

Classification des sols salés : les sols Salic

J.Y. LOYER

Pédologue Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une proposition de classification internationale en cours d'élaboration par l'ISSS (IRB), et comportant 20 groupes de sols, ceux affectés par une quantité importante de sels solubles, constituent le groupe des sols Salic (les sols Sodic constituant un groupe séparé).

Leur définition proposée ici repose sur des critères de solubilité, celle-ci devant être supérieure à celle du gypse, et de concentration ionique qui, traduite par une mesure de conductivité électrique de l'extrait saturé, doit avoir une valeur minimum (8 ou 15 dS.m⁻¹, selon les cas).

La distinction des sous-unités se fait ensuite à partir de caractéristiques chimiques, essentiellement la nature anionique de la solution du sol qui permet de distinguer six faciès répartis selon un diagramme ternaire :

- chloruré acidifié,*
- chloruro-sulfaté neutre,*
- sulfaté neutre,*
- sulfaté acide,*
- bicarbonato-sulfaté alcalin,*
- carbonaté basique.*

Secondairement, la nature des cations et la forme du profil salin vertical peuvent intervenir pour des différenciations plus fines. Les relations avec les sols Sodic ou avec d'autres paragenèses minérales sont présentées.

MOTS CLÉS : Classification – Sols salés – Sols Salic – Sols salins.

ABSTRACT

SALIC SOILS CLASSIFICATION

The international system of soil classification proposed by ISSS (IRB), includes, among twenty major groups, soils with « Salic attributes » (those with sodic attributes do not belong at the same major group).

The main characteristics used here to define Salic soils are : solubility (these soils must contain a quantity of salts which more soluble than gypsum) and the total salt concentration in soil solution (E. C. more than 8 or 15 dS.m⁻¹).

It is proposed to classify them in six facies according to their anionic composition :

- acid chloride salic soils,*
- neutral chlorido sulfate salic soils,*
- neutral sulfate salic soils,*
- very acid sulfate salic soils,*
- alkaline bicarbonate-sulfate salic soils,*
- strongly alkaline carbonate salic soils.*

The nature of the cations and the morphology of the saline profile may also be used to define sub-units ; finally the relations with Sodic soils and other mineral paragenesis are submitted.

KEY WORDS : Classification – Salt affected soils – Salic soils – Solontchaks.

INTRODUCTION

Lors du congrès de l'Association internationale de la science du sol à New Delhi en 1982, un groupe de travail créé au sein de la Commission V fut chargé d'établir un système de classification des sols qui reçoive l'agrément de la communauté scientifique internationale. Depuis cette date, le programme de l'IRB (International Reference Base for Soil Classification) œuvre pour mener à bien cet objectif. Le groupe central de travail, animé par A. RUELLAN (1988) et R. DUDAL (1990), a pu exposer lors du récent congrès de Kyoto les derniers développements de ce projet qui propose une liste de vingt groupes de sols principaux (ISSS, 1990). Au sein de ces vingt groupes, les sols salés au sens large ont été séparés en deux groupes présentés selon l'ordre de priorité attribué à chacun :

- groupe 12 : « sols Salic » (sols salins, solontchaks), caractérisés par une accumulation marquée de sels solubles.

- groupe 13 : « sols Sodique » (sols alcalins, solonetz), caractérisés par une saturation marquée en sodium.

Cet article se rapporte exclusivement aux sols Salic (LOYER, 1989a), les sols uniquement Sodique devant faire l'objet d'une proposition distincte de T. V. TURSINA (URSS).

Par ailleurs, nous avons proposé dans le cadre du référentiel pédologique de l'Association française pour l'étude du sol (AFES, 1990), un « grand ensemble de référence » se rapportant aux sols Salsodiques et regroupant les sols à l'horizon diagnostic « Salique » et ceux à horizon diagnostic « Sodique » (LOYER, 1990).

Concernant les sols caractérisés par la présence de sels solubles (seuls étudiés ici), ces deux propositions – IRB et AFES – sont superposables, divergeant seulement par le fait que les sols sulfatés acides issus de mangroves n'ont pas été inclus dans l'ensemble salsodique du référentiel, car faisant l'objet d'une référence distincte (MARIUS, 1990) ; ceci malgré la présence dans ces sols de sels sulfatés mixtes caractérisés par un produit de solubilité élevé (LE BRUSQ *et al.*, 1987 – LOYER *et al.*, 1989). La proposition se rapportant à l'IRB étant la plus détaillée au niveau des faciès salins (six, regroupés en deux pour le référentiel), c'est elle qui est présentée ici.

DÉFINITION DES SOLS « SALIC »

Les deux critères chimiques principaux retenus pour la définition de ces sols sont le produit de solubilité des sels accumulés ou susceptibles de se former, et la concentration ionique dans la solution du sol :

- Pour être considérés comme Salic, ces sols doivent contenir une quantité importante de sels plus solubles que le gypse et *a fortiori* que le carbonate de calcium, la jarosite et le sulfure de fer. Sont donc exclus de ce groupe les sols uniquement gypseux (sols Gypsic), ou calcaires (sols Calcic), et uniquement à jarosite ou à sulfure de fer, rattachés aux sols Fluvic ; ceci bien que ces différents sols puissent appartenir à une même séquence géochimique.

- La concentration saline totale de l'extrait de sol, exprimée par une mesure de conductivité électrique, sert à fixer les limites du groupe : les sols doivent présenter, à moins de 125 cm de profondeur et à un moment donné de l'année, une concentration en sels telle qu'elle se traduise par une conductivité électrique minimum. Celle-ci mesurée sur un extrait de pâte saturée ou sur un extrait 1/1 pour les sols trop sableux, doit être :

- supérieure à 15 dSiemens/m (ou mSiemens/cm) à 25°C ;

- ou supérieure à 7 dSiemens/m si le pH 1/1 est supérieur à 8,5 (sols carbonatés alcalins) ou inférieur à 3,5 (sols sulfatés acides).

CARACTÈRES GÉNÉRAUX

L'origine des sels responsables de cette salinité est diverse : marine actuelle ou ancienne, pétrographique due aux ions libérés par l'altération de certaines roches sédimentaire, volcanique, hydrothermale, éolienne apportée par des embruns ; elle est aussi très souvent anthropique induite par la mise en valeur hydroagricole et autres aménagements (eaux d'irrigation, remontées de nappes phréatiques, engrais, solutions nutritives des serres et des cultures hors sol, effluents urbains, etc.).

Selon les estimations, ces sols Salic représenteraient sur la planète une superficie de l'ordre de 260 millions (DUDAL, 1990) à 340 millions d'hectares (SZABOLCS, 1989), en fonction de l'intensité du phénomène pris en compte. Très répartis dans les régions arides à semi-arides, ils couvrent de grandes surfaces surtout en URSS, Australie, Amérique du Sud, Chine et Moyen-Orient.

La présence de ces sels et l'élévation de la pression osmotique de la solution du sol, ou une toxicité ionique spécifique, entraînent la formation de paysages particuliers, soit occupés par une végétation naturelle spécialisée dite halophyte, soit présentant une absence totale de végétation (*chotts, sebkhas, lagunas, salares, sansouires, tannes vifs*, etc.), selon le degré de salinité atteint.

L'utilisation agricole de ces sols est délicate. En régime pluvial, seuls ceux des régions suffisamment humides sont cultivables, parfois après une phase de

dessalement naturelle (riz, orge, etc.), et aussi plantables en espèces fourragères ou forestières tolérantes. Partout ailleurs notamment en région sèches, on doit recourir à leur mise en valeur irriguée qui, sous ces conditions climatiques, nécessite des précautions particulières de gestion et surtout un lessivage et un drainage appropriés pour éliminer l'excès de sels (VALLES, 1985) et contrôler les remontées de nappe. On a parfois recours à l'emploi d'amendements minéraux ou organiques ou d'eaux rééquilibrées, et même à des solutions salines qui, améliorant l'agrégation des sols, facilitent le lessivage des sels.

Par ailleurs, il existe un risque de développer à partir de ces pratiques hydroagricoles, sur des sols initialement sains, une dégradation saline secondaire induite, même par l'utilisation d'eaux d'assez bonne qualité, mais sans drainage efficace (AUBERT, 1985 ; LOYER, 1989b).

Au niveau des plantes cultivées, l'objectif est de sélectionner des variétés tolérantes pour maintenir la meilleure production possible, en repoussant le seuil de mortalité des espèces, et aussi d'intervenir au cours du cycle cultural, soit par utilisation successive d'eaux de plus ou moins bonne qualité, parfois recyclées (l'utilisation d'eaux salines en début de cycle pouvant même, en agissant sur la vigueur du plant de certaines cultures maraîchères, prolonger leur production (Inra, 1987), soit encore par utilisation d'eaux apportées en mélange ou en alternance selon la sensibilité des cultures (RHOADES, 1977). Ces problèmes, liés à la conservation, à la dégradation chimique et à la régénération des sols affectés, sont aujourd'hui d'une importance primordiale dans les terres irriguées, en raison de l'ampleur des interventions humaines en cours de développement, qui approcheraient 500 millions d'hectares irrigués sur la planète en l'an 2000 (KANWAR, 1982).

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS SALIC

Elles sont essentielles à la distinction des sols de ce groupe. En plus des limites de solubilité et de concentration utilisées pour leur définition, sur le plan qualitatif, « la nature des ions identifiés dans les solutions » doit permettre de définir différents faciès Salic.

Les constituants ioniques majeurs pris en compte sont les chlorures, sulfates, bicarbonates et carbonates, associés du point de vue cationique au sodium, magnésium et potassium. Selon C. CHEVERRY (*comm. orale*), les nitrates, issus de fertilisants ou de polluants divers, pourraient aussi être pris en compte sous certaines conditions climatiques qui leur permettraient de se maintenir et de s'exprimer dans les sols ; certains

borates également selon leur solubilité, beaucoup plus rares dans les sols mais qui peuvent y apparaître en relation avec des contextes particuliers de volcanisme et de boratières telles qu'en Bolivie (RISACHER, 1978).

Le cation le plus souvent présent est le sodium. Sa présence à forte concentration dans la solution du sol (ainsi que celle du magnésium en milieu non calcaire), entraîne obligatoirement la fixation d'une certaine proportion de celui-ci sous forme échangeable (alcalisation ou sodisation du complexe) (BOLT, 1979).

Les sels susceptibles de précipiter sont, soit des sels simples anhydres ou plus ou moins hydratés, soit des sels doubles ou des sels mixtes plus complexes. Bien qu'il soit difficile de considérer ces ions isolément puisqu'ils appartiennent à des séries géochimiques continues, il a été proposé de les séparer de façon symétrique selon une représentation triangulaire régulière prenant en compte le pourcentage respectif des différents anions : « Halon, Natron, Sulfon, Chloron » (FITZPATRICK, 1980).

Afin de rendre compte de la nature et de la quantité relative d'anions présents, et aussi des conditions d'oxydo-réduction et de pH extrêmes qui peuvent se manifester dans certains cas, il est proposé ici une représentation selon un système ternaire dissymétrique, établi à partir de la composition ionique de l'extrait de pâte saturée de sols représentatifs. Six faciès salins ont ainsi été identifiés, prenant en compte les sols sulfatés acides à sulfates mixtes. Ils correspondent à trois grands domaines de pH selon le spectre suivant, dont les limites sont sujettes à de petites variations dans les conditions naturelles :

– $\text{pH} < 3,5$: domaine hyperacide des milieux de mangroves très acidifiés par oxydation microbiologique des sulfures.

– $3,5 < \text{pH} < 8,5$: domaine des sels neutres, mais pouvant dans certaines conditions particulières descendre en dessous de 5 (milieux parasulfatés acides partiellement neutralisés).

– $\text{pH} < 8,5$: domaine alcalin, dont la limite inférieure de 8,5 correspond au pH maximum (mesuré en conditions standard) atteint par le système de sels neutres précédent, ouvert sur la pression partielle du CO_2 atmosphérique. La présence et la proportion de sels d'acides faibles et de bases fortes contribuent à élever ce pH ; celui-ci pouvant dépasser 10 et atteindre 12 en milieu carbonaté enrichi en sodium.

S'agissant des conditions d'oxydo-réduction, seul le faciès salin carbonaté sodique évolue dans un milieu organique nettement réducteur avec production de H_2S et dissolution de matière organique ($\text{pH} > 10$) (CHEVERRY, 1974). À l'autre pôle sulfaté acide, en milieu riche en fer, ces conditions très réductrices entraînent la formation de sulfure de fer insoluble et les sols affectés n'appartiennent donc pas tous aux sols

Salic (polders et sols de mangrove potentiellement sulfatés acides des régions équatoriales, par rapport à ceux des régions tropicales plus sensibles à l'oxydation).

La nature de l'anion dominant dans ces sols Salic a été utilisée pour les différencier selon trois grands faciès (cf. ci-après) :

- chloruré,
- sulfaté,
- bicarbonaté-carbonaté.

Du point de vue cationique, la proportion relative des différents cations, et en particulier celle des alcalins par rapport aux alcalino-terreux, affecte la solution du sol, et l'état du complexe échangeable. Certains auteurs ont ainsi distingué deux types de sols (DUCHAUFOR, 1988) :

- des « sols salins à complexe calcique » caractérisés dans la solution du sol et dans le complexe adsorbant par une dominance du calcium et du magnésium sur le sodium et le potassium. C'est le cas de sols calcaires et gypseux dont la composition cationique de la solution du sol est comprise entre ces limites : $1 < Ca + Mg/Na + K < 4$, et $Ca/Mg \geq 1$.

La structure de ces sols reste stable même après dessalement. Une légère alcalinisation (augmentation de pH) se manifeste (sols Sodique).

- Des « sols à complexe sodique » dans lesquels le sodium, dominant dans la solution du sol relativement aux alcalino-terreux, se fixe préférentiellement à ceux-ci, sur le complexe échangeable. On a dans la solution du sol : $Ca + Mg/Na + K < 1$.

L'alcalinisation est nettement marquée après dessalement et hydrolyse du complexe. La structure tend ensuite à se dégrader (sols Sodique).

- On peut y adjoindre « des sols salins à complexe magnésien » dont le comportement structural en l'absence de calcium, c'est-à-dire hors des milieux calcaires et gypseux, se rapproche des sols sodiques précédents. Dans la solution du sol, le magnésium associé aux bicarbonates et carbonates (très peu solubles) entraîne une réaction alcaline ; associé aux sulfates et surtout aux chlorures, sels beaucoup plus solubles, sa réaction est neutre.

On a dans la solution du sol :

$Ca + Mg/Na + K > 1$, avec $Ca/Mg \leq 1$ et $Na/Mg < 1$.

(Vertisols magnésiens de Nouvelle Calédonie, par ex).

Après dessalement, l'hydrolyse du complexe magnésien par des eaux douces provoque une forte alcalinisation (augmentation de pH), suivie d'une dégradation de structure possible (avec évolution vers les sols Sodique) : « Smolniza » des Balkans (SZABOLCS, 1989).

CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES, STRUCTURES ET ORGANISATION

Dans l'expression des manifestations salines, plusieurs degrés sont possibles :

- Le caractère salin est secondaire par rapport à d'autres caractéristiques pédogénétiques. C'est le cas des sols alluviaux jeunes peu différenciés au plan structural et organisationnel (sols Fluvic par exemple), ou encore transformés par l'homme sous l'effet de l'irrigation (sols Anthric). C'est aussi le cas de sols pédogénétiquement plus évolués, au sein desquels les manifestations salines peuvent être faibles et secondaires (sols Vertic et Gleyic, par exemple).

- Le caractère salin est dominant et des horizons d'accumulation de sels sont identifiés dans ces sols. Selon les régimes hydrothermiques naturels et anthropiques, ces horizons peuvent se former à différentes profondeurs et avoir des expressions diverses (pseudomycélium, amas salins, croûte gypso-saline, etc.). Lorsqu'elles sont importantes, ces précipitations salines affectent certaines propriétés des sols, porosité, disponibilité hydrique, et constituent parfois un obstacle physique à l'enracinement des plantes (« terch » gypso-salin des oasis).

Sous certaines conditions climatiques extrêmes (faibles précipitations atmosphériques et forte évaporation), les sels présents dans la solution de ces sols peuvent aussi s'exprimer à la surface sous forme de manifestations diverses plus ou moins continues dans l'espace, et évolutives dans le temps (efflorescences blanches, croûtes salines, poudres brunes désagrégées, salants noirs, cristaux de sels évaporitiques, etc.) (LOYER, *et al.*, 1989). L'éclatement des agrégats, qui résulte de ces concentrations superficielles et qui se manifeste saisonnièrement sous forme d'horizon poudreux superficiel désagrégé, ne constitue pas une dégradation structurale au sens strict comme dans le cas d'une hydrolyse sodique. Il s'agit d'une cristallisation de sels provoquant un effet secondaire de boursofflement par désagrégation.

Ces diverses accumulations ont servi à différencier dans les profils, en relation avec un régime pluviothermique saisonnier ou un régime anthropique particulier (irrigation), des gradients verticaux de salinité caractéristiques de certaines situations (SERVANT, 1978) :

- profils salins verticaux ascendants ;
- profils salins verticaux descendants ;
- profils salins verticaux indifférenciés ;
- profils salins verticaux complexes.

Ceux-ci sont évolutifs et sujets à des variations qui peuvent être rapides.

Au plan structural, il n'existe pas d'assemblage spécifique des sols Salic, contrairement aux sols

Sodic. Même lorsqu'une certaine proportion du sodium en solution passe à l'état échangeable (alcalisation ou sodisation), il n'y a pas de dégradation de la structure de ces sols : les agrégats restent stables et floculés et les propriétés hydrodynamiques inaltérées tant que des sels sont présents en quantité significative dans la solution du sol.

PRINCIPAUX FACIÈS DES SOLS SALIC

Le découpage proposé à l'intérieur de ce groupe repose essentiellement sur un critère chimique : la composition anionique de la solution du sol (fig. 1) :

à très acide (5 à 3,5), le calcium pratiquement absent du milieu, et les sulfates, représentés uniquement par ceux de l'eau de mer, en très faible proportion relative ; le sodium domine dans les solutions :

(Cl >> SO₄ > HCO₃ et Na >> Ca).

La présence de NaCl et de CaCl₂ et MgCl₂ très hygroscopiques, peut s'exprimer à la surface des sols sous forme de salants blancs chlorurés (croûte ou efflorescences), pouvant évoluer saisonnièrement vers des horizons poudreux bruns.

Basse vallée de la Gambie, du Sine Saloum et de la Casamance au Sénégal (cf. tabl. I).

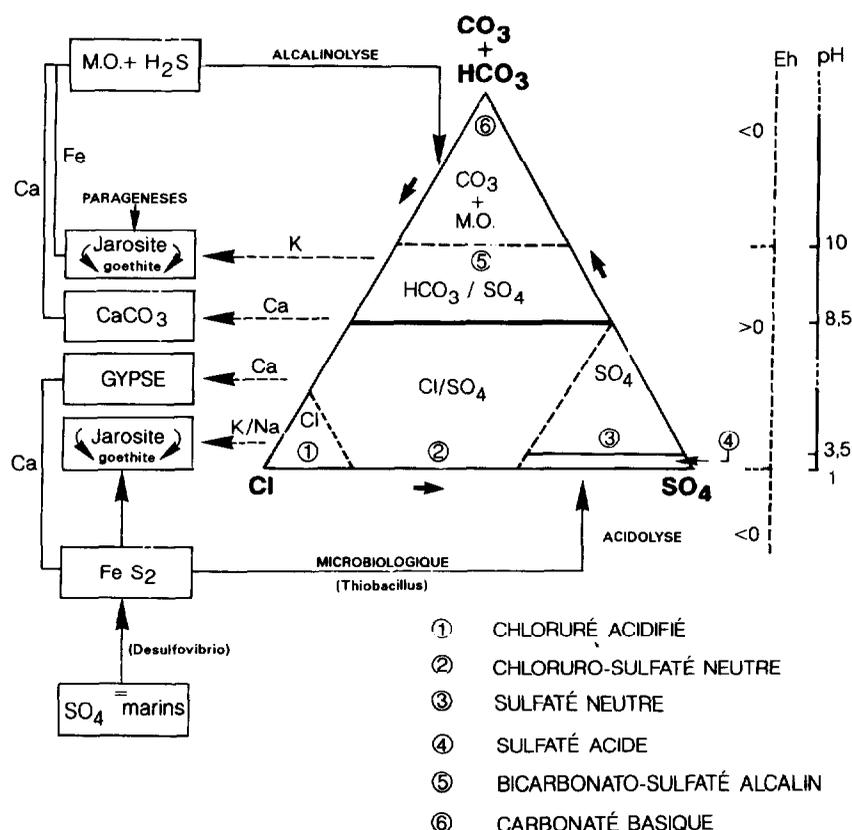


FIG. 1. - Principaux faciès des sols Salic
Main Salic soils facies

Principales « facies » de suelos Salicos

Les sols « Salic » chlorurés

Parmi ceux-ci, deux types peuvent être différenciés :

Les sols « Salic » chlorurés, acidifiés

D'origine marine stricte, mais influencés par l'acidité potentielle des sols de mangroves. Le pH est acide

Les sols « Salic » chloruro-sulfatés neutres

D'origine le plus souvent marine, mais parfois enrichis par du gypse sédimentaire redistribué par les eaux continentales. Le pH est proche de la neutralité. Les sulfates et chlorures sont en proportions variables relativement, et supérieures aux bicarbonates et carbo-

TABLEAU I
Sol Salic chloruré acide (Casamance, Sénégal) (P. BOIVIN, 1984)
Acid chlorid Salic soil
Suelo Salico cloruro-ácido

K60 Profondeur (cm)	Extrait 1/5 - Sels solubles - mé/l - Av. 1985							E 1/5	pH Extrait 1/2,5
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	pH	Conduct. mS/cm	Extr. eau
0 - 5	4,3	35	162	3,1	180	29	5,3	19,5	5,1
5 - 26	3,5	34	164	2,3	186	18,5	3,9	19,5	3,5
26 - 90	3,8	28	169	2,8	191	17	3,3	20,5	3,4
90 - 110	2,6	15,5	79	1,6	91	15,8	3	11	3,1
110 - 130	1,5	6,7	41	1,1	45	6,7	3,7	5,5	3,7

nates ; sodium, calcium et magnésium sont quantitativement variables. Expression des sels sous forme de NaCl, CaCl₂ et MgCl₂ associés à du gypse dans les profils. Salants blancs hygroscopiques à croûte saline, efflorescences ou structures poudreuses brunes superficielles.

Basses plaines alluviales, *chotts* et *sebkhas* d'Afrique du Nord, *lagunas* mexicaines, vallée de l'Euphrate en Syrie et en Irak, *salares* de l'Altiplano andin (cf. tabl. II).

Les sols « Salic » sulfatés

Selon deux milieux géochimiques, on peut distinguer :

Les sols « Salic » sulfatés neutres

D'origine continentale stricte, cette salinité est

souvent induite par la nature d'eaux d'irrigation très chargées en sulfates et en sodium. Le pH est proche de la neutralité. SO₄ >> HCO₃ > Cl et Na >> Ca dans la solution du sol. L'expression des sels peut se faire en surface sous forme de salant blanc pulvérulent à Na₂SO₄ (thénardite) ou Na₂SO₄ · 10 H₂O (mirabilite) (LOYER *et al.*, 1989).

Région Lagunera du Nord Mexique (cf. tabl. III).

Les sols « Salic » sulfatés acides

Ils ont une origine marine et sont formés à partir des milieux de mangroves potentiellement acides, dont l'acidification est exacerbée par les sécheresses climatiques des pays tropicaux. Le milieu devenu hyperacide (pH < 3,5) permet une acidolyse des argiles avec libération d'alumine, de fer, et de magnésium dans les sols ; ceux-ci peuvent précipiter sous forme de sulfates

TABLEAU II
Sol Salic chloruro-sulfaté (Guadalquivir, Espagne) (J.O. JOB et J.Y. LOYER, 1989)
Neutral chloride-sulfate Salic soil
Suelo Salico cloruro-sulfatado

M 2 Déc. 88	Sol - Extrait de pâte saturée - mé/l											
0 - 120 cm	CE mS/cm	Ca	Mg	K	Na	Σ ⁺	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Σ	pH
Moy. 6 échant.	29.8	40.2	74	217.4	3.9	335.5	-	1	284.0	71.5	356.5	7.15
Nappe phréatique - mé/l												
150 cm	79.4	46.4	205.6	652.2	10.2	914.4	-	4.8	888.7	91.7	985.2	7.43

TABLEAU III
Sol Salic sulfaté neutre (région Lagunera, Mexique) (J.Y. LOYER *et al.*, 1989)
Neutral sulfate Salic soil
Suelo Salico sulfatado-neutro

LAG 45	Croûte saline : Thénardite - Extrait aqueux 1/500 - mé/l											
Surface	CE mS/cm	Ca	Mg	Na	K	Σ^+	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Σ^-	pH
	2.66	0.50	0.18	24.1	0.02	24.8	-	0.23	0.1	25.2	25.5	6.65
LAG 50	Sol - Extrait de pâte saturée - mé/l											
10-50 cm	39.7	21.0	28.6	522.0	23.4	595.0	-	5.0	45.6	462.0	512.6	8.17
LAG 6	Eau de nappe - mé/l											
70 cm	11.07	11.7	8.5	123.9	0.5	144.6	-	8.1	10.4	142.7	161.2	7.8

mixtes divers : alunite, tamarujite, pickéringite, rozé-
nite, jurbanite, coquimbite, etc. Expression possible
des sels sous forme de salants blancs pulvérulents, très
solubles à l'eau. Il y a peu de calcium et peu de
chlorures dans le milieu (LE BRUSQ *et al.*, 1987).

Basse vallée de la Gambie, Sine Saloum et Casa-
mance au Sénégal, Guinée Bissau (cf. tabl. IV).

Les sols « Salic » carbonatés

Cette salinité est représentative des bassins endoréi-
ques continentaux. Le pH est plus ou moins alcalin,
toujours supérieur à 8,5. Deux faciès ont été reconnus :

Les sols « Salic » bicarbonato-sulfatés alcalins

Cette voie saline se manifeste après concentration

TABLEAU IV
Sol Salic sulfaté acide (Bao Bolon, Sénégal) (J.Y. LE BRUSQ *et al.*, 1987)
Acid sulfate Salic soil
Suelo Salico sulfatado ácido

BB 20 Profondeur (cm)	Extrait 1/5 - Sels solubles - mé/l								E .S.	pH Extrait 1/2,5
	Al	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	pH	Conduct. mS/cm	Extr. eau
0 - 10	1	2,2	4	0,04	8,5	4	11,5	3,3	21,4	3,2
40 - 50	0,8	1,4	2,7	0,1	3,4	4,6	4,8	3,3	4,5	3,1
90 - 100	2,4	2,8	6,4	0,16	8	7,8	12	3,3	12,5	3,2
130 - 140	3	3,3	7,1	0,13	8,6	4	18	3,2	-	3,1

des solutions en milieu aérobie favorisant la production de sulfates à partir des sulfures des vases originelles. L'acidité libérée par cette réaction d'oxydation est neutralisée par les carbonates de sodium et de calcium présents en larges excès dans ces milieux. Le pH des solutions de sol devient supérieur à 8,5. $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ et $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$. Il peut y avoir précipitation de natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) thermonatrite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et de thénardite (Na_2SO_4) à la surface des sols,

sous forme de salant blanc pulvérulent (CHEVERRY, 1974).

Polders du lac Tchad, hautes plaines mexicaines (cf. tabl. V).

Les sols « Salic » carbonatés basiques

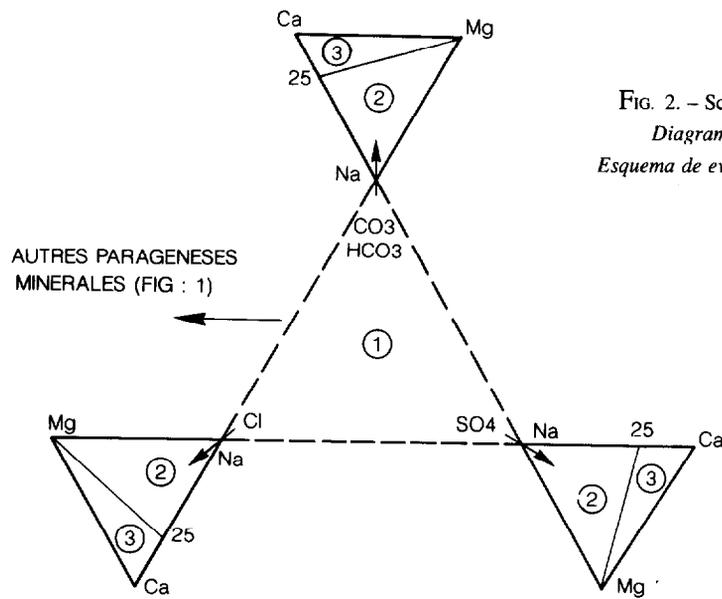
Cette voie alcaline se manifeste en milieu continental anaérobie riche en matière organique et en H_2S . La concentration des eaux sur ces milieux favorise la

TABLEAU V
Sol Salic carbonato-sulfaté alcalin (Durango, Mexique) (J.Y. LOYER, non publié)
Alkaline bicarbonate sulfate Salic soil
Suelo Salico carbonato-sulfatado alcalino

Efflorescences salines blanches (Thermonatrite - Trona) Extrait aqueux 1/5 - mé/l												
Oct. 89	CE mS/cm	Ca	Mg	K	Na	Σ^+	CO_3	HCO_3	Cl	SO_4	Σ^-	pH
D 12 Surface	93,9	0,11	0,03	65,4	1335	1400	558	699	6,3	79,5	1343	9,9
Eau de nappe superficielle - mé/l												
D 17	5,7	0,28	2,4	3,5	82,0	88,3	19,4	57,0	3,6	4,2	84,2	10,0

TABLEAU VI
Sol Salic carbonaté-basique (Lac Tchad) (CHEVERRY, 1974)
Very strongly alkaline Salic soil
Suelo Salico carbonatado básico

Croûte noire superficielle - Extrait 1/2 - mé/l												
Profil 1 Août 70	CE mS/cm	Ca	Mg	K	Na	Σ^+	CO_3	HCO_3	Cl	SO_4	Σ^-	pH
0-3 cm	17.5	tr.	tr.	13	240	253	30	175	13.5	13	231.5	10
3-6 cm	12.5	0.2	0.2	10	185	195.4	26	130	12	16.5	184.5	9.7
Nappe superficielle - mé/l												
10 cm	6.2	tr.	tr.	4.5	73	77.5	16.5	52.2	4.4	1.4	74.5	9.2



- △ SOLUTION DU SOL
 ▽ COMPLEXE D'ECHANGE
- ① DOMAINE DES SOLS SALIC
 ② DOMAINE DES SOLS SODIC
 ③ DOMAINE DES SOLS CALCIC, GYPSIC

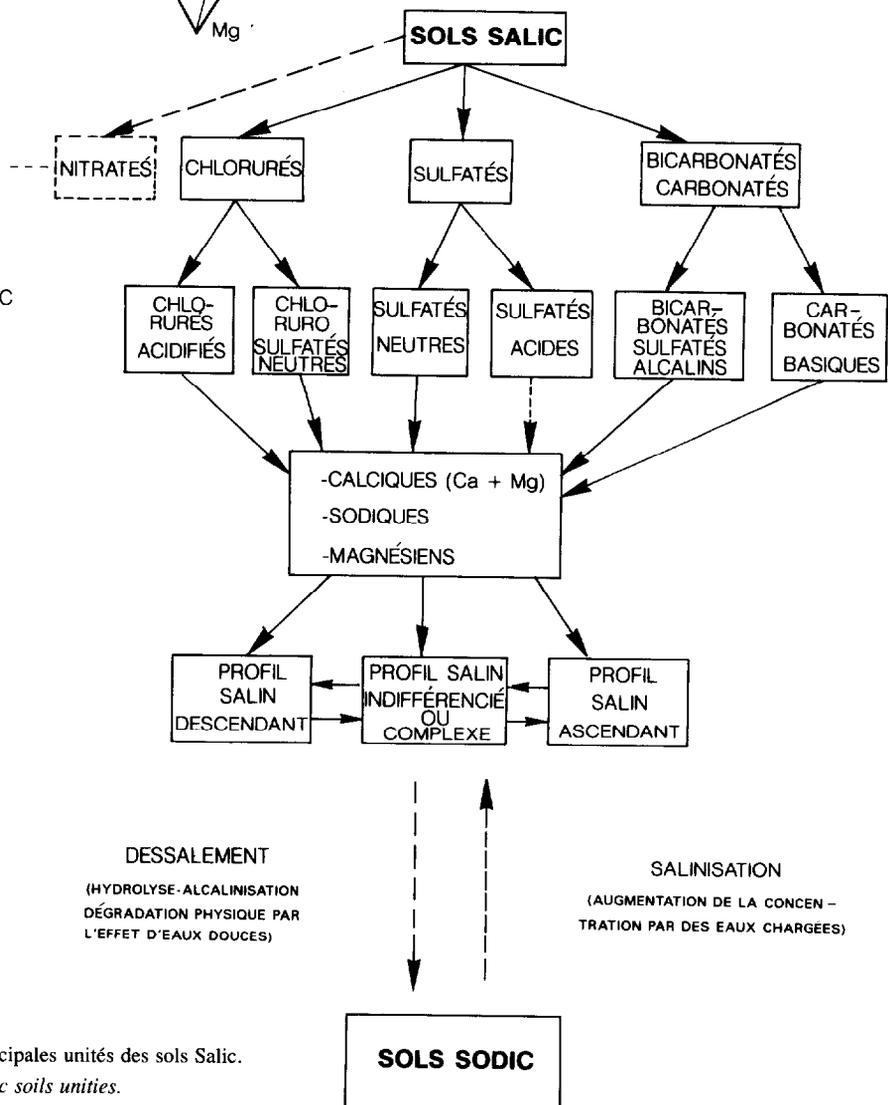


Fig. 3. - Représentation schématique des principales unités des sols Salic.
 Schematic diagram of main Salic soils unities.
 Representación esquemática de las principales unidades de suelos Salicos.

BIBLIOGRAPHIE

- ACSAD, 1980. – Soil classification Workshop, Damas, 171 p., multigr.
- AFES, 1990. – Référentiel Pédologique. Kyoto août 90 - INRA, France, 203 p.
- AFNOR, 1987. – Qualité des sols, méthodes d'analyse. 1ère éd. Paris. 135 p.
- AUBERT (G.), 1985. – Utilisation des terres et alimentation des populations des pays tropicaux en voie de développement. C.R. Ac. d'Agriculture de France. Tome 71, n° 10.
- BOIVIN (P.), 1984. – Étude pédologique de la vallée de Koubalan (Casamance). Étude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne. ORSTOM Dakar.
- BOLT (G.H.), 1979. – Soils chemistry. Vol. I et II. Elsevier, Amsterdam.
- CHEVERRY (Cl.), 1974. – Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Th. Strasbourg. 275 p.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1988. – Pédologie. Masson éd., 224 p.
- DUDAL (R.), 1990. – An International Reference Base for soil Classification (IRB). Transactions ISSS of com. V. Kyoto. : 38-42.
- FAO-UNESCO, 1988. – Soil map of the world. Revised legend. World Soil Ressources Report 60. FAO, Rome.
- FITZPATRICK (E.A.), 1980. – Soils, their formation, classification and distribution. Longmar.
- INRA, 1987. – Les cultures hors sol. 2ème éd., Paris, 409 p.
- ISSS, 1990. – Recent development in the preparation of an International Soil Reference Base. 14 th Inter. Congress of Soil Sc., Kyoto Japan. Transactions vol. V, com. V : 37-70.
- JOB (J.O.), LOYER (J.Y.), 1989. – Variations spatiales de la salinité globale dans la parcelle 2049 des Marismas du Guadalquivir. Orstom Montpellier/Inra Séville.
- KANWAR (J. S.), 1982. – Managing soil ressources to meet the challenges to mankind : Presidential address. 12 th Intern. Congress of Soil Science, New Delhi.
- LE BRUSQ (J.Y.), LOYER (J.Y.), MOUGENOT (B.), CARN (M.), 1987. – Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Sc. du Sol* n° 1987-3, vol. 5 : 173-184, Plaisir France.
- LOYER (J.Y.), 1989a. – Les sols Salic plutôt que Halic. Com. aux Journées IRB - Rennes, France, sept. 89.
- LOYER (J.Y.), 1989b. – Dégradation saline des sols induite par l'irrigation en domaine sahélien. *In* : « Le risque en agriculture ». Orstom Paris. pp. 531-539.
- LOYER (J.Y.), 1990. – Les sols salsodiques. *In* : Référentiel pédologique. AFES (Kyoto - août 90). Plaisir France. éd. Inra. 203 p.
- LOYER (J.Y.), GONZALEZ BARRIOS (J.L.), JOB (J.O.), 1989. – Les principaux faciès salins et leur expression dans les sols des régions chaudes. Actes Sém. Mapimi Mexique. Oct. 89. à paraître.
- MARIUS (C.), 1990. – Les sols sulfatés-acides. *In* : Référentiel pédologique. Afes (Kyoto - août 90). Plaisir France. éd. Inra. 203 p.
- RHOADES (J.D.), 1977. – Potential for using saline agricultural drainage water for irrigation. Proceedings of water management for Irrigation and Drainage. ASCE/Reno, Nevada.
- RISACHER (F.), 1978. – Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. *Cah. Orstom sér. Géologie*, vol. X, n° 1, 1978 : 37-48.
- RUELLAN (A.), 1988. – A Soil Reference System : why and how to establish it. Paper submitted at the meeting IRB. Rennes, France, sept. 89.
- SERVANT (J.), 1978. – La salinité dans les sols et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage. Bull. du BRGM, section IV, n° 2 : 123-142.
- SZABOLCS (I.), 1989. – Salt-affected Soils CRC Press Inc., Florida, 274 p.
- USDA, 1985. – Keys to Soil Taxonomy. Cornell University. USA.
- VALLES (V.), 1985. – Étude et modélisation du transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Th. INAP, Toulouse. N° 15, 150 p.