

ROLE ORIGINAL DE LA PEDOGENESE SUR LA NATURE ET LE MODE DE L'ACCUMULATION SALINE DANS CERTAINS MILIEUX CONFINES EN REGION SUBARIDE (Polders des bordures du lac Tchad)

C. CHEVERRY

Centre ORSTOM de Fort-Lamy
Collaboration technique : R. SAYOL

SOMMAIRE

Les polders de Bol sont des terres gagnées sur le Lac Tchad depuis 15 ans. Une nappe phréatique minéralisée (0,3 à 15 g/l), partout présente à faible profondeur, provoque une remontée et une accumulation saline dans les sols. L'étude de l'extension verticale et latérale des divers dépôts salins actuels (carbonate de calcium, sulfate de calcium, sulfate de sodium, carbonate de sodium) suggère l'existence de relations « génétiques » entre les facteurs de la pédogenèse (nappe phréatique, matériaux), certains traits de cette pédogenèse (structuration, aération du matériau, vie biologique) et la nature et le mode de l'accumulation saline dans la nappe et les sols. L'alcalisation des sols par suite d'une réduction biologique des sulfates est l'un des processus en cause.

Intervenant sur le devenir des principaux ions solubles (Na, Ca) la pédogenèse de ces sols joue un rôle original dans le cadre des phénomènes géo-chimiques évaporatoires observés au fond de la cuvette Tchadienne, aux abords du Lac.

21 JAN. 1969

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n°/2853 dx 1



Figure 1. — Rive Nord-Est du Lac Tchad. Système dunaire orienté NNO/SSE ; les interdunes sont occupées par les eaux du Lac Tchad. — Ilots flottants de papyrus. — Au premier plan, la ville de Bol.



Fig. 2. — *Au premier plan, un bras du Lac transformé en « polder » (Bol, Bérin).*

INTRODUCTION.

Le paysage de la région de Bol est celui d'un erg ancien, orienté NNW-SSE, dont les creux interdunaires furent envahis par les eaux d'une transgression du Lac Tchad. Certains de ces bras du Lac (superficie : 5 à 10 km²), isolés voici 15 ans par la construction de barrages en sable, furent transformés en « polders ». L'aridité du climat (température moyenne annuelle : 28° ; précipitations : 300 mm ; ETP : 2.200 mm), la présence à faible profondeur d'une nappe phréatique faiblement salée, alimentée plus ou moins directement par les eaux du Lac, favorisent les phénomènes de remontée capillaire et l'accumulation de sels dans les sols.

Les processus pédologiques liés à l'action de cette nappe sont :

- la carbonatation (terme réservé à la précipitation de CaCO₃ à un niveau quelconque du profil) ;
- l'accumulation saline de sulfates (Na₂SO₄, CaSO₄) ;
- l'alcalisation (fixation de sodium en proportion notable sur le complexe absorbant du sol : 12 % ou plus de la capacité d'échange).

Les deux polders de Bol (Guini : 5 km² et Bérin : 10 km²) se révèlent un cadre favorable pour l'étude de ces processus : les sols sont très jeunes (15 ans), la plupart de leurs caractères sont encore ceux du matériau sédimentaire lacustre ; les manifestations de l'accumulation saline sont actuelles, rapides, et se décèlent morphologiquement. Enfin, l'histoire de ces polders depuis leur création est assez bien connue grâce, notamment, aux travaux de PIAS (1960) (variations de niveau du plan d'eau, de son degré de minéralisation, utilisation des sols).

I. — LES CONDITIONS D'EVOLUTION DES SOLS.

Le matériau sédimentaire lacustre est une argile humifère (60 % d'argile, 20 % de limon, 7 à 12 % de matière organique). La montmorillonite domine légèrement les minéraux de type illite et la kaolinite (4/3/3) (Strasbourg, 1966). Ce matériau est fortement structuré. Localement, dans les points bas des polders, on observe enfoui, à faible profondeur, un niveau enrichi en une matière organique moins intimement liée à la matière minérale (15 à 30 % de M.O.).

La salinité de la nappe varie fortement d'un secteur à l'autre d'un même polder (figure n° 3). Ainsi, dans le polder Guini, la bordure Ouest est une zone privilégiée d'infiltrations d'eaux faiblement salées (conductivité de 0,2 à 0,5 m.mho) venant du Lac. La bordure Est est beaucoup plus salée (3 à 15 m.mhos). Un certain gradient hydraulique de la nappe dans le sens Ouest-Est, un drainage naturel des sels, expliqueraient la concentration progressive des sels le long d'un tel axe. Dans l'état actuel de nos observations, il est nécessaire de formuler deux hypothèses. On admettra :

— qu'un polder constitue un milieu fermé, simplement enrichi par des eaux d'infiltration venant du Lac. On négligera ainsi les interférences éventuelles des aquifères profondes, de leurs caractéristiques chimiques propres (la première aquifère a une certaine pression artésienne). Cette hypothèse s'appuie sur les travaux hydrogéologiques de DIELEMAN - DE RIDDER (1963) : au niveau des séquences de sols étudiées, les eaux d'infiltration pénètrent le polder Guini par une zone étroite en bordure Ouest et s'écoulent ensuite dans une direction Est à travers la strate de couverture fissurée (celle touchée par la pédogenèse actuelle) et par dessus une couche de faible perméabilité.

— que toutes les manifestations décrites sont bien dues à des processus actuels et ne sont pas les témoins de processus ayant joué soit lors de phases antérieures de régression du Lac Tchad, soit dans le milieu de sédimentation lui-même. Une étude préalable (CHEVERRY, 1966) a permis de localiser une carbonatation ancienne, de préciser son extension et par là même de la distinguer de la carbonatation actuelle.

ACCUMULATION SALINE

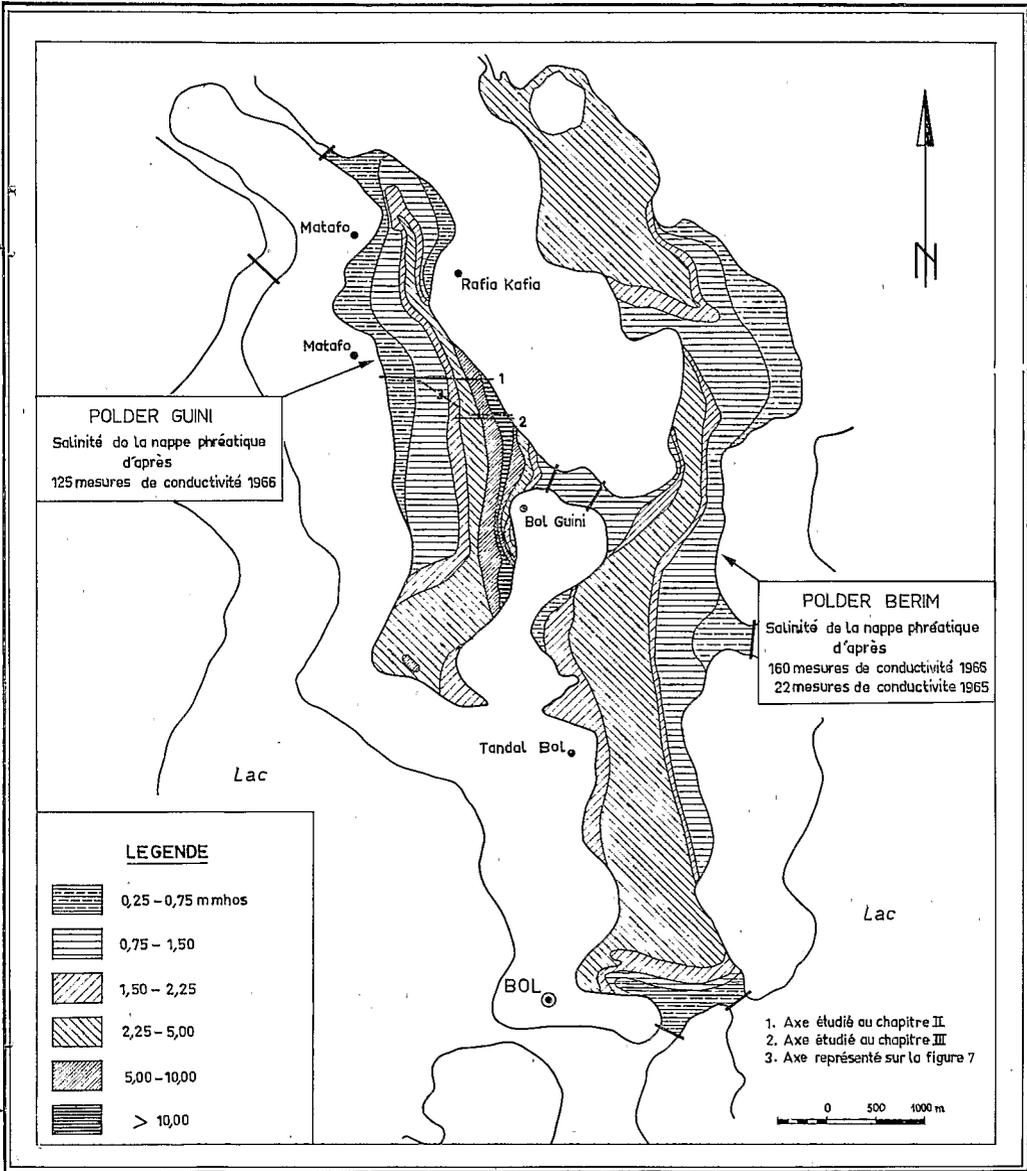


Figure 3. — Polders de Bol Guini, Bol Bérime. Salinité de la nappe phréatique, en 1965-1966.

II. — PROCESSUS DE CARBONATATION ET D'ALCALISATION, DANS DES SOLS SOUMIS A L'ACTION D'UNE NAPPE FAIBLEMENT SALEE (0,3 à 4 mmhos).

Le long d'un axe traversant le polder Guini d'Ouest en Est (figure n° 3, axe 1), des prélèvements d'eau de la nappe tous les 100 m mettent en évidence une concentration progressive de cette nappe et une modification de son caractère chimique (tableau I) :

- en bordure Ouest, sur le front d'infiltration des eaux venant du Lac, les eaux ont une conductivité faible, un faciès bicarbonaté-calcaïque ; la séquence anionique s'écrit : $r \text{CO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{Cl}$; la séquence cationique : $r \text{Ca} > \text{Mg} > r \text{Na}$ (1) ;
- en bordure Est, pour des conductivités supérieures à 2 mmhos, la séquence cationique est devenue $r \text{Na} > r \text{Mg} > r \text{Ca}$, l'ordre des anions reste : $r \text{CO}_3 > r \text{SO}_4 > \text{Cl}$; mais la dominance du CO_3 combiné sur les sulfates est moins marquée ; ces eaux ont un faciès bicarbonaté-sodique ;
- les modifications de caractère chimique de la nappe, le long de cet axe, sont progressives : le rapport Na/Ca passe de 0,5 à 2-3, le rapport HCO_3/SO_4 diminue nettement.

TABLEAU I

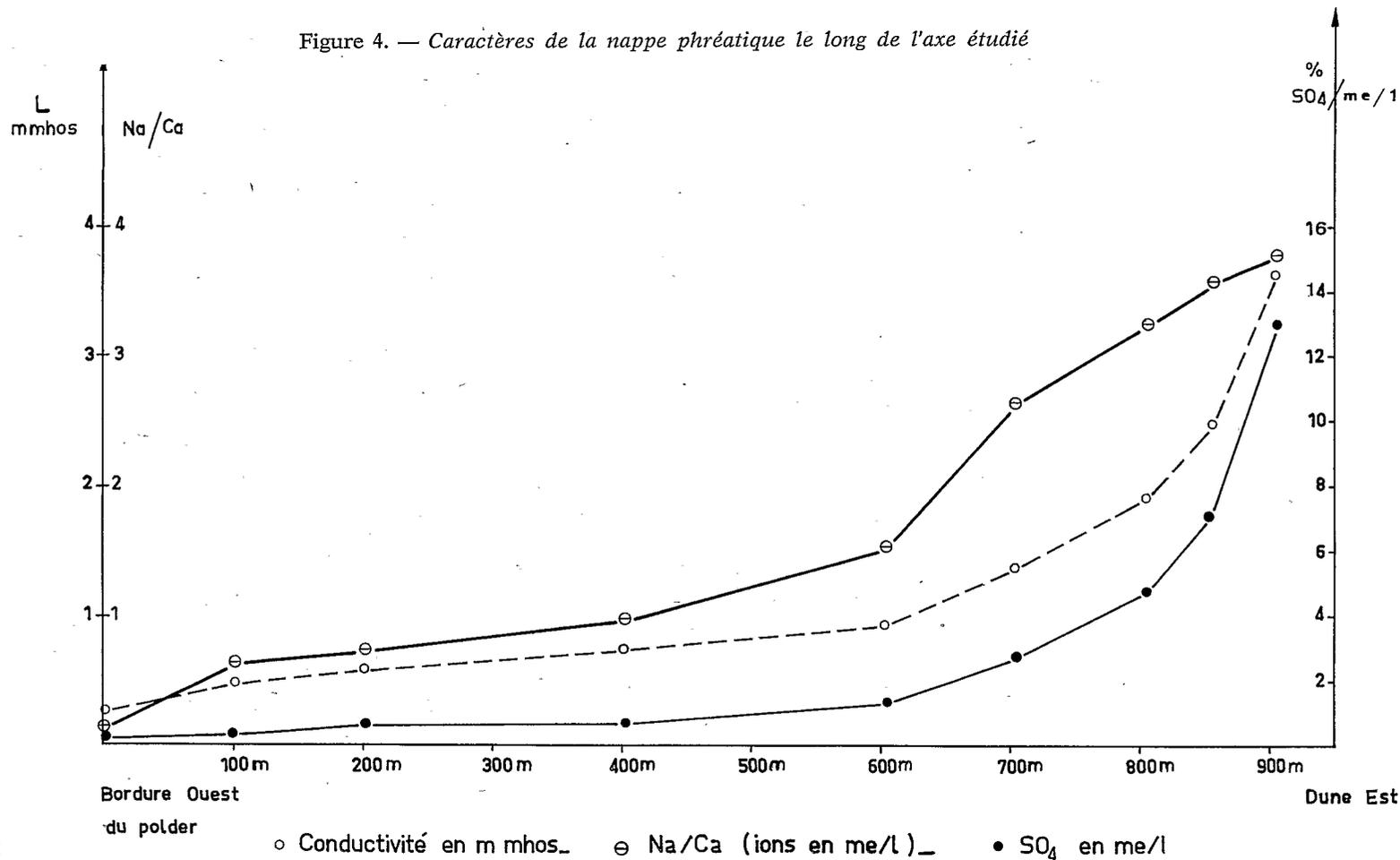
RESULTATS ANALYTIQUES RELATIFS A LA NAPPE PHREATIQUE, AU NIVEAU DE CETTE SEQUENCE

(Les divers échantillons sont repérés par leur distance, exprimée en mètres, par rapport à la bordure ouest du polder)

Prélèv.	Date	Prof ^T cm	L mmhos	R.S. g/l	SO ₄ me/l	CO ₃ me/l	Cl me/l	S ⁻ me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	S ⁺ me/l
Bras du Lac			0,17	0,18	-	1,8	-	1,8	0,6	0,5	0,2	0,5	1,8
3 m	11/67		0,3	0,4	0,2	2,6	0,1	2,9	1,7	0,6	0,4	0,4	3,1
100 m	3/67	117	0,5	0,45	0,3	4,9	0,1	5,3	2,5	1,0	0,3	1,7	5,5
200 m	"	79	0,6	0,47	0,7	5,2	0,1	6,0	2,8	1,0	0,4	2,1	6,3
400 m	"	68	0,75	0,58	0,6	6,9	0,2	7,7	2,9	1,4	0,7	2,9	7,9
600 m	"	59	0,95	0,74	1,4	8,2	0,2	9,8	2,9	1,4	0,5	4,5	9,3
700 m	"	45	1,4	1,15	2,8	13,1	0,1	16	3,0	2,2	0,6	8,2	14
800 m	"	61	1,95	1,53	4,8	16,7	0,1	21,6	4,2	3,0	0,9	14,1	22,2
850 m	"	76	2,5	2,01	7,1	31,4	0,7	39,9	5,0	2,5	0,9	18	26,5
900 m	"	92	3,65	3,22	13,4	31,9	0,1	45,4	7,7	3,9	1,6	29,5	42,7

(1) Toutes les valeurs relatives aux ions ($r \text{CO}_3$, $r \text{SO}_4$,...) sont exprimées en milliéquivalents par litre. $r \text{CO}_3$ désigne la teneur en carbonate combiné (HCO_3 et CO_3).

Figure 4. — Caractères de la nappe phréatique le long de l'axe étudié



ACCUMULATION SALINE

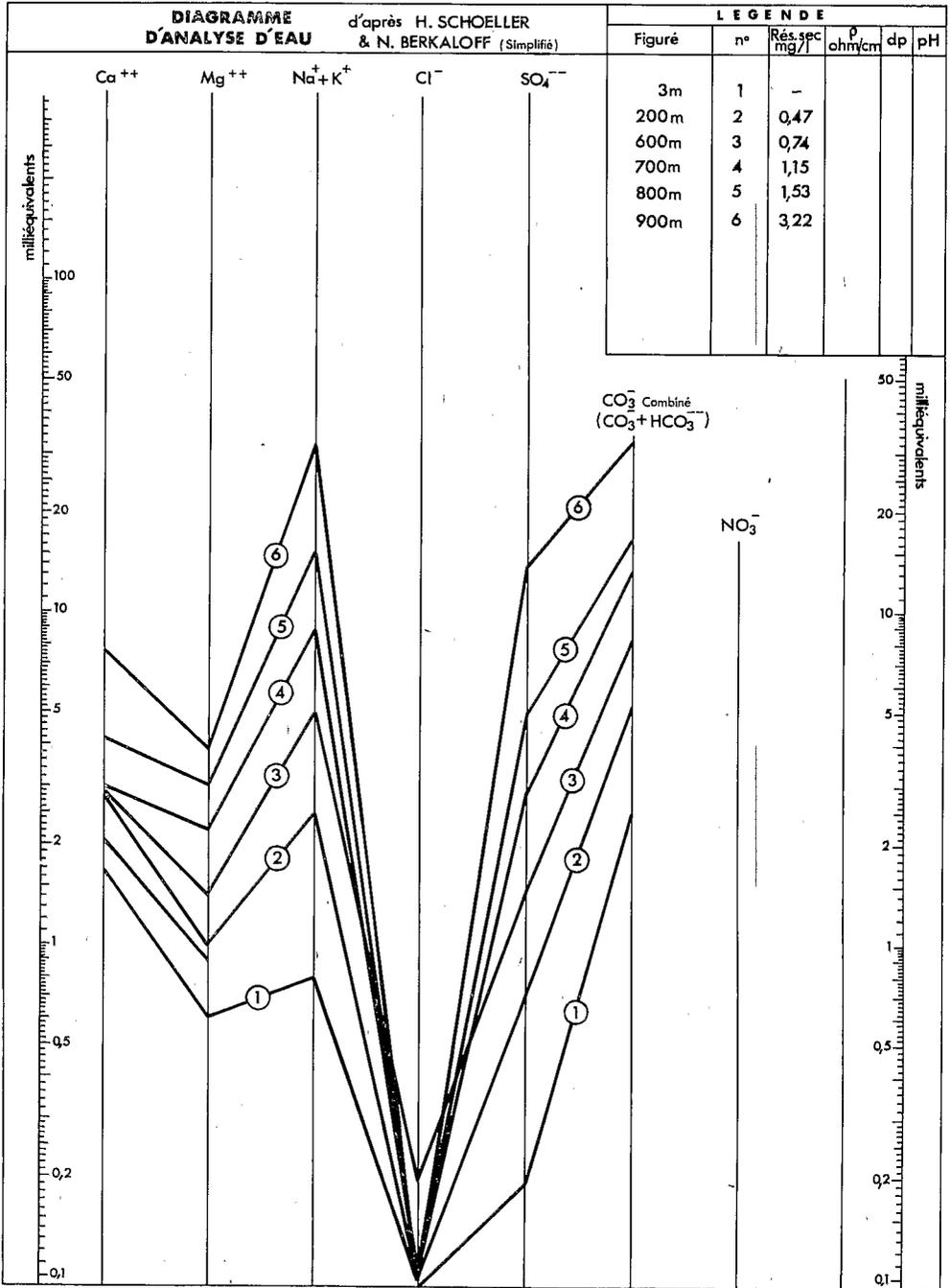


Figure 5. — Représentation graphique (diagramme Schoeller) de la « séquence de Nappes » définie au chapitre II.

Le long de cet axe, on peut associer à la « séquence de nappe » précédemment définie (figure n° 3), une « séquence de sols » caractérisés par une intensification de la carbonatation, de la sulfatation et l'apparition d'une certaine alcalisation :

A une nappe très faiblement salée (0,6 mmho), de faciès bicarbonaté-calcique (Na + K/Ca + Mg) inférieur à 1 ; — (Na/Somme des cations) inférieur à 35 %, correspond un sol caractérisé par (tableau II) :

- une localisation très superficielle (0 à 5 cm) de l'accumulation saline (SO₄, Cl, Na), les autres horizons du profil n'étant que très peu salés ;
- une carbonatation (CaCO₃), faible, imprégnant les 20 cm supérieurs ;
- une absence de fixation de sodium en quantité notable sur le complexe.

A une nappe faiblement salée (2,1 mmhos), de faciès bicarbonaté-sodique (Na + K/Ca + Mg), supérieur à 2 ; — Na/Somme des cations supérieur à 65 %, correspond un sol caractérisé par (tableau III) :

- une localisation superficielle de l'accumulation saline sous forme de taches blanches (SO₄, Cl, Na), mais l'ensemble du profil est également imprégné par une solution saline ;
- une carbonatation, plus marquée, diffuse, avec un début d'accumulation localisée en amas ;
- un début de fixation de sodium sur le complexe (Na/T de 12 %).

Deux profils de cette séquence seront présentés, l'un en bordure Ouest, l'autre en bordure Est.

Profil situé à 200 m de la bordure Ouest du polder Guini.

Observé en mai 1966. Nappe phréatique à 84 cm (composition chimique sur le tableau I, ligne 200 m). Le sol est dénudé.

- 0 — 5 cm : Sec ; gris-noir ; argileux ; humifère ; structure polyédrique fine très développée ; très poreux (macroporosité). Horizon salé, à accumulation saline localisée en petites taches blanches (Na₂SO₄) sur les faces des éléments structuraux ; carbonatation légère, diffuse, par imprégnation du matériau (CaCO₃).
- 5 — 17 cm : Frais ; gris-sombre ; argileux ; humifère ; même structure. Horizon faiblement salé, à accumulation saline et carbonatation diffuses.
- 17 — 43 cm : Légèrement humide ; brun-gris très sombre, nombreuses taches d'hydromorphie jaune-rouge ; argileux ; légèrement organique (matière organique bien humifiée) ; structure en plaquettes (10 x 5 x 5 cm) fortement développée ; « poches » plus claires avec présence de microcoquilles, carbonatées (carbonatation ancienne) ; très poreux. L'horizon est faiblement salé, non carbonaté en dehors des poches.
- 43 — 84 cm : Très humide ; teinte gleyeuse de fond, nombreuses taches d'hydromorphie ; argileux ; légèrement organique ; structure prismatique grossière fortement développée ; les prismes eux-mêmes sont faiblement poreux, mais forte macroporosité due aux fentes de retrait. Horizon faiblement salé, imprégné par la remontée capillaire, non carbonaté.

TABLEAU II
PROFIL A 200 METRES DE LA BORDURE OUEST. RESULTATS ANALYTIQUES
+ PRELEVEMENT EFFECTUE DANS UNE POCHE DE CARBONATATION
ANCIENNE

Profondeur du prélèvement	pH	CaCO ₃ %	L _{ES} mmho	SO ₄ [*] me	HCO ₃ me	Cl me	P ⁻ me	Ca me	Mg me	K me	Na me	p ⁺ me	Na/T %
0 - 5 cm	-	3,5	6,4	2,8	2,0	1,1	5,9	3,8	1,6	0,6	3,3	9,3	3
5 - 17 cm	8,2	2	1	0,1	1,0	0,8	1,9	1,6	0,3	0,1	0,6	2,6	3
25 - 35 cm	7,2	0	1	0,3	1,2	0,7	2,2	1,3	-	-	0,2	1,5	2
+25 - 35 cm	7,9	3	0,9	0,1	1,2	0,7	2,0	1,3	0,3	-	0,2	1,8	2
55 - 65 cm	7,1	0	1,1	0,8	1,0	0,8	2,6	1,6	-	0,1	0,5	2,2	1

(La conductivité est mesurée sur l'extrait de saturation, les sels solubles déterminés sur un extrait 1/10). La méthode suivie pour la détermination du sodium échangeable (percolation par de l'acétate d'ammonium à pH 7) ne donne, en milieu salé et calcaire, que des résultats indicatifs. Les valeurs obtenues permettent cependant d'apprécier, de profil à profil, les variations du rôle joué par le sodium dans la capacité d'échange (T).

Interprétation.

La pédogenèse de ce sol, qui se manifeste notamment par la structuration, l'aération, l'évolution de la matière organique du matériau originel, intervient ici simplement sur la localisation de l'accumulation saline de la carbonatation, mais non sur sa nature.

Profil situé à 200 m de la bordure Est du polder Guini.

Observé en mai 1966. Nappe à 74 cm (composition chimique sur le tableau IV, ligne Q 6).

- 0 — 5 cm : Sec ; gris ; argileux ; humifère ; structure polyédrique moyenne bien développée ; force macroporosité ; horizon très salé, à accumulation saline sous forme de multiples petites taches blanches (Na₂SO₄) recouvrant les faces des éléments structuraux ; carbonatation diffuse.
- 5 — 12 cm : Frais ; gris ; argileux ; humifère ; même structure, avec une tendance à une réorganisation de la structure. Horizon salé ; les taches salines blanches sont strictement localisées sur l'interface supérieure de l'horizon ; carbonatation à la fois diffuse et localisée en petits amas et enduits sur les pores racinaires.
- 12 — 74 cm : Humide ; argileux ; légèrement organique ; structure polyédrique moyenne. La macroporosité diminue, la compacité augmente fortement. Horizon salé imprégné par la frange capillaire, très faiblement carbonaté, de manière diffuse.

TABLEAU III

PROFIL A 200 METRES DE LA BORDURE EST. RESULTATS ANALYTIQUES

Prélèvement	pH	CaCO ₃ %	L _{ES} mmho	SO ₄ [#] me	HCO ₃ me	Cl me	P ⁻ me	Ca me	Mg me	K me	Na me	P ⁺ me	Na ^{+/T} %
0 - 5 cm	8,3	4,7	13,2	13,1	2,5	1,9	17,5	2,2	0,3	1,3	14,8	19,1	9
5 - 12 cm	8,5	3,0	6,0	3,6	2,7	0,9	7,2	1,6	1,0	0,4	7,1	10,1	12
15 - 25 cm	8,4	0,5	3,9	1,4	2,0	0,8	4,2	0,7	0,3	-	3,8	4,8	13
35 - 40 cm	8,2	0,8	5,1	3,4	2,2	0,6	6,2	1,2	0,3	-	5,1	6,6	12
60 - 70 cm	7,7	-	4,5	2,2	1,2	0,4	3,8	1,0	-	-	3,0	4,0	6

(La conductivité est mesurée sur l'extrait de saturation, les sels solubles déterminés sur un extrait 1/10). Dans tous les profils cités, les données relatives au pH concernent un échantillon de sol de poids donné mis, après dessèchement, en contact avec un volume donné d'eau. Ces valeurs ne sont donc pas celles du pH du sol « in situ »

Interprétation.

La pédogenèse conditionne la localisation de l'accumulation saline (la sulfatation, au moment de l'observation, joue à 5 cm de profondeur, à la limite supérieure de remontée capillaire), et la forme de la carbonatation (en amas, enduits).

III. — PROCESSUS D'ACCUMULATION SALINE DANS DES SOLS SOUMIS A L'ACTION D'UNE NAPPE SALEE (CONDUCTIVITE : 4 à 15 MMHOS) DE FACIES SULFATE-SODIQUE.

En bordure Centre-Est du polder Guini, le degré de minéralisation de la nappe augmente au-delà des valeurs citées dans le chapitre précédent. La conductivité dépasse 10 mmhos, le faciès chimique de la nappe devient sulfaté-sodique. L'étude d'une séquence de sols de ce secteur (Figure 3, axe n° 2 ; profil en long de la séquence sur la Figure 6) montre que la nature chimique de la nappe n'est plus alors le seul facteur intervenant sur la nature de l'accumulation saline dans les sols. La présence ou non, à faible profondeur, d'un niveau enrichi en matière organique, le degré d'engorgement du sol sont d'autres facteurs essentiels, qui orientent la pédogenèse de ces sols suivant deux voies très distinctes :

— Dans les points bas (figure 6, profil Q5), là où le niveau enrichi en matière organique est observé et la nappe peu profonde (50 cm en fin de saison sèche), les sols sont caractérisés par (résultats analytiques : tableau V) :

- un croûte saline de surface (Na₂SO₄),
- une forte précipitation de CaCO₃,
- une forte alcalisation du complexe,
- la présence de sulfures en profondeur.

Ces sulfures correspondent à une réduction, au moins partielle, des sulfates. Le sol, malgré l'alcalisation du complexe et un début de dégradation de la structure, reste avant tout un solonchak à accumulation superficielle de Na₂SO₄.

— 80 m plus à l'Est, au contact de la dune (figure 6, profil Q3), le niveau enrichi

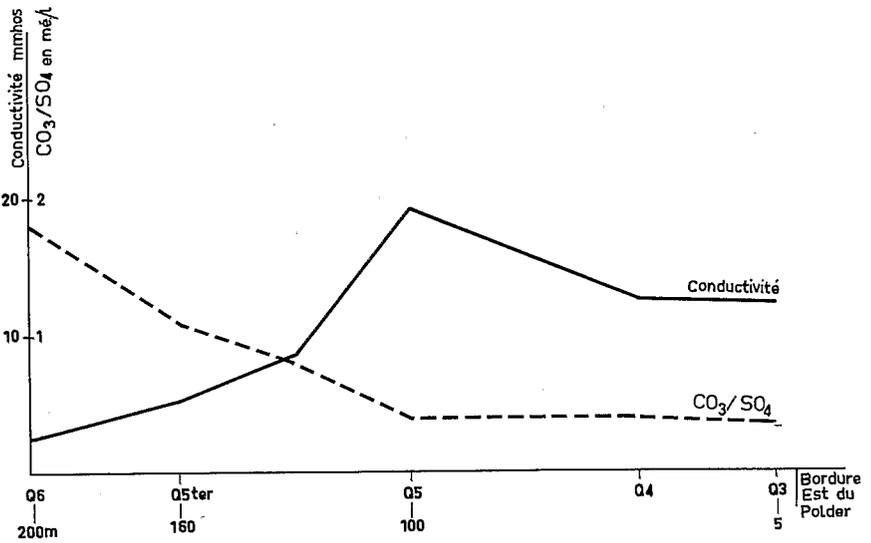
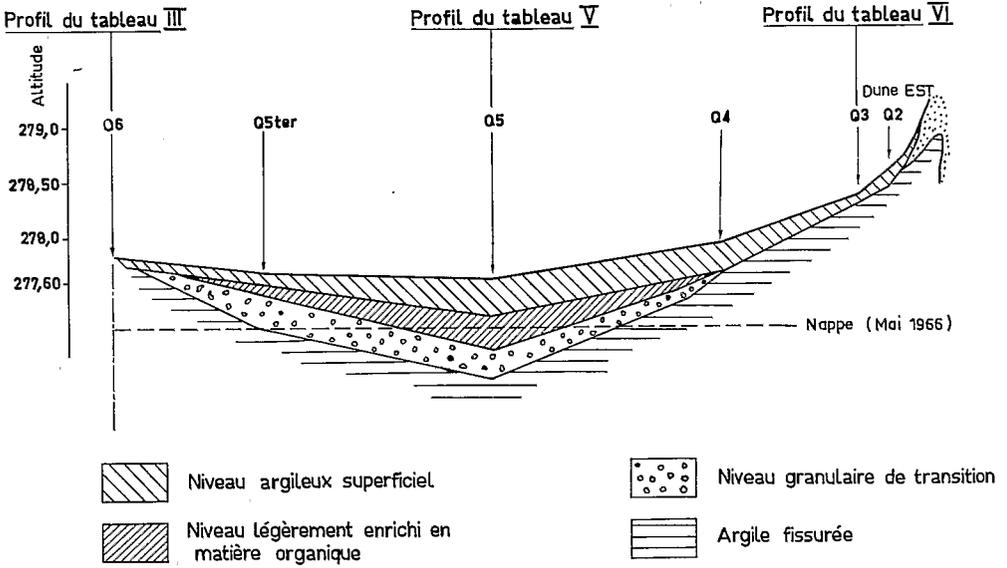


Figure 6. — Coupe en long de l'axe étudié au chapitre III. Variations de certains caractères chimiques de la nappe le long de l'axe.

ACCUMULATION SALINE

en matière organique a disparu, la nappe est plus profonde (120 cm en fin de saison sèche), les sols caractérisés par (résultats analytiques : tableau VI) :

- l'absence de croûte saline,
- la présence de CaSO_4 ,
- une carbonatation (CaCO_3) et une alcalisation faibles.

Ces pédogenèses correspondent donc à des comportements très différents des cations Ca et Na. Dans le premier cas le calcium est « bloqué » à l'état de CaCO_3 , le sodium se fixe sur le complexe. Dans le second, une partie du calcium reste facilement solubilisable à l'état de CaSO_4 , il n'y a pas d'alcalisation du complexe absorbant. Trois tableaux préciseront les caractères de la nappe et des sols au niveau de cette séquence.

La nappe phréatique.

Au niveau de cette séquence de sols, le faciès de la nappe devient, pour des conductivités supérieures à 5 mmhos, sulfaté-sodique. La séquence anionique s'écrit en effet alors : $r \text{SO}_4 > r \text{CO}_3 \text{ combiné} > r \text{Cl}$. Les valeurs de Cl ne sont plus négligeables (10 me/l), celles de CO_3 combiné restent très élevées. La séquence cationique s'écrit : $r \text{Na} > r \text{Ca} \approx r \text{Mg}$. On note, dans la partie basse de la séquence, une diminution significative de la proportion de calcium par rapport au magnésium.

TABLEAU IV

RESULTATS ANALYTIQUES RELATIFS A LA NAPPE PHREATIQUE AU NIVEAU DE LA DEUXIEME SEQUENCE DE SOLS

(Les divers échantillons sont repérés par leur distance, exprimée en mètres, par rapport à la bordure Est du polder)

Emplacement Prélèvement	Date	Prof ^r cm	L mmhos	R.S. g/l	SO ₄ me/l	CO ₃ me/l	Cl me/l	P ⁻ me/l	Ca me/l	Mg me/l	K me/l	Na me/l	P ⁺ me/l
200 m (Q 6)		69	2,5	1,93	9,7	18,2	1,3	27,2	4,9	3,1	1	17	26
160 m		51	5,2	4,5	30,2	32,7	1,9	64,8	8,2	5,6	1,4	38,2	53,4
130 m	Mai 1967		8,6	7,6	61,5	49,6	3,5	114,6	9,1	14,6	2,2	73	99
100 m (Q 5)		50	19,2	20,3	191,4	74,5	10,6	276,5	9,6	39,9	6,3	188	243,8
30 m		98	12,5	12,4	115,7	45,8	9,6	171,1	27,2	24,7	2,1	98,0	152
5 m (Q5)	Juin 1967	120	12,3		116	42	8,8	166,8	34,4	23,5	1,6	94,4	153,9

Dans tous les résultats analytiques relatifs à la nappe présentés dans cette note, les données de pH ne figurent pas. Elles ne purent en effet être effectuées « in situ ». Les phénomènes de contact avec l'oxygène de l'air, de dégagement de CO_2 , d' H_2S modifient profondément et rapidement l'équilibre du pH

Profil situé à 100 m de la bordure Est du polder Guini. Solonchak à Na_2SO_4 .

Réduction partielle des sulfates. Début d'alcalisation.

Observé en mai 1966; nappe à 46 cm (composition chimique : ligne Q5 du tableau IV); végétation de roseaux Phragmites.

- 0 — 2 cm : Litière de feuilles de roseaux non décomposées; nombreuses taches blanches sur les feuilles (Na_2SO_4).
- 2 — 5 cm : Humide; gris très sombre; taches d'hydromorphie sur les radicelles; argileux; humifère; structure polyédrique fine; moyennement poreux. Horizon extrêmement salé, à imprégnation saline, à carbonatation (CaCO_3) localisée en amas.
- 5 — 38 cm : Très humide; brun-gris sombre; argileux; légèrement organique (8 %) (matière organique bien humifiée); taches noires de sulfures sur les débris végétaux; structure polyédrique moyenne peu développée; faiblement poreux; compact. Horizon très salé, imprégné par la frange capillaire, à forte carbonatation localisée en amas, en revêtements

humides tapissant les anciens pores racinaires, en plaquettes sur les faces des éléments structuraux.

38 — 60 cm : Très humide (sous le niveau piézométrique de la nappe) ; enrichi en matière organique (18 % à C/N de 13) ; présence de sulfures (forte odeur d'H₂S avec HCl) ; non structuré, compact, très déformable. Horizon très salé, imprégné par une solution saline. Très carbonaté (CaCO₃) par imprégnation dans la masse de l'horizon.

60 — 80 cm : Sous la nappe ; argile fissurée légèrement organique ; structure moyennement développée.

TABLEAU V
PROFIL SITUE A 100 M. DE LA BORDURE EST : RESULTATS ANALYTIQUES

	pH	CaCO ₃ %	L mmho	SO ₄ me ⁴	CO ₃ me ³	Cl me	P ⁻ me	Ca me	Mg me	K me	Na me	P ⁺ me	Na/P ⁺ %
2 - 5 cm	8,9	7,0	36	34	1	4	39	1	1	2,5	34	38,5	5
6 - 13 cm	8,7	7,1	13	12	1	1,5	14,5	-	3,5	1	14	18,5	51
20 - 30 cm	8,3	4,5	18	18	1,5	1,5	21	0,5	5	1	18	24,5	35
40 - 50 cm	8,1	5,3	32	36	2	3	41	2	6,5	1	40	49,5	17
50 - 60 cm	8,3	19,3	26,5	26	1	1,5	28,5	2	3,5	1	24	30,5	
70 - 80 cm	8,0	22,7	12	15	0,5	1	16,5	2	2,5	0,3	12	16,8	1
110 - 130 cm	7,3	0,9	9	7	0,5	2,5	10	2	1,5	0,3	6	10	1

(Les ions correspondant aux sels solubles, exprimés en milliéquivalents par 100 g de sol, furent déterminés ici sur l'extrait de saturation. La colonne CaCO₃ % représente en fait, par la méthode du calcimètre Bernard, la somme des carbonates. Dans les deux horizons superficiels, une proportion, faible, du chiffre indiqué correspond à du Na₂CO₃)

Interprétation.

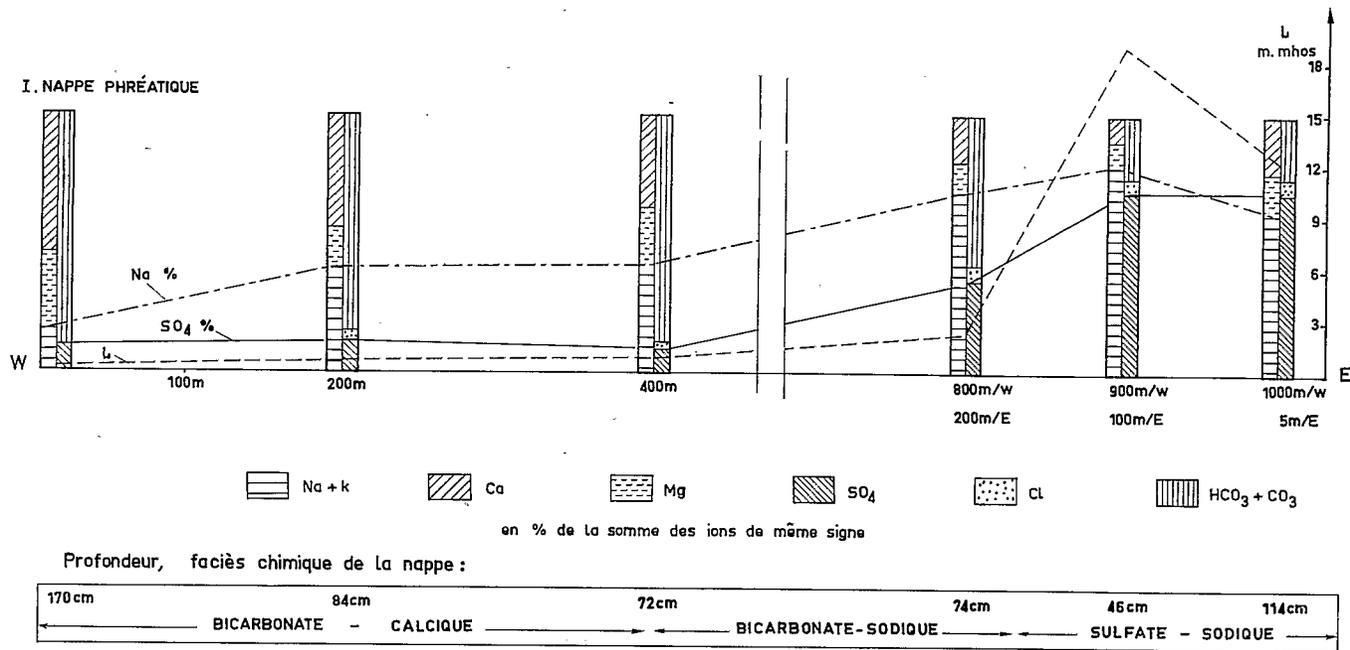
L'activité microbiologique, liée aux conditions d'engorgement de ce sol et à la présence d'un niveau légèrement enrichi en matière organique, intervient sur l'état des composés du soufre et par la même sur le type d'accumulation saline (individualisation de Na₂SO₄ en surface, sulfures à faible profondeur, précipitation de CaCO₃ sur les faces des éléments structuraux, sur les parois des anciens pores racinaires, alcalisation du complexe). La carbonatation, forte (5 à 10 %), localisée, observée sur les 50 cm supérieurs est actuelle ; celle notée de 50 à 80 cm ne l'est pas ou du moins pas uniquement.

En fin de saison sèche, la couche de salant s'est épaissie (1 à 2 cm), s'est individualisée de la litière. Son analyse confirme que, à ce niveau de la séquence, le sol est un « solonchak » à croûte saline de Na₂SO₄ (ions exprimés en me/100 g).

SO ₄ ---	CO ₃ ---	Cl	Ca	Mg	K	Na
550	3	24	6	6	30	550

Profil observé à 5 m de la bordure Est, 80 m en amont du précédent.

Observé en mai 1966 ; nappe à 114 cm (composition chimique : ligne Q3 du tableau IV) ; sol dénudé.



II. SOLS - CLASSIFICATION

Sols Hydromorphes, moyennement humifères, humiques à gley salés, à anmoor calcique	Sols Sodiques (Halomorphes) à structure non dégradée Salins	Sols Sodiques à début de dégradation de la structure, salins à alcalins	Sols Sodiques à structure non dégradée, salins
--	---	---	--

Figure 7. — Synthèse des phénomènes d'accumulation saline (dans la nappe et les sols) le long d'un axe traversant le polder guiné d'ouest en est

0 — 27 cm : Sec ; brun-gris très sombre ; argileux ; humifère ; structure polyédrique fine puis moyenne très développée, avec une nette tendance à l'agré-
gation des éléments ; très poreux (forte macroporosité). Horizons extrê-
mement salés, à accumulation saline localisée en de très nombreuses
taches blanches, en amas de 2-3 mm, en gaines d'anciens pores
racinaires ; très faiblement carbonaté, de manière diffuse.

27 — 110 cm : Légèrement humide, puis humide ; apparition de teinte gleyeuse à
61 cm ; argileux ; structure en plaquettes puis prismatique, très déve-
loppée ; la macroporosité reste très forte ; horizons salés, à impré-
gnation par une solution saline (frange capillaire) ; très faiblement
carbonaté, de manière diffuse.

TABLEAU VI

PROFIL SITUE A 5 M. DE LA BORDURE EST : RESULTATS ANALYTIQUES

Prof ^r en cm	pH	CaCO ₃ %	L mmho	SO ₄ me ⁴	CO ₃ me ³	Cl me	P ⁻ me	Ca me	Mg me	K me	Na me	P ⁺ me	Na/T %
0 - 3	7,9	1	42	19	2	6,5	27,5	2,5	4	2	44	52,5	
3 - 13	8,0	1	18	9	0,6	2	11,6	1,5	1,5	0,4	10	13,4	
15 - 25	7,9	1,3	11	6,5	0,3	0,5	7,3	1	2,5	-	5,5	9	
15 - 25bis	7,3	0	10	5	0,5	1,5	7	1,7	1,3	0,4	8	11,4	
35 - 45	7,8	0,1	8	4	0,9	1,2	6,1	1,7	0,8	0,2	4	6,7	9,5
70 - 80	7,7	0,1	8	4,5	0,2	0,5	5,2	1,5	1	0,2	3,7	6,4	11
100 - 110	7,3	0	8,5	5	0,4	0,6	6,2	1,6	1,3	0,1	5	8,0	5,5

Les ions en me/100 g de sol, sont déterminés sur l'extrait de saturation. Les te-
neurs en sulfates et en calcium, déterminées par ailleurs sur un extrait 1/10 et
ramenées au même poids de terre, se sont révélées beaucoup plus élevées (disso-
lution de CaSO₄, dont la présence a été mise en évidence chimiquement par des
analyses des petits amas blancs prélevés séparément)

Interprétation.

La nappe est trop profonde, le sol trop structuré, trop profondément aéré pour que
l'accumulation saline, encore superficielle, se concrétise par une croûte saline. Ces
mêmes facteurs, l'absence de niveau organique ne permettent pas non plus une activité
biologique comparable à celle du profil précédent (bactéries réductrices des sulfates).

**IV. — ALCALISATION ET FORMATION DE CARBONATE DE SOUDE -
REDUCTION BIOLOGIQUE DES SULFATES.**

Les facteurs particuliers de la pédogenèse (engorgement dû à une nappe sub-
affleurante, niveau légèrement enrichi en matière organique à faible profondeur)
observés dans la partie basse de la séquence précédente (profil Q 5, tableau V),
le sont également dans la partie Sud du polder Bérim.

Mais la nappe phréatique de ce secteur n'est que faiblement salée (conductivité :
1 à 2 mmhos), de caractère alcalin (faciès bicarbonaté-sodique) ; elle submerge les
sols plusieurs mois chaque année, après la saison des pluies, ne descend jamais à
plus de 30 cm de profondeur. Sa zone de battement, d'amplitude réduite, se situe

dans des horizons sans macroporosité, peu perméables (niveau enrichi en matière organique en particulier). L'eau de la nappe est caractérisée par son odeur, l'absence d'oxygène dissous (test de WINKLER), son Eh négatif.

Les sols correspondants sont à salant superficiel de couleur très noire (carbonate de sodium ayant dissout de la matière organique). L'horizon immédiatement sous-jacent est en partie décoloré, sa structure est fortement dégradée. Les taches noires de sulfures, l'odeur d' H_2S , sont nettes dès 10 cm. Ces sols « salés à alcalis » sont donc, dans leur nature, différents de tous ceux décrits précédemment, sols à structure non dégradée, « salins » (le profil Q 5, tableau V, présentant déjà certains caractères intermédiaires).

Etude d'un profil situé à 225 m de la bordure Ouest du polder Bérim (Jardin de Bol).

Observé en mai 1966, nappe à 12 cm; composition chimique ci-dessous. Terrain dénudé, réenvahi par des roseaux Phragmites.

- 0 — 1 cm : Croûte saline, humide à sa partie inférieure, très noire, goudronneuse, soufflée localement, comme sous l'influence d'un dégagement gazeux du sol. Localement, la couleur passe au brun.
- 1 — 4 cm : Sec, gris-olivâtre : argileux ; légèrement appauvri en matière organique ; structure massive, dégradée ; faiblement poreux ; compact ; Horizon extrêmement salé, à accumulation saline diffuse ; faiblement carbonaté (Na_2CO_3 plutôt que $CaCO_3$).
- 4 — 13 cm : Très humide ; teinte gleyeuse ; nombreux débris végétaux très noircis ; forte odeur d' H_2S avec HCl ; structure massive ; horizon salé, imprégné par une solution saline ; très faiblement carbonaté, de manière diffuse.
- 13 — 35 cm : Niveau enrichi en matière organique ; pas de structuration décelable ; compact ; aisément déformable ; forte odeur d' H_2S ; non carbonaté.
- 35 — 70 cm : Passage au matériau : argile fissurée ; structure moyennement développée.

TABLEAU VII

PROFIL SITUE AU SUD DU POLDER BERIM : RESULTATS ANALYTIQUES

Profondeur	M.O. %	CO_3 %	pH	I_{ES} mmho	SO_4 me	CO_3 me	Cl me	P^- me	Ca me	Mg me	K mé	Na me	P^+ me	Na/T %
Salant noir	18,9		10,2		45	1090	5	1140	3	1	7	992	1003	
1 - 4	7,9	4,6	9,8	22,7	15	8	2	25	2	1,5	0,6	28	32	55
4 - 13	11,7	0,3	7,5	6,1	5	1	1,5	7,5	0,5	0,5	0,1	6,5	7,5	12,5
25 - 35	25	0,6	7,0	-	9,5	1,5	1	12	1	0,7	0,1	12	14	10
40 - 50	6,1	0,4	8,2	4,0	1,5	1,5	1	4	1,5	0,5	-	4	6	15
Nappe				1,5	0,9	13,7	1,5	16,1	1,2	0,4	0,3	13,2	15,1	

Les ions des sels solubles furent déterminés sur un extrait 1/10. La colonne CO_3 % (calcimètre Bernard) correspond ici soit à du $CaCO_3$, soit à du Na_2CO_3 , en proportions respectives non étudiées

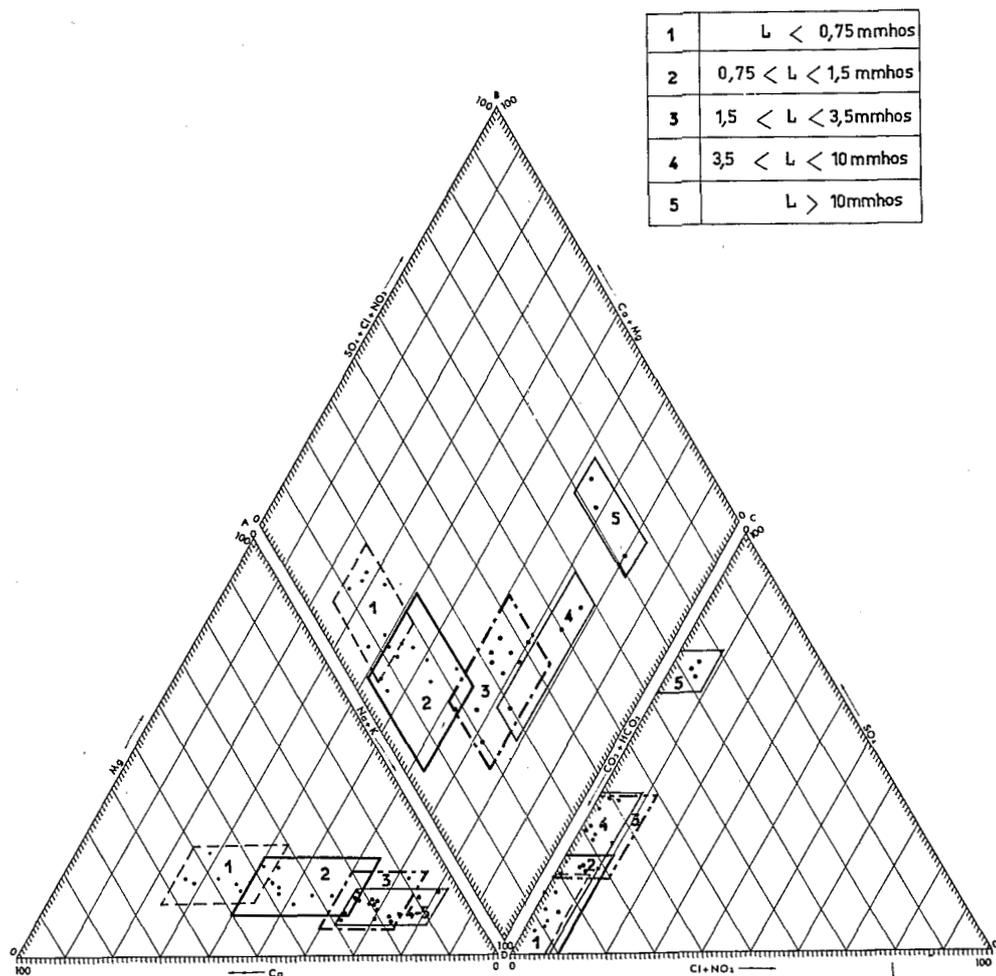


Figure 8. — Variation des caractères chimiques de la nappe en fonction de sa concentration « voie saline » (Diagramme de Piper-Hill)

Interprétation.

L'activité biologique donne à la pédogenèse de ce sol une orientation particulière. Cette pédogenèse « marque » en retour les propriétés intrinsèques du matériau (dégradation de la structure, légère décoloration et appauvrissement en matière organique, solubilisée, de l'horizon supérieur).

Le mécanisme de réduction biologique des sulfates.

Ce mécanisme rendrait compte de manière satisfaisante des caractères du sol décrit : présence de sulfures, alcalisation, formation de carbonate de soude, et du fait que ces caractères sont observés dans les secteurs des polders où sont simultanément remplies les trois conditions :

- nappe phréatique contenant des sulfates ;
- enrichissement en matière organique à faible profondeur ;
- engorgement permanent du sol (conditions anaérobies à faible profondeur).

Or, les travaux récents de WHITTIG et JANITSKY (1963), de TIMAR (1964) ont montré que ces conditions étaient propices à une réduction biologique des sulfates dans les sols. Les grandes lignes de ce mécanisme peuvent se résumer ainsi :

La matière organique (ou plus exactement certains de ses composés) représente pour les bactéries sulfato-réductrices une source de pouvoir réducteur, de carbone et d'énergie. Ces bactéries utilisent l'ion sulfate comme accepteur final d'hydrogène. Une partie des sulfures formés se combine avec le fer (Fe S). Une partie est hydrolysée (OH—, H₂S), la réaction avec le CO₂ résultant de l'oxydation biologique de la matière organique entraîne la formation de HCO₃—.

L'anion bicarbonate réagit avec le calcium soluble ou même échangeable (précipitation de CaCO₃), s'associe au sodium. Dans certaines conditions, il peut y avoir individualisation de Na₂CO₃. La faible intensité de la carbonatation (CaCO₃) dans le profil décrit est à rapprocher des faibles teneurs en calcium de la nappe dans ce secteur du polder.

V. — INTERPRÉTATION D'ENSEMBLE : LES PROCESSUS PEDOGENETIQUES.

Des observations et résultats présentés dans les chapitres précédents, deux premières conclusions générales seront dégagées :

— A la verticale d'un point donné, il existe des relations « génétiques » entre les facteurs de la pédogenèse (profondeur et caractère chimique de la nappe phréatique, nature des matériaux), certaines conséquences de cette pédogenèse (structuration, aération du sol, activité biologique fonction du régime hydrique) et les manifestations de l'accumulation saline dans le sol. Les sels exprimés peuvent être du carbonate de calcium, du sulfate de sodium, du sulfate de calcium, du carbonate de sodium.

— Le même type de relations régit l'extension latérale, à l'échelle du polder, des divers dépôts salins puisqu'aux variations progressives de composition chimique de la nappe, observées le long de certains axes transversaux des polders (« séquences de nappes ») peuvent être associées des variations dans la nature et le mode de l'accumulation saline (« séquences de sols »).

Les mêmes données permettent également de porter un jugement sur les modifications de caractère chimique de la nappe, et sur les mécanismes en jeu dans les sols, c'est-à-dire sur les processus pédogénétiques eux-mêmes.

La nappe phréatique.

La succession, en fonction d'une concentration croissante, des faciès de la nappe dans l'ordre : nappes très faiblement salées, à faciès bicarbonaté-calcique, nappes faiblement salées à faciès bicarbonaté-sodique, nappes salées à faciès sulfaté-sodique, rend compte des caractères de la nappe dans une grande partie des deux polders (figure 8). Cette succession représente la voie « saline » de concentration chimique de la nappe, traduisant la solubilité respective des sels de calcium, de sodium. Les teneurs élevées en carbonates combinés dans les nappes salées sont attribuées aux débris végétaux peu décomposés, enfouis à faible profondeur dans certaines parties basses du polder (« phénomènes générateurs de CO₂ »).

Le processus de carbonatation dans les sols.

Le mécanisme rendant le mieux compte de la plupart des faits de carbonatation actuelle observés est celui d'une baisse de la tension de CO₂ au contact de l'atmosphère, entraînant le passage du bicarbonate de calcium, remonté par la solution capillaire, à l'état de CaCO₃, insoluble. Ce mécanisme semble jouer en particulier dans les sols à nappe assez profonde (80 — 120 cm), très structurés et très aérés sur 10 à 20 cm d'épaisseur ; la carbonatation se manifeste à ce niveau du sol.

Dans certains points bas des polders, avec une nappe très peu profonde, de faciès sulfaté-sodique, la carbonatation observée est probablement liée en partie à un autre mécanisme. L'horizon très carbonaté en profondeur (carbonatation ancienne) sert de « réserve ». La matière organique enfouie constitue une « générateur de CO₂ » qui facilite la mise en solution d'une partie de ce carbonate de calcium. Le bicarbonate

remonté précipite (plaquages, gaines...) sur les 40 cm superficiels du profil soit par suite d'une baisse de tension du CO_2 soit plutôt (car ces horizons sont engorgés, non aérés) par suite de l'alcalisation du milieu, résultant de la réduction biologique partielle des sulfates. Ces faits sont à rapprocher de ceux décrits, en milieu marin, par Cl. LALOU, 1954.

Le processus de sulfatation.

Ce processus joue partout où la nappe contient des sulfates, lorsque ces sulfates ne sont pas complètement réduits, bloqués à l'état de sulfures métalliques par un mécanisme de réduction biologique. Le sulfate de sodium se manifeste par des taches très blanches donnant à la surface des éléments structuraux l'aspect « moucheté ». Ces taches apparaissent en particulier à la limite supérieure de remontée capillaire, soit en surface du sol, soit sous un « mulch » de quelques centimètres. Les conditions particulières de la pédogenèse entraînant la formation, localement (profil Q3) de sulfate de calcium restent à préciser (absence de phénomènes générateurs de CO_2 , teneur suffisante de la nappe en calcium...).

Le processus d'alcalisation (fixation de sodium sur le complexe absorbant).

Dans un premier cas, l'alcalisation, faible ($\text{Na/T} = 12\%$) correspond à une forte proportion de sodium dans la nappe (60 - 70 % de la somme des cations). L'alcalisation s'accompagne alors toujours d'une certaine carbonatation; le calcium est « bloqué » à l'état de CaCO_3 . Le profil contenant du CaSO_4 est significatif : ce profil n'est pas alcalisé.

L'alcalisation des sols par suite d'une réduction biologique des sulfates apparaît comme un mécanisme original. Des travaux de laboratoire sont en cours pour vérifier la présence, dans les sols de Bol, des bactéries incriminées, et préciser les facteurs écologiques favorisant leur action. Les bactéries « sulfato-réductrices » ont été notamment étudiées par SENEZ (1962), par ABD-EL-MALEK (1963).

La comparaison des deux profils présentés précédemment (profil Q5, tableau V et profil du tableau VII) est, de ce point de vue, intéressante : dans un cas (tableau V) le mécanisme supposé de réduction ne joue que partiellement : une partie seulement des sulfates est immobilisée en profondeur, l'autre s'exprime en surface de sol sous forme de sulfate de sodium, sel largement dominant dans la croûte saline. Dans le second cas (tableau VII), le mécanisme joue à plein et c'est le carbonate de sodium qui s'exprime en surface du sol. Or, les différences entre ces deux profils, du point de vue des facteurs de la pédogenèse, tiennent : à la profondeur de la nappe (plus profonde dans le premier cas : 48 cm contre 12 cm), à son niveau de salinité (plus salée dans le premier cas : 19 mmhos contre 1,5 mmho). L'influence de ces deux facteurs est en cours d'étude.

VI. — CONCLUSION : LE ROLE ORIGINAL DE LA PEDOGENESE DANS LES PHENOMENES EVAPORATOIRES.

La nature de la plupart des dépôts salins observés (CaCO_3 , Na_2CO_3 , Na_2SO_4) pouvait être prévue de par la simple composition chimique des eaux du Lac, qui alimentent la nappe. Ces eaux sont en effet « natroniques » (5), et déposent par évaporation des sels : calcite, gaylussite, trona, mirabilite et thénardite (ordre de précipitation) observés par G. MAGLIONE (8) dans les « natronières ».

Mais le sol n'est pas un simple support physique à des phénomènes évaporatoires. La présence de certains autres sels (CaSO_4) et surtout l'intensité, le mode, l'extension verticale et latérale de l'accumulation saline apparaissent comme les conséquences originales de la pédogenèse, notamment de l'aération, de la structuration du matériau, de l'évolution de la matière organique, du milieu biologique.

Une meilleure compréhension de cette pédogenèse permettra de mieux interpréter certaines manifestations de l'accumulation saline, au sens large du terme, observées sur les anciennes aires d'extension du Lac Tchad, sur de très larges superficies.

Reçu pour publication en août 1968.

Bibliographie

- ABD-EL-MALEK Y., RIZK S.J., 1963. — Bacterial sulfate reduction and the development of alkalinity. Jour. of Applied Bacteriology, 1963, t. 26, pp. 7-26.
- AUBERT G., 1965. — Classification des sols. Tableaux des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la Section de Pédologie de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, ser. Pédologie, vol. III, 3, 1965.
- CHEVERRY C., 1966. — Etude préliminaire des processus d'hydromorphie et d'halomorphie dans les sols de polders de la région de Bol (Rives du Lac Tchad). Cah. ORSTOM, ser. Pédologie, vol. IV, 3, 1966.
- CHEVERRY C., 1967. — Note sur la fertilité des sols des polders de Bol après dix ans de mise en culture. Cah. ORSTOM, ser. Pédologie, vol. V, 2, 1967 (à paraître).
- DELECOURT J., 1946. — Géochimie des océans, bassins clos et gites salifères. Mém. Soc. Bel. Géol. Paléont. et Hydrologie, n° 1, 177 p.
- DIELEMAN P.J., DE RIDDER N.A., 1963. — Expertise sur les mouvements des eaux et des sels dans le polder de Bol-Guini. Institut de Wageningen, Pays-Bas.
- DURAND J.-H., 1963. — Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie. Formation et âge. Bull. Soc. Géol. de France, 1963, tome V, pp. 959-968.
- LALOU Cl., 1954. — Sur la précipitation expérimentale de la calcite dans les vases de la baie de Villefranche-sur-Mer. C.A. Acad. Sciences Paris, séance du 1^{er} février 1964.
- MAGLIONE G., 1967. — Présence de gaylussite et de trona dans les natronières du Kanem. ORSTOM, Centre de Fort-Lamy, 12 pages.
- PIAS J., BARBERY J., 1960. — Evolution de la salinité dans le polder de Bol-Guini. ORSTOM, Centre de Fort-Lamy, 108 pages.
- RIOU Ch., 1965. — Données climatologiques concernant la région de Bol durant les années 1963 et 1964. ORSTOM, Centre de Fort-Lamy, 16 pages.
- ROCHE M.-A., 1967. — Première estimation des apports en sels au Lac Tchad par le Chari, ORSTOM, Centre de Fort-Lamy.
- SENEZ J.-C., 1962. — Rôle écologique des bactéries sulfato-réductrices. Pubbl. staz. zool. Napoli 32 suppl. 427-441.
- SOGETHA, 1963. — Etude d'un polder expérimental dans la région de Bol. Etudes préliminaires. Rapport de synthèse. Avant-Projet.
- TIMAR E., 1965. — Effect of organic matter on sulfate reduction occurring in alkali (szik) soils. Agro-kémia és Talajtan, tome 14, 1965, pp. 195.
- Université de Strasbourg, 1966. — Analyse aux rayons X de 14 échantillons de sols de la bordure nord-est du Lac Tchad, 3 p. (Laboratoire du Pr. MILLOT, analyses effectuées par H. PAQUET.)
- WHITTIG L.D., JANITSKI P., 1963. — Mechanisms of formation of sodium carbonate in soils. I. Manifestations of biological conversion. J. Soil Science. 14, 322-333.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF SOLUBLE SALTS IN ARID REGIONS
THE PART PLAYED BY THE PEDOGENESIS ON NATURE AND
WAY OF SALTED ACCUMULATION IN LAKE CHAD POLDERS

The empoldered lands of Bol have been won on Lake Chad for fifteen years. A mineralized (0,3-15g/l) ground-water is everywhere present at a weak depth and draws up salts into the soils. The study of the vertical and side extension of the different salted deposits (calcium carbonate, calcium sulphate, sodium sulphate, sodium carbonate), suggests the existence of « genetic » relations between the factors of pedogenesis (ground-water, materials), some characters of this pedogenesis (structuration, ariq of the soil) and the nature and the way of salted accumulation in the groundwater and the soils. The alcalisation of soils in consequence of a biological reduction of sulphates is one of the processes concerned.

Interfering with the state of flux of the principal soluble ions (Na,Ca), the pedogenesis of these soils plays an original part within the geochemical évaporating phenomenons observed at the bottom of Chadian basin, on the outskirts of the Lake.

Setis

Extrait de « Science du Sol » — N° 2, 1968 — Supplément au Bulletin
de l'Association Française pour l'Etude du Sol

**Rôle original de la pédogenèse sur la nature
et le mode de l'accumulation saline
dans certains milieux confinés
en région subaride**

(Polders des bordures du lac Tchad)

C. CHEVERRY

Centre ORSTOM de Fort-Lamy
Collaboration technique : R. SAYOL

BCR/2853 ex 1