO_3Na_2 .

d - Désaturation calcique et saturation magnésienne expérimentales du complexe adsorbant en présence de l'eau de la nappe

50 cc d'eau de la nappe prélevée en décembre 1967 ont été mis en présence de 2 g de sol puis évaporés doucement à l'étuve tandis qu'on répétait la même expérience avec respectivement 150 cc et 200 cc de la même eau, évaporée par tranche de 50 cc. Enfin, une quatrième expérience consistait à mettre le sol en présence de 150 cc d'eau de la nappe pendant 20 minutes puis à centrifuger.

Après chacun de ces quatre traitements, l'analyse des complexes adsorbants a donné les résultats suivants :

ETAT DU COMPLEXE ADSORBANT APRÈS ÉVAPORATION
OU SIMPLE CONTACT AVEC L'EAU DE LA NAPPE
mé./litre.

	Témoin	Après évaporation de			Après centrifugation
		50 cc	150 cc	200 cc	de 150 cc
Ca ⁺⁺	20,3	16,8	8,6	4,5	16
Mg ⁺⁺	5,5	8,2	15,8	23,3	10,5

Les trois traitements par évaporation montrent bien l'évolution escomptée de l'état du complexe adsorbant qui se décalcifie d'une part et fixe davantage de magnésium d'autre part. Quant à la quatrième expérience, avec simple mise en suspension et centrifugation, elle montre que l'état du complexe adsorbant après évaporation n'est pas la simple conséquence d'un état d'équilibre avec la solution mais qu'il est le fait d'autres phénomènes liés à l'évaporation.

Il semble bien que nous arrivions dans ces dernières expériences à réaliser artificiellement et d'une façon approchée l'ensemble des mécanismes qui se produisent dans le sol au niveau d'évaporation de la frange capillaire.

7. CONCLUSIONS

7.1. SUR LE PLAN AGRONOMIQUE

Les problèmes posés par l'adaptation du peuplier aux conditions de sol de M'Krazza peuvent trouver à présent deux réponses :

— Il ne fait pas de doute que l'alcalinité du milieu est provoquée dans le sol par une influence de la nappe actuelle suivant des mécanismes d'autant plus efficaces qu'ils se produisent en été. Les taches de mortalité de peupliers noirs où ces phénomènes sont les plus intenses supportent sans doute la présence plus longue de la nappe avant et après la période d'irrigation comme en témoignent les caractères particulièrement nets des profils des valeurs du rapport d'adsorption Ca⁺⁺/Mg⁺⁺ (fig. 1).

— Au vu de la même figure, il est fortement probable que le peuplier blanc s'accommode mieux de ce milieu puisque sur les trois profils de sol étudiés dans ces peupliers (P26, P27, P28), deux d'entre eux (P27 et P28) montrent des conditions de sol identiques aux plus mauvaises stations de peupliers noirs.

7.2. SUR LE PLAN PÉDOLOGIQUE

a - Le mécanisme proprement dit

La régularité des résultats analytiques des 28 profils (fig. 1) montre bien qu'il existe au niveau de la nappe phréatique des sols de M'Krazza des phénomènes particuliers propres à la présence d'une nappe phréatique et à sa surface d'évaporation. Ces phénomènes semblent pouvoir se succéder suivant le mécanisme ci-après :

1° Evaporation de la nappe transformant les teneurs en carbonates et bicarbonates et provoquant la précipitation du CO_3Ca . La solution du sol s'enrichit en magnésium.

2° Un nouvel équilibre s'établit entre cette solution du sol modifiée et le complexe adsorbant pour aboutir à la création d'un complexe très magnésien en partie décalcifié.

3° Le calcium du complexe qui passe dans la solution précipite sous forme de CO_3Ca en présence de CO_2 ou sous la seule influence de l'alcalinité du milieu.

Ces phénomènes sont accusés par des températures élevées, une alcalinité du milieu, la présence de CO_3Na_2 et une alimentation de la solution du sol en magnésium.

b - L'intensité du mécanisme

— D'un profil à l'autre, on constate (fig. 1) une variation de l'intensité du mécanisme de saturation magnésienne. On voit ainsi que les sols situés dans les zones légèrement plus basses ont subi cette action plus intensément et sur toute leur épaisseur depuis la surface, tandis que d'autres, situés à peine plus haut topographiquement, ont conservé des complexes adsorbants plus fortement calciques et peu magnésiens.

A l'intérieur d'un même profil qui subit l'action de la nappe, on constate également que les horizons de surface, toujours plus drainés, arrivent à échapper partiellement ou totalement à la décalcification du complexe.

Nous croyons donc pouvoir affirmer que les valeurs plus ou moins basses du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ du complexe adsorbant des sols traduisent l'intensité plus ou moins forte d'une hydromorphie temporaire, pourvu que la solution du sol présente une certaine richesse en Mg^{++} et que la température extérieure soit assez forte. En effet il s'agirait plutôt d'une hydromorphie de saison chaude puisqu'il est nécessaire que la nappe s'évapore.

Devraient donc présenter ce type de complexe magnésien tous les sols qui conservent une certaine humidité au moment où l'évaporation est intense. Il s'agirait donc d'abord des sols qui possèdent une nappe permanente ou semi-permanente. On peut en trouver un bel exemple dans le profil n° 17 présenté près de Fès au cours de la tournée au Maroc du Congrès de pédologie méditerranéenne.

Il s'agit d'un sol dont la qualification d'hydromorphe était contestée malgré la présence d'une nappe phréatique presque permanente à faible profondeur. On relève les données analytiques suivantes qui concernent ce sol :

Profondeur	pH eau	Complexe mé./100 g			CO ₃ Ca %	Observations
		Ca	Mg	Ca/Mg		
0-10	7,8	22,0	11,4	1,90	33	gley peu net
10-20	8,0	9,2	15,3	0,60	51,5	
20-30	8,5	5,2	13,6	0,38	60,6	
30-40	8,8	4,2	11,3	0,37	65,0	
40-55	8,8	3,4	10,6	0,32	71,0	
55-70	8,8	2,0	7,4	0,37	72,0	concrétions calco-ferriques et niveau de frange capillaire en juillet
75-95	8,7	2,8	5,8	0,48	76,8	
95-105	8,6	3,6	2,0	1,80	76,0	
120-130	8,4	5,0	3,6	1,39	69,0	
170-180	7,9	14,4	6,8	2,12	43,3	
220-230	7,9	4,0	3,8	1,05	46,0	

A propos de ce sol, on peut citer les observations de P. BILLAUX (1968) : « il (le sol) est gorgé d'eau, au moins en profondeur pendant une partie de l'année, à cause de la remontée de la nappe, à laquelle s'ajoute une stagnation temporaire de l'eau de pluie ; il y a trente ans, avant l'approfondissement de l'oued Fès, cet engorgement devait être d'ailleurs quasi total et permanent ».

Il est remarquable de retrouver ici l'ensemble des données qui ont fait l'objet de nos observations dans les sols de M'Krazza. On y retrouve les valeurs très basses du rapport d'adsorption $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ en même temps qu'une élévation du pH et l'augmentation du taux de calcaire dans les mêmes horizons où on a supposé un engorgement très récent ou constaté une nappe actuelle.

Les mécanismes pourraient être également identiques, mais avec un moindre degré d'intensité, dans le cas des sols lourds à engorgement de surface qui restent humides tardivement dans la saison post-hivernale. Ce serait le cas en particulier des sols hydromorphes ou des vertisols à engorgement de surface. On conviendra que précisément ces types de sols présentent presque constamment des complexes adsorbants fortement magnésiens au Maroc mais aussi dans la zone intertropicale à saisons humides et sèches très marquées.

Une diminution moins importante du rapport $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ a pu aussi être observée dans d'autres types de sols hydromorphes ou dans des horizons à hydromorphie temporaire, en forêt de la Mamora et dans le Moyen Atlas, dans des sols rouges plus ou moins engorgés (LEPOUTRE, 1963). Dans ce dernier cas il semblerait bien que ce caractère du complexe puisse être en liaison avec certains cas de non régénération du cèdre, ce qui paraît logique compte tenu de la sensibilité des résineux à l'excès d'eau.

Il paraît donc justifié d'introduire le caractère de saturation magnésienne du complexe adsorbant dans les indices qui traduisent l'hydromorphie des sols, du moins quand cette saturation est importante ou quand elle varie brusquement à l'intérieur du profil. Il semble cependant plus difficile, pour le moment, de chiffrer avec exactitude l'intensité de cette hydromorphie sans une étude parallèle précise des durées et des périodes d'engorgement du sol ; disons simplement que les valeurs du rapport d'adsorption $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ inférieures à 1 correspondent sans doute à une forte influence de l'engorgement du sol qui se manifeste plus vraisemblablement en période estivale sous le climat méditerranéen et en saison chaude sous climat tropical, le mécanisme de la décalcification et de la saturation magnésienne étant d'autant plus facilité que l'alcalinité du milieu est plus marquée, que CO_3Na_2 est présent et que la solution du sol est alimentée en magnésium.

BIBLIOGRAPHIE

- BILLIAUX (P.), 1966. — Profils de sols présentés dans le Saïs. Congrès de pédologie méditerranéenne. Excursion au Maroc. Livret guide t. III, chap. 3. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Rabat, 99 p.
- LEPOUTRE (B.), 1963. — Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. Inst. rech. for. au Maroc, t. 6, Fasc. 2, pp. 200-211.