

I - EXPOSE DES RESULTATS

A - PROFILS SALINS D'ETE

Trois cas peuvent être distingués au vu des sols cités en exemple.

1 - le rapport Cl/SO_4 et le taux de $Cl^{(n)}$ présentent des valeurs assez constantes le long du profil et ce aussi bien en présence d'un profil salin de type A (station U) que d'un profil salin de type D (station CN). Dans ces cas, le profil des anions n'apparaît pas différencié.

2 - Le rapport Cl/SO_4 et le taux de Cl augmentent dans l'horizon superficiel ; c'est le cas des stations B_1 et B_2 , mais cette caractéristique est beaucoup plus accusée dans le cas du sol B_1 (profil salin de type A et présence de gypse en surface) que dans le cas du sol B_2 (profil salin de type D).

3 - Partant de valeurs minimales dans l'horizon sub-superficiel, le rapport Cl/SO_4 augmente d'une part dans l'horizon de surface situé au-dessus et d'autre part dans les horizons sous-jacents. C'est le cas de la station V qui présente un profil salin de type C. Les valeurs maximales du rapport Cl/SO_4 et du taux de Cl correspondent aux horizons les plus salés ; les valeurs minimales aux horizons les moins salés.

B - PROFILS SALINS D'HIVER

On assiste, pour de nombreux sols, à une plus nette différenciation des profils anioniques qui se manifeste - par rapport aux valeurs d'été - par une diminution du rapport Cl/SO_4 et du taux de Cl^- dans l'horizon supérieur et par une augmentation dans les niveaux sous-jacents du profil (voir annexe VI A et également figures (22-23-24).

Ces modifications sont enregistrées dans toutes les stations étudiées, sauf dans le cas de la station V qui conserve un profil comparable à celui que l'on avait pu observer en été (fig. 25).

II - COMMENTAIRES ET INTERPRETATION

Ils résultent de la comparaison des profils anioniques d'hiver et d'été. Il apparaît ainsi, au niveau des profils salins d'hiver, que le rapport Cl/SO_4 et le taux de Cl diminuent - par rapport aux valeurs d'été - dans l'horizon supérieur appauvri en sels et augmentent dans les horizons sous-jacents enrichis en sels. Ce fait semble indiquer que les chlorures sont plus facilement mobilisés et entraînés que les sulfates et que c'est l'afflux préférentiel de l'ion Cl^- au niveau du maximum de salinité qui entraîne une élévation du rapport Cl/SO_4 , alors que son départ préférentiel en surface provoque une diminution de ce rapport.

(n) - Cl^- en p. cent de la somme des anions ($Cl^- + SO_4^{=}$ + HCO_3^-)

Ce résultat confirme, sur le terrain, les données de la pédologie expérimentale (YAALON 1965 - FILIPOVSKY 1969 - HAMIDAMI 1969) prouvant que la mobilité des chlorures est plus grande que celle des sulfates dans un processus d'entraînement vers le bas.

Ce type de différenciation du profil ionique en période de désalinisation apparaît également bien vérifié dans le cas des sols salés d'Espagne que nous avons prélevés en décembre 1972. Cette augmentation du rapport Cl/SO_4 avec la profondeur et avec la salinité apparaît aussi nettement dans le sol non gypseux (I) que dans le sol gypseux (II).

Profondeur en cm	STATION I			STATION II (sol gypseux)		
	Lmmhos/cm	Cl/SO ₄	Cl %	Lmmhos/cm	Cl/SO ₄	Cl %
0-5	1,4	0,8	29	14	0,9	47
5-10	1,7	1,6	50	22	1,0	49
10-20	2,8	3,2	65	40	1,7	61
20-30	5,2	4,0	71	46	2,0	65
30-40	11,1	5,4	80	54	2,7	72
40-50	14,8	5,3	81	45	2,3	69
50-60	18,9	7,5	85	34	2,2	68
60-70	23,4	9,1	88	15	1,6	61
70-80	26,2	8,0	87	13	1,0	51
80-90	25,2	8,5	87	11	0,9	48
90-100	25,2	8,5	88	10	0,9	46

TABLEAU n° 32 - Valeurs de Cl % et de Cl/SO₄ pour deux sols salés d'Espagne

Cas des profils d'été

Le fait que le rapport Cl/SO_4 augmente vers la surface dans le cas des stations B₁ et B₂ et que cette augmentation soit particulièrement marquée dans le cas du sol B₁ gypseux apparaît comme une conséquence logique du phénomène de salinisation. POLYNOV (1932) a en effet montré expérimentalement que le rapport Cl/SO_4 augmente vers la surface au cours du processus de salinisation per ascensum d'une colonne de sols.

Ce fait traduit la plus grande mobilité de l'ion Cl⁻ et la formation de gypse qui peut intervenir en conséquence des phénomènes d'échange de cations (voir plus loin). La formation de gypse, peu soluble, entraîne en effet une élévation du rapport Cl/SO_4 et c'est principalement la raison de l'augmentation du paramètre dans le cas du profil B₁ (gypse dosable) et dans le cas du profil B₂ (gypse dosable uniquement en profondeur).

Cas de la station V

Dans ce cas, le rapport Cl/SO_4 présente, hiver comme été, des valeurs minimales au niveau du minimum sub-superficiel de salinité. Il augmente dans les horizons sous-jacents où il se stabilise vers les valeurs de 11 ; il augmente également dans l'horizon de surface où il atteint 15.

Ce fait traduit une dynamique particulièrement complexe de ce profil où interviennent :

- les inondations périodiques qui appauvrissent en sels la partie supérieure du profil et entraînent ces sels en profondeur ; c'est ce qui expliquerait le minimum de salinité et les valeurs minimales du rapport Cl/SO_4 dans l'horizon 3-30 et l'augmentation de ces valeurs dans les niveaux sous-jacents,
- l'évaporation qui provoque une concentration saline superficielle avec augmentation du rapport Cl/SO_4 sous l'effet d'un afflux préférentiel des chlorures et d'une légère précipitation du gypse dans l'horizon 0-3.

Le profil salin de type C, constaté à Villeneuve-de-la-Raho, serait donc la conséquence de ces deux actions dont la prise en compte permet d'expliquer la distribution particulière des sels. Ce profil traduit une reprise du processus de salinisation per ascensum, suite à une période de désalinisation.

Mais la dynamique des sels apparaît différente à l'examen du profil réalisé au printemps 1973. Dans ce cas (voir sous-chapitre 423 I, C) la forme du profil salin est intermédiaire entre C et A, c'est-à-dire qu'il y a un apport de sel au niveau de l'ancien minimum sub-superficiel. Cet apport semblant procéder d'un transfert per ascensum qui se caractérise, par rapport au profil d'hiver, par une diminution de la salinité en profondeur et une augmentation dans la partie supérieure du profil (comparaison des courbes 2 et 3 sur la figure 17, station V).

Cette interprétation est confirmée par l'examen du profil des valeurs Cl/SO_4 où le rapport conserve des valeurs élevées, supérieures à 10, sur l'ensemble de la tranche de sol étudiée. Le rapport Cl/SO_4 a donc augmenté dans la zone sub-superficielle où il atteint les mêmes valeurs que dans les horizons profonds. Ce fait traduit un apport de chlorures en relation avec un processus de salinisation per ascensum pouvant conduire à l'individualisation d'un profil salin de type A.

La transformation constatée dans la différenciation du profil résulte d'une période particulièrement sèche, avec absence d'inondations entre les prélèvements 2 et 3.

Par contre, les observations de terrain ont montré l'existence d'inondations avant le prélèvement d'été (cuvette inondée au printemps 72) et entre les prélèvements d'été et d'hiver (cuvette inondée en automne 1972).

De ces divers commentaires, il ressort que l'étude des variations du rapport Cl/SO_4 constitue un indice intéressant, traduisant la dynamique des sels dans le sol et permettant une meilleure compréhension de son histoire.

432 - PROFILS DES CATIONS

Ces profils d'ions sont examinés au niveau des stations du Roussillon déjà mentionnées, dont les résultats sont exposés dans les annexes VI B, C, D, E et représentés sur différentes figures (20-27). La lecture de ces tableaux conduit aux commentaires suivants.

I - CARACTERISTIQUES GENERALES DES PROFILS CATIONIQUES

En ce qui concerne la distribution des cations dans le profil, deux cas peuvent être distingués quand on considère les proportions de ces ions dans les extraits de pâtes saturées, lesquelles varient assez notablement entre la base et la surface du profil.

. Premier cas : sols dont le profil cationique montre un enrichissement en calcium facilement soluble⁽¹⁾ dans les niveaux superficiels.

. Deuxième cas : sols dont le profil cationique montre un appauvrissement en calcium facilement soluble dans les niveaux superficiels.

C'est principalement en considérant les proportions relatives du calcium par rapport à la somme des cations solubles que cet appauvrissement ou cet enrichissement ont pu être mis en évidence (voir annexes VI, C, D, E).

a - Etude du premier cas

Cette caractéristique est bien nette, au niveau des profils salins d'été, dans le cas des stations V, CN, B₂ et M qui correspondent à des sols non gypseux (voir annexe VI, C, D, E et figures 20 et 21). On constate une augmentation du taux d'alcalino-terreux dans l'horizon de surface, cette caractéristique étant surtout très marquée en ce qui concerne le calcium, qui peut représenter dans le cas des stations B₂ et V jusqu'à 30 % de la somme des cations, le magnésium ne dépassant pas 20 %. Ces taux maximums correspondent à la couche superficielle du sol n'excédant pas 10 cm d'épaisseur, mais l'augmentation du taux d'alcalino-terreux vers la surface se développe dans une couche pouvant atteindre jusqu'à 30 cm d'épaisseur.

L'augmentation du taux de calcium se manifeste par une élévation du rapport Ca/Mg à mesure que l'on se rapproche de la surface. On trouve également dans ces zones enrichies en Ca⁺⁺ soluble les plus faibles valeurs de Na/Ca + Mg, de Na/Mg et du paramètre S.A.R. (voir figures 23-24-25 et également annexes VI, C, D, E).

Il faut noter que l'horizon présentant ce taux maximum d'alcalino-terreux correspond à un minimum de salinité dans le cas des profils B₂, CN et M et est à cheval sur un maximum et un minimum dans le cas du profil V. Il n'est donc pas obligatoirement associé à un maximum épipédonique de salinité. Il apparaît d'autre part, en prenant l'exemple du sol de la station V, qu'un tel type de distribution des cations se manifeste dans des sols peu ou non gypseux, où les chlorures sont les anions dominants ce qui laisse supposer (station V) que le calcium est associé au chlorure sous forme d'un sel très soluble (Ca Cl₂).

(1) - C'est-à-dire soluble dans l'extrait aqueux à saturation

Enfin, cette distribution du calcium n'est pas conforme à celle du sodium dont les maximums se situent plus profondément dans le profil (voir fig. 20). Il y a donc dans le sol, une distribution remarquable du calcium soluble qui va se traduire, dans le profil des sels, par une localisation particulière des produits calciques tels que le chlorure de calcium. Ces aspects seront examinés dans le sous-chapitre 44 relatif au profil des sels.

b - Etude du deuxième cas : profil B₁

Dans ces sols, la proportion de calcium de l'extrait saturé diminue dans la partie supérieure du profil alors que cette proportion augmentait dans le cas précédent (voir fig. 27). D'autre part, on constate par un dosage spécifique à l'acétone la présence de gypse dans l'horizon superficiel du sol B₁ alors que ce sel n'a pas été mis en évidence dans les autres sols illustrant le cas précédent.

On en déduit que le calcium n'a pas disparu, mais se trouve sous une forme qui est moins facilement solubilisable que dans le cas précédent, ce qui explique que la proportion de calcium soluble de l'extrait de pâte saturée diminue dans la zone supérieure du profil où le gypse se forme, ce minéral étant mal dissous dans l'extrait de sol (voir chap. 3).

Si après dosage spécifique du gypse, on procède à l'intégration de ces ions $\text{SO}_4^{=}$ et Ca^{++} dans l'inventaire ionique établi au niveau de l'extrait de pâte saturée on retrouve un maximum de calcium dans la partie supérieure du profil ainsi d'ailleurs qu'un second maximum situé plus en profondeur et qui correspond à une accumulation de gypse sous-jacente (voir figure 28).

Le phénomène général d'augmentation du calcium solubilisable dans la partie supérieure du profil se trouve donc encore vérifié, la différence avec le cas précédent étant que le calcium ne reste pas sous forme facilement solubilisable mais passe sous forme de gypse beaucoup moins soluble.

II - CAS DES PROFILS CATIONIQUES D'HIVER

La caractéristique principale qui se dégage de l'examen comparé des profils cationiques d'hiver et d'été, concerne les valeurs du magnésium solubilisable (voir annexe VI B, C, D). On constate en effet, que d'une manière assez générale, les extraits de sol sont plus riches en magnésium pour les échantillons d'hiver que pour ceux d'été, cette caractéristique apparaissant :

- à l'examen des valeurs absolues quand on compare deux échantillons de salinités égales,
- à l'examen des proportions de cations dans l'extrait de sol,
- à l'examen des paramètres Na/Mg, Ca/Mg et Na/Ca + Mg dont les valeurs d'hiver sont inférieures aux valeurs d'été (voir fig. 22 à 26).

La tendance constatée est donc celle d'une plus grande solubilisation du magnésium au niveau des échantillons de la période hivernale.

Une première explication réside dans un échange de cations entre la solution saline et le matériau pédologique, le passage Mg échangeable \rightarrow Mg en solution -en échange d'ions sodium- étant plus prononcé qu'il ne l'était en été. En d'autres termes l'échange sol (Na, Mg, Ca) \rightleftharpoons solution (Na, Mg, Ca) se déplacerait dans le sens d'une augmentation de Mg en solution et d'une diminution de Mg échangeable avec parallèlement une diminution de Na en solution et une augmentation de Na échangeable.

Dans cette hypothèse, une augmentation de la sodicité doit donc apparaître à l'analyse au niveau des valeurs d'hiver. Corrélativement, le paramètre S. A. R. qui est proportionnel au taux de Na échangeable (voir plus loin) doit également augmenter.

Une seconde explication fait intervenir la plus grande solubilisation du magnésium à partir de sels peu solubles tels que les carbonates alcalino-terreux quand le milieu est plus riche en gaz carbonique dissous. Nous ne retiendrons cette hypothèse que très secondairement dans le cas qui nous intéresse et seulement dans des profils, où la dolomie a été mise en évidence sur les diagrammes de rayons X (profil V par exemple).

433 - CONCLUSION A L'ETUDE DES PROFILS D'IONS

La connaissance de ces données constitue tout d'abord un complément aux commentaires et interprétations qui résultaient de l'étude du profil salin général. Elle apporte ensuite de nouveaux éléments permettant de préciser certains aspects du transfert des produits dissous dans le sol.

L'étude de la distribution des anions majeurs (Cl^- et $\text{SO}_4^{=}$) a montré que les variations du rapport Cl/SO_4 dans le profil étaient reliées aux variations de salinité et que, la diminution de salinité constatée en hiver, dans l'horizon de surface des stations B_2 , U, CN et B_1 s'accompagnait d'un abaissement des valeurs du paramètre Cl/SO_4 par rapport à celles constatées en été. Cet abaissement traduit un départ préférentiel de l'ion Cl^- par rapport à l'ion $\text{SO}_4^{=}$ dans les horizons appauvris en sels. Il résulte d'une plus grande mobilité de l'ion Cl^- par rapport à l'ion $\text{SO}_4^{=}$ et ces constatations sont en accord avec les résultats de la pédologie expérimentale.

Dans les horizons sous-jacents enrichis en sels, ce paramètre augmente par rapport aux valeurs d'été ce qui traduit -en l'absence de toute précipitation de gypse- un afflux préférentiel de l'ion Cl^- par rapport à l'ion $\text{SO}_4^{=}$, au niveau du maximum de salinité.

Il apparaît ainsi, que d'une manière générale, le rapport Cl/SO_4 d'hiver augmente avec la profondeur et avec la salinité constituant ainsi une image du phénomène de désalinisation. Les valeurs d'été par contre ne permettaient pas de conclure à une dynamique préférentielle de ces anions au cours du processus de salinisation per ascensum, les variations enregistrées résultant alors principalement de la présence de gypse (profil B_1).

Une seule exception se trouvait au niveau de la station V, qui dans les deux cas, présentait un profil du rapport Cl/SO_4 de type "hiver" et ne renfermait pas de gypse.

Ce fait traduit le lessivage des sels sous l'influence d'inondations périodiques et dans ces conditions Cl/SO_4 augmente avec la profondeur. Au cours du processus de salinisation qui se traduit par le passage d'un profil salin de type C vers un profil salin de type A, le rapport Cl/SO_4 s'uniformise sur l'ensemble du profil en relation avec un transfert ascendant des sels.

Cette interprétation dynamique des variations d'un paramètre ionique est possible pour les anions car ceux-ci ne sont que très faiblement retenus par les composants du sol et n'entrent pas, comme les cations, dans des mécanismes d'échange d'ions.

D'une manière très générale, les anions sont au contraire soumis à un effet de répulsion de la part des particules d'argile chargées négativement. Cet effet de répulsion donne naissance à un déficit local en anions dans l'environnement des particules d'argile. On parle alors de "l'effet d'exclusion d'anions" ou de "l'adsorption négative" (de HAAN et BOLT, 1963 et El. SWAIFY et al. 1967, THOMAS et SWOBODA, 1970). C'est seulement sur les côtés des particules d'argile, chargés positivement, que les anions sont susceptibles d'être retenus, cette propriété étant plus nette pour les ions $SO_4^{=}$ qu'elle ne l'est pour les ions Cl^- .

Il y a donc dans le sol une séparation entre les anions et les cations de la solution saline. Les premiers restent dans la solution inter-particulaire sous l'effet de répulsion alors que les seconds accèdent aux espaces interfeuillet. Les études menées par THOMAS et SWOBODA montrent que cet "effet d'exclusion d'anions" joue un rôle important en accroissant le mouvement des sels dans des sols argileux à forte capacité d'échange, de type vertisol.

Alors que les profils d'anions peuvent s'interpréter en termes de dynamique des sels dans le profil en raison de leur faible affinité avec le matériau pédologique, il n'en est donc plus de même des profils de cations dont les variations résultent en grande partie d'échanges ioniques avec les minéraux argileux du sol. Compte-tenu de ces échanges, il n'est pas possible de voir dans les variations de Ca/Mg ou $\frac{Na}{Ca + Mg}$, des indices traduisant le mouvement différentiel des cations dans le profil. Mais ces profils cationiques permettent de montrer que les alcalino-terreux ont tendance à s'accumuler à la surface du sol en réponse au phénomène de sodisation du complexe par la solution saline imprégnant le sol, le milieu pédologique étant alors, par échange de cations, pourvoyeur de calcium lequel passe dans la solution du sol, sous forme soluble (voir plus loin).

Une nouvelle étape dans l'interprétation combinée de ces résultats va faire l'objet du sous-chapitre suivant concernant le profil des sels.

44 - INTERPRETATION DES DONNEES DE L'ANALYSE IONIQUE
EN TERMES D'ESPECES SALINES

Les différents types de profils des sels et leur signification

Il a été procédé, dans le sous-chapitre 43, à l'étude des distributions ioniques (profils d'ions) dans différents exemples de sols halomorphes. Il a été constaté que la composition ionique des extraits aqueux de sols varie pour un profil donné, entre la base du profil (niveau de la nappe phréatique salée) et la surface du sol. Ces variations intéressent la composition en anions majeurs (Cl^- et SO_4^{2-}) et en cations majeurs (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}).

Dans le premier cas elles sont facilement mises en évidence par l'examen des taux relatifs de Cl^- et de SO_4^{2-} , ainsi que par l'étude du rapport de ces deux anions. Dans le second cas elles apparaissent également à l'examen des taux relatifs de cations ainsi qu'après étude de différents paramètres tels que $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{++}$, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, S. A. R.

Certaines interprétations résultant de cette analyse ont déjà été données en séparant l'étude des anions de celle des cations. Il est maintenant nécessaire de relier ces deux catégories de résultats, dans une interprétation globale, faisant intervenir la formation d'espèces salines, par combinaison des anions et cations, en se plaçant dans les conditions d'une évaporation isotherme de la solution saline.

I - EXPRESSION HYPOTHETIQUE DE LA COMPOSITION SALINE
PRINCIPES DE LA FORMATION DES SELS

Au cours de la concentration d'une saumure marine, sous l'effet d'une évaporation isotherme, on assiste à l'apparition successive de différents sels dont la séquence -donnée par STEWART⁽¹⁾ (1963) d'après des données de USIGLIO (1849)- est la suivante :

Ca CO_3 , Ca SO_4 , Na Cl , Mg SO_4 , Mg Cl_2 , Na Br , K Cl .

L'examen du tableau de précipitation des sels montre que les domaines de formation se chevauchent mais que, toutefois, on peut considérer :

- que tout le calcaire et la plus grande partie du gypse se sont formés quand commence la précipitation de Na Cl ,
- que plus de 90 % de Na Cl se sont formés quand se dépose la plus importante partie de Mg SO_4 .

D'après SVERDRUP, JOHNSON et FLEMING (1949)⁽²⁾ la composition hypothétique de l'eau de mer, en taux pondéral, est la suivante : 78 % de Na Cl + 9,2 % de Mg Cl_2 + 6,5 % de Mg SO_4 + 3,8 % de Ca SO_4 + 2,1 % de K Cl + 0,3 % de Ca CO_3 + 0,3 % de sels divers.

(1) - in BLATT, MIDDLETON et MURRAY (1972)

(2) - in O. BRAISCH (1971)

Des données précises sur les produits successifs de l'évaporation d'une eau de mer à 25°C sont fournies par O. BRAITSCH (1971). Après formation de Ca CO₃ et du gypse (Ca SO₄, 2 H₂ O) la séquence saline est la suivante ; dans le cas "d'un équilibre stable sans réaction aux points de transition" :

- 1 - 70 % Na Cl (halite) + 30 % bloedite (Na₂, Mg (SO₄)₂, 4 H₂ O)
- 2 - 20 % Na Cl + 80 % epsomite (Mg SO₄, 7 H₂ O)
- 3 - 30 % Na Cl + 30 % epsomite + 40 % kainite (K Mg SO₄ Cl 11/4 H₂O)
- 4 - 20 % Na Cl + 80 % kainite
- 5 - 10 % Na Cl + 20 % kieserite (Mg SO₄, H₂O) + 70 % carnallite (K Mg Cl₃, 6 H₂O)
- 6 - 100 % bischofite (Mg Cl₂, 6 H₂ O).

La réalité physique de la précipitation des sels hors d'une saumure apparaît donc très complexe, mais il est cependant possible de dégager une séquence moyenne d'apparition des sels qui servira de modèle pour constituer successivement les différents produits. Cette séquence est exprimée en termes d'espèces chimiques à 25° C ; elle ne tient pas compte des sels potassiques.



C'est donc dans cet ordre que seront successivement constitués les différents sels, par combinaisons préférentielles des anions et cations en milliéquivalents, suivant la démarche figurant ci-après.

On commence par former Ca CO₃ en combinant les ions Ca⁺⁺ et HCO₃⁻. Puis on passe à la constitution de Ca SO₄ en combinant les ions Ca⁺⁺ et SO₄⁼ s'il reste des ions Ca⁺⁺.

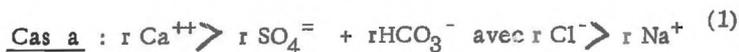
En troisième lieu on procède à la formation de Na Cl en utilisant le maximum d'ions Cl⁻ et Na⁺.

Dans une quatrième phase, on constitue, si cela est possible, les sulfates de sodium et magnésium en commençant par le sulfate de sodium.

Enfin, on forme les chlorures alcalino-terreux, Mg Cl₂ puis Ca Cl₂.

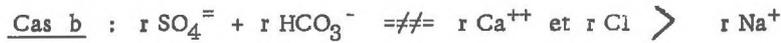
Si après formation de Ca CO₃ à partir de la combinaison des anions HCO₃⁻ et Ca⁺⁺, il demeure un excès d'ions HCO₃⁻, il sera alors possible de constituer Na HCO₃. S'il existe des anions CO₃⁼, ils seront préférentiellement utilisés dans la formation de Na₂CO₃ qui constitue le carbonate le plus soluble.

En se basant sur l'hypothèse choisie, il est possible de distinguer plusieurs cas selon la composition ionique des extraits salins.



Dans ce cas, après formation de (HCO₃)₂ Ca et de CaSO₄, tous les ions SO₄⁼ et HCO₃⁻ sont utilisés et il reste un excès de calcium ; les seuls sels possibles sont donc des chlorures. Ils seront alors constitués dans la succession Na Cl, Mg Cl₂ et CaCl₂. Les sels formés dans cette voie seront donc : CaCO₃, Ca SO₄, Na Cl, Mg Cl₂, Ca Cl₂.

(1) - les valeurs r Ca⁺⁺, r Na⁺, r Cl⁻ etc. désignent les quantités d'ions exprimées en me/litre



Dans ce cas, après formation de $(\text{HCO}_3)_2 \text{Ca}$ et CaSO_4 , tous les ions HCO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ et Ca^{++} sont utilisés. Les seuls sels possibles seront alors NaCl et MgCl_2 . Les sels formés dans cette voie seront donc : CaCO_3 , CaSO_4 , NaCl , MgCl_2 .



Dans ce cas, après formation de $(\text{HCO}_3)_2 \text{Ca}$ et CaSO_4 tous les ions Ca^{++} et HCO_3^- ont été utilisés et il reste un excès d'ions $\text{SO}_4^{=}$.

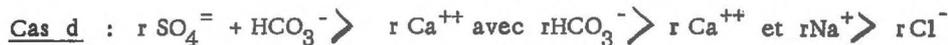
Deux sous-cas peuvent être envisagés :



Tout le sodium est utilisé dans la formation de NaCl . Le seul sulfate possible est MgSO_4 et l'excès de Cl^- sert à la constitution de MgCl_2 . Les sels formés dans cette voie sont : CaCO_3 , CaSO_4 , NaCl , MgSO_4 , MgCl_2 .



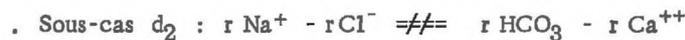
Il reste un excès de Na^+ après formation de NaCl et tout le stock d'ions Cl^- a été utilisé. Il est alors possible de constituer les deux sulfates Na_2SO_4 et MgSO_4 . Les sels formés dans cette voie sont : CaCO_3 , CaSO_4 , NaCl , Na_2SO_4 , MgSO_4 .



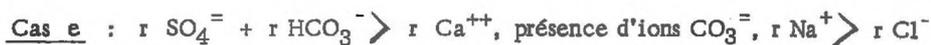
Dans ce cas, il ne reste plus d'ions Ca^{++} pour former le gypse après constitution de $(\text{HCO}_3)_2 \text{Ca}$ et il reste un excès d'ions $\text{SO}_4^{=}$ et d'ions HCO_3^- . Après formation de NaCl , il est procédé à celle de HCO_3Na .



Il reste un excès de Na^+ après formation de HCO_3Na et deux sulfates pourront être constitués : Na_2SO_4 et MgSO_4 . Les sels formés dans cette voie seront : CaCO_3 , NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , MgSO_4 .



Il ne reste pas d'excès de Na^+ après formation de HCO_3Na et un seul sulfate (MgSO_4) sera possible. Les sels formés dans cette voie seront : CaCO_3 , NaCl , NaHCO_3 , MgSO_4 .



On se ramènera aux sous-cas c_2 , d_1 , d_2 en formant en plus de Na_2CO_3 après constitution de NaCl .

Les différentes séries salines reconnues dans cette démarche peuvent être désignées par les termes suivants :

1 - Voie neutre : absence de carbonate et bicarbonate de sodium

A - Série chlorurée ($Cl/SO_4 > 6$, atteignant et dépassant 10)

Cas a : chlorurée Na - Mg - Ca

Cas b : chlorurée Na - Mg

B - Série chloruro-sulfatée ($Cl/SO_4 < 6$)

Cas c :

c₁ : chlorurée Na, Mg, sulfatée Ca, Mg

c₂ : chlorurée Na, sulfatée Na, Mg Ca

2 - Voie alcaline : présence de bicarbonate et/ou carbonate de sodium

A - Série bicarbonatée sodique

Cas d :

d₁ : chlorurée Na, sulfatée Na, Mg

d₂ : chlorurée Na, sulfatée Mg

B - Série carbonatée sodique

Cas e :

e₁ : chlorurée Na, sulfatée Ca, Mg, Na

e₂ : chlorurée Na, sulfatée Mg, Na

e₃ : chlorurée Na, sulfatée Mg

Partant de la composition des sels en termes d'espèces chimiques, il est possible de prévoir la nature des espèces minérales susceptibles de se former lors des processus naturels de cristallisation à la surface des sols salés. Dans les espèces minérales de la voie neutre, les données fournies par O. BRAITSCH 1971 conduisent à distinguer :

- dans le cas a :

- le carbonate de calcium ($CaCO_3$)
- le gypse $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$
- le chlorure de sodium ou halite ($Na Cl$)
- la tachyhydrite ($Ca Mg_2 Cl_6 \cdot 12 H_2O$)
- la bischofite ($Mg Cl_2 \cdot 6 H_2O$)

- dans le cas b : les mêmes sels sauf la tachyhydrite

- dans le cas c₁ :

- le carbonate de calcium
- le gypse
- le chlorure de sodium
- la kieserite ($Mg SO_4 \cdot H_2O$) et l'epsomite ($Mg SO_4 \cdot 7 H_2O$)
- la bischofite ($Mg Cl_2 \cdot 6 H_2O$)

- dans le cas c_2 :

- le carbonate de calcium
- le gypse
- le chlorure de sodium
- la bloedite ($Na_2 Mg (SO_4)_2 \cdot 4 H_2 O$)
- la kieserite et l'epsomite

C'est donc parmi ces minéraux que l'on doit principalement rechercher les espèces salines naturelles cristallisant dans les horizons d'accumulation des sols salés de la série neutre. Il faut remarquer que la kieserite est plus probable que l'epsomite. On peut noter d'autre part le caractère fortement hygroscopique des chlorures alcalino-terreux (bischofite, tachyhydrite).

II - APPLICATION A L'ETUDE DU PROFIL DES SELS DANS QUELQUES STATIONS DU ROUSSILLON

A - ETUDE DU SOL DE LA STATION V : L'APPARITION ET L'ACCUMULATION SUPERFICIELLE DU CHLORURE DE CALCIUM

1 - Rappel des caractéristiques ioniques (voir fig. 20 et 25 et annexes VI A, B,C)

- Milieu fortement salé caractérisé par une large abondance des chlorures par rapport aux sulfates : $Cl/SO_4 > 6$, atteignant et dépassant 10, dans les extraits de sol et dans la nappe.

- Gypse absent, ou présent en faible quantité.

- Dans l'extrait de sol, variation de la composition cationique le long du profil se traduisant par une importante augmentation de la teneur en calcium soluble dans l'horizon superficiel. C'est ainsi que le calcium ne représente que 2 à 5 % de la somme des cations dans la partie inférieure du profil et atteint le taux de 20 à 30 % dans la partie superficielle.

La composition des extraits de sol, pour quelques horizons est rappelée dans le tableau ci-dessous (en me/l).

Profondeur cm	Cl^-	$SO_4^{=}$	HCO_3^-	Cl/SO_4	Na^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Ca % de la somme des cations
0-3	1640	32	20	51	976	398	320	24
a 3-10	365	30	12	12,3	280	70	55	17
10-20	287	28	12	10,3	230	48	47	15
30-40	288	30	10	9,7	268	19	41	6
50-60	310	30	10	10,3	310	11	30	3
70-80	325	29	12	11,2	320	10	29	2,5
c1 90-100	380	34	10	11,2	370	11	40	2
110-130	425	32	10	13,4	424	10	42	1,5
Nappe	770	52	20	14,8	760	24	56	2,8

TABLEAU n° 33 - Inventaire des ions en me/l dans le profil salin pour la station V (Mars 1973)

2 - Formation du profil des sels

Dans les 3 premiers niveaux du profil, on se trouve dans le cas a. Dans les horizons sous-jacents on se trouve dans le sous-cas c₁. En formant successivement les espèces salines chimiques, on aboutit aux données suivantes :

Profondeur cm	ESPECES SALINES CHIMIQUES						
	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂
0-3	20	32	976	0	0	320	345
3-10	12	30	280	0	0	55	28
10-20	12	28	230	0	0	47	8
30-40	10	9	268	0	21	20	0
50-60	10	1	310	0	28	0	0
70-80	10	0	320	0	29	tr.	0
90-100	10	0	370	0	34	5	0
110-130	10	0	424	0	32	tr.	0
Nappe	20	4	760	0	48	8	0

TABLEAU n° 34 - Distribution hypothétique des sels en me après évaporation d'un litre de solution (Station V, mars 1973)

Ce bilan met en évidence un processus de différenciation du profil des sels qui se caractérise, dans l'horizon de surface, par une accumulation des produits solubles sous la forme d'un mélange de trois chlorures avec, en particulier, l'apparition de CaCl₂ qui n'existe ni dans la nappe ni dans la partie profonde du sol.

Dans la partie supérieure du sol, les espèces minérales susceptibles d'apparaître par cristallisation sont principalement : le calcaire, le gypse, le chlorure de sodium, la bischofite et la tachyhydrite. La présence des chlorures alcalino-terreux hygroscopiques se traduit par l'aspect humide et foncé de la surface du sol (salant humide).

Dans la partie profonde, on note principalement le calcaire, le chlorure de sodium, la kieserite et l'epsomite et un peu de bischofite. La même composition caractériserait la cristallisation de la nappe.

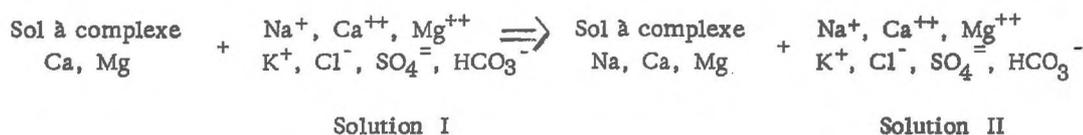
3 - Interprétation

L'accumulation des chlorures alcalino-terreux et en particulier l'apparition du chlorure de calcium dans l'horizon supérieur peuvent être interprétées comme la conséquence de phénomènes pédologiques générateurs de transformations salines. Plusieurs mécanismes peuvent être envisagés.

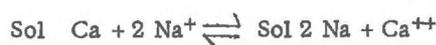
a - Les échanges cationiques entre les minéraux argileux et la solution saline

Ils procèdent principalement d'une adsorption de Na⁺ par le sol et d'une cession de Ca⁺⁺ qui passe en solution. Cette cession est d'autant plus accentuée que le pouvoir sodisant de la solution est élevé et que la capacité d'échange du matériau est forte (voir plus loin sous-chapitre 45).

Dans ces conditions, la solution saline issue de l'échange se trouve enrichie en calcium par rapport à la solution initiale, la réaction d'échange pouvant se formuler comme suit :



soit plus simplement :



Les expériences de KRUPKIN (1963), de SZABOLCS et LEZTAK (1968), de MASSOUMI (1968) et de JABER (1970) confirment ce processus et expliquent l'accumulation du calcium dans la partie supérieure du profil. Ces auteurs montrent en effet, qu'au cours du processus de salinisation, per ascensum, d'une colonne de sol, par du chlorure de sodium, la solution saline imprégnant le sol voit sa composition cationique varier, cette variation résultant de l'apparition du calcium et du magnésium issus des phénomènes d'échange entre la solution sodique et le matériau.

On remarque que la quantité de calcium en solution augmente vers la surface où se situe le maximum. Partant d'une solution de NaCl à la base de la colonne, on trouve à la surface du sol, un mélange de chlorures de Na, Ca et Mg.

La sodisation du sol de la station V est confirmée par l'étude de son complexe absorbant (voir plus loin sous-chapitre 45) qui présente un taux élevé de sodium échangeable (voir fig. 31 et annexe XD).

Afin que cette interprétation concernant l'échange des cations soit crédible, il est nécessaire que les valeurs des cations solubles (et en particulier du calcium) mesurées dans l'extrait aqueux de sol soient du même ordre de grandeur que la potentialité de cession de ces cations par le sol.

Considérons un horizon de sol V dont le taux de sodium échangeable est d'environ 50 % et dont la capacité d'échange est de 25 me/100g. Dans ces conditions, on peut admettre que le sol a pu céder environ 12 me de Ca⁺⁺ pour 100 g de terre en échange de 12 me de Na.

Ramenés en me/l pour être comparés au calcium soluble dosé dans l'extrait de sol, ces 12 me représentent -sachant qu'on a ajouté 180 cc d'eau à 300 g de terre pour préparer l'extrait- : $12 \cdot 000 / 6 = 200 \text{ me/l}$ de Ca⁺⁺. Un tel résultat explique facilement les valeurs élevées du Ca⁺⁺ soluble dans l'horizon de surface, les ordres de grandeur étant comparables.

Compte-tenu de ces ordres de grandeur comparables des éléments solubles et échangeables, même dans le cas des sols très salés, il est logique d'admettre que les phénomènes d'échange de cations puissent principalement expliquer les transformations affectant la composition de la solution saline au cours de l'imprégnation du sol.

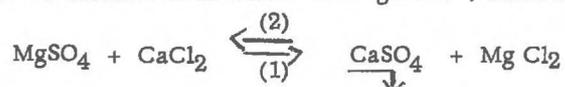
b - La dolomitisation de CaCO₃

D. J. SCHERMAN (1966)⁽¹⁾ voit, dans la dolomitisation d'un sédiment hôte initialement calcaire, la principale cause de la transformation chimique d'une eau marine au cours de son cheminement au sein d'une boue calcaire. Il en résulte une "saumure ultime" de faciès chloruré-calcique. Dans ce mécanisme, il y aurait donc une fixation de Mg dans le carbonate et une libération de Ca en solution suivant la réaction : $Mg^{++} + 2 CaCO_3 \rightarrow CaCO_3, MgCO_3 + Ca^{++}$.

Ce mécanisme est très possible dans le cas du sol de la station V où la dolomie a été mise en évidence par l'étude aux rayons X (voir annexe V A) mais on ne peut le considérer comme l'unique responsable des transformations constatées car, dans ce cas, on assisterait à une diminution du taux de Mg⁺⁺ dans les zones du profil où le taux de Ca⁺⁺ augmente ce qui n'est pas observé.

c - Autres transformations chimiques

L'analyse du profil des sels montre, que dans la partie supérieure du sol, Mg SO₄ disparaît en même temps qu'apparaît CaSO₄. Cette transformation peut être expliquée par la réaction chimique entre le chlorure de calcium et le sulfate de magnésium, selon l'équation (1) :



La précipitation du gypse entraîne le déplacement de l'équilibre dans le sens (1) jusqu'à épuisement de Mg SO₄.

Les conditions sont d'autre part remplies pour que se forme la tachydrite à partir des chlorures alcalino-terreux :



d - Conclusion

La présence d'une importante fraction de calcium sous forme de chlorure dans l'horizon superficiel, apparaît donc comme la conséquence d'interactions sol-solution où le phénomène d'échange de cations joue très certainement le rôle le plus important. Le phénomène de dolomitisation peut également être pris en compte dans l'exemple choisi. Les différents produits formés peuvent également réagir entre eux, ce qui influence le profil des sels.

Dans le cas du sol de la station V, le calcium issu de ces transformations reste principalement sous forme soluble du fait de la pauvreté du milieu en ions SO₄⁼ ce qui limite la formation du gypse. En la seule présence de chlorure, le calcium reste donc mobile et peut s'accumuler en surface avec les autres chlorures.

Cet ensemble de données met donc en évidence un premier exemple de différenciation du profil salin. C'est le faciès à chlorure de sodium, chlorure de magnésium et chlorure de calcium de la voie saline neutre⁽²⁾.

(1) - cité par G. BUSSON - 1974

(2) - Les sols salés renfermant du chlorure de calcium sont bien connus dans la zone aride continentale. Ils sont désignés en Irak sous le terme de "Sabach" (O. SCHVARTS - 1961). M. POUGET (1973) a étudié des plages salées présentant ces caractéristiques dans les steppes du sud-Algérois.

B - ETUDE DU SECOND TYPE (EXEMPLE DU SOL DE LA STATION B₁) :
L'ACCUMULATION DU GYPSE

1 - Caractéristiques des profils ioniques

- Milieu fortement salé où les chlorures bien que dominants sont moins abondants par rapport aux sulfates que dans le cas précédent : $Cl/SO_4 < 6$ et s'abaissant vers 2 ou 3, dans le sol et dans la nappe.

- Présence d'individualisations gypseuses mises en évidence par l'étude morphologique et par l'analyse spécifique.

- Compte-tenu de la faible solubilité du gypse dans l'extrait de sol, on voit le taux de calcium soluble diminuer considérablement dans les horizons d'accumulation du gypse et en particulier dans l'horizon de surface, ce qui constitue une figure opposé à celle que l'on a constatée dans le premier type (Fig. 27).

- Cependant, en introduisant dans les bilans ioniques les ions Ca^{++} et $SO_4^{=}$ issus de la mesure spécifique du gypse, on rétablit une distribution du calcium comparable à celle du premier exemple. Le taux de sulfates se trouve encore accru (Fig. 28).

La composition ionique des extraits aqueux de sol est rappelée dans le tableau ci-dessous (avec intégration du gypse).

Profondeur cm	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃	Cl/SO ₄	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Gypse
0-3	1860	541	20	3,5	1880	122	408	++
3-10	890	351	15	2,5	896	207	146	+++
10-20	540	172	12	3,1	565	90	66	+
30-40	325	90	10	3,9	360	27	43	
50-60	330	97	8	3,4	360	24	50	
70-80	215	90	8	2,4	250	21	33	
90-100	212	135	10	1,6	250	67	31	++
110-130	162	82	8	1,9	200	25	28	
Nappe	375	93	15	4,0	380	34	67	

TABLEAU n° 35 - Inventaire des ions (en me/l) dans le profil salin, pour la station B₁, en mars 1973 (avec intégration du gypse)

2 - Formation des sels

On se trouve dans tous les horizons dans le cas c et dans la nappe, dans le sous-cas c₂ ; on a en effet : $r SO_4^{=} + r HCO_3 > r Ca^{++}$ avec $r Ca^{++} > r HCO_3^-$ et $r Cl^- < r Na^+$.

Dans ces conditions on va pouvoir former les sels suivants : CO₃Ca, CaSO₄, NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄.

Les espèces minérales susceptibles d'apparaître dans ces conditions sont essentiellement : le calcaire, le gypse, le chlorure de sodium, la bloedite, la kieserite et l'epsomite.

Profondeur cm	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂
0-3	20	102	1860	20	408	0	0
3-10	15	182	890	6	146	0	0
10-20	12	78	540	15	65	0	0
30-40	10	17	325	35	32	0	0
50-60	8	16	330	30	50	0	0
70-80	8	13	215	45	32	0	0
90-100	10	57	212	38	20	0	0
110-130	8	17	162	38	27	0	0
Nappe	15	17	375	5	67	0	0

TABLEAU n° 36 - Formation des sels dans le profil B₁ (en mg après évaporation d'un litre de solution).

3 - Interprétation

Ce sol est caractérisé dans son horizon supérieur, par l'abondance du NaCl, l'absence totale de chlorures alcalino-terreux et la formation du gypse et du sulfate de magnésium. La salinité est donc fortement différente de celle du premier cas étudié.

Il y a, pour les 3 sels majeurs, une accumulation en surface, conséquence de la salinisation ascendante, mais en comparant à la source de sels qu'est la nappe, on constate que l'accumulation du gypse est considérablement plus importante que ne le laisserait supposer la teneur initiale en CaSO₄. C'est ainsi qu'en faisant, pour un sel donné, le rapport entre sa valeur maximale en surface et sa valeur dans la nappe, on trouve :

CaSO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
12	5	4	6

Il n'est donc pas illogique d'admettre que la formation du gypse constitue la conséquence des phénomènes d'échange de cations entre le sol et la solution saline (voir réaction I). Le calcium cédé par le sol ne peut se maintenir en solution sous forme facilement soluble du fait de la richesse du milieu en ions SO₄⁼ et il participe à la formation du gypse, lequel apparaît comme un produit de formation secondaire. Il est intéressant de noter que l'observation de terrain met en évidence une accumulation gypseuse sub-superficielle et un autre niveau gypseux plus profond. Le même phénomène a été expérimentalement montré par MASSOUMI (1968). On peut y voir une première précipitation sur le trajet capillaire, dans la zone proche de la nappe et une seconde précipitation, en surface, sous l'influence de l'évaporation et de la concentration des solutions, le gypse cristallisant avant les autres sels, dans l'horizon sub-superficiel.

C - ETUDE D'UN TROISIEME TYPE (SOL DE LA STATION U) :
L'APPARITION DU "BICARBONATE" DE SODIUM

1 - Caractéristiques du profil ionique

L'inventaire des ions, dans le sol de la station U, en mars 1973 est représenté ci-dessous :

Profondeur cm	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl/SO ₄	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺
0-3	305	85	18	3,6	16	63	310
3-10	190	53	18	3,7	8	31	215
10-20	205	58	16	3,5	8	29	235
30-40	210	47	12	4,5	6	23	244
70-80	305	76	15	4,0	14	41	350
90-110	245	57	10	4,3	10	31	270
130-150	160	42	8	3,8	9	19	185
Nappe	212	45	15	4,7	16	37	220

TABLEAU n° 37 - Composition ionique (me/l) des extraits salins dans le sol U

2 - La formation des sels

Sur l'ensemble du profil on a $r \text{SO}_4^{=} + r \text{HCO}_3^{-} > r \text{Ca}^{++}$ et $r \text{Cl}^{-} < r \text{Na}^{+}$ avec $r \text{HCO}_3^{-} > r \text{Ca}^{++}$ dans la partie supérieure du profil ce qui correspond au cas d où il est possible de former HCO₃ Na.

En formant successivement les sels dans les différents niveaux du profil, on aboutit aux résultats suivants :

Profondeur cm	CO ₃ Ca	CaSO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	NaHCO ₃	MgCl ₂	CaCl ₂
0-3	16	0	305	2	63	2	0	0
3-10	8	0	190	5	31	10	0	0
10-20	8	0	205	12	29	8	0	0
30-40	6	0	210	28	20	6	0	0
70-80	14	0	305	45	31	1	0	0
90-110	10	0	245	25	31	0	0	0
130-150	8	1	160	25	19	0	0	0
Nappe	15	1	212	8	37	0	0	0

TABLEAU n° 38 - Distribution hypothétique des sels en me après évaporation d'un litre de solution. Sol de la station U, mars 1973

3 - Interprétation

Le trait caractéristique du profil des sels est l'apparition du "bicarbonate de sodium" dans la partie supérieure du profil. On note l'absence de gypse (confirmée par l'analyse spécifique) et l'absence de chlorures alcalino-terreux. Le faciès salin est celui de la voie alcaline (présence de HCO₃Na), chloruré Na, sulfaté Na, Mg.

La formation de HCO_3Na (et de Na_2CO_3) dans les sols halomorphes a fait l'objet de nombreux travaux et diverses théories ont été émises:

- théorie de HILGARD (1912)⁽¹⁾ où ces sels résulteraient de la réaction entre le calcaire et les sels neutres de sodium (NaCl , Na_2SO_4).
- théorie de GEDROIZ (1936)⁽¹⁾, SIGMOND (1927)⁽¹⁾, KELLEY (1951)⁽¹⁾ dans laquelle la formation de NaHCO_3 et de Na_2CO_3 résulterait de réactions d'échange entre le complexe sodique et des bicarbonates de la solution saline.
- théorie biologique selon laquelle la formation de ces sels alcalins ferait intervenir la réduction des sulfates dans le sol : (WHITTIG et JANITSKY - 1963).

Dans le cas présent, l'apparition de NaHCO_3 ne peut être considérée que comme une manifestation saline temporaire car le profil des sels de la station U réalisé en juillet 1972 ne montre pas la présence de HCO_3Na alors que ce fait est constaté en mars 1973. Cette différenciation saline est en relation avec un profil salin présentant de très nets changements de forme d'une saison à l'autre (voir fig. 17) avec alternance salinisation-désalinisation dans la partie superficielle du profil.

On peut donc penser que la genèse de HCO_3Na résulte d'une transformation de l'équilibre ionique au cours du processus de désalinisation selon une réaction en présence de CO_3Ca , CO_2 et H_2O (BOWER - 1969) : $\text{Sol } 2\text{Na}^+ + \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Sol } \text{Ca}^{++} + 2\text{NaHCO}_3$.

D - ETUDE D'UN QUATRIEME TYPE : L'APPARITION DU CARBONATE DE SODIUM

Des sols renfermant des ions $\text{CO}_3^{=}$ en quantités dosables ont été observés à proximité de la station U, dans le secteur du mas Escara.

1 - Composition ionique du profil salin

Profondeur cm	Cl^-	$\text{SO}_4^{=}$	HCO_3^-	$\text{CO}_3^{=}$	Na^+	Ca^{++}	Mg^{++}
0-5	310	151	27	12	500	8	2
5-35	170	49	13	10	244	4	3
35-60	131	41	6	tr.	164	3	6
60-100	41	9	3	0	35	10	6

TABLEAU n° 39 - Composition ionique des extraits salins (en me/l)

2 - Formation des sels

Compte-tenu de cette composition ionique et conformément aux règles qui ont été utilisées, il apparaît possible de former HCO_3Na et Na_2CO_3 ce qui caractérise nettement la voie alcaline.

(1) - auteurs cités par I. SZABOLCS - 1969

Profondeur cm	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	CaCl ₂
0-5	8	0	310	19	12	150	2	0	0
5-35	4	0	170	9	10	46	3	0	0
35-60	3	0	131	3	tr.	34	6	0	0
60-100	3	9	32	0	0	0	0	6	0

TABLEAU n° 40 - Distribution des sels en me après évaporation d'un litre de solution

3 - Interprétation

L'apparition du carbonate de sodium peut être interprétée de la même façon que celle du bicarbonate. Elle constitue un stade encore plus marqué de la différenciation saline dans la voie alcaline. Ce cas peut être considéré comme très peu fréquent dans le cadre des terrains faisant l'objet de cette étude. Il se manifeste (voir plus loin) par une très forte élévation du pH et par une nette dégradation de la structure du sol. La réaction de formation des deux sels en présence de CaCO₃, CO₂ et H₂O s'écrit dans les termes suivants (BOWER - 1969) :



III - CONCLUSION

En combinant anions et cations pour former des sels, il a été possible de mettre en évidence quelques principaux types de différenciation saline au sein du profil.

A - Dans la voie saline neutre deux cas typiques ont été distingués, où selon la composition anionique du milieu déterminée par le rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{=}$, le devenir des cations issus des phénomènes d'échange (calcium) est différent.:

1 - Dans un milieu riche en chlorures et pauvre en ions $\text{SO}_4^{=}$ ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{=} > 6$ et si $r \text{ Ca}^{++} > r \text{ SO}_4^{=}$), le calcium reste soluble et apparaît sous forme de chlorure de calcium accompagnant NaCl et MgCl₂. C'est le salant humide ou hygroscopique où des sels complexes tels que la tachydrite peuvent naturellement se former par cristallisation.

2 - Dans un milieu salin plus riche en sulfates ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{=} < 6$ et $r \text{ SO}_4^{=} > r \text{ Ca}^{++}$), le calcium est immobilisé dans la formation du gypse qui peut s'accumuler en surface. Dans ces conditions le principal chlorure est NaCl ; les autres sels sont des sulfates. Le faciès de terrain est de type salant blanc.

La présence de ces sels neutres est caractéristique des sols de type solontchak (voir plus loin chapitre 7) qui conservent, en milieu salin, une structure non dégradée et dont le pH n'excède pas 8,8 bien que le taux de Na échangeable puisse être élevé.

B - Dans la voie alcaline apparaissent le bicarbonate et le carbonate de sodium en raison d'un haut niveau de sodicité du complexe absorbant et d'une réaction de formation de ces sels, entre le complexe sodique et la solution, au cours des périodes de désalinisation, traduites par de fréquents changements de forme du profil salin. Bien que NaCl reste dominant, la présence de ces sels confère aux sols des propriétés particulières qui se manifestent par le caractère dégradé de la structure et la forte élévation du pH qui atteint 9 ou 10. Les sols renfermant l'un ou l'autre de ces sels sont du type salé à alcali (voir plus loin chapitre 7).

En ce qui concerne l'ensemble des différenciations salines, il apparaît que le chlorure de calcium, le gypse, le bicarbonate et le carbonate de soude sont en partie le résultat de transformations géochimiques caractéristiques du milieu halomorphe. Ce sont des sels de formation secondaire car ils ne sont contenus qu'en faible quantité (CaSO_4) où n'existent pas (CaCl_2) dans la nappe phréatique, source de sels solubles.

IV - DIAGNOSTIC DES SELS PAR LA VOIE DES ETUDES AU MICROSCOPE ET AUX RAYONS X

Parallèlement à l'étude chimique, le diagnostic des espèces salines peut être réalisé par la voie des études au microscope et aux rayons X. Ces déterminations sont effectuées sur des cristaux de sels que l'on peut observer :

- dans des cristallisats d'extraits aqueux de sol,
- dans des plaques minces de sol,
- au niveau d'efflorescences salines prélevées sur le terrain.

Ces études permettent une identification minéralogique de certaines espèces salines, très utile à l'interprétation des analyses chimiques. Elles procèdent d'observations effectuées au microscope optique, au microscope électronique à balayage ainsi que de diagrammes de rayons X.

A - ETUDE AU MICROSCOPE POLARISANT

1 - Cristallisats d'extraits aqueux de sols salés

En laissant cristalliser, sur une plaque de verre, une goutte d'extrait salin, on a une image, observable au microscope, des différents sels présents dans la solution. Cette détermination a été précédée par la reconnaissance d'espèces minérales provenant de solutions salines dont on a fixé la composition. Il est alors possible de reconnaître (J. SERVANT - 1970) :

- les dendrites ramifiées, les cristaux en "sapins", les cubes et les trémies de Na Cl qui sont éteints en nicols croisés,
- les chlorures hygroscopiques de Ca et Mg, qui ne polarisent (le premier surtout) que quand on chauffe la préparation,

- le gypse qui présente des cristaux bien distincts en "queue d'aronde", empennage de flèche ou des macles par entrecroisement, en "épingle à linge" et dont l'extinction est oblique (37°) ce qui permet de différencier le gypse des autres sulfates,

- le sulfate de sodium hydraté qui cristallise sous forme de cristaux multifides faiblement éclairés en nicols croisés,

- le sulfate de magnésium hydraté qui donne sur lame de verre un enduit cristallin polarisant dans des teintes vives avec des formes pennées très fréquentes.

Cette méthode de diagnose est appliquée à quelques exemples dont on connaît la composition chimique de par l'analyse des extraits aqueux et qui correspondent aux principaux faciès rencontrés au cours de cette étude.

a - Faciès du salant blanc (photographies planche 4)

L'extrait aqueux renferme principalement Na Cl mis en évidence par l'analyse. Sur le cristallisé, le chlorure de sodium apparaît sous forme de cubes et de trémies bien visibles sur la photo A, en milieu concentré. Sur la photo B, en milieu plus dilué, les cristaux de Na Cl sont orientés suivant des axes A_3 . Cette cristallisation conduit à des formes très allongées en "sapins" débutant en bas de la photo. Tous ces cristaux sont éteints en nicols croisés.

b - Faciès du salant humide (photographies planche 5)

L'analyse chimique nous a montré la coexistence de chlorures de Na, Mg et Ca, le premier étant dominant. A la température de la salle, la préparation conserve un aspect humide, du fait de la présence de sels hygroscopiques. Les trémies de Na Cl sont corrodées et présentent un contour arrondi. Les cristaux allongés, barrant la préparation, sont attribués au chlorure de magnésium (bishofite). Ils sont visibles en lumière naturelle et en nicols croisés. En chauffant la préparation on observe très temporairement la cristallisation d'un chlorure alcalino-terreux qui redevient hygroscopique dès que la température diminue.

c - Faciès du salant sulfato-chloruré (photographies planche 6)

L'analyse chimique nous enseigne que cet échantillon, fortement salé est plus riche en magnésium qu'en sodium solubles et présente une importante proportion de sulfates par rapport aux cas précédents. L'examen au microscope polarisant met facilement en évidence :

- les gros cristaux de Na Cl (halite),
- les petits cristaux de gypse ($\text{SO}_4\text{Ca}, 2 \text{H}_2\text{O}$),
- le grand cristal barrant la préparation, attribué au sulfate de magnésium (epsomite : $\text{Mg SO}_4, 7 \text{H}_2\text{O}$).

2 - Plaques minces de sols

Sur les plaques minces de sols, l'observation des évaporites n'est pas toujours aisée en ce qui concerne les sels très solubles. Le gypse constitue le minéral le plus facile à reconnaître par la forme de ses cristaux lenticulaires, polygonaux en plan et à section grossièrement losangique,

plus ou moins allongée suivant le cas. Ses macles sont également très typiques. Ces aspects seront à nouveau évoqués, dans le chapitre 5. Ils sont illustrés par les planches 11 à 16 qui décrivent les principaux cas rencontrés. Le chlorure de sodium est plus difficile à mettre en évidence car ses formes ne sont pas toujours nettes et son extinction en nicols croisés rend la diagnose délicate.

A la surface du sol, les cristaux en aiguilles (voir planche 3) ou les amas microcristallins sont les plus facilement observables. Dans le matériau, Na Cl apparaît sous forme de revêtements à la surface des vides (planches 7 à 10), présentant parfois des contours géométriques (planche 7 B). Ces amas de halite renferment sur leur périphérie, d'autres cristaux d'évaporites qui polarisent en nicols croisés comme on peut le voir sur la planche 8 (L. P.). Certains vides peuvent être complètement colmatés par les cristallisations de halite (planche 7).

B - ETUDE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (Laboratoire de microscopie électronique. Faculté des Sciences. Montpellier)

Ces études ont été effectuées sur des amas salins provenant d'efflorescences prélevées sur le terrain. Elles ont pour but de visualiser les formes microcristallines qui échappent à l'examen optique. Après "aurification" qui recouvre l'échantillon d'une mince couche métallique, celui-ci est passé au microscope à des grossissements variant de 600 à 3 000. Les images sont observées sur un écran de télévision, des photographies étant prises au polaroid (voir planches n° 20 et 21). Les données retenues concernent essentiellement les formes du chlorure de sodium et on a pu montrer par cette voie :

- l'agencement et la stratification des micro-cristaux de halite où l'on retrouve des formes cubiques caractéristiques, mélangées à des éléments aux contours moins typiques traduisant une certaine dissolution ou érosion des cristaux ;

- l'existence de cristallites allongées de très petite dimension (25 microns) identiques - à une échelle plus fine - à celles qui seront décrites dans le salant pulvérulent (voir chapitre 5, sous-chapitre 52). Comme dans cet exemple, les micro-batonnets de Na Cl entraînent le soulèvement de particules salines au-dessus de la surface de l'amas cristallin,

- l'état des surfaces du salant hygroscopique où l'on peut reconnaître,

- . deux cristaux de Na Cl aux contours arrondis,
- . des amas cristallins informes -dont l'interprétation est délicate- pouvant renfermer des chlorures alcalino-terreux.

C - ETUDES AUX RAYONS X

Les déterminations aux rayons X ont permis sans ambiguïté de confirmer la présence des sels suivants : chlorure de sodium (halite), gypse, dolomie dans le cas du profil V correspondant à la dépression inférieure de Villeneuve-de-la-Raho, epsomite. Elles ont permis de confirmer que les cristallites allongées du salant poudreux étaient bien constituées par du chlorure de sodium (voir sous-chapitre 52). Les résultats restent ambigus en ce qui concerne la détermination d'autres sels tels que les chlorures alcalino-terreux du salant hygroscopique car si l'on constate bien l'existence de ces sels, il apparaît difficile de séparer les chlorures de calcium et magnésium hydratés de la tachydrate ($\text{Ca, Mg}_2 \text{Cl}_6 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$).

45 - RELATIONS ENTRE LA SALINITE, LA SODICITE ET L'ALCALINITE
DANS LE PROFIL DES SOLS HALOMORPHES

I - RELATIONS ENTRE LES CATIONS SOLUBLES ET ECHANGEABLES
(RELATIONS : SALINITE - SODICITE)

A - VALEURS ET VARIATIONS DU PARAMETRE S.A.R. DANS LE PROFIL SALIN
CONSEQUENCES SUR LA SODISATION DU COMPLEXE ABSORBANT

En utilisant ce paramètre simple, $Na / \left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{0,5}$ provenant des travaux de GAPON (1933) et traduisant la composition cationique de l'extrait de pâte saturée, les chercheurs de l'U. S. Salinity Laboratory (1954) ont montré qu'il était relié au taux de sodium échangeable du sol par une expression statistique s'écrivant :

$$Na/T \% = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 \text{ S.A.R.})}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \text{ S.A.R.})}$$

Le sigle S.A.R. désignant ce paramètre sous son appellation anglo-saxonne : sodium adsorption ratio que l'on peut considérer en langue française comme l'indice d'absorption du sodium. Nous conserverons toutefois le sigle S.A.R. internationalement utilisé.

Il a été procédé, dans le cas des sols du Sud et du Sud-Ouest de la France à l'étude des relations existant entre ce paramètre de salinité et le sodium échangeable des sols, déterminé par mesure directe, en utilisant la méthode BOWER (1962). Il a été possible d'établir statistiquement deux corrélations se formulant comme suit : (voir figures 29 et 30)

1 - Relation linéaire entre le sodium échangeable S.E. et le S.A.R. - S.E. représentant le sodium échangeable en % de la capacité d'échange T :

$$S.E. = 1,049 \text{ S.A.R.} - 0,381 \text{ avec } n = 80 \text{ et } r = 0,928$$

2 - Relation logarithmique entre les mêmes quantités se formulant comme suit :

$$\text{Log. } 100 \frac{Na \%}{100 - Na \%} = 0,024 \text{ S.A.R.} + 0,852 \text{ avec } n = 75 \text{ et } r = 0,860.$$

La première relation apparaît la plus intéressante et la plus facile d'emploi. Elle est voisine de celle établie en Tunisie par le C.R.U.E.S.I. en 1970, laquelle s'écrit pour $n = 75$:

$$Na/T \% = 0,988 \text{ S.A.R.} - 0,61 \text{ avec } r = 0,937.$$

Cette corrélation n'a toutefois été établie que pour des échantillons dont les valeurs du S.A.R. n'excèdent pas 12.

Elle permet, dans le cas des sols étudiés, c'est-à-dire en présence d'une salinité à dominante chlorurée, de prévoir la sodicité quand on connaît la composition cationique de l'extrait de pâte saturée. Ces relations n'apparaissent plus valables dans le cas d'autres types d'extraits aqueux de sol tels que les extraits de type 1/2 ou 1/5.

D'une manière très générale, le paramètre S.A.R. paraît augmenter avec la salinité et ce fait est statistiquement vérifié pour une population de 80 échantillons de sols où nous avons établi entre le S.A.R. et la salinité (exprimée par la somme des anions) la corrélation suivante :
 $S.A.R. = 0,056 \sum A + 27,1 ; \sum A = 11,67 S.A.R. - 233$ avec $n = 80$ échantillons et $r = 0,81$.

Les formes présentées par le profil du S.A.R. et par le profil sodique réel déterminé par mesure directe sont représentées sur un graphique où figurent également les profils salins (fig. 31). Par analogie avec ces derniers, on retrouve pour la sodicité quatre formes principales de profils sodiques.

- La forme A à maximum de sodicité épipédonique
- La forme B à maximum mésopédonique
- La forme D à maximum hypopédonique
- La forme C à maximums épi et méso ou hypopédonique

Connaissant la relation S.A.R. - sodicité, on peut considérer que les variations saisonnières du paramètre S.A.R. constituent une approche convenable des variations de la sodicité dans le profil des sols. C'est ainsi que les variations saisonnières du paramètre S.A.R. dans le profil, sont graphiquement représentées dans le cas de 5 stations du Roussillon, à 3 périodes de l'année (figure 32). On donne ci-après la valeur des moyennes et des coefficients de variation.

Profondeur cm	U		B ₁		V		CN	
	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.
0-3	49	0,11	121	0,19	36	0,35	21	0,22
3-10	56	0,14	87	0,09	31	0,16	23	0,10
10-20	63	0,15	66	0,15	32	0,04	31	0,07
30-40	56	0,10	53	0,16	46	0,09	40	0,07
50-60	56	0,16	48	0,22	60	0,14	47	0,08
70-80	57	0,18	42	0,12	72	0,11	48	0,13
90-100	47	0,22	40	0,06	73	0,01	47	0,21
100-120	40	0,21	43	0,15	83	0,15	45	0,18
Nappe	46	0,28	52	0,01	82	0,08	48	0,20

TABLEAU n° 41 - Valeurs moyennes du paramètre S.A.R. et coefficients de variation pour 4 sols du Roussillon

Dans l'horizon superficiel de ces sols, les coefficients de variation du S.A.R. sont plutôt moins importants que les coefficients de variation de la salinité dans ces mêmes niveaux.

Dans les horizons sous-jacents, par contre, les coefficients de variation du S.A.R. apparaissent plus élevés que ceux de la salinité.

Les moyennes et les coefficients de variation du paramètre S.A.R. sont également donnés ci-après en ce qui concerne des sols de la série camarguaise, classés par ordre de salinités décroissantes et intéressant 8 prélèvements effectués de 1970 à 1972.

Prof. cm	C ₁₂		11 A		A ₁		10 E		8 H	
	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.	Moyenne	Coeff. var.
0-30	66	0,19	69	0,17	58	0,31	33	0,23	18	0,46
30-60	70	0,10	51	0,11	52	0,30	36	0,37	23	0,28
60-80	71	0,10	43	0,20	30	0,37	43	0,30	40	0,56
Nappe	71	0,17	51	0,37	26	0,17	21	0,52	30	0,26

TABLEAU n° 42 - Valeurs moyennes du paramètre S.A.R. et coefficients de variation pour 5 sols de Camargue.

La tendance qui se dégage est que les plus faibles coefficients de variation du S.A.R. correspondent aux sols les plus salés (C₁₂) et que les plus forts coefficients correspondent aux sols les moins salés (10 E et 8 H). On retrouve d'autre part le résultat suivant lequel les valeurs du S.A.R. et de la sodicité sont d'autant plus fortes que le sol est plus salé.

B - CAS DES AUTRES CATIONS ECHANGEABLES

Si le niveau et la distribution du sodium échangeable dans le profil des sols halomorphes constituent des caractéristiques fondamentales, il apparaît également, que parmi les alcalino-terreux formant les autres cations échangeables, le magnésium est souvent plus représenté que le calcium (J. SERVANT - 1970). Cette constatation n'est pas surprenante puisque dans la solution du sol, ce cation est généralement beaucoup plus abondant que le magnésium.

Les sols salés étudiés, en Languedoc-Roussillon, Camargue et marais de la Gironde, sont toujours fortement magnésiens puisque pour l'ensemble des sols ces taux varient de 10 à 55 % de la capacité d'échange.

Les sols fortement salins occupant la bordure des grands étangs saumâtres possèdent les taux les plus élevés de Mg échangeable (30 à 60 %). Des taux de magnésium inférieurs à 30 % sont observés dans les sols salés situés plus en amont. Dans ces sols, on constate souvent une valeur assez constante du taux de Mg échangeable dans divers horizons du profil. Comme le taux de sodium échangeable varie considérablement, il en résulte une variation complémentaire du calcium en présence d'un taux peu changeant de Mg. On rejoint ici des éléments déjà constatés à propos du profil salin : discordance des distributions du sodium et du calcium, le magnésium présentant une distribution intermédiaire.

Il faut d'autre part, noter l'existence de sols fortement salés dont le complexe absorbant présente une garniture cationique à dominance Mg-Ca. Nous avons eu l'occasion d'étudier de tels sols non pas en France mais en Espagne centrale. Leur genèse résulte d'une contamination saline à dominance de sulfate de magnésium, les sels de sodium étant beaucoup moins abondants que dans les sols salés qui font l'objet de cette étude. Dans ces conditions, les valeurs du paramètre S.A.R. restent

faibles malgré la forte salinité et, le taux de sodium échangeable est relativement réduit, ce qui me conduit à considérer ces sols comme possédant un complexe calcimagnésique, alors que les sols salés faisant l'objet de cette étude possèdent un complexe sodique (voir plus loin le chapitre concernant la classification pédologique).

II - INFLUENCE DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE SUR LE pH DES SOLS HALOMORPHES

Le pH des sols salés est généralement alcalin, exception faite des sols sulfatés acides qui ne sont pas concernés par la présente étude. Cette alcalinité est fonction de différents facteurs dont les principaux sont :

- la nature des sels solubles (sels neutres ou alcalins),
- l'état du complexe absorbant (présence plus ou moins grande de sodium échangeable),
- la dilution utilisée pour faire la mesure du pH.

Le tableau figurant ci-après montre les variations du pH avec la dilution pour différents échantillons de sols halomorphes.

Echantillons	pH pâte	pH 1/1	pH 1/2,5	pH 1/5	pH 1/10	Sodicité	Salinité
						Na % de T	mmhos/cm dans E. P. S.

I - MILIEU CHLORURE SODIQUE

A - Forte salinité

. Roussillon (sol calcaire non gypseux)

V 10-20	7,5	7,95	8,0	8,1	8,2	25	25
V 30-40	7,8	8,20	8,5	8,7	8,9	40	25
V 50-60	8,0	8,5	8,8	9,0	9,2	55	26

. Médoc (sol calcaire, faiblement gypseux)

P 45 60-60	7,4	7,9	8,1	8,3	8,5	40	28
P 45 60-70	7,5	7,9	8,2	8,3	8,6	35	28

B - Salinité plus faible

. Roussillon (sol faiblement calcaire, non gypseux)

CN 10-20	7,81	8,2	8,4	8,5	9,0	20	14
CN 30-40	8,3	8,6	8,8	9,0	9,2	30	16
CN 50-60	8,3	8,7	8,9	9,05	9,5	40	18
CN 90-100	8,3	8,7	8,9	9,1	9,6	50	19

II - MILIEU SULFATE MAGNESICO-SODIQUE forte salinité

. Espagne centrale (sol calcaire fortement gypseux)

C ₄ 5-10	8,2	8,6	8,8	8,9	8,9	8	22
C ₄ 10-20	8,3	9,0	9,1	9,2	9,2	5	40

TABLEAU n° 43 - Valeurs du pH, pour différents sols halomorphes, en fonction de la dilution

L'examen de ce tableau conduit aux commentaires suivants :

- 1 - pour tous les échantillons les valeurs du pH augmentent avec la dilution,
- 2 - pour un profil donné -et c'est particulièrement net dans le cas des profils V et CN- les valeurs du pH augmentent avec la sodicité, la séparation de différents niveaux de sodicité n'apparaissant nettement qu'aux fortes dilutions,
- 3 - si une valeur élevée du pH 1/2, 5 est souvent en relation avec une forte sodicité, il existe cependant des exceptions où l'on constate soit une valeur peu élevée du pH avec une forte sodicité, soit une valeur très élevée du pH avec une faible sodicité.

La montée du pH avec la dilution et la sodicité est la conséquence de l'apparition de traces de soude dans la solution (il y a formation de carbonate de sodium au contact de l'air). Ce phénomène est limité dans le cas du pH pâte, qui par sa faible dilution, approche mieux que les autres mesures les conditions régnant dans le sol en place. Aussi, un pH pâte particulièrement élevé indique-t'il, dans la plupart des cas, la présence de sels sodiques autres que les chlorures et sulfates (carbonate de sodium en particulier).

Dans la grande majorité des sols étudiés, le pH de la pâte reste inférieur à 8,5 et le pH 1/2, 5 reste compris entre 8,5 et 9,1, la valeur 9,0 étant fréquemment atteinte dans les horizons les plus sodiques. Ce décalage (pouvant atteindre un point) entre le pH pâte et le pH 1/2, 5 est graphiquement représenté pour différents profils de sols salés pour lesquels le caractère sodique est généralement bien affirmé. On constate une analogie de formes entre le profil du pH et le profil sodique (figure 33).

Il a été également rendu compte des variations saisonnières du pH à deux époques de l'année, variations qui peuvent atteindre 1/2 point quand on utilise la suspension 1/2, 5 et qui sont plus faibles dans le cas du pH de la pâte.

Des pH 1/2, 5, très élevés, pouvant voisiner 10, ont été observés dans quelques sols salés du Roussillon (région de l'Etang de Saint-Nazaire) et en Camargue. L'extrait de pâte saturée renfermait alors du carbonate de sodium et/ou du bicarbonate de sodium mis en évidence par l'étude du profil des sels (voir sous-chapitre 44).

Profondeur cm	Anions me/l				Ca ⁺⁺	Cations me/l			pH pâte	pH 1/2, 5	CO ₃ Ca %
	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁼		Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺			
0-10	310	151	27	10	2	8	480	3	9,2	9,7	2,5
10-40	170	48	13	10	3	3	230	0,9	9,2	9,7	2,4
0-10	360	62	72	24	tr.	4	520	0,2	-	10,2	-
10-30	72	32	18	6	tr.	4	125	0,2	-	10,2	-

TABEAU n° 44 - Sol du Mas Escara en Roussillon

	Novembre	Janvier	Mars	Mai
Conductivité mmhos/cm	18	9	5	5
Cl ⁻	82	42	22	22
SO ₄ ⁼	84	26	13	14
HCO ₃ ⁻	34	13	13	13
CO ₃ ⁼	6	1	tr.	tr.
pH pâte	9,6	9,1	9,1	9,1

TABLEAU n° 45 - Mas du Grand Manusclat en Camargue (horizon 0-30)
Station 8 B à 4 époques de l'année (1971)

On note, dans ce dernier tableau, que la formation du carbonate de sodium est localisée dans le temps et apparaît comme un phénomène temporaire au cours de la période pluvieuse d'automne. L'augmentation du pH, liée à cette différenciation saline, est très nette.

La présence de carbonate de sodium en quantités dosables dans les sols étudiés constitue une exception. Elle a toutefois été mise en évidence dans le Roussillon du sud, dans le secteur du mas d'Uston. Le carbonate de sodium qui apparaît ici constitue le résultat de transformations chimiques intervenant dans le sol (voir sous-chapitre 44). Des sols riches en Na₂CO₃ sont fréquents dans de nombreuses régions du globe (KOVDA et SAMOILAVA - 1969, SZABOLCS - 1969, CHEVERRY - 1974).

En résumé, on constate les faits suivants :

. Le pH pâte des sols salés, même quand la sodicité est forte, reste inférieur à 8,5 dans le cas d'une salinisation chlorurée ou chloruro-sulfatée sodique ou sodico-magnésienne s'accompagnant d'un haut niveau de salinité dans le sol.

Des valeurs très élevées du pH pâte ne sont constatées que quand la solution du sol renferme du carbonate de sodium en quantités décelables à l'analyse. Le pH pâte est alors largement supérieur à 8,5.

. En présence de sels neutres le pH 1/2, 5 augmente avec la sodicité et reste ordinairement inférieur à 8,8 dans le cas des sols fortement salés.

La valeur de 8,8 est dépassée dans les horizons les plus sodiques ne présentant pas un haut niveau de salinité. Le pH peut alors atteindre et dépasser 9.

Si le sol renferme du carbonate de sodium en quantités dosables, le pH 1/2, 5 peut atteindre et dépasser 10.

III - COMMENTAIRES ET INTERPRETATION DES DONNEES

Après l'étude des profils salins, celle des profils sodiques vient compléter l'approche chimique de l'halomorphie. Ces deux données permettent en effet une caractérisation précise des sols salés en situant le niveau, la distribution et les variations saisonnières, des deux critères fondamentaux que sont la salinité et la sodicité.

Au plan de la sodicité, une donnée très importante qui se fait jour est le niveau élevé du taux de sodium échangeable dans les profils qui ont fait l'objet d'études détaillées. Ces sols présentent sans ambiguïté le caractère sodique coexistant avec le caractère salé. Cet élément fera l'objet de commentaires plus fournis dans la partie réservée à l'étude des types de sols.

Le caractère fortement sodique de ces sols ne constitue pas une surprise mais une confirmation logique de ce qu'on pouvait déjà prévoir par l'étude de la composition cationique des nappes phréatiques, sources de sels solubles (voir première partie). L'étude de la sodicité ne peut en effet être dissociée de celle de la salinité car la détermination analytique des cations échangeables implique la connaissance des cations solubles de l'extrait de pâte saturée. Par ailleurs, on a vu que cette connaissance permettait de prévoir, par l'emploi du paramètre S.A.R., l'ordre de grandeur de la sodicité dans le profil.

Enfin, le processus d'échange intervenant entre la solution saline et le matériau pédologique constitue un élément excessivement important de la bonne compréhension des processus d'halomorphie. C'est en effet par ce processus que se modifie la composition cationique de la solution du sol et que le calcium déplacé par le sodium est susceptible de passer en solution (voir sous-chapitre 44).

Au plan de l'alcalinité, on constate qu'une séparation peut s'établir autour des valeurs limites de 8,5 pour le pH pâte et d'environ 8,8 pour le pH dans le rapport 1/2, 5. En-dessous de ces valeurs, les sols riches en sodium échangeable peuvent être considérés comme possédant le caractère sodique. Au-delà vers les valeurs fortement alcalines du pH, les sols riches en sodium échangeable, peuvent être considérés comme possédant le caractère à alcali.

Il sera montré, dans une prochaine partie, que le caractère sodique ne s'accompagne pas obligatoirement d'une dégradation de la structure alors que cette dégradation est de règle dans le cas des sols à alcali.

CHAPITRE 5

INFLUENCES DES CONDITIONS SALINE ET SODIQUE
SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET SUR LA
MORPHOLOGIE DES SOLS HALOMORPHES

La présence de sels solubles, sodiques, magnésiens et calciques imprégnant le sol, et l'existence d'un complexe absorbant à forte charge sodique confèrent aux sols halomorphes, non seulement un chimisme, mais également un comportement physique particulier, pouvant se traduire par des traits morphologiques spécifiques de cette catégorie de sols.

Dans une première partie, l'étude portera sur le comportement physique de ces sols mis en évidence par certains tests (sous-chapitre 51). Dans une seconde partie, on étudiera les conséquences pédo-morphologiques de ces propriétés (sous-chapitre 52).

51 - ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DES SOLS HALOMORPHES

I - RAPPEL DE DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES GENERALES

On ne doit pas confondre l'action de la sodicité (présence de sodium échangeable en quantité importante) avec celle de la salinité (présence de sels solubles en quantité importante) car bien que ces deux facteurs soient le plus souvent génétiquement liés, leurs influences pédologiques ne sont pas comparables. Cette différence de comportement sous l'action des deux composantes de l'halomorphie est bien exprimée par S. HENIN et al. dans "Le Profil Cultural".

"On appelle sols salins tous ceux qui contiennent assez de sels solubles pour que leur fertilité en soit affectée. On appelle sols alcalins ceux dont la fertilité est amoindrie par une teneur élevée en sodium échangeable. Il existe des cas mixtes, d'ailleurs les plus fréquents, mais il est intéressant de considérer séparément ces deux éventualités car les terres salées peuvent avoir une bonne structure : c'est le cas des boues marines récemment desséchées. La présence de sel maintient l'argile floculée en dépit de sa teneur élevée en sodium échangeable. D'autre part, la formation de petits cristaux de sel dans la masse de terre facilite sa fragmentation. Au contraire une

fois les sels entraînés par l'eau, l'argile tend à se disperser, la structure se dégrade rapidement et on obtient en définitive une sorte de béton compact et asphyxiant dont la remise en culture est d'autant plus laborieuse, que du fait de l'imperméabilité du milieu, il devient très difficile d'y faire pénétrer les solutions de sels de calcium qui permettraient de déplacer le sodium adsorbé".

Les propriétés physiques des sols halomorphes apparaissent donc commandées non seulement par l'action spécifique défavorable de l'ion Na mais également par l'action spécifique favorable des solutions salines concentrées qui imprègnent le sol. L'état physique d'un sol halomorphe va donc traduire la résultante de ces deux effets aux caractères opposés.

Si le caractère salé l'emporte sur le caractère sodique, les propriétés physiques ne subissent pas la dégradation imputable à l'ion Na. Par contre, si le caractère sodique l'emporte, les propriétés physiques du sol présentent l'état de dégradation mentionné plus haut. Une explication de ces comportements nous est fournie en termes clairs et simples par VAN OLPHEN - 1969.

a - Pour maintenir une argile sodique floculée, la concentration requise pour une solution de NaCl est beaucoup plus élevée que celle requise pour une solution de CaCl₂. En d'autres termes, dans le milieu sodique, le système ne reste stable que si la concentration de la solution saline imprégnant le sol se maintient au-dessus d'un certain seuil d'autant plus élevé que la solution est riche en sodium.

b - Le mécanisme de la floculation sous l'effet de la concentration peut se formuler de la manière suivante : pour une forte concentration en électrolytes, la couche double des particules d'argile est fortement comprimée et s'étend à une distance inférieure au rayon d'action des forces de Van der WAALS. La somme attraction + répulsion est alors en faveur des attractions. La suspension flocule rapidement (In CHAMA YOU - 1972). Par contre, lorsque la concentration diminue, les forces de répulsion deviennent prépondérantes et le système est dispersé. Il apparaît, que pour des ions monovalents (Na par exemple), l'épaisseur de la couche double diffuse devient très faible pour des concentrations supérieures à N/10 et ne commence à se développer que si les concentrations deviennent inférieures à N/100.

Remarque :

Bien qu'on puisse parfois lire, dans la littérature, que le caractère magnésien de certains sols salés entraînerait des propriétés physiques défavorables comparables à celles induites par le caractère sodique, il n'apparaît pas que cette propriété soit vraiment confirmée par les résultats de la pédologie expérimentale. C'est ainsi que KOUESTANI (1964) a montré que l'effet de Mg⁺⁺ sur les propriétés physiques des sols étudiés était très comparable à celui de Ca⁺⁺, c'est-à-dire favorable. Il apparaît toutefois que l'effet "protecteur" de Ca⁺⁺ semble plus élevée que celui de Mg⁺⁺ et que dans certains cas l'action de Mg⁺⁺ peut agir faiblement dans le même sens que Na⁺.

J'ai abouti à des conclusions identiques (similitude d'effets de Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺) dans des expériences sur la perméabilité dont il sera rendu compte dans la prochaine partie du mémoire.

II - L'ETUDE DE LA PERMEABILITE D'ECHANTILLONS DE SOLS SALES ET SODIQUES

A - LES FAITS EXPERIMENTAUX A PARTIR D'ECHANTILLONS DE SOLS INITIALEMENT NON SALES

a - Mise en évidence

DEMOLON, dans la Dynamique du Sol a écrit : "Quand un sol est submergé par de l'eau de mer ou irrigué avec une eau salée plus ou moins riche en NaCl, sa perméabilité commence généralement par augmenter du fait de la formation d'agrégats par action flocculante des sels, puis elle se maintient constante. Mais si l'on substitue à l'eau saline de l'eau de pluie, la perméabilité décroît considérablement par suite de la dispersion de l'argile sodique qui passe dans les eaux de percolation".

Cette propriété est facilement mise en évidence par une expérience simple (J. SERVANT - 1970) qui montre également l'influence de la concentration de la solution saline percolante qui est constituée ici par une solution de NaCl.

1. Principe de l'expérience

Des échantillons d'un sol non salé (sol brun calcique) sont soumis à une imprégnation puis à une percolation par des solutions diversement concentrées en NaCl (d'urée 1 heure). Dans un deuxième temps, la percolation se poursuit en substituant l'eau distillée aux différentes solutions salines (durée 2 heures). On note les volumes d'eau recueillis à intervalles réguliers, au cours des deux phases.

2. Résultats (moyennes de plusieurs répétitions) : voir annexe VII A et fig. 33 bis, 1

3. Commentaires

Les conclusions suivantes ressortent de l'examen de ces résultats :

- dans la phase de percolation par des eaux salines, l'écoulement, par rapport au témoin, est d'autant plus important que la solution est plus chargée en sels,
- dans la phase de percolation par de l'eau distillée, on note une brusque chute de la perméabilité à partir du traitement 50 me/l et au-delà.] ???

b - Influence de la concentration de la solution saline et de la sodicité (Na % T) sur la perméabilité

Cet aspect a déjà été abordé, en ce qui concerne la concentration, dans l'expérience précédente. Il a fait l'objet d'une étude approfondie par QUIRK et SCHOFIELD en 1955, suite à des travaux antérieurs de FIREMAN (1944), CHRISTIANSEN (1947), BODMAN et FIREMAN (1950), KELLEY (1950)⁽¹⁾. QUIRK et SCHOFIELD utilisent des échantillons de sols saturés par divers cations et soumis à des percolations par des solutions salines chlorurées des mêmes cations à diverses concentrations. Ils mettent ainsi en évidence, pour une saturation monocationique définie, l'existence d'un seuil de concentration de la solution saline isocationique, en dessous duquel on note une importante diminution de la perméabilité pour la solution

(1) - auteurs cités par QUIRK et SCHOFIELD

Les seuils obtenus correspondent aux concentrations suivantes des solutions salines pour des échantillons de sols saturés par les mêmes cations.

2,5. 10^{-1} M NaCl	1. 10^{-3} M $MgCl_2$
6,6. 10^{-2} M KCl	3. 10^{-4} M $CaCl_2$

L'examen du premier résultat nous montre que pour l'échantillon donné (sol de Rothamstedt) saturé en sodium, le seuil de concentration d'une solution de NaCl est de 14,5 g/l. Il est nécessaire que la concentration saline reste supérieure à ce seuil pour que la perméabilité demeure suffisamment bonne. Si la salinité s'abaisse en-dessous de ce seuil, on assiste à une forte décroissance de la perméabilité. Dans une autre série d'expériences, QUIRK et SCHOFIELD ont déterminé les seuils de concentration de la solution saline pour différents taux de sodium échangeable et montré que la limite de concentration requise -au-dessous de laquelle on assiste à une forte baisse de la perméabilité- augmente avec la teneur en sodium échangeable de l'échantillon.

Des expériences conduites par Mc NEAL et COLEMAN (1966) intéressent une gamme plus variée de sols. Ces auteurs ont établi que la chute de perméabilité était surtout très nette dans les sols renfermant des minéraux argileux de type 2/1 et surtout en présence de montmorillonite. La chute de perméabilité se manifeste principalement quand le taux de sodium échangeable dépasse 20 % de T, la fourchette étant de 20 à 35 % suivant le sol, et la concentration saline correspondante variant de 3 à 50 me/l - Cet effet est irréversible dans de nombreux cas, sauf dans les sols renfermant plus de 10 % de montmorillonite, où des solutions fortement salines ou riches en calcium entraînent plus facilement une amélioration de la perméabilité.

c - Influence de différentes solutions salines à concentration constante

Dans ces expériences (J. SERVANT - 1970), des échantillons de sols initialement non salés sont d'abord imprégnés par différentes solutions salines puis soumis à une percolation par de l'eau distillée. La concentration des solutions salines servant à l'imprégnation est de 200 me/l d'anions accompagnant la même quantité de cations.

- Dispositif expérimental

On utilise les tubes à percolation employés pour mesurer K dans les tests de stabilité structurale (méthode HENIN). Les échantillons de terre sont passés au tamis à mailles carrées de 2 mm de façon à conserver le maximum de petits agrégats naturels.

Les tubes préalablement garnis de graviers quartzeux dans leur partie inférieure sont remplis à sec par 50 g de terre fine introduite en 5 prises de 10 g. Les tubes sont alors posés dans des béciers où l'on verse 100 cm³ des différentes solutions salines en effectuant 4 répétitions. Dans des tubes témoins, qui serviront de référence pour juger l'effet des traitements, on utilise de l'eau distillée. On laisse les échantillons s'imprégner pendant une nuit. Puis, les tubes sont introduits dans une batterie de percolation, la mise en charge s'effectuant par un jet doux de pissette, et le niveau étant maintenu constant par des vases de Mariotte. Les quantités d'eau recueillies dans les béciers sont alors mesurées tous les quarts d'heure, la durée de l'expérience étant de 2 heures.

- Echantillons de sols

Trois catégories de sols, bien différentes, ont été utilisées :

- échantillons A : sol brun calcique de la région de Montpellier (29 % d'argile, 32 % de limons, 29 % de sables, pH = 7,8) ; l'illite est largement dominante dans les minéraux argileux.
- échantillons B : rendzine de Dordogne : 37 % d'argile, 35 % de limons, 27 % de sables, 2 % de matière organique, 20 % de calcaire total, 6 % d'actif - pH = 8,0 - Minéraux argileux : illite + smectites
- échantillons C : horizon de fragipan d'un sol lessivé acide du Périgord = 15 % d'argile, 40 % de limons, 40 % de sables fins, 5 % de sables grossiers - pH = 5,4 - Minéraux argileux : kaolinite + illite.

1 - Influence des cations de solutions salines chlorurées

Les solutions salines servant à l'imprégnation des échantillons renferment les sels suivants : NaCl, MgCl₂ 6 H₂O, CaCl₂ 6 H₂O.

Mélange de ces chlorures avec S.A.R. = 14 (solution I)

Mélange de ces chlorures avec S.A.R. = 30 (solution II)

Mélange de ces chlorures avec S.A.R. = 60 (solution III)

Les quantités d'eau percolées après ces traitements sont figurées dans l'annexe VII B.

Commentaires :

Pour les échantillons A, on constate que l'écoulement par rapport au témoin est :

- plus fort après traitement aux chlorures de calcium et de magnésium ainsi qu'après traitement par la solution I,
- plus faible après les autres traitements, l'abaissement de perméabilité étant d'autant plus marqué que la solution saline d'imprégnation est plus riche en NaCl.

Cette gradation apparaît encore nettement dans le cas des échantillons B, par rapport au témoin, pour les traitements I, II, III. Pour l'échantillon C, on constate que les traitements retenus ont abaissé l'écoulement par rapport au témoin, mais que les quantités percolées sont finalement voisines pour les différents traitements. On remarque que le traitement MgCl₂ a abaissé la perméabilité par rapport au témoin.

2 - Influence de différents sels sodiques de solutions monosalines

Les solutions salines servant à l'imprégnation des échantillons renferment un seul des sels suivants :

- chlorure de sodium, NaCl
- sulfate de sodium hydraté, Na₂SO₄ 10 H₂O
- bicarbonate de sodium HCO₃Na
- carbonate de sodium Na₂CO₃

Comme dans le cas précédent, les quantités percolées par l'eau après traitements, sont mesurées à intervalles réguliers pour les trois échantillons de sols. Les résultats obtenus sont rassemblés dans l'annexe VII C et sont graphiquement représentés sur la figure 33 bis, 2.

Commentaires :

Les résultats concernant les échantillons A et B nous montrent que la chute de la perméabilité enregistrée au cours de la percolation à l'eau distillée, dépend de la nature du sel, l'effet le plus marqué se produisant pour le carbonate de sodium et le moins marqué pour le chlorure, l'ensemble se classant de la manière suivante, par ordre d'effets décroissants



Pour l'échantillon C on constate une chute de perméabilité après traitements sodiques mais pas de différences significatives entre les divers traitements.

3 - Interprétation des deux expériences

Echantillons A et B

Au cours de la première expérience, on a montré que l'existence d'un caractère salé constitué uniquement par des chlorures de calcium ou de magnésium entraînait une amélioration de la perméabilité, par rapport au témoin, dans une percolation par de l'eau distillée. Cette propriété demeure en présence d'un mélange de sels Na - Ca - Mg avec une faible valeur du S.A.R. (14). Par contre, quand le S.A.R. augmente (30, puis 60) et que l'on arrive à une solution de NaCl, la perméabilité diminue considérablement en réponse au phénomène de sodisation s'accompagnant d'une forte baisse de concentration saline au cours de la percolation par de l'eau distillée.

On constate, que pour ces échantillons, une valeur du S.A.R. de 14, qui correspond à un taux de sodium échangeable d'environ 15 % de T, n'a pas entraîné une baisse de perméabilité au cours de la percolation à l'eau distillée mais que cette chute de perméabilité apparaît nettement pour S.A.R. = 30, ce qui correspond à une sodicité d'environ 30 % de T.

Dans la seconde expérience, on a montré l'effet très agressif du carbonate de sodium et également du bicarbonate, ce dernier apparaissant toutefois moins fort que celui dû au premier sel. Ces traitements entraînent une imperméabilisation des échantillons au cours de la percolation à l'eau distillée. Il faut y voir la conséquence du caractère fortement alcalin des solutions renfermant ces sels et le fait que le processus de sodisation du complexe est plus accentué en leur présence, qu'en présence des sels neutres de type chlorure ou sulfate (SZABOLCS, DARAB et REMENI - 1967). Ces sels neutres présentent également une différence d'influence sur les échantillons de sols dans les expériences précédentes. On constate que la baisse de perméabilité enregistrée est plus forte après traitement SO_4Na_2 qu'après traitement NaCl.

On retrouve ici une séparation déjà exprimée au cours de l'étude de la dynamique des anions dans le profil salin (voir sous-chapitre 43). LONGENECKER (1960) a d'autre part, constaté une différence d'action de ces sels sur les propriétés physiques du sol et en particulier sur le module de rupture de croûtes de sol, NaCl abaissant ce module en-dessous de celui obtenu pour un échantillon à l'eau distillée, alors que Na_2SO_4 , ainsi d'ailleurs que Na_2CO_3 et HCO_3Na , augmentent le module de rupture.

Cet auteur fait intervenir la différence de viscosité existant entre NaCl et Na₂SO₄ aux fortes concentrations (1,045 pour NaCl, N et 1,51 pour Na₂SO₄, N) et tient compte de la plus grande faculté d'hydratation des ions SO₄ par rapport aux ions Cl⁻.

. Echantillon C

Cet échantillon de sol acide n'a pas permis, comme les précédents, de différencier l'effet des divers traitements. Cette faible influence des traitements peut être éclairée par les données suivantes :

- l'échantillon renferme un faible taux d'argile,
- la capacité d'échange de l'argile est faible (dominance de kaolinite),
- la transformation de l'argile H en argile Na entraînerait une baisse de stabilité beaucoup moins importante que celle qui se produit dans la transformation argile Ca - argile Na.

B - ETUDE DE LA PERMEABILITE POUR L'EAU D'ECHANTILLONS DE SOLS HALOMORPHES

La méthode utilisée est celle préconisée par S. HENIN et al. dans l'évaluation de la stabilité structurale. Cette méthode intéresse des échantillons passés au tamis à mailles carrées de 2 mm, les tubes à percolation étant en eau quand on procède à leur remplissage, en fractions successives, par la terre à tester.

Le coefficient K₁, exprimé en cm/h est mesuré après la première heure d'expérience. Nous y avons adjoint une seconde mesure (K₂) effectuée après la 5ème heure de percolation afin de tester les variations de perméabilité intervenant à plus long terme. Différents échantillons appartenant à plusieurs profils de sols halomorphes du Languedoc-Roussillon ont été étudiés. Les résultats obtenus figurent dans l'annexe VIII A et leur examen conduit aux commentaires suivants.

. La plupart des échantillons testés présentent des coefficients K₁ et K₂ se situant dans les faibles et très faibles valeurs de la perméabilité, la valeur de 1 cm/h n'étant que très rarement dépassée. Ce résultat ne surprend pas : il est en accord avec ce qui a été précédemment exposé ainsi qu'avec un certain nombre d'applications de ce test aux terres sodiques (S. HENIN et al.). Les valeurs les plus élevées du coefficient K₁ sont observées pour des échantillons de surface riches en matière organique. Dans ceux-ci, K₁ dépasse 1 cm/h.

. La comparaison des coefficients K₁ et K₂ apporte des éléments complémentaires à cette analyse. Il apparaît en effet que l'on assiste, entre les instants t₁ et t₂ à une baisse générale de la perméabilité -pouvant être particulièrement accentuée pour certains sols- sauf dans le cas des échantillons gypseux qui conservent une valeur K₂ très voisine de celle enregistrée pour K₁. Cette particularité n'est constatée pour aucun autre échantillon même pour ceux qui sont bien pourvus en matière organique.

Le gypse assure donc ici le maintien et même, dans certains cas, l'amélioration du coefficient K au bout de plusieurs heures d'écoulement. En d'autres termes, le processus de défloculation

et de gonflement lié à la percolation par l'eau distillée, et qui conduit à une imperméabilisation de l'échantillon, est inhibé par la présence de gypse qui constitue un apport de calcium soluble favorisant la désodisation du complexe et maintenant l'échantillon relativement perméable.

C - ETUDE DE LA STABILITE STRUCTURALE PAR L'ANALYSE D'AGREGATS

Les échantillons de sols halomorphes sont maintenant testés suivant la méthode de l'analyse d'agrégats (S. HENIN et al. - 1960) impliquant la mise en oeuvre de différents prétraitements : alcool, air, benzène et conduisant à l'évaluation du pourcentage d'agrégats grossiers, résistant à ces différentes influences, ainsi qu'au calcul d'un indice global d'instabilité structurale se formulant comme suit (Profil Cultural, p. 122).

$$S = \frac{(A + L) \text{ max. } \%}{\sum \frac{\text{agrégats } \%}{3}} - 0,9 \text{ S. G. } \%$$

(A + L) max. représente la fraction inférieure à 20 microns obtenue par le prétraitement le plus dispersant et S. G. le pourcentage des sables grossiers (supérieurs à 200 μ). Les sables grossiers sont obtenus par analyse mécanique sans destruction du calcaire. Le pourcentage d'agrégats représente la moyenne arithmétique entre les 3 traitements.

Les résultats obtenus pour divers sols du Languedoc-Roussillon et du Médoc figurent dans l'annexe VIII B où les sols sont classés en deux grands groupes en fonction de la présence ou de l'absence d'une végétation bien recouvrante. L'examen de ces résultats conduit aux commentaires suivants :

- dans l'éventail général des résultats du test d'agrégats, ces sols présentent en moyenne un caractère instable pour la plupart des horizons comme l'ont déjà annoncé S. HENIN et al. pour les sols sodiques. Cependant l'examen détaillé des profils appelle les remarques suivantes :

1 - Sols nus de Sansoufres

Dans ces sols très salés, à profil salin de type A, on constate l'existence d'un minimum d'instabilité intéressant l'horizon qui se trouve en moyenne entre 5 et 20 cm de profondeur. A l'examen macroscopique cet horizon présente une structure nette, fragmentaire de type polyédrique fine. Cette propriété n'est pas seulement le fait des horizons gypseux.

Cette caractéristique est plus nette dans le cas des sols argilo-limoneux que dans le cas des sols limoneux. Même en présence de gypse, et surtout quand ils sont sous-jacents à la tranche 5-20, les autres horizons étudiés possèdent une forte instabilité structurale aussi bien dans les sols limoneux que dans les sols argileux.

2 - Sols de pelouses halophile et sub-halophile

Ces sols sont moins salés que les précédents, du moins en ce qui concerne les horizons de surface. Ils sont riches en matière organique dans l'horizon A₁. Cette richesse en matière organique

et la plus faible sodicité du complexe de l'horizon supérieur expliquent le caractère assez stable de la structure de cet horizon. L'examen du profil M nous enseigne, d'autre part, qu'une certaine stabilité de structure peut régner dans un horizon (B) de structure grossière prismatico-columnaire d'un protosolonetz de pelouse sub-halophile (voir plus loin l'étude de ce type de sol).

D - CONCLUSION A L'ETUDE DES TESTS DE PERMEABILITE ET D'ANALYSE D'AGREGATS

Tant que la solution saline neutre imprégnant le sol demeure suffisamment concentrée, le matériau pédologique reste floculé malgré le taux élevé de sodium échangeable et le sol présente une structure fragmentaire différenciée. De telles conditions règnent en période estivale dans les sols très salés du Languedoc-Roussillon et de la Camargue. Paradoxalement, l'accumulation saline peut toutefois entraîner un processus mécanique de la désagrégation (voir sous-chapitre suivant) qui vient en quelque sorte s'opposer au processus de la voie physico-chimique.

Les transformations de la structure vont intervenir sous l'influence des pluies ou des inondations par l'eau douce pendant l'automne et l'hiver. C'est cette dernière influence qui est examinée, dans des conditions particulièrement brutales, au cours des tests de perméabilité et d'analyse d'agregats.

. Analyse d'agregats (test S)

On constate que certains horizons sont susceptibles de résister mieux que les autres au processus de dégradation car, ils présentent une meilleure stabilité structurale S. Ce sont toujours des horizons de la tranche supérieure du profil pédologique qui, à l'examen morphologique, se révèlent bien structurés.

Cette meilleure stabilité structurale dépend de plusieurs facteurs. Elle est d'abord plus forte dans les sols calcaires, argilo-limoneux, que dans les sols limoneux peu calcaires. Elle est dans certains cas corrélée à la présence de gypse mais cette caractéristique ne semble pas obligatoire. Elle est plus forte dans les horizons organiques sous pelouse. Elle est en relation avec les plus faibles valeurs du paramètre S.A.R. et de la sodicité (profil V et M par exemple) mais cette caractéristique n'apparaît pas pour le profil CN.

. Tests de perméabilité (test K)

Les horizons humifères se classent comme les plus perméables au cours de la première heure de percolation. A ce niveau, il n'apparaît pas, que les horizons d'un profil renfermant du gypse soient nettement plus perméables que ceux qui n'en renferment pas.

Cette propriété n'est mise en évidence qu'au bout de plusieurs heures d'écoulement. On constate alors une remarquable constance du coefficient K des échantillons gypseux alors que ce coefficient s'abaisse considérablement dans les autres échantillons y compris ceux qui sont humifères. La présence de gypse constitue donc un facteur important du maintien de la perméabilité des sols salés au cours d'une percolation par des eaux douces. Il va sans dire que cette constatation est de grande importance pour la mise en valeur.

52 - LES TRAIT'S MORPHOLOGIQUES EN RELATION
AVEC LA SALINITE ET LA SODICITE

I - INFLUENCE DES ACCUMULATIONS SALINES

L'étude des profils salins a mis en évidence deux grands types d'accumulations salines susceptibles de se produire dans les sols salés. Dans un premier cas, il s'agit d'accumulations chlorurées qui se développent essentiellement à la surface du sol, d'autant plus nettement que la nappe est salée, peu profonde et que le sol est nu. Dans un second cas, il s'agit d'accumulations sulfatées et plus précisément de gypse, qui se développent plus profondément dans le profil.

La présence d'horizons gypseux dépend de la richesse initiale du milieu en ions $\text{SO}_4^{=}$ et, en particulier, de la salinisation de la nappe et commande, d'autre part, la nature des accumulations chlorurées superficielles, celles-ci étant essentiellement sodico-magnésiennes en présence de gypse. Les faciès qui en résultent sont le salant blanc qui se manifeste par des efflorescences blanchâtres à la surface du sol et le salant pulvérulent qui procède d'un mécanisme particulier étudié plus loin.

Si le milieu est pauvre en ions sulfatés, le calcium de la solution - dont une grande partie provient de l'échange d'ions - subsiste sous forme soluble et peut s'accumuler en surface sous forme de chlorure de calcium mélangé aux chlorures de sodium et magnésium, NaCl étant le sel dominant. Le caractère hygroscopique des chlorures alcalino-terreux confère alors au sol le faciès connu sous le nom de salant humide.

L'influence des accumulations salines sur les traits morphologiques sera maintenant examinée, en distinguant le cas des accumulations chlorurées, de celui des accumulations gypseuses.

A - LES HORIZONS D'ACCUMULATION DES CHLORURES

1 - Le salant blanc typique

C'est le faciès le plus évident de la salinité. Il se manifeste par l'apparition d'efflorescences salines blanches à la surface lisse et glacée des sols de sansoufre ou de taches salées. L'analyse révèle que le profil salin est alors de type A avec très forte accumulation superficielle, qu'il y a souvent précipitation de gypse à proximité de la surface et que les sels dominants à la surface du sol sont les chlorures de sodium et de magnésium, le chlorure de calcium étant absent. Le chlorure de sodium est d'ailleurs très largement dominant par rapport au chlorure de magnésium puisqu'il représente à lui seul 80 à 90 % des sels.

Le chlorure de sodium forme, à la surface du sol, des efflorescences neigeuses microcristallines dont le détail des formes n'apparaît pas au microscope optique⁽¹⁾. Quelques rares tremies sont visibles,

(1) - L'étude au microscope électronique à balayage nous donne le détail de ces formes (voir planches 20-21).

englobées dans la masse microcristalline. L'horizon superficiel épais de quelques centimètres présente très fréquemment une structure lamellaire remarquablement différenciée. Deux descriptions seront données après examen de plaques minces de sol.

a - Sol limono-argileux calcaire (station 12 en Camargue, juillet 1972)

0-0,1 cm : Efflorescences salines neigeuses microcristallines.

0,1-1 cm : Structure de type "mie de pain" avec très forte porosité vésiculaire. Les vésicules sont allongés et plus ou moins arqués. Ils présentent une distribution plus ou moins parallèle à la surface de l'échantillon. Au niveau des agrégats l'assemblage est de type aggloméré. Le squelette est constitué de grains de quartz de la dimension des limons. Le plasma est fortement imprégné par du carbonate de calcium. Présence de débris de coquilles englobés dans la masse.

1-3 cm : Microstructure en granules allongés résultant de la fragmentation des lamelles sous l'influence d'un réseau de cassures grossièrement perpendiculaires à la surface des lamelles. Le chlorure de sodium est bien visible sous forme de revêtements souvent épais situés à la périphérie des vides. Il s'insinue dans les vides de petite dimension en les colmatant plus ou moins. Certains secteurs situés à la périphérie des vides sont fortement imprégnés, le chlorure de sodium englobant des particules de terre. A l'intérieur de l'agrégat, l'assemblage élémentaire est de type aggloméré. La porosité générale reste élevée.

3-5 cm : Microstructure lamellaire plus grossière que dans le niveau précédent. On note l'apparition du gypse dans les vides planaires. A l'intérieur des lamelles l'assemblage élémentaire devient de type porphyrique.

On retiendra de cet exemple les faits suivants :

- Structure différenciée de type lamellaire plus ou moins fragmentée induisant une forte porosité interagrégats. La fragmentation est plus poussée dans la partie supérieure que dans la partie inférieure de l'échantillon où l'assemblage élémentaire est également plus compact.

- Le chlorure de sodium apparaît à la surface des vides sous forme de revêtements d'épaisseur variable (voir planches 7, 8, 9, 10) observés dans des vides de petite dimension. Les formes du chlorure de sodium éventuellement présentes dans les microvides échappent à l'examen au microscope optique.

- Le gypse, situé plus profondément apparaît dans la partie inférieure de la préparation.

b - Sol limoneux micacé faiblement calcaire (station B₁, juillet 1972)

0-0,1 cm : Efflorescences salines microcristallines.

0,1-1 cm : Cette zone est parcourue par un réseau de vides, vésiculaires, allongés, parallèles à la surface. Les micas, constituants principaux, présentent des orientations très variables. L'assemblage élémentaire est de type aggloméré. Le chlorure de sodium n'est pas nettement mis en évidence à l'examen optique.

1-3 cm : Zone intermédiaire - Microstructure litée avec vides planaires très nettement parallèles à la surface. Présences de zones plus riches en carbonates le long de certains vides. L'assemblage élémentaire est de type aggloméré.

3-5 cm : Microstructure plus massive et plus compacte. L'arrangement élémentaire reste de type aggloméré. On note la disparition des vides planaires, la porosité étant déterminée par des vésicules sphéroïdales. Présence de beaux cristaux de gypse, intercalaires.

Commentaires :

. Dans ce sol, la microstructure est moins différenciée que dans le cas précédent. Elle est cependant de type lité, bien visible de par l'orientation des paillettes de mica, mais la séparation des lamelles ne s'effectue pas aussi nettement.

. Le chlorure de sodium, abondant à l'analyse, est difficile à discerner dans les plaques minces.

. La partie inférieure de la préparation renferme des cristaux de gypse de type intercalaire (voir planche 15).

2 - Le salant pulvérulent

a - Description (voir planches 1 et 2, figure 34)

Le faciès poudreux constitue une caractéristique assez fréquente dans le cas des sols salés du Midi de la France. Il se manifeste par l'existence d'un horizon superficiel épais de 3 à 5 cm et de structure pulvérulente, occupant les parties les plus hautes du terrain, alors que les microdépressions, plus basses, présentent une structure essentiellement lamellaire, identique à celle décrite dans le paragraphe précédent. Le caractère pulvérulent de la structure résulte de l'existence de particules pseudo-sableuses constituées par des assemblages de la dimension des sables mais de composition limoneuse.

Les parties basses sont affectées par un réseau polygonal de fentes de retrait, passant latéralement dans les parties hautes, à un réseau de même maille, mais de composition poudreuse, dont le dessin est en relief par rapport à la surface du sol, ce qui confère aux horizons poudreux une organisation cellulaire. Cette localisation topographique apporte une donnée complémentaire au problème, car entre les points hauts et bas, il est possible d'observer des structures intermédiaires entre les deux cas extrêmes décrits. Elles se caractérisent par le fait que l'on y trouve des éléments structuraux dont la taille décroît et dont la désorganisation se développe à mesure que l'on se rapproche des parties hautes du terrain.

b - Interprétation

En étudiant la salinité dans l'horizon poudreux (P) et dans l'horizon lamellaire (L) on aboutit aux résultats figurant ci-après (cas d'un exemple situé près de Montpellier, septembre 1973).

Humidités %	< 2 microns	2-20	20-50	50-100	100-200	200-2000
P 3,3	24,4	47,5	25,9	5,1	0,2	0,4
L 2,5	30,8	48,3	19,5	2,7	0,3	0,3

TABLEAU n° 46 - Granulométrie %

	Cl ⁻	me/l dans l'extrait de pâte saturée				Na ⁺	Gypse me/100g
		SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺		
P	4800	93	15	115	1120	3640	8
L	620	50	3	28	124	520	0

TABLEAU n° 47 - Sels solubles

Les matériaux constituant ces structures sont moyennement argileux -un peu moins en poudre qu'en lamelles- et sont surtout caractérisés par l'abondance des limons. Ce dernier fait, peut expliquer la faible stabilité de la structure mise en évidence par l'apparition des formes lamellaires dans les zones basses. Mais l'analyse chimique de la fraction soluble est beaucoup plus révélatrice, les structures poudreuses étant caractérisées par une accumulation considérable de chlorures de sodium et de magnésium qui les distingue nettement des horizons à structure lamellaire.

On peut donc voir, dans cette accumulation de sels, la cause de la structure poudreuse. L'observation microscopique montre en effet que cette structure est constituée par des fragments de lamelles déchiquetés -au point de constituer des micro-agrégats isodimensionnels de type pseudo-sableux- étroitement associés à des cristaux allongés de chlorure ayant une dimension de quelques dizaines de microns à plusieurs millimètres (voir planche 3). Ces cristaux ont une tendance à s'orienter perpendiculairement à la surface du sol, certains étant ramifiés et même courbés comme si leur croissance, dans certaines directions, s'était trouvée gênée.

Ces observations conduisent donc à considérer la structure poudreuse comme le résultat du démantèlement d'une structure lamellaire préexistante, sous l'influence de la croissance des cristallites de chlorure de sodium.

c - Vérification expérimentale

Pour préciser les modalités de ce mécanisme, quelques expériences ont été effectuées au laboratoire. Tout d'abord, un fragment d'horizon à structure lamellaire a été placé sur un tampon de coton baignant dans une solution de NaCl sensiblement N/2, une lampe à infra-rouge accélérant l'évaporation. Dans ces conditions, il s'est constitué, à la surface du sol, une abondante croûte saline sans apparition de cristallites allongées ni de structure poudreuse.

Dans une deuxième expérience, le fragment de croûte lamellaire a été réhumecté à partir d'un coton humide puis abandonné plusieurs jours dans une atmosphère de très forte humidité relative. Il s'est alors formé, à partir de la seule réserve en chlorures de l'échantillon, de très nombreuses baguettes qui ont provoqué, dans la partie supérieure, le soulèvement des lamelles et dans certains cas une fragmentation assez poussée de celles-ci, le matériel prenant alors l'aspect d'échantillons à structure poudreuse.

Dans une troisième expérience, du matériau d'horizons poudreux a été placé dans des boîtes de Pétri, l'eau étant apportée de deux manières différentes, soit dans le fond de la boîte -ce qui conduit à une humectation par capillarité- soit sur la masse de terre, ce qui a entraîné une saturation de celle-ci.

Dans le premier cas, la structure est restée poudreuse et au voisinage de la surface, les particules de sol étaient perchées à l'extrémité de nombreuses cristallites allongées, de néoformation. Dans l'autre cas, il s'est formé une masse compacte à la surface de laquelle sont apparus de gros cristaux de chlorure de sodium ayant la forme classique de cubes ou de trémies.

d - Evolution saisonnière

Les formes poudreuses à organisation cellulaire ont essentiellement été observées à l'issue de la saison sèche et présentaient en septembre 1973, après un été sec, un remarquable développement dans certaines stations du Languedoc et du Roussillon. J'ai suivi leur évolution après les pluies d'automne. Sous l'influence de ces pluies, on note une reprise en masse de la structure avec apparition -dans la partie supérieure de l'horizon- d'une structure bulleuse caractérisée par une très grande abondance de vides sphériques. Cette structure indique très probablement un départ d'air de l'échantillon, formant des bulles dans la partie supérieure. Ce départ d'air résulte d'un effondrement de la structure poudreuse sous l'influence de la dissolution des sels par les pluies.

Sous l'effet de très fortes pluies, on a même assisté à une inversion du relief au niveau des bordures des cellules polyédriques -jadis en relief- qui se trouvent maintenant érodées et en creux, conférant à l'horizon de surface l'aspect d'un pavage plus ou moins arrondi (voir fig. 34).

e - Conclusion

Les structures poudreuses représentent donc une manifestation spécifique, mais temporaire -essentiellement estivale- de la salinité. Elles sont dues à une dislocation des assemblages préexistant dans le matériau, par suite de la formation de cristaux allongés de chlorure. Ce mécanisme est très comparable à ce qui se produit, dans certains sols, sous l'influence du gel (S. HENIN et O. ROBICHET 1950-1951), et comme dans le cas du gel, il est lié à l'apparition de cristallites de forme allongée, qui ne semblent pouvoir prendre naissance, que si l'évaporation ne se produit pas à partir de la masse du sol, mais de certains sites privilégiés qui se forment spontanément quand la terre n'est pas saturée.

Il est d'autre part nécessaire que l'évaporation soit suffisamment lente pour que les cristaux formés dans ces sites puissent grossir. Dans le cas d'une évaporation trop rapide, l'ensemble de la solution du sol est sursaturé et il se produit de nombreux petits cristaux de forme ramassée. De même si la terre est trop humide, l'évaporation se produit en surface du sol et les cristaux se déposent à l'extérieur de la masse de terre sans agir sur celle-ci.

La localisation des structures poudreuses sur les zones légèrement surélevées du terrain s'explique bien par ce processus, l'évaporation étant en effet plus intense au niveau de ces sites, ce que démontre d'ailleurs la concentration des sels. Comme ces zones sont surélevées, l'évaporation se produit dans la masse et non pas à partir de la surface, condition nécessaire à la formation des cristallites allongées.

Sous l'influence des sels, on assiste à un "gonflement" du sol. Cette augmentation du volume apparent se répercute au niveau des fentes de retrait préexistantes par une sortie de matière poudreuse qui engendre le réseau polygonal en relief caractéristique de ce faciès.

Dans d'autres pays le faciès pulvérulent est également fréquent. On le trouve dans les sebkrahs d'Afrique du Nord (BOULAINÉ - 1957, BELKHODJA - 1972) où il subit l'action éolienne, les particules étant entraînées par le vent et s'accumulant sur la périphérie des dépressions. Les sols à salant pulvérulent sont désignés sous le terme de "puff-solontchaks"^(*). Ils apparaissent fréquemment en relation avec une salinisation sulfatée sodique (DRIESSEN et SCHOORL - 1973).

3 - Le salant hygroscopique

Avec le salant blanc et le salant pulvérulent, le salant hygroscopique constitue un faciès d'halomorphie également répandu dans le Midi de la France et particulièrement dans la plaine du Roussillon. Ce faciès est caractérisé par l'existence d'un horizon superficiel présentant, même en saison sèche, un aspect humide, ce qui confère à la terre une teinte beaucoup plus sombre.

L'analyse révèle, dans le faciès humide, un haut niveau de salinité et la présence de chlorures de sodium, magnésium et calcium (voir chapitre 44, voir également les photos de la planche 5). La présence de chlorure de calcium constitue une importante différence avec le salant blanc qui renferme essentiellement du chlorure de sodium. L'étude du profil salin montre, que dans ce sol, dont la salinité est caractérisée par une forte valeur du rapport Cl/SO_4 , le calcium peut subsister sous forme soluble, la précipitation de gypse restant limitée de par le faible taux d'ions SO_4 . Par contre, dans la majorité des sols à salant blanc, la teneur en ions SO_4 est suffisamment élevée pour ne pas permettre le maintien du calcium en solution et immobiliser celui-ci sous forme de gypse.

Le faciès humide est fréquent au sein de la zone cultivée, (en relation avec des phénomènes de salinisation temporaire, gros pourvoyeurs de calcium, issu des phénomènes d'échange) dans des sols jusqu'alors non salés, soumis à l'action de solutions salines sodiques, qui remontent par capillarité.

B - LES HORIZONS D'ACCUMULATION DU GYPSE

Facilement décelables sur le terrain, les horizons d'accumulation du gypse se prêtent remarquablement bien à l'examen micromorphologique, le gypse y apparaissant en effet comme un minéral bien cristallisé, dont l'identification microscopique est aisée.

1 - Formes et distribution des cristaux

Suivant la nature du sol, deux grands types de distributions peuvent être observés :

- distribution localisée au niveau des vides de l'échantillon (gypse lié aux vides),
- distribution intéressant l'ensemble de l'échantillon (gypse intramatriciel).

a - Gypse lié aux vides

Il s'agit d'un cas très fréquent intéressant en particulier les sols qui présentent une structure lamellaire, le gypse se distribuant alors au niveau des vides de jonction entre deux lamelles

(*) - Au Sahara, les sols salins présentant un horizon supérieur meuble et sans cohésion sont désignés sous le terme de "fech-fech" (P. DUTIL - 1971). Le sulfate de sodium y est le sel principal.

(voir planche 12). Mais il intéresse également des sols ne présentant pas cette structure, tels que des sols argileux où le gypse est localisé le long des vides interpédiques.

La forme la plus fréquente présentée par les cristaux est celle d'une lentille à contour hexagonal dont la plus grande dimension varie de 1/5 à 1/20 de mm. En coupe, cette lentille présente la forme d'un quadrilatère allongé, grossièrement losangique (voir planche 11). Ces formes s'apparentent très nettement à celles décrites par A. LACROIX (1910) dans les marnes oligocènes de Paris. Dans ces vides, les cristaux de gypse occupent une surface plus ou moins importante pouvant aller jusqu'au colmatage complet.

L'arrangement de type normal -c'est-à-dire perpendiculaire à la paroi du vide- est très net dans certains vides de jonction entre deux lamelles (voir planche 14). Les cristaux présentent alors une forme particulièrement allongée. Si le vide est complètement occupé par des cristaux, on peut assister, sur les bordures du vide, à une pénétration des cristaux dans la matrice, pénétration qui est facilitée par la distribution normale du cristal dont la forme en coin facilite son insertion.

L'arrangement de type parallèle est également fréquent (voir planche 14). Il peut d'ailleurs coexister avec le précédent. C'est de préférence dans les chambres cristallines plutôt que dans les vides planaires, que cette distribution est observée. Dans les chambres cristallines colmatées, les cristaux à arrangement parallèle sont comprimés sur les bordures du vide. Enfin, dans de nombreux cas, on se trouve en présence d'arrangements pluridirectionnels sans dominance bien nette.

Dans certains vides on peut séparer deux groupes de cristaux. Le premier, localisé sur les bordures du vide, comprend des cristaux bien formés d'assez grande dimension. Le second, occupant le centre du vide, est formé de petits cristaux. Cet état traduit certainement des vitesses de cristallisation différentes entre le centre et la périphérie du vide, la cristallisation étant plus rapide au centre qu'elle ne l'est sur la périphérie. Il peut également indiquer, au niveau des petits cristaux, la zone préférentielle de circulation des solutions où se produisent fréquemment des phénomènes de dissolution et de reprécipitation du gypse. (voir planche 14).

b - Gypse intramatriciel

Dans certains sols, les cristaux de gypse apparaissent répartis au sein du matériau pédologique sans relation évidente avec l'existence de vides. On parle alors de cristaux intercalaires que KUBIENA définit comme des cristaux simples noyés dans une matrice dense.

. Dans un premier cas, il peut s'agir de gypse de constitution, appartenant au matériau pédologique. Un exemple nous est fourni par l'étude d'une plaque mince concernant des sols salés d'Espagne centrale placés dans un environnement géologique fortement gypseux. Le gypse de constitution apparaît alors sous la forme de gros cristaux maclés en fer de lance. Ce type de macle n'est généralement pas observé dans le cas du gypse secondaire.

. Dans le second cas, il s'agit de gypse secondaire dont les cristaux se développent isolément au sein de la matrice. Ce type de distribution a été observé dans des sols limoneux micacés où se

développent ainsi des zones préférentielles d'imprégnation gypseuse. On trouve des monocristaux, aux faces cristallines bien développées ainsi que de nombreuses macles par entrecroisement (voir planches 13 et 15).

2 - Influence des cristallisations gypseuses sur le comportement structural du sol

L'individualisation des cristaux de gypse au sein du matériau pédologique va engendrer de fortes contraintes résultant de la pression de cristallisation du minéral. La pression de cristallisation du gypse - bien qu'inférieure à celle de la glace - est cependant très élevée comme en témoignent les chiffres figurant ci-après, où l'on compare avec d'autres sels solubles^(*):

Ca SO ₄ 2 H ₂ O	:	1100 kg/cm ²
Na ₂ SO ₄ 10H ₂ O	:	250 kg/cm ²
Na ₂ CO ₃ 10H ₂ O	:	300 kg/cm ²

L'influence des cristallisations gypseuses sur le matériau pédologique peut être facilement approchée par l'examen des plaques minces de sol. Les observations effectuées à ce niveau conduisent aux remarques suivantes.

a - Cas des sols calcaires à structure lamellaire

Dans ces sols, le gypse lié aux vides s'accumule préférentiellement au niveau des joints inter-lamellaires. On assiste alors à un écartement des lamelles sous l'influence de la cristallisation gypseuse. Au niveau de certains sites, qui constituent des boursouflures de ces zones gypseuses, le gypse s'insinue dans des vides adjacents et, sous l'effet de sa pression, on assiste à une désagrégation du matériau pédologique sous forme d'agréats polyédriques qui apparaissent noyés dans la masse de cristaux. Il y a alors un effet de désagrégation, suivi d'un effet de dilution de la matière terreuse au sein de la matière saline (voir planche 16).

On rejoint là certaines conclusions formulées par C. PLET-LAJOUX, G. MONNIER et G. PEDRO (1971) à l'occasion d'expériences "in vitro" concernant la genèse et la mise en place des encroûtements gypseux. Ces auteurs mettent en évidence le fait que l'induration de l'encroûtement est due à une disposition particulière du gypse modifiant l'assemblage primitif et que d'autre part le gypse a tendance à diluer les éléments de la matrice au sein de la formation résultante.

On rejoint également, par la convergence d'action, les éléments relatifs au salant pulvérulent où l'on a vu que la désagrégation était provoquée - dans l'horizon de surface - par l'action des cristaux allongés de chlorure. Or l'analyse révélait - dans l'exemple cité - la présence de gypse dans l'horizon poudreux, ainsi que son accumulation dans l'horizon immédiatement sous-jacent. Il est donc logique de penser que l'action des cristallites de NaCl, en tant qu'agent de désagrégation, puisse être précédée et préparée par celle du gypse qui cristallise le premier et accomplit alors le "gros oeuvre" dans la démolition des agencements lamellaires. Cette interprétation n'est cependant pas générale, puisque de nombreux exemples de salant poudreux ne renferment pas de gypse.

(*) - in J. MOINEREAU - 1974

b - Cas des sols limoneux micacés

Dans ces sols, l'imprégnation gypseuse revêt une forme différente avec individualisation de cristaux isolés, intramatriciels, qui injectent le matériau pédologique. Au niveau des vides sphéroïdes remplis de gypse, la pression de cristallisation se manifeste par un tassement et un réarrangement des particules de limon sur la périphérie du vide (voir planche 13 A).

On n'assiste donc pas, comme dans le cas précédent, à une "microtectonique cassante", mais à une réponse plus souple du matériau qui se manifeste par une déformation des lits micacés sans rupture, avec des tassements au niveau de certaines zones.

II - INFLUENCE DE LA SODICITE
PROBLEME DE LA DEGRADATION DE LA STRUCTURE

Compte-tenu des effets antagonistes entre l'action floculante des sels solubles à forte concentration et celle désagrégante du sodium échangeable, la résultante favorable à ce dernier aspect va nécessiter un milieu caractérisé par une salinité modérée, ou soumise à de fortes variations.

Le taux de sodium échangeable à partir duquel on assiste à une nette dégradation de la structure, ne peut être fixé de manière catégorique car il dépend du type de sol et de la nature des minéraux argileux. On peut admettre que ce taux varie, suivant les situations, de 7 à 25 % de la capacité d'échange et on peut retenir la valeur intermédiaire de 15 % pour se fixer un seuil dans une classification (voir plus loin, chapitre 7). Comme le fait remarquer JABER (1970), la teneur en sodium échangeable d'un sol ne peut donc indiquer à elle seule ni le degré de dispersion de ses éléments, ni l'ensemble de ses propriétés d'où découle sa classification parmi les sols à alcali.

Les sols halomorphes présentant une structure dégradée sont classés comme "à alcali" (voir plus loin chapitre 7, l'étude de la séquence halomorphe). Leur caractéristique principale est l'existence d'une structure massive à fissuration prismatique, donnant naissance à des unités structurales excessivement dures et compactes en sec. Certains sols désignés plus loin sous le terme de proto-solonetz présentent cette structure dans l'horizon (B). Les prismes sont alors qualifiés de colonnaires en raison de leur section arrondie. Sous l'horizon (B), la structure devient massive et continue. Les profils M et CN dont il est fait précédemment état répondent à ce type de sol.

On remarquera que les mesures de stabilité structurale ne traduisent pas parfaitement cette structure de type dégradé quand on compare avec des sols bien structurés, dont la structure est qualifiée de non dégradée. En se reportant au chapitre 51 (tests d'agrégats) et en comparant les profils V et M, on constate que le profil V qui possède un horizon (B) à structure fragmentaire bien marquée entre 30 et 60 présente une instabilité structurale beaucoup plus forte que le profil M dont l'horizon (B) prismatico-colonnaire (structure fragmentaire non différenciée) se situe également entre 30 et 60.

L'explication réside dans le fait que la sodicité de V -traduite par le S.A.R. - est beaucoup plus élevée que celle de M, ce qui s'exprime par le test S. En d'autres termes l'horizon (B) de M caractérisé par environ 25 % de Na échangeable et une salinité de 13 mmhos. cm présente une structure dégradée alors que l'horizon (B) de V qui renferme près de 50 % de sodium échangeable avec une salinité de 30 millimhos possède une bonne structure, non dégradée. La présence du (B) prismatico-columnaire n'est donc pas directement fonction de la valeur absolue de la sodicité mais dépend plus du fait que la salinité est trop modérée dans ce type de sol pour que son effet flocculant se manifeste.

C'est donc plus par l'examen morphologique que par le résultat des tests de stabilité que le caractère structure dégradée peut être différencié du caractère structure non dégradée. Il s'y ajoute des éléments propres au profil des sels : présence de sels de la série alcaline (HCO_3Na , Na_2CO_3) dans le cas des structures les plus dégradées.

La distinction morphologique est nette dans de nombreux cas, surtout en présence de matériaux de texture fine. Elle est moins claire dans d'autres et il sera montré par la suite (voir chapitre 7) que la structure de certains sols est qualifiée de semi-dégradée.

TROISIEME PARTIE

SYNTHESE ET INTERPRETATION GENERALE DES DONNEES

Un certain nombre d'interprétations ont déjà été données dans la deuxième partie du mémoire consacrée à la caractérisation des sols halomorphes. Elles ont trait à la genèse des profils salins, à la dynamique des sels et des ions dans le profil, au déterminisme des différenciations salines et à l'influence des sels sur l'état structural. Ces interprétations peuvent être appréhendées au niveau des différentes conclusions partielles qui figurent à la fin des principaux chapitres ou sous-chapitres.

Il est maintenant proposé de relier ces différentes conclusions dans un schéma général orienté dans deux directions.

- La première direction est celle des processus et des mécanismes présidant à la pédogénèse en milieu halomorphe. Cet aspect sera abordé dans le chapitre 6.

- La seconde direction est celle du résultat de ces processus, c'est-à-dire du diagnostic et de la classification des différents sols de la séquence halomorphe dans le Sud et le Sud-Ouest de la France. Partant de ces données, des propositions seront émises visant à modifier certains points de la classification générale des sols halomorphes ainsi que les critères du diagnostic. Cet aspect sera abordé dans le chapitre 7.

CHAPITRE 6

LES PROCESSUS PEDOLOGIQUES DE L'HALOMORPHIE

Le terme de salinisation désigne l'ensemble des mécanismes suivant lesquels le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert -à un degré plus ou moins fort- le caractère salé.

Le terme de sodisation désigne l'ensemble des mécanismes suivant lesquels, au contact des solutions de sels neutres sodiques, le sol s'enrichit en sodium échangeable sans que ce phénomène entraîne, de manière marquée, une dégradation de l'état structural ni une forte élévation du pH, exception faite d'épisodes temporaires pouvant se manifester pendant la période humide. Ce maintien d'une structure non dégradée, en présence d'un taux élevé de sodium échangeable est la conséquence d'un haut niveau de salinité par des sels de la série neutre (effet flocculant des sels).

Le terme d'alcalisation⁽¹⁾ désigne un processus de sodisation, qui s'accompagne, de manière permanente, par une dégradation marquée de l'état structural, en relation fréquente -dans les sols étudiés ici- avec l'un ou plusieurs des caractères suivants :

- forte baisse de salinité,
- forte élévation du pH,⁽²⁾
- apparition des sels de la série alcaline.

Dans ce cas, le sol acquiert le caractère à alcali.

Les processus antagonistes seront respectivement désignés sous les termes de désalinisation, désodisation et désalcalisation.

Les différents mécanismes impliqués dans le déroulement de ces processus sont présentés sur le tableau n° 48 où figurent également les méthodes d'étude, utilisées et leurs contributions respectives dans l'analyse de ces mécanismes. Chaque processus de l'halomorphie apparaît ainsi constitué par une somme de mécanismes, dont certains sont communs aux trois processus (par exemple, le transfert des sels) alors que d'autres, sont spécifiques de tel ou tel processus.

L'exposé sera donc maintenant orienté vers la caractérisation des principaux mécanismes mis en jeu, à la lumière de l'exposé des faits, réalisé dans les deux premières parties du mémoire.

(1) - Ce terme n'est pas synonyme d'alcalinisation, ce dernier rendant seulement compte de l'élévation, vers le pôle alcalin, de la réaction (pH) du sol.

(2) - pH 1/2, 5 pouvant voisiner 10

METHODES D'ETUDE		MECANISMES MIS EN JEU		DEVENIR DES HERITAGES	PROCESSUS DE L'HALOMORPHIE		
		dans le sol	dans la solution		salinisation	sodisation	alcalisation
Approche chimique et physico-chimique	Profil salin général	Transfert et redistribution des produits dissous		EVOLUTION DE L'HERITAGE SALIN	☐	☐	☐
	Profil des ions		Transformations salines série neutre		☐	☐	(☐)
	Profil des sels		Transformations salines série alcaline				☐
	Profil sodique	Stockage des sels			☐		
Macro et micro morphologie		Echange de cations entre le sol et la solution		EVOLUTION DE L'HERITAGE SEDIMENTAIRE		☐	☐
Minéralogie	Modification de l'état structural		☐			☐	
	Transformation des minéraux argileux				(☐)	(☐)	(☐)
Caractères de l'halomorphie résultant de l'action de ces processus					Caractère salé	Caractère sodique	Caractère à alcali

TABLEAU n° 48 - Les processus de l'halomorphie, les mécanismes mis en jeu et les méthodes d'étude

Nota : Les transformations salines, par oxydo-réduction des produits soufrés, qui caractérisent les mangroves tropicales ne sont pas figurées, mais ce mécanisme s'inscrit facilement dans ce schéma sous l'appellation : transformations salines, série acide.

I - TRANSFERT DES IONS ET STOCKAGE DES SELS

Les sels en mouvement dans la solution du sol sont sous forme ionisée, dans un milieu généralement non saturé par l'eau.

Le transfert des sels peut résulter du phénomène de convection, conséquence des mouvements du liquide dans le milieu sous l'influence de l'ascension capillaire et de l'évaporation ou de l'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation. Il peut également, résulter du phénomène de diffusion, en réponse à des gradients de concentration (DOERING, REEVE, STOCKINGER - 1972).

Ce transfert est, d'autre part, influencé par les processus d'échange existant entre la solution saline et le sol ainsi que par le mouvement différentiel de certains ions (voir plus loin).

Il y a stockage des sels, chaque fois qu'apparaît la phase cristalline. Celle-ci a souvent pour conséquence une modification de l'organisation pédologique (voir plus loin). Cette conséquence extrême du transfert est l'expression la plus évidente du processus de salinisation.

Dans l'approche globale du pédologue de terrain, l'étude de ces mécanismes est abordée, d'une part au travers des facteurs et des conditions du milieu qui les déterminent, d'autre part au travers du constat de leurs résultantes qui modifient les caractéristiques de ce milieu.

A - INFLUENCE DES FACTEURS DU MILIEU NATUREL

1 - Le transfert des produits dissous exige, à partir d'une source de sel, un vecteur mobilisateur, c'est-à-dire des conditions entraînant un mouvement des solutions présentes dans le milieu. Cet état est réalisé dans les sols des marais et basses plaines maritimes par la présence d'une nappe salée peu profonde et d'un flux ascendant, conséquence de la remontée capillaire et de l'évaporation.

2 - Le transfert des produits dissous nécessite que la matière présente une bonne conductibilité hydraulique. Cette condition apparaît remplie dans de nombreux sols alluviaux du Languedoc-Roussillon et de la Camargue, caractérisés par leur texture moyenne limoneuse à limono-sableuse où les transferts per ascensum sont importants.

Le maintien d'une structure non dégradée sous l'influence des solutions salines concentrées de la série neutre et peut être aussi l'augmentation de la mouillabilité liée à la présence de sels, assurent des conditions optimales pour ce transfert. Le fait que ces sols soient pauvres en matière organique, constitue un argument supplémentaire.

3 - Le transfert et le stockage sont sous la dépendance de facteurs climatiques et bio-climatiques : influence de la demande d'eau atmosphérique dans le cas des sols nus, ce qui conduit à une accumulation saline superficielle ; influence des prélèvements d'eau par la plante dans le cas des pelouses, ce qui conduit à l'absence d'accumulation saline superficielle et à une accumulation saline située plus en profondeur (voir sous-chapitres 22 et 424).

Un bilan général E-P positif est favorable au processus de salinisation (région méditerranéenne).

Un bilan E-P négatif lui est défavorable (sols des marais atlantiques et des Wateringues du Nord - Pas-de-Calais).

4 - Le transfert des sels est conditionné par l'intensité du drainage caractérisant le paysage où il s'exerce qu'il s'agisse du drainage naturel dû à la pente générale et lié à la présence ou à l'absence de marées, ou du drainage artificiel pour les besoins de l'agriculture.

B - LES RESULTANTES DE CES MECANISMES AU TRAVERS DU CONCEPT DE PROFIL SALIN

Ces résultantes sont décrites à l'aide du concept de profil salin général (sous-chapitre 42) qui rend compte de la distribution de la salinité dans la tranche de sol située entre la nappe et la surface. J'ai distingué 4 types caractéristiques de profils salins dont l'horizon de diagnostic correspond à l'accumulation saline qui peut être :

- superficielle ou épipédonique, profil salin de type A,
- plus ou moins profonde (méso ou hypopédonique), profils salins de types B et D,
- à la fois superficielle et profonde, profil salin de type C.

L'interprétation générale qui est maintenant proposée conduit à considérer le profil salin comme la résultante des actions antagonistes, entre les processus de salinisation et de désalinisation, qui procèdent des différentes phases du transfert des solutions salines dans le profil du sol.

Compte-tenu des faits, il apparaît nécessaire de séparer, dans le profil du sol, deux zones :

- la partie supérieure où le transfert des sels procède essentiellement d'une dynamique verticale des solutions,
- la partie profonde où le phénomène apparaît plus complexe et où intervient l'action directe de la nappe phréatique.

1 - Considérations intéressant principalement la partie supérieure des sols

Dans la partie supérieure du sol et parfois dans la partie profonde, le transfert et le stockage des sels sont essentiellement liés à une dynamique verticale des solutions qui traduit la résultante des effets antagonistes entre la remontée capillaire et l'évaporation d'une part, l'infiltration des eaux de pluie, d'inondation ou d'irrigation, d'autre part.

Il est possible de distinguer différents cas :

a - Processus ascendant dominant

Dans ce cas, qui caractérise les sols nus de sansouire ou de tache salée, le processus ascendant de salinisation est évident de par l'accumulation saline superficielle et le maintien d'un profil salin de type A pendant la plus grande partie de l'année et parfois pendant toute l'année. C'est le cas de taches salées étudiées en Camargue (tache A₁ par exemple) ou de la sansouire du Bourdigou en Roussillon (sol B₁).

Dans ce dernier exemple, qui correspond à un sol uniformément limoneux, le profil salin a conservé sa forme avec maximum épipédonique, aux différentes saisons et le transfert des sels du haut vers le bas, au cours de l'hiver, ne se manifeste pas profondément. Le niveau général de salinité reste très élevé, à toutes les saisons, sur l'ensemble de la tranche de sol considérée.

b - Processus ascendant contrarié

Dans ce cas, le transfert ascendant des sels au cours de l'été peut ne pas se traduire par une accumulation saline superficielle et le transfert descendant, des sels, au cours de l'hiver, se manifeste par une nette désalinisation de surface, avec changement de forme du profil salin. Trois sous-cas seront examinés.

b₁ - Sol sous pelouse

Sous pelouse halophile, à recouvrement végétal dense, le processus de remontée des sels n'aboutit pas à une accumulation saline de surface, car il est contrarié :

- par la plus grande distance à la nappe, quand on compare au sol nu de sansouire,
- par le fait que l'évaporation superficielle ne joue pas, que le départ d'eau affecte toute la tranche de sol colonisée par les racines et que ce départ d'eau n'implique pas un transfert des sels,
- par la nature du matériau dans l'horizon de surface, lequel renferme de la matière organique ralentissant la remontée capillaire.

Dans ces conditions, le profil salin est de type D, l'horizon de surface étant le moins salé. Cette faible salinité explique l'existence de la pelouse mais la pelouse intervient à son tour en améliorant la perméabilité du sol par l'action des racines et de la matière organique, ce qui favorise le lessivage des sels dans cette tranche de sol, au cours de l'hiver. Il apparaît en effet, que les pluies d'hiver entraînent un processus affirmé de désalinisation dans l'horizon superficiel comme cela a été constaté dans le cas du sol B₂ de pelouse où l'horizon supérieur du sol possède une faible salinité pendant l'hiver. On observe alors un changement de forme du profil salin avec différenciation d'une forme B dont le maximum de salinité mésopédonique résulte d'un transfert vertical des sels vers le bas, ce dernier étant plus prononcé que dans le cas du sol nu de la station B₁ contigue.

b₂ - Influence de la texture

Pour le sol de la station U, très faiblement colonisé par la végétation, on assiste à l'individualisation d'un profil salin de type A, pendant l'été. Mais la différence avec la station B₁ est l'existence de très nets changements de forme du profil salin en hiver et au printemps : forme B en hiver qui traduit la désalinisation de surface et le transfert vertical des sels avec une forte désalure ; forme C au printemps qui indique une reprise du phénomène de salinisation ascendante.

C'est dans la texture hétérogène de ce sol que je rechercherai l'explication de cet état. Le sol est en effet caractérisé par l'existence de strates sableuses qui favorisent son drainage et partant le mouvement des sels vers le bas.

b₃ - Influence des inondations

Dans les stations périodiquement inondées par des eaux qui ne sont que très faiblement minéralisées par rapport à la nappe salée peu profonde, le processus ascendant est naturellement contrarié et le profil salin est de type D (salinité augmentant avec la profondeur) à l'issue de la période d'inondation : station V en

Roussillon, station 12 en Camargue. Le processus ascendant ne se manifeste qu'une partie de l'année par le passage d'un profil salin de type D vers un profil salin de type C (apparition d'un maximum superficiel) et peut être vers un type A, certaines années. Les sols correspondant à ce cas étudié sont occupés par une végétation clairsemée avec plages de sol nu.

c - Processus descendant dominant

Dans les sols des dépressions intérieures du Roussillon, autres que celle de Villeneuve-de-la-Raho, le profil salin est de type D et le niveau général de salinité bien moins important que dans le cas précédent, ce qui autorise le développement de pelouses qui ne présentent qu'un caractère sub-halophile (Montescot, Bages, etc). Ces exemples constituent une variante du sous-cas b_3 , avec une tendance beaucoup plus nette à la désalinisation, ce qui conduit à considérer que le processus descendant est cette fois dominant. Le sol présente d'ailleurs des propriétés particulières en relation avec ce processus (voir chap. 7).

Cet état est la conséquence de travaux d'assainissement agricole entrepris dans ces situations : présence d'un réseau de fossés à ciel ouvert qui entraîne l'abaissement de la nappe et favorise la désalinisation. Dans ces sols argileux, riches en matière organique, la vitesse de remontée capillaire des sels est plus lente que dans les limons alluviaux de la Salanque.

Mais, c'est certainement dans les marais du Médoc que le processus de désalinisation permanente est le plus affirmé, les caractères de salinité n'apparaissant, de façon marquée, qu'au delà de 1 m de profondeur (voir chapitre 7).

Il faut y voir l'influence climatique du régime océanique et également celle de l'environnement marin (présence de marées) qui favorise le drainage périodique gravitaire lequel n'existe pas en bordure de la Méditerranée.

C'est également le cas de la région maritime du nord de la France où le processus de désalinisation est total malgré des influences salines historiquement récentes. Dans ce cas, au climat et au type d'environnement marin, s'ajoutent la nature filtrante du sous-sol (sables fins) et un réseau de drainage très efficace.

2 - Considérations intéressant la partie profonde du sol

Dans la partie profonde du sol, les variations de salinité qui ont été constatées ne semblent pas toujours résulter d'un simple transfert vertical et descendant des sels solubles mais d'une dynamique plus complexe où intervient, directement, la nappe phréatique par ses battements verticaux (remontée hivernale en particulier).

Les arguments à l'appui de cette interprétation sont les augmentations de masse saline constatées dans certains sols en hiver et au printemps par rapport à la masse saline d'été. Il faut alors admettre qu'il y a, au cours de cette période, un afflux de sels qui ne proviennent pas des horizons immédiatement sus-jacents, puisque la masse saline a augmenté dans la tranche de sol considérée (1 mètre d'épaisseur). Cette caractéristique apparaît nettement sur le tableau 31 bis, dans le cas des stations U, CN et V.

Cet afflux de sel est très certainement lié à la remontée générale du plan d'eau au cours de cette période et, le maximum de salinité qui caractérise le profil salin hivernal de type B, aurait pour origine, non seulement des sels issus des horizons supérieurs sus-jacents, mais également des sels issus des horizons profonds, dont le transfert serait provoqué par une remontée de la nappe. Cet aspect du transfert profond devra nécessiter de nouvelles recherches pour faire la part des mouvements latéraux et des mouvements verticaux, au niveau de séquences fines.

3 - Les données fournies par les profils d'ions

L'étude des profils ioniques a permis de mettre en évidence un entraînement préférentiel des chlorures par rapport aux sulfates au cours du processus hivernal de désalinisation : le rapport Cl/SO_4 diminue dans les horizons de surface appauvris en sels et augmente dans les horizons sous-jacents enrichis (voir sous-chapitre 43).

L'examen de ce paramètre apporte des données complémentaires à l'étude de la dynamique du profil salin, son augmentation dans le profil du sol se faisant dans le sens du transfert des sels. Il est ainsi possible de séparer les phases de transfert per ascensum (profil salin de type ascendant) des phases de transfert per descensum (profil salin de type descendant).

Au niveau de l'étude des profils de cations solubles, il n'apparaît pas possible de mettre en évidence un entraînement préférentiel de tel cation par rapport à tel autre en raison des échanges sol-solution (voir plus loin) qui modifient la composition cationique de la solution d'un point à un autre du profil. C'est ainsi que les variations des rapports Na/Mg et $Na/Ca + Mg$ ne sont pas superposables à celles du rapport Cl/SO_4 .

Enfin, il faut noter que le transfert des solutions salines dans le sol favorise l'échange de cations et la sodisation du complexe (voir paragraphe suivant). D'autre part, le stockage des sels engendre certains processus modifiant l'organisation primitive et les propriétés du matériau pédologique (voir modifications de l'état structural).

II - L'ECHANGE DE CATIONS ET LA SODISATION DU COMPLEXE

L'interaction entre la solution saline imprégnant le sol et le matériau pédologique se traduit par un échange de cations entre la phase solide et l'électrolyte.

Au cours de cet échange, qui peut être décrit par l'équation de GAPON^(M), la sélectivité pour les ions bivalents Ca et Mg va être plus importante que pour les monovalents Na et K. FRIPIAT, CHAUSSIDON et JELLI (1971) font remarquer que la rétention d'un ion bivalent entraîne une configuration particulière, où un seul atome,

$$^{(M)} - \frac{Na}{Ca + Mg} = k \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{0,5}}$$

Cations échangeables en me/100 g Cations solubles de la solution du sol en me/l

doublement ionisé, équilibre deux charges situées en moyenne (dans le cas des argiles) à des distances de 10 Angstroms. Pour qu'un ion bivalent soit remplacé par deux monovalents, il faut que la concentration de ces derniers soit assez élevée pour que, pendant le temps de saut t , de l'ion bivalent, deux ions monovalents soient suffisamment proches des sites de l'échangeur qui sont libérés.

Compte-tenu de ces aspects, la sodisation du complexe nécessite donc, dans la solution saline, un pourcentage élevé d'ions Na par rapport aux cations Ca et Mg, pour que le phénomène puisse convenablement se développer.

Ces conditions sont réalisées dans la majorité des sols étudiés où l'ion Na représente à lui seul plus de 80 % des cations en solution. A l'analyse, ces sols se révèlent comme renfermant un taux élevé de sodium échangeable.

La connaissance de la composition cationique de la solution saline (paramètre S. A. R.) permet une bonne prévision du taux de sodisation et une corrélation a été établie dans le cas des sols ayant fait l'objet de cette étude (voir sous-chapitre 45). Le phénomène de sodisation du complexe entraîne une modification de la composition cationique de la solution saline au cours de son transfert depuis la nappe jusqu'à la surface du sol. Cette modification se traduit principalement par l'augmentation du taux de calcium soluble issu de l'échange. Ce fait a été mis en évidence par l'étude des profils ioniques (sous-chapitre 43), il conduit à des transformations salines (voir paragraphe suivant).

Malgré son caractère sodique, le sol possède un état structural de type non dégradé tant que la solution saline imprégnant le sol conserve une forte concentration en électrolytes et est composée de sels neutres (voir sous-chapitre 51). On assiste à la formation d'agrégats sous l'influence des sels. Le sol est de type solontchak, mais possède un complexe sodique (voir plus loin, chapitre 7).

III - LES TRANSFORMATIONS SALINES DE LA SERIE NEUTRE

Elles sont une conséquence des modifications cationiques résultant du phénomène de sodisation du complexe qui se traduit par l'apparition en solution, d'ions calcium déplacés par les ions sodium qui ont été retenus par le complexe absorbant du sol. Le devenir de ces ions calcium va être déterminé par les conditions anioniques régnant dans la phase liquide de l'électrolyte (voir sous-chapitre 44).

Si le milieu est très riche en ions chlorures et pauvre en ions sulfates et bicarbonates (valeurs élevées du rapport Cl/SO_4), une grande partie du calcium⁽¹⁾ demeure soluble et on assiste à la formation de chlorure de calcium ou de chlorures complexes de calcium et de magnésium (tachyhydrite) qui s'ajoutent au sel dominant constitué par le chlorure de sodium. Par leur caractère hygroscopique, ces sels alcalino-terreux confèrent aux accumulations salines superficielles un faciès particulier désigné sous le terme de salant humide.

(1) - une partie du calcium a déjà été engagée dans la formation de calcaire et de gypse

Il apparaît logique de penser que la présence de chlorure de calcium en quantités importantes constitue la marque d'un processus récent de salinisation. Cette présence peut se manifester dans les premiers stades du processus de salinisation (ou de resalinisation) d'un sol. Par la suite, le calcium facilement soluble va progressivement diminuer de par la formation de carbonates alcalino-terreux et de gypse.

Si le milieu est plus riche en ions sulfates (valeurs basses du rapport Cl/SO_4), le calcium issu de l'échange participe à la formation de gypse peu soluble, qui précipite dans le profil. Les seuls chlorures possibles sont alors $Na Cl$ et $MgCl_2$. Différents sulfates peuvent également se former. Le faciès est de type salant blanc avec accumulation gypseuse sub-superficielle. Une partie du calcium participe également à la calcarisation du profil.

Ces différenciations salines de la série neutre ont été mises en évidence par l'étude du profil des sels ainsi que par l'examen des cristallisats d'extraits aqueux de sols et des efflorescences salines. Elles se manifestent dans des sols de type solontchak (voir plus loin) et n'entraînent ni une forte augmentation du pH ni une dégradation marquée de l'état structural.

IV - LES TRANSFORMATIONS SALINES DE LA SERIE ALCALINE

Elles sont caractérisées par l'apparition, en quantités dosables, des carbonates mono et bisodique dans la solution saline. La formation de ces sels procède -dans les sols étudiés- d'une réaction entre le complexe fortement sodique et la solution au cours d'un processus marqué de désalinisation sous l'influence des eaux de pluie ou d'inondation. Dans le Midi de la France, ce phénomène peut ne présenter qu'un aspect saisonnier (voir sous-chapitres 44 et 45).

La présence de ces sels alcalins élève considérablement le pH du sol qui peut atteindre 10 et les conditions favorables à la dégradation de l'état structural se trouvent réalisées même si le niveau de salinité est encore élevé. On parle alors non pas de sodisation mais d'alcalisation du sol lequel appartient à l'ensemble des sols salés à alcali (voir chapitre 7).

Les transformations salines de la série alcaline peuvent succéder aux transformations salines de la série neutre, dans des sols de type solontchak soumis à un processus naturel ou artificiel de désalinisation. Il y a alors passage progressif du solontchak vers le sol à alcali sauf si des amendements gypseux sont apportés, ce qui diminue considérablement le risque d'alcalisation.

V - LES MODIFICATIONS DE L'ETAT STRUCTURAL

Sous l'influence de la salinité, de la sodicité et de l'alcalinité, le matériau pédologique peut voir son organisation et son état structural primitifs se modifier et évoluer. Il apparaît possible, compte-tenu de ce qui a été précédemment exprimé, de distinguer les modifications par agrégation de celles qui procèdent d'une désagrégation et d'une dégradation.

A - LES MODIFICATIONS PAR AGREGATION

Il a été montré dans le sous-chapitre 51, le rôle flocculant, favorable à l'agrégation, des solutions salines neutres présentant une forte concentration en électrolytes. Ce fait explique l'excellente structure polyédrique que l'on peut rencontrer dans l'horizon supérieur des solontchaks même quand la sodicité apparaît élevée. Il en résulte une bonne perméabilité pour les solutions salines tant que la concentration reste élevée.

B - LES MODIFICATIONS PAR DESAGREGATION ET DEGRADATION

Deux cas peuvent être envisagés :

1 - Influence mécanique des cristallisations salines

Bien que constituant un agent d'agrégation, le sel peut paradoxalement avoir un effet différent en agissant mécaniquement, par la formation de cristallites, sur l'état structural du sol.

Il a été ainsi montré (sous-chapitre 52) que la genèse de cristallites allongées de NaCl, dans certaines situations du terrain, très riches en sels, provoquait la transformation d'une structure initialement lamellaire en une structure poudreuse pseudo-sableuse caractéristique du salant pulvérulent. Il s'agit d'une manifestation temporaire et estivale de la salinité. Il apparaît, que pour une situation donnée le phénomène ne se manifeste pas toutes les années. J'ai également constaté que la formation abondante de cristaux de gypse entraînait une modification de l'organisation primitive du sol par dilution de la matière minérale au sein de la masse gypseuse dont la pression de cristallisation provoque une désagrégation du matériau terreux.

2 - Influence physico-chimique des conditions saline et sodique

La dégradation de la structure peut se manifester dans deux cas.:

a - En milieu assez fortement salé où des sels de la série alcaline se sont différenciés. En présence de ces sels, le pH s'élève fortement et peut voisiner 10. Ces conditions sont favorables à la peptisation des colloïdes argileux conduisant à une dégradation de l'état structural.

b - Par abaissement de la salinité en-dessous du seuil nécessaire au maintien d'un état flocculé. Ce seuil est d'autant plus élevé que la sodicité est forte. Ces conditions peuvent être réalisées au cours d'un processus naturel ou artificiel de désalinisation. Elles peuvent conduire à des différenciations salines de la série alcaline, ce qui augmente l'intensité du phénomène de dégradation de l'état structural.

VI - LE DEVENIR DES MINERAUX ARGILEUX DE L'HERITAGE SEDIMENTAIRE

Le schéma de G. MILLOT (1962) nous conduit à rechercher les parts de l'héritage, des transformations et des néoformations.

1 - L'héritage sédimentaire est déterminant dans ce matériel alluvial qui reflète la composition minéralogique des sols et des formations constituant le bassin d'alimentation. Ce fait a été établi par CHAMLEY, PAQUET et MILLOT (1962), en ce qui concerne les vases méditerranéennes. Ainsi, pour prendre l'exemple du

Roussillon, on constate que la composition minéralogique des alluvions fluviatiles s'interprète facilement quand on connaît celle des matériaux dont elles sont issues :

- . kaolinite et halloysite dans les vieux sols rouges lessivés,
- . montmorillonite et illite des sols calcimorphes,
- . chlorite et illite des schistes pyrénéens.

2 - Les transformations sont peu accusées en terrain alluvial riche en bases solubles qui constitue un milieu conservateur des produits de l'érosion et plus favorable à l'agradation qu'à la dégradation. Etudiant les minéraux argileux, dans le domaine océanique de l'estuaire de la Gironde, C. LATOUCHE (1971) a en effet montré que le rapport montmorillonite sur illite diminue dans une séquence amont-aval, ce qui indiquerait une transformation par agradation (fixation de cations) de la montmorillonite vers l'illite, au contact du milieu marin. Le fait que ces transformations soient plus nettes que dans le milieu méditerranéen résulterait d'un plus long temps de contact avec les eaux marines, les sédiments étant plus rapidement enfouis dans le domaine méditerranéen.

Les modifications, constatées dans les sols halomorphes du Roussillon, se manifestent par l'apparition d'intergrades, dans l'horizon superficiel (profil CN par exemple, voir annexe V A). Mais, il est vraisemblable que ces modifications ne correspondent pas à des transformations "in situ", l'examen du profil granulométrique (fig. 8) montrant une discontinuité pouvant traduire deux apports. Dans ce cas, les variations enregistrées seraient donc d'origine sédimentaire.

3 - Les néoformations pourraient être envisageables dans le milieu salin faisant l'objet de ce mémoire. La recherche des attapulgites et des palygorskites s'est avérée négative, dans le cas des stations étudiées. Il en est de même en ce qui concerne les silicates sodiques de types analcime.

D'une manière générale, la nature des minéraux argileux n'apparaît donc pas significative du milieu étudié où l'héritage sédimentaire imprime sa marque. La part des transformations est faible et les néoformations -qui pourraient être le véritable trait- ne sont pas discernables.

DIAGNOSTIC ET CLASSEMENT DES SOLS DE LA SEQUENCE HALOMORPHE DANS LE SUD ET LE SUD-OUEST DE LA FRANCE

LES INCIDENCES SUR LA CLASSIFICATION GENERALE DES SOLS HALOMORPHES

L'étude des sols halomorphes du Sud et du Sud-Ouest de la France conduit à considérer que certaines modifications et précisions peuvent être apportées à l'actuelle classification, non seulement dans le choix et la définition des critères, mais également dans le découpage de la classe en groupes et sous-groupes en ce qui concerne les sols non lessivés.

71 - LES CRITERES DU DIAGNOSTIC

I - RAPPEL DES CRITERES ET DES TYPES DE SOLS ACTUELLEMENT RETENUS DANS LA CLASSIFICATION FRANCAISE

La classification française des sols halomorphes, dans ses différentes "approximations" (G. AUBERT et Ph. DUCHAUFOR - 1956, G. AUBERT - 1963, G. AUBERT - 1965, C. P. C. S. - 1967) fait intervenir des critères chimiques et morphologiques pour définir les différentes catégories de sols halomorphes.

Au plan chimique, on considère comme salé tout sol dont la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 7 mmhos/cm et comme "à alcali" tout sol dont le taux de sodium échangeable est supérieur à 10 % de la capacité d'échange en bases.

Au plan morphologique, on sépare les sols à structure dégradée de ceux qui ne présentent pas ce caractère et on tient compte des types de profils pédologiques traduisant l'évolution du sol et, en particulier, l'éventuel lessivage des constituants argileux (profil A B C).

Dans la première sous-classe, à structure non dégradée et à profil non lessivé, se situent essentiellement les solontchaks ou sols salins qui, dans l'état actuel de la classification, possèdent le caractère salé. Dans la seconde sous-classe, à structure dégradée et à profil de type A (B) C ou A B C, le caractère à alcali est toujours présent et peut être accompagné du caractère salé.

Les classificateurs distinguent : les sols salés à alcali, caractérisés par un profil A (B) C et par la coexistence des 2 caractères chimiques ; les solonetz à profil A B C où le caractère salé est fortement atténué et où l'horizon B présente une structure colonnaire à prismatique ; les solods qui sont des sols halomorphes à profil textural différencié, acidifiés dans l'horizon A₂ où l'argile est dégradée.

II - LES PRECISIONS APORTEES PAR LA PRESENTE ETUDE

A - LES CRITERES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES

a - L'état de la structure⁽¹⁾

L'état de la structure implique de distinguer les structures de type dégradé de celles qui ne présentent pas ce caractère. Cette notion est fondamentale car elle traduit la présence ou l'absence de sels solubles en quantité suffisante pour maintenir les constituants du sol dans un état floculé ou dispersé. Dans le premier cas, l'évolution pédologique est bloquée. Dans le second, le transfert d'argile par lessivage est possible. En d'autres termes, les sols riches en sels solubles -à condition qu'il s'agisse principalement de sels neutres- possèdent une structure non dégradée, même en présence de sodium échangeable, alors que les sols riches en sodium échangeable mais pauvres en sels solubles possèdent ordinairement une structure de type dégradé.

On peut considérer comme non dégradée, toute structure fragmentaire bien individualisée de type polyédrique, cubique ou grumeleux et, comme dégradée, toute structure massive où les seuls éléments structuraux, quand ils existent, sont constitués par des prismes compacts plus ou moins colonnaires. Cette distinction est uniquement basée sur des observations macro ou micromorphologiques car les tests de stabilité structurale (méthode S. HENIN et collaborateurs) montrent que dans tous les cas l'instabilité structurale est très forte, exception faite des horizons gypseux ou riches en matière organique (voir chapitre 5).

Il apparaît toutefois délicat d'appliquer cette distinction dans le cas des sols de texture limoneuse ou limono-sableuse. Il existe d'autre part des cas intermédiaires où la structure est qualifiée de semi-dégradée (voir plus loin).

Malgré ces difficultés, l'importance fondamentale de cette séparation et l'intérêt qu'elle présente en cartographie (c'est un critère de terrain), paraissent indéniables et, comme les auteurs de la classification des sols, je pense que ce critère doit figurer au niveau le plus élevé, c'est-à-dire au niveau de la sous-classe.

b - Le développement du profil pédologique

La tendance générale préconisée par les classificateurs est que les sols à structure non dégradée présentent un profil de type AC et que les sols à structure dégradée possèdent un profil pédologique de type A (B) C ou A B C.

(1) - La notion d'état de la structure est également contenue dans la définition des critères qualifiés de chimiques (voir plus loin, paragraphe 3)

Cette correspondance structure-profil n'apparaît pas complètement vérifiée par les résultats de cette étude. Il sera en effet montré que des solontchaks à structure non dégradée peuvent posséder, non seulement un profil de type AC, mais également un profil de type A (B) C. Il a été d'autre part constaté que des sols à structure dégradée peuvent posséder un profil pédologique non seulement de type A (B) C mais également de type AC. Les sols halomorphes de profil A B C seront laissés sous silence car ils n'ont pas été mis en évidence sur les terrains faisant l'objet de cette étude.

B - LES CRITERES CHIMIQUES PROPOSES

Les données découlant de cette étude et en particulier des différentes formes et distributions de la salinité et de la sodicité dans le profil, conduisent à distinguer trois critères principaux :

- le caractère salé,
- le caractère sodique,
- le caractère à alcali qui constitue un cas particulier du caractère sodique.

a - Le caractère salé

Le caractère salé traduit la présence de sels solubles en quantités anormalement élevées. L'examen des profils salins a montré, que les sols présentant visuellement des caractères bien marqués de salure (végétation spécialisée, sansoufre, taches salées) possèdent une conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée largement supérieure à 7 mmhos/cm sur l'ensemble de la tranche de sol comprise entre le plan d'eau et la surface du sol et ce à différentes saisons de l'année. De tels sols sont considérés comme possédant un caractère salé permanent.

Dans d'autres cas constatés au cours de cette étude, la conductivité de l'extrait de pâte saturée peut s'abaisser en-dessous de 7 mmhos/cm, au niveau des horizons A et ce pendant certaines saisons de l'année, les valeurs d'été demeurant supérieures à 7 mmhos sur l'ensemble du profil. De tels sols sont considérés comme possédant un caractère salé semi-permanent.

Sous pelouses sub-halophiles, la salinité peut être en permanence inférieure à 7 mmhos/cm dans les horizons A, ne dépassant ce seuil qu'à partir de 30 ou 40 cm de profondeur. Dans ces conditions, il apparaît préférable de parler d'un sol salé en profondeur.

Une définition acceptable du caractère salé d'un sol doit rendre compte de ces trois aspects ; aussi est-il proposé de considérer comme salé tout sol dont la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 7 mmhos/cm :

- 1 - soit sur l'ensemble du profil à toutes les saisons (caractère salé permanent),
- 2 - soit sur l'ensemble du profil, certaines saisons (l'été surtout), les horizons A pouvant ne pas présenter le caractère salé pendant l'hiver (caractère salé semi-permanent),
- 3 - soit dans la partie du profil située à partir de 40 cm de profondeur et ce à toutes les saisons (caractère salé en profondeur).

L'application de ces critères conduira à distinguer :

- Pour les solontchaks :

- . le solontchak s. s. ou hyper solontchak dans le cas 1,
- . le solontchak s. l. dans le cas 2,
- . le crypto-solontchak dans le cas 3.

- Pour les sols salés à alcali :

- . le sol salé (s. s.) à alcali dans le cas 1,
- . le sol salé (s. l.) à alcali dans le cas 2,
- . le sol salé (en profondeur) à alcali dans le cas 3.

b - Le caractère sodique

Je considère comme sodique tout échantillon de sol où l'analyse révèle un taux de sodium échangeable élevé et toujours supérieur à 15 % de la capacité d'échange, cette propriété ne s'accompagnant pas obligatoirement d'une nette dégradation de la structure, ni d'une forte élévation du pH (pH eau $1/2,5 \leq 8,8$, pH pâte $< 8,5$), pendant la plus grande partie de l'année dont la saison sèche.

Les données exposées dans le chapitre 4 conduisent à considérer, comme sodique, tout sol qui possède la précédente propriété dans la partie du profil pédologique, s'étendant sous les horizons A et comprenant des horizons de types B, (B) ou C. Ce caractère est vérifié à fortiori si les horizons A sont également sodiques.

c - Le caractère à alcali

Il est proposé de considérer comme possédant le caractère à alcali, tout sol de caractère sodique présentant en outre les particularités suivantes, la première étant obligatoire :

- . structure de type nettement dégradé,
- . pH $1/2,5 > 8,8$ et pH pâte supérieur à 8,5
- . présence de sels de la série alcaline ($\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{HCO}_3\text{Na}$) en quantités dosables.

72 - LA MISE EN OEUVRE DE CES CRITERES DANS LE CLASSEMENT DES SOLS DE LA SEQUENCE HALOMORPHE DU SUD ET DU SUD- OUEST DE LA FRANCE

I - SCHEMA DE CLASSEMENT

Il est proposé dans le tableau 49, un schéma de classement faisant intervenir les différentes combinaisons retenues, les cas "caractère à alcali seulement" et "profil pédologique de type A B C" n'étant pas intégrés car ils n'ont pas été observés au cours de cette étude. L'application de ce schéma aux sols halomorphes du sud et du sud-ouest de la France conduit à envisager 6 cas principaux à l'intérieur de l'ensemble halomorphe.

ETAT DE LA STRUCTURE DU SOL		Structure non dégradée		Structure semi-dégradée	Structure dégradée
		CRITERES CHIMIQUES DE L'HALOMORPHIE		Caractère salé uniquement	Coexistence des caractères salé et sodique
Différenciation du profil pédologique	Type A C (peu différencié)	Premier cas : Solontchak Ca-Mg continental et solontchak de tex- ture sableuse, lit- toral	Second cas : Solontchak Na des basses plaines mé- diterranéennes et du schorre Atlan- tique.		Cas n° 5 : Sol salé à alcali de la région du mas d'Uston
	Type A(B) C (moyent. différencié)		Troisième cas : Solontchak Na de la dépression in- térieure de Ville- neuve-de-la-Raho	Cas n° 4 : Sol sodique des palus du Médoc	Cas n° 6 : Sol salé à alcali et proto- solonetz des dépressions intérieures du Roussillon

TABLEAU n° 49 - Classement des principaux types de sols halomorphes du Sud et du Sud-Ouest de la France

II - ETUDE DES DIFFERENTS CAS EXPOSES DANS LE TABLEAU 49

A - PREMIER CAS : STRUCTURE NON DEGRADEE, PROFIL PEDOLOGIQUE DE TYPE AC, CARACTERE SALE UNIQUEMENT

a - L'absence de caractère sodique peut être analytiquement mise en évidence

On se trouve en présence d'un sol salé ne renfermant jamais plus de 15 % de sodium sous forme échangeable, mais dont le niveau de salinité reste toujours très élevé. De tels sols ne paraissent pas exister dans les terrains que nous avons étudiés sur le territoire français.

Nous avons eu cependant l'occasion d'examiner et d'étudier de tels sols en Espagne centrale⁽¹⁾ où la présence d'une faible sodicité sur l'ensemble du profil, résulte de la nature fortement magnésienne des sels imprégnant le sol (voir tableau ci-après).

Profondeurs en cm	Conductivité mmhos/cm	SALINITE						Sodicité Na % de T
		Cations %			Anions %			
		Ca	Mg	Na	HCO ₃	Cl	SO ₄	
0-5	14	16	55	29	3	47	50	7
5-10	21	10	64	26	3	49	48	8
10-20	40	6	69	25	2	61	37	11
20-30	46	6	71	23	2	65	33	11
30-40	54	5	72	23	1	72	27	13
40-50	45	6	70	24	1	69	30	12
50-60	34	10	65	25	2	68	30	10
60-70	15	16	57	27	2	61	37	7
70-80	12	17	53	30	2	51	47	7
80-90	11	19	52	19	1	48	51	6
90-100	10	21	51	19	1	46	53	5

TABLEAU n° 50 - Caractéristiques chimiques d'un sol salé d'Espagne centrale

Les caractéristiques de ces sols sont indiscutablement celles d'un solontchak s. s. dont on précisera la garniture essentiellement calci-magnésique du complexe absorbant (solontchak s. s. Ca-Mg) ce qui signifie que (Ca + Mg) % représente plus de 85 % des cations échangeables.

b - L'absence de caractère sodique ne peut être analytiquement mise en évidence

Dans les sols sableux très salés du littoral Languedoc-Roussillon et de la Camargue, la très faible capacité d'échange du matériau ne permet pas la mesure interprétable des ions échangeables.

On ne retient par conséquent que le caractère salé pour définir ces sols. C'est le cas par exemple des bas lidos submersibles du département de l'Aude, ou des sables salés de l'Espiguette près de Montpellier. On parle alors de solontchak au sens large, sans préciser l'état du complexe absorbant.

(1) - Ces prélèvements ont pu être effectués grâce à l'amabilité de J. PORTA, chargé de l'étude des sols de cette région.

Les sols du bas lido sableux, au nord de Leucate, sont colonisés par un peuplement large d'halophytes (Salicornia fruticosa et Obione portulacoides dominants). On trouve en surface des tests d'oursins et des squelettes de gorgones, ce qui traduit l'influence marine. Celle-ci se manifeste encore par la présence de coquilles de Cardium edule dans le matériau sableux constituant le sol. Une particularité de ces sols réside dans la présence de plusieurs dalles gréseuses sub-superficielles épaisses de quelques centimètres et séparées par des lits sableux. Ces grès calcaires sont colorés en noir ou en brun rouille par des oxydes de fer. Ils fossilisent des trous de vers marins. Compte-tenu de l'existence de cette dalle, excessivement dure, les végétaux ne colonisent que les quelques centimètres de sables situés au-dessus.

Le mécanisme de la formation de ces grès ferrugineux peut s'expliquer par une solubilisation du fer en milieu réducteur, résultant de la submersion, puis par une réoxydation en milieu aéré avec précipitation de dépôts ferriques. Un tel processus a été mis en évidence par B. CALLAME et J. DUPUIS (1972), dans la zone intertidale de la pointe d'Arcay, en Vendée.

B - SECOND CAS : STRUCTURE NON DEGRADEE, PROFIL A C, COEXISTENCE DES CARACTERES SALE ET SODIQUE

Il s'agit de la catégorie de sols halomorphes qui apparaît la plus répandue dans le Midi de la France et qui peut constituer l'orthotype des sols salés français. Ces sols correspondent aux sansouires, enganes et pelouses halophiles où le niveau de salinité reste très élevé en toutes saisons et dans tous les cas étudiés, supérieur à 10 mmhos sur l'ensemble du profil, comme on peut le constater en examinant les profils salins des stations B₁ et B₂ dont les sols appartiennent à ce groupe. La seconde caractéristique, très importante, concerne le taux de sodium échangeable qui reste supérieur -dans tous les cas- à 15 % de la capacité d'échange sur l'ensemble du profil, ce qui permet d'affirmer, sans ambiguïté, que ces sols possèdent un caractère sodique coexistant avec le caractère salin. Cette constatation est d'ailleurs logique ; elle résulte du caractère marin ou laguno-marin, fortement sodique, des nappes constituant la source de sels solubles ainsi, par voie de conséquence, que des solutions salines imprégnant le sol. Le paramètre S.A.R. y présente toujours des valeurs très élevées, ce qui explique les niveaux également élevés de la sodicité constatés dans le sol.

La forte concentration saline assure le maintien d'une structure non dégradée avec des agrégats de type polyédrique dans les matériaux suffisamment fins. L'évolution pédologique reste très faible et le profil pédologique est de type A C.

Dans ces conditions, il s'agit de sols de type solontchak dont le caractère sodique est précisé par l'appellation de solontchak sodique, ce qui signifie que la somme des cations alcalino-terreux échangeables représente toujours moins de 85 % des cations échangeables.

L'étude de la réaction de ces sols montre, par ailleurs, que le pH de la pâte saturée reste toujours inférieur à 8,5 sur l'ensemble du profil et que le pH 1/2,5 n'excède pas les valeurs de 8,8. De nombreux profils effectués en Camargue et en Languedoc-Roussillon appuient ces conclusions et conduisent à distinguer deux premiers cas, illustrés par les profils B₁ et B₂ dont on a suivi l'évolution saisonnière :

- le solontchak sodique de sansouire littorale (B₁),
- le solontchak sodique de pelouse halophile (B₂),

auquel il faut ajouter un troisième cas spécifique du littoral atlantique et que nous avons étudié dans les marais du Médoc.

a - Solontchak s. s. sodique de sansouire (sol nu de la station B₁, annexe X A)

La sansouire correspond aux zones les plus salées où le sol est nu sur de grandes surfaces avec, çà et là, des coussinets circulaires, constitués par Arthrocnemum, glaucum. Les sansouires sont répandues en Camargue. Elles tendent à diminuer en Roussillon où la zone la plus typique se situe dans la région de l'aérodrome militaire de la Salanque. En saison sèche, le sol nu se couvre d'efflorescences blanches de sel et l'on assiste localement à la genèse d'horizons superficiels poudreux résultant d'un mécanisme étudié plus haut et constituant une manifestation estivale de l'halomorphie. Le matériau pédologique est constitué par des alluvions fluviatiles, la plupart du temps, limoneuses et calcaires. Le plan d'eau y est fluctuant et toujours fortement salé. La remontée capillaire y est très rapide et les accumulations salines superficielles particulièrement intenses.

De ce fait, les maximums de salinité et de sodicité sont épipédoniques. La conductivité de l'extrait de pâte saturée apparaît supérieure à 20 mmhos/cm sur l'ensemble du profil et le taux de sodium échangeable est excessivement élevé puisqu'il peut dépasser 50 % de la capacité d'échange. On note parfois un niveau sub-superficiel d'accumulation du gypse et un second niveau en profondeur.

Les caractéristiques analytiques et morphologiques détaillées d'un profil sont présentées dans l'annexe X_A. Les éléments essentiels suivants seront retenus :

- texture limoneuse micacée sur l'ensemble du profil,
- profil pédologique peu différencié de type A C avec horizon A mince et pauvre en matière organique,
- structure faiblement différenciée, mais de type polyédrique, conduisant à considérer la structure comme non dégradée,
- présence d'horizons d'accumulation du gypse,
- faible taux de calcaire avec légère accumulation en surface,
- pH 1/2, 5 n'excédant pas 8,8 et pH pâte inférieur à 8,5,
- faciès superficiel de type salant blanc (voir paragraphe 433, le profil des sels) pouvant présenter également le type poudreux à certaines périodes (1).

b - Solontchak sodique de pelouse halophile (B₂, annexe X B)

Par opposition aux sols nus de la sansouire, où se trouvent des ilots d'Arthrocnemum, le terme de pelouse halophile désigne des zones légèrement plus hautes intégralement colonisées par la végétation, laquelle comprend bon nombre d'halophytes strictes (Salicornia fruticosa, Obione portulacoides, Statice limonium) et de nombreuses graminées.

(1) - Le faciès poudreux n'est pas spécifique des solontchaks et il apparaît fréquemment dans les sols salés à alcali d'Afrique du Nord (G. AUBERT, com. pers.). Dans le cas du littoral Languedoc-Roussillon, l'horizon poudreux repose souvent sur un horizon enrichi en gypse.

Dans ces sols, le processus d'alimentation saline, à partir de la nappe, n'est pas régi, comme dans le cas précédent, par le phénomène d'évaporation du sol nu, mais par celui d'évapotranspiration de la pelouse. En conséquence, les profils salins ne présentent pas la même forme (voir chapitre 4).

D'autre part, on assiste à une individualisation plus marquée de l'horizon A_1 que pour le sol de sansouire de par la plus grande richesse en matière organique. Cette particularité, par les caractéristiques physiques qu'elle engendre, favorise, mieux que pour la sansouire, la désalinisation hivernale de l'horizon de surface. Une autre différence réside dans la position de l'horizon d'accumulation gypseuse (quand il existe), lequel se trouve localisé plus en profondeur que pour le sol nu, comme on peut le voir en comparant les profils B_1 et B_2 , ce dernier concernant le sol de pelouse halophile. Enfin, on remarque que le plan d'eau salée est généralement plus profond que sous la sansouire.

L'étude du profil pédologique de la station B_2 , cité en exemple vérifie les assertions précédentes et conduit aux conclusions suivantes, en ce qui concerne le chimisme du sol (voir annexe X B).

- La conductivité de l'extrait de pâte saturée est généralement supérieure à 10 mmhos/cm sur l'ensemble du profil, exception faite de l'horizon superficiel A_{11} où elle peut s'abaisser en-dessous de cette valeur, pendant l'hiver (solontchak s.1.). Dans tous les cas, le profil salin est de type D, la salinité augmentant en profondeur.

- La sodicité est supérieure à 20 % de T sur l'ensemble du profil, avec un maximum mésopédologique bien marqué où le taux de sodium échangeable voisine 50 % de la capacité d'échange.

- Les valeurs du pH 1/2, 5 restent inférieures à 8,8 sur l'ensemble du profil.

En conclusion, les caractéristiques morphologiques et chimiques nous conduisent à classer ce sol comme un solontchak s.1. sodique de pelouse halophile.

c - Solontchak s.s. sodique du schorre atlantique (profil Médoc 45, annexe X C)

En bordure de l'Atlantique, la zone du schorre correspond à la partie la plus terrestre de la frange littorale soumise à l'influence directe de la mer, la zone la plus marine correspondant à la slikke. Le schorre est formé par des sédiments fluvio-marins, colonisés par une abondante végétation d'halophytes et périodiquement submergés par des eaux salées, aux fortes marées. Les bas lidos submersibles du littoral audois - dont on a déjà présenté les caractéristiques plus haut - sont très comparables à ces terrains dans leur situation méditerranéenne.

Le profil cité en exemple a été implanté dans un secteur du schorre situé dans l'estuaire de la Gironde, en rive gauche (P. 45). Il présente les caractéristiques suivantes (annexe X C).

- Profil pédologique peu différencié, de type A C, où l'horizon humifère de surface est bien marqué et où les horizons C sont fortement affectés par l'hydromorphie.

- La structure peut être considérée comme présentant des agrégats individualisés dans l'horizon 20-60. De ce fait, elle n'est pas de type dégradé.

- Le profil salin est de type C, résultant du régime particulier des submersions périodiques. La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée apparaît supérieure à 25 mmhos/cm sur l'ensemble du profil (prélèvements de mai 1973). Le caractère salé est donc très prononcé (cf. figure 38), il en est de même du caractère sodique avec un taux de sodium échangeable voisin de 45 % de T sur l'ensemble du profil (cf. figure 37).

En liaison avec un pH qui n'excède pas 8,6, les caractéristiques précédentes nous conduisent à classer ce sol comme un solontchak sodique du schorre atlantique.

C - TROISIEME CAS : STRUCTURE NON DEGRADEE, COEXISTENCE DES CARACTERES SALE ET SODIQUE, PROFIL PEDOLOGIQUE DE TYPE A (B) C.

L'exemple de la dépression de Villeneuve-de-la-Raho (annexe X D)

J'ai caractérisé ce cas dans une localisation particulière qui est celle de la dépression intérieure très salée de Villeneuve-de-la-Raho (profil V) dans le Roussillon. Cette "cuvette" de forme grossièrement circulaire, est surplombée par des falaises abruptes ou par des pentes plus douces taillées dans les sédiments meubles du Pliocène. Les sédiments lagunaires occupant cette dépression sont très fortement imprégnés de sels, la source de sels solubles étant constituée par la nappe salée peu profonde. La cuvette est périodiquement inondée après les pluies, les eaux d'inondation possédant un caractère faiblement salé, qui participe dans une certaine mesure à l'alimentation saline en surface du sol et qui provient du lessivage d'un environnement pliocène (voir sous-chapitre 22).

La station V qui a fait l'objet de cette étude, se situe dans le secteur le plus salé de la dépression, avec une végétation typique d'halophytes alors que dans d'autres secteurs, cette végétation est en régression, pour faire place à des groupements helophiles ou post-halophiles (P. SIMONNEAU - 1967).

L'étude de la Station V nous montre, que la salinité reste supérieure à 20 mmhos/cm sur l'ensemble du profil, le profil salin étant de type C (chapitre 4). La sodicité reste également très élevée sur l'ensemble du profil, où elle augmente avec la profondeur, passant de 25 % de T en surface à 70 % à 1,20 m de profondeur.

La coexistence des caractères salin et sodique apparaît donc indéniable. Au niveau des caractéristiques morphologiques, on constate une structure fragmentaire remarquablement différenciée et un profil pédologique qui présente un horizon (B) de type structural. Cet horizon est caractérisé par une belle structure prismatique à sous-structure polyédrique à cubique. Dans l'horizon A, cette structure est très nettement polyédrique. Cette dernière caractéristique se retrouve encore -moins clairement- dans l'horizon C entre 60 cm et 1,20 m de profondeur. Ce profil présente en outre les caractéristiques suivantes (voir annexe X D) :

- texture lourde argilo-limoneuse,
- caractère nettement calcaire,
- pH 1/2, 5 augmentant avec la profondeur et restant inférieur à 8,7 sur l'ensemble du profil.

Tenant compte des caractéristiques morphologiques et chimiques, le profil V apparaît comme un exemple de solontchak s. s. sodique à profil pédologique de type A (B) C.

D - QUATRIEME CAS : STRUCTURE "SEMI-DEGRADEE". PROFIL DE TYPE A C à A (B) C

Présence du caractère sodique, en l'absence de caractère salé (profil Médoc 47, annexe X E)

Dans ces sols de palus du Médoc, les caractères de salinité apparaissent généralement très faibles, la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée n'excédant 7 mmhos/cm qu'au-delà de 1 mètre de profondeur (cf. figure 38).

La sodicité, par contre, est plus importante et le taux de sodium échangeable, dépasse 15 % de T dans les horizons (B) ou C à moins de 50 cm sous la surface du sol (cf. figure 37). L'examen des profils conduit à considérer la structure comme intermédiaire entre le type non dégradé (structure polyédrique très nette) et le type dégradé (structure prismatique ou prismatico-columnaire massive). Ce fait est exprimé en utilisant le terme de structure semi-dégradée.

Le profil pédologique est, suivant le cas, de type A C ou A (B) C avec des horizons A bien différenciés et riches en matière organique, car il s'agit de sols de prairies. Ces caractéristiques s'appliquent à certains sols des marais du Médoc, appartenant à l'ensemble des palus. Cet ensemble correspond à d'anciens marais asséchés et mis en valeur par les Hollandais au XVIIIème siècle, et formés par des sols argileux gris sur matériaux fluvio-marins.

De tels sols sont également observés dans la zone des "mattes" -sols argileux bruns des atterrissements de la Gironde- qui prolonge les palus en bordure de la Gironde et correspond à des sédiments plus jeunes (voir carte des sols des marais du Médoc).

Les profils P 19, P 47 et P 110, dont les profils salin et sodique sont représentés graphiquement, correspondent à ces unités (voir figures 37 et 38).

- Sols de palus : profils 19 et 47,
- Sols de mattes : profil 110.

On peut constater, dans les trois cas, que la salinité reste très faible jusqu'à environ 1 mètre de profondeur. Le caractère sodique, par contre, se manifeste à moins grande profondeur. Par ordre d'importance décroissante de la sodicité, les profils se classent comme suit : 47, 110, 19. De par l'importance de son caractère sodique, le profil 47 constitue un bon exemple, illustrant ce quatrième cas alors que les profils 19 et 110 sont classés à l'extérieur de l'ensemble halomorphe dans les sols hydromorphes à caractères d'halomorphie (voir plus loin paragraphe G).

C'est également dans cette catégorie que se classent, en Roussillon, certains sols de la région de Taxo - d'Avall décrits à la page 59 de la notice explicative de la carte pédologique au 1/100 000, feuille de Perpignan - Argelès (J. SERVANT - 1971).

E - CINQUIEME CAS : STRUCTURE DEGRADEE, COEXISTENCE DES CARACTERES SALE ET A ALCALI Profil de type A C (annexe X F)

C'est principalement dans le bassin de l'étang de Saint-Nazaire (66) -dans le secteur des mas d'Uston et Escara- que ces sols ont été mis en évidence, au vu des valeurs particulièrement élevées du pH qui atteignaient 10 dans certaines situations (J. SERVANT - 1964). Ces valeurs très élevées du pH étaient toujours associées à la présence de carbonate de sodium (voir chapitre consacré à l'alcalinité).

Une étude pédologique détaillée de ce secteur nous a montré que le sol est constitué par des alluvions peu calcaires, de texture variable en surface, sableuse en profondeur (J. SERVANT - 1964) où ont été séparées :

- la zone à taches salées temporaires,
- la zone à salinisation généralisée.

J'ai également précisé les situations où des valeurs particulièrement élevées du pH étaient mesurées. Un profil correspondant à ce dernier cas, présente les caractéristiques décrites dans l'annexe X F.

L'étude de ce profil met en évidence la coexistence des caractères salé et à alcali. Le premier est défini par une conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée supérieure à 7 mmhos sur la plus grande partie du profil (le profil salin est de type A avec maximum épipédologique, ce qui est en accord avec un sol presque nu). Le second s'exprime par trois critères principaux :

- 1 - le taux élevé de sodium échangeable,
- 2 - la structure dégradée, massive et non fragmentaire,
- 3 - les valeurs très élevées du pH (y compris le pH de la pâte) en relation avec la présence de bicarbonate et de carbonate de sodium en quantités dosables (voir paragraphe 433, le profil des sels).

Ces différents arguments conduisent à considérer ce sol comme appartenant au type "sol salé à alcali" avec un profil pédologique peu différencié, de type A C.

F - SIXIEME CAS : STRUCTURE DEGRADEE, COEXISTENCE DES CARACTERES SALE ET A ALCALI Profil pédologique A (B) C (annexe X G)

Ces sols ont été mis en évidence dans des dépressions intérieures du Roussillon où les caractères de salinité ne sont pas excessifs : dépressions de Bages et Montescot principalement. La première couvre environ 150 ha, la superficie de la seconde étant de l'ordre de 350 ha. Ces terrains sont occupés par des pelouses sub-halophiles, où la végétation d'halophytes est encore représentée par quelques espèces, citées par P. SIMONNEAU, 1967. Comme à Villeneuve-de-la-Raho, ces dépressions correspondent à d'anciens étangs saumâtres, mais le processus de désalinisation y est beaucoup plus avancé.

Le matériau constituant le sol est généralement constitué par des alluvions fines argilo-limoneuses. En profondeur, le sol présente parfois des caractères vertiques (J. SERVANT - 1971) plus particulièrement dans la dépression de Bages. Le profil choisi pour exemple se situe dans la dépression de Montescot (station M). Ses caractéristiques morphologiques sont présentées en annexe, sous la référence X G.

L'étude de ce sol met en évidence un profil pédologique de type A (B) C où l'horizon (B) possède une organisation prismatico-columnaire, les prismes présentant une section de forme plus ou moins arrondie. Ces prismes sont très fortement massifs et cohérents. Leur sommet reste plat, ce qui constitue une différence avec les structures columnaires à sommet arrondi.

L'étude chimique de ces sols montre par ailleurs la coexistence des caractères salé et à alcali :

- La conductivité de l'extrait de pâte saturée est en effet supérieure à 7 mmhos/cm sur la plus grande partie du profil, mais elle n'excède pas 15 mmhos/cm, ce qui nous montre que la salinité est beaucoup moins forte que dans les cas précédents. On comprend ainsi l'établissement d'une pelouse à caractère beaucoup moins halophile que dans les autres situations.

- Le taux de sodium échangeable est également moins fort surtout dans l'horizon de surface, mais la sodicité reste cependant élevée (40 % de T) sur l'ensemble du profil,

- ce taux élevé de sodium échangeable s'accompagne d'un pH élevé (pH 9,0) et d'une structure dégradée en (B).

Il s'agit donc d'un sol salé à alcali et, compte-tenu de la structure prismatico-columnaire, on peut voir dans ce sol, un point de convergence vers les solonetz, bien qu'on n'assiste pas à une migration de l'argile, le profil pédologique restant en effet essentiellement de type structural. Ce point sera précisé en qualifiant ce sol du terme de proto-solonetz (voir figure 36).

G - AUTRES TYPES DE SOLS PRESENTANT DES CARACTERES D'HALOMORPHIE

Certains d'entre eux présentent des caractéristiques d'halomorphie encore bien exprimées avec, en même temps, un fort degré d'hydromorphie. D'autres ne possèdent les caractères d'halomorphie qu'en profondeur et, dans ces conditions, n'appartiennent plus à l'ensemble des sols halomorphes.

1 - Sols très hydromorphes à caractères d'halomorphie

C'est le cas des marécages semi-permanents à joncs et roseaux que l'on trouve en Camargue et en Languedoc-Roussillon. Ces sols présentent un caractère hydromorphe fortement exprimé conduisant, dans certaines situations, à une accumulation de matière organique semi-tourbeuse (grandes phragmitaies de bordure de l'étang de Salces en Roussillon). Quand le sol n'est pas submergé, le plan d'eau reste toutefois très près de la surface.

Les caractéristiques de l'halomorphie liées à cet engorgement par des eaux saumâtres sont nettement individualisées, exception faite de l'horizon superficiel du profil.

Dans la notice explicative de la feuille de Perpignan-Argelès/Mer, j'ai pris le parti de classer ces sols comme hydromorphes semi-organiques, en précisant le caractère salé. Cette position est toutefois contestable car, dans certains cas, le niveau élevé de salinité impliquerait un classement en termes de sols halomorphes (voir annexe X H).

2 - Sols à caractères d'halomorphie insuffisamment exprimés

On peut séparer les sols peu évolués d'alluvions fluviales ou marines des sols évolués sur alluvions anciennes des terrasses.

a - Sols d'alluvions marines ou fluviales

C'est le cas de nombreux sols de types marais ou palus dans les marais du Médoc où les caractères d'halomorphie ne sont exprimés qu'en profondeur : profils 19 et 110 dont les aspects de l'halomorphie sont graphiquement représentés (figures 37 et 38). Dans ces conditions, ces sols n'appartiennent pas à l'ensemble halomorphe et doivent être considérés comme des sols alluviaux, à gley, sodiques et salés en profondeur. La même remarque s'applique aux sols alluviaux de la périphérie des zones halomorphes du littoral Languedoc-Roussillon et de la Camargue que l'on classe dans les gleys salés.

b - Sols d'alluvions anciennes

Certains sols rouges lessivés des terrasses d'alluvions anciennes du Tech présentent un caractère sodique en profondeur. Il faut y voir une contamination saline ayant pour origine des venues saumâtres issues du matériau pliocène constituant l'environnement (J. SERVANT - 1969).

H - CONCLUSION

Après avoir retenu un certain nombre de critères morphologiques et chimiques, il a été procédé à un classement des principaux types de sols rencontrés au cours des études, lesquels sont associés à des paysages halomorphes du littoral méditerranéen et atlantique et des dépressions intérieures du Roussillon.

Les principaux types de sols résultant de cet inventaire se regroupent -au sein d'un ensemble halomorphe- en six cas majeurs qui ont été successivement étudiés.

Les caractéristiques principales des sols halomorphes de la séquence méditerranéenne et de la séquence atlantique seront maintenant présentées.

1 - Séquence méditerranéenne

- Sur le littoral, le profil pédologique reste peu différencié, de type AC et les caractères de salinité et de sodicité sont fortement exprimés l'un et l'autre. L'évolution pédologique constatée est le passage des solontchaks sodiques à structure conservée, caractérisés par des sels neutres, aux sols salés à alcali dont la structure est dégradée. Tous ces sols occupent les aires salées de type "sansouires", "engane" et pelouses halophiles. La dégradation de la structure se manifeste particulièrement dans certains secteurs inondables situés dans la périphérie des étangs. Elle est le plus souvent corrélée à l'apparition du bicarbonate et du carbonate de sodium en quantités faibles mais dosables, dans l'extrait de pâte saturée et, à une nette élévation du pH qui dépasse 8,8 et peut atteindre 10.

- Dans les dépressions intérieures du Roussillon, le profil pédologique est de type A (B) C et, l'évolution constatée, est le passage de solontchaks sodiques à structure non dégradée -qui occupent des dépressions intérieures très salées, telle que celle de Villeneuve-de-la-Raho- vers les proto-solonetz à structure dégradée, prismatico-columnaire en (B), qui occupent des dépressions moins salées où règne une pelouse sub-halophile (Bages, Montescot).

2 - Séquence atlantique

Dans les marais de la Gironde, la coexistence d'un haut niveau de salinité et de sodicité n'est constatée que dans la frange marine du schorre soumise aux submersions par des eaux salées. Les sols occupant ces terrains sont des solontchaks sodiques à profil A C.

Dans la zone des "marais" du Médoc, le caractère salé est très fortement atténué et n'apparaît qu'en profondeur. Le caractère sodique, par contre, subsiste plus nettement dans certains sols de palus à structure semi-dégradée qui ont été désignés sous le terme de sols sodiques. Ailleurs, les sols de palus et de matte ne peuvent être considérés que comme des sols alluviaux hydromorphes à caractère salé ou sodique en profondeur.

En résumé, les sols halomorphes étudiés, développés dans des matériaux alluvionnaires récents, sont essentiellement du type non lessivé. Le terme halomorphe trouve son plein emploi sur le littoral de la Méditerranée où les sols très salés, à nappe peu profonde, sont principalement des solontchaks à complexe sodique.

Il n'en n'est plus de même dans la zone atlantique des marais du Médoc, où la salinité est très faible dans le profil pédologique, et, l'appellation halomorphe, ne peut être justifiée que par l'examen du taux de sodium échangeable : sol sodique de palus, exception faite des sols salés soumis à l'action directe des submersions (schorre) qui sont du type solontchak sodique.

De par leur origine, que reflètent leur position géographique et la nature des sels qu'ils renferment, les sols étudiés appartiennent à un grand ensemble naturel qui est celui des sols halomorphes maritimes des marais et basses plaines littorales, ensemble que l'on peut opposer à celui des sols halomorphes continentaux où apparaissent d'autres catégories de sols tels que les solometz et les solod.

73 - PROPOSITIONS POUR UNE REVISION DE LA CLASSIFICATION FRANCAISE DES SOLS HALOMORPHES

Pour rendre compte objectivement des différents types de sols halomorphes reconnus au cours des études pédologiques dans le Sud et le Sud-Ouest de la France, il a été procédé à un classement (voir sous-chapitre précédent) qui - bien que suivant les lignes directrices de la classification pédologique française - présente certaines différences avec cette classification dans la définition des critères, dans leur combinaison et dans l'expression taxonomique de ces données.

A ce niveau, il apparaît souhaitable de formuler des propositions, visant à ajuster les données jusqu'alors retenues dans le cadre de la classification pédologique, avec celles qui découlent de l'exposé pédologique des faits dans le cas des sols halomorphes du Sud et du Sud-Ouest de la France. Cette démarche a comme but la recherche d'une classification pédologique visant à décrire objectivement et exhaustivement les sols du territoire national sans pour autant s'écarter des grands principes irréversiblement admis par tous les classificateurs.

I - DEFINITION DE LA CLASSE DES SOLS HALOMORPHES

Sols possédant au moins un des trois caractères qui ont été définis dans le chapitre précédent.

- 1 - Le caractère salé
- 2 - Le caractère sodique
- 3 - Le caractère à alcali.

Tenant compte du fait que les deux traits principaux sont les caractères salé et sodique - le caractère à alcali étant un cas particulier du caractère sodique - il est proposé une nouvelle appellation de la classe procédant d'une association des termes salé et sodique : les sols salsodiques.

Cette appellation semble plus générale que celle de sols halomorphes (qui traduit très bien le caractère salé, mais ne rend pas explicitement compte des sols non salés renfermant du sodium échangeable) et préférable à celle de sols sodiques, proposée par le C. P. C. S., qui ne rend pas compte des sols salés en raison du sens qui a été donné au terme sodique. D'autre part, le terme sodique seul est insuffisant pour décrire des sols salés qui renferment principalement des sels magnésiens.

II - DEFINITION DES DEUX SOUS-CLASSES

1 - Sous-classe des sols "salsodiques" à structure non dégradée

Sols à structure fragmentaire moyenne à fine bien individualisée, au moins dans la partie supérieure du profil, en relation avec un taux élevé de sels solubles de la série neutre, présentant un profil pédologique de type A C ou A (B) C.

Ces sols possèdent obligatoirement le caractère salé. Ils peuvent également posséder le caractère sodique.

2 - Sous-classe des sols "salsodiques" à structure dégradée et semi-dégradée

Sols à structure massive, diffuse, prismatique ou colonnaire en relation avec un taux élevé de sodium échangeable et offrant un profil pédologique de type A C, A (B) C ou A B C. Ils possèdent obligatoirement le caractère à alcali. Ils peuvent également posséder le caractère salé. Les sols à structure semi-dégradée, qui présentent imparfaitement le caractère à alcali, sont également inclus dans cette sous-classe.

De par la tendance de son chimisme, la première sous-classe correspond aux sols salés alors que la seconde correspond grosso-modo aux sols à alcali. Il apparaît donc préférable de ne pas identifier le vocable de sol salé à celui de sol halomorphe (ou salsodique).

III - ETUDE DES GROUPES ET SOUS-GROUPES DE LA PREMIERE SOUS-CLASSE

Cette sous-classe comprend actuellement un seul groupe : celui des solontchaks ou sols salins. Ces sols sont considérés comme possédant uniquement le caractère salé, ce qui exclut qu'ils puissent présenter le caractère sodique. Ce cas correspond à de nombreux solontchaks continentaux, dont ceux d'Espagne qui ont été cités en exemple. Par contre, dans le cas des solontchaks étudiés au cours de cette étude, j'ai montré la coexistence des caractères salé et sodique et parlé de solontchaks à complexe sodique qui ont été séparés des solontchaks à complexe Ca - Mg.

Dans ces conditions, il apparaît souhaitable d'introduire, dans la sous-classe, deux groupes de solontchaks.

- a - Le groupe des solontchaks (ou sols salins), à complexe calcimagnésique. Ces sols ne sont définis que par le caractère salé en l'absence de caractère sodique.
- b - Le groupe des solontchaks (ou sols salins), à complexe sodique. Ces sols sont définis par la coexistence des caractères salé et sodique.

Avant de passer aux sous-groupes, il est proposé, à un niveau intermédiaire qualifié de demi-groupe, d'effectuer une éventuelle séparation entre :

- les hyper-solontchaks qui correspondent aux zones très salées où le sol souvent nu, se couvre d'efflorescences salines. Le profil salin y présente un maximum épipédonique (types A et C) et le caractère salé a été qualifié de permanent ;
- les crypto-solontchaks qui correspondent aux pelouses de la zone salée avec un profil salin à maximum méso ou hypopédonique (type B ou D) et où le sol peut n'être qualifié que de salé en profondeur (voir exposé des critères).

Les différents sous-groupes proposés sont les suivants :

- a - le sous-groupe gypseux où l'on peut préciser l'accumulation gypseuse sub-superficielle, dans les solontchaks à efflorescences et l'accumulation gypseuse profonde dans les crypto-solontchaks de pelouse,
- b - le sous-groupe à salant hygroscopique qui rend compte de la présence de chlorures alcalino-terreux dont Ca Cl_2 ,
- c - le sous-groupe à horizon superficiel temporairement poudreux,
- d - le sous-groupe sulfaté acide (pour mémoire et dans l'hypothèse où cet aspect n'est pas défini à un niveau plus élevé); voir plus bas,
- e - le sous-groupe modal où les sols ne présentent aucune des particularités précédentes.

On peut préciser, après ces diagnostics, le caractère plus ou moins hydromorphe -règle quasi-générale dans les sols salés- et la présence ou l'absence de calcaire.

Nota :

La création d'un groupe spécifique des sols sulfatés acides des bassins paraliques tropicaux est envisagée par JH. DURAND (1973). Dans cette hypothèse, deux sous-groupes sont proposés par cet auteur :

- le sous-groupe des sols sulfatés réduits,
- le sous-groupe des sols sulfatés acides.

Les sols sulfatés acides sont bien représentés dans les mangroves tropicales (VIELLEFON - 1969, DURAND - 1973). Au cours de la réoxydation des sulfures, on peut assister, en milieu calcaire, à d'importantes individualisations gypseuses (J. AVIAS - 1949, 1953, 1958). Les sols sulfatés acides existent également -de manière très localisée- dans certains secteurs des marais atlantiques du littoral français. J'ai eu récemment, avec A. RUELLAN, l'occasion d'observer de tels sols dans les marais de la Vilaine. J'ai également constaté le phénomène, dans la partie profonde de certains sols des Wateringues du nord de la France (J. SERVANT - 1973).

IV - ETUDE DES UNITES DE LA DEUXIEME SOUS - CLASSE : SOUS-CLASSE DES SOLS SODIQUES ET A ALCALI

Trois groupes ont été proposés par G. AUBERT en 1965 (voir premier chapitre) :

- le groupe non lessivé,
- le groupe lessivé,
- le groupe lessivé à argile dégradée.

Les propositions qui sont maintenant formulées ne concernent que le premier groupe, non lessivé.

Ils répondent au concept central de la sous-classe à structure dégradée : présence du caractère à alcali pouvant être accompagné du caractère salé. Leur profil pédologique est de type A C ou A (B) C mais jamais de type A B C ou B est un horizon illuvial. Il est également proposé d'introduire dans ce groupe, des sols à structure semi-dégradée, possédant imparfaitement le caractère à alcali⁽¹⁾, et ne comportant pas de caractère salé.

Sur ces bases, il est proposé de scinder le groupe en deux demi-groupes :

- premier demi-groupe ; sols possédant le caractère à alcali accompagné du caractère salé,
- second demi-groupe ; sols possédant le caractère sodique, faiblement à alcali, en l'absence du caractère salé et à fortiori sols possédant le caractère à alcali en l'absence du caractère salé.

A - PREMIER DEMI-GROUPE

Les sols de cet ensemble correspondent aux sols salés à alcali. Les résultats de cette étude sont parfaitement en accord avec les deux sous-groupes définis par G. AUBERT en 1965.

1 - Le sous-groupe des sols très salés, à alcali, permet de rendre compte de sols alcalisés possédant un haut niveau de salinité. C'est par exemple le cas des sols du bassin de l'étang de St-Nazaire, constituant le cas n° 5 dans le sous-chapitre précédent.

Les éléments complémentaires à la caractérisation de ce sous-groupe peuvent être :

- le type de profil pédologique (A C ou A (B) C),
- l'existence d'une salinisation à faciès carbonaté sodique,
- l'importance de l'hydromorphie,
- le faciès poudreux en surface.

2 - Le sous-groupe des sols peu à moyennement salés à alcali permet de rendre compte des sols halomorphes à horizon (B) prismatico-columnaire que l'on trouve sous pelouse sub-halophile dans les dépressions intérieures du Roussillon. Ces sols ont été désignés sous le terme de proto-solonetz (cas n° 6 dans le sous-chapitre précédent).

(1) - Ces sols possèdent le caractère sodique, mais les critères nécessaires au diagnostic "à alcali" sont insuffisamment exprimés. Ils ne peuvent pas être rangés dans la première sous-classe en raison de l'absence du caractère salé et de l'état semi-dégradé de la structure.

- a - Le groupe des solontchaks (ou sols salins), à complexe calcimagnésique. Ces sols ne sont définis que par le caractère salé en l'absence de caractère sodique.
- b - Le groupe des solontchaks (ou sols salins), à complexe sodique. Ces sols sont définis par la coexistence des caractères salé et sodique.

Avant de passer aux sous-groupes, il est proposé, à un niveau intermédiaire qualifié de demi-groupe, d'effectuer une éventuelle séparation entre :

- les hyper-solontchaks qui correspondent aux zones très salées où le sol souvent nu, se couvre d'efflorescences salines. Le profil salin y présente un maximum épipédonique (types A et C) et le caractère salé a été qualifié de permanent ;
- les crypto-solontchaks qui correspondent aux pelouses de la zone salée avec un profil salin à maximum méso ou hypopédonique (type B ou D) et où le sol peut n'être qualifié que de salé en profondeur (voir exposé des critères).

Les différents sous-groupes proposés sont les suivants :

- a - le sous-groupe gypseux où l'on peut préciser l'accumulation gypseuse sub-superficielle, dans les solontchaks à efflorescences et l'accumulation gypseuse profonde dans les crypto-solontchaks de pelouse,
- b - le sous-groupe à salant hygroscopique qui rend compte de la présence de chlorures alcalino-terreux dont Ca Cl_2 ,
- c - le sous-groupe à horizon superficiel temporairement poudreux,
- d - le sous-groupe sulfaté acide (pour mémoire et dans l'hypothèse où cet aspect n'est pas défini à un niveau plus élevé); voir plus bas,
- e - le sous-groupe modal où les sols ne présentent aucune des particularités précédentes.

On peut préciser, après ces diagnostics, le caractère plus ou moins hydromorphe -règle quasi-générale dans les sols salés- et la présence ou l'absence de calcaire.

Nota :

La création d'un groupe spécifique des sols sulfatés acides des bassins paraliques tropicaux est envisagée par JH. DURAND (1973). Dans cette hypothèse, deux sous-groupes sont proposés par cet auteur :

- le sous-groupe des sols sulfatés réduits,
- le sous-groupe des sols sulfatés acides.

Les sols sulfatés acides sont bien représentés dans les mangroves tropicales (VIELLEFON - 1969, DURAND - 1973). Au cours de la réoxydation des sulfures, on peut assister, en milieu calcaire, à d'importantes individualisations gypseuses (J. AVIAS - 1949, 1953, 1958). Les sols sulfatés acides existent également -de manière très localisée- dans certains secteurs des marais atlantiques du littoral français. J'ai eu récemment, avec A. RUELLAN, l'occasion d'observer de tels sols dans les marais de la Vilaine. J'ai également constaté le phénomène, dans la partie profonde de certains sols des Wateringues du nord de la France (J. SERVANT - 1973).

IV - ETUDE DES UNITES DE LA DEUXIEME SOUS - CLASSE : SOUS-CLASSE DES SOLS SODIQUES ET A ALCALI

Trois groupes ont été proposés par G. AUBERT en 1965 (voir premier chapitre) :

- le groupe non lessivé,
- le groupe lessivé,
- le groupe lessivé à argile dégradée.

Les propositions qui sont maintenant formulées ne concernent que le premier groupe, non lessivé.

Ils répondent au concept central de la sous-classe à structure dégradée : présence du caractère à alcali pouvant être accompagné du caractère salé. Leur profil pédologique est de type A C ou A (B) C mais jamais de type A B C ou B est un horizon illuvial. Il est également proposé d'introduire dans ce groupe, des sols à structure semi-dégradée, possédant imparfaitement le caractère à alcali⁽¹⁾, et ne comportant pas de caractère salé.

Sur ces bases, il est proposé de scinder le groupe en deux demi-groupes :

- premier demi-groupe ; sols possédant le caractère à alcali accompagné du caractère salé,
- second demi-groupe ; sols possédant le caractère sodique, faiblement à alcali, en l'absence du caractère salé et à fortiori sols possédant le caractère à alcali en l'absence du caractère salé.

A - PREMIER DEMI-GROUPE

Les sols de cet ensemble correspondent aux sols salés à alcali. Les résultats de cette étude sont parfaitement en accord avec les deux sous-groupes définis par G. AUBERT en 1965.

1 - Le sous-groupe des sols très salés, à alcali, permet de rendre compte de sols alcalisés possédant un haut niveau de salinité. C'est par exemple le cas des sols du bassin de l'étang de St-Nazaire, constituant le cas n° 5 dans le sous-chapitre précédent.

Les éléments complémentaires à la caractérisation de ce sous-groupe peuvent être :

- le type de profil pédologique (A C ou A (B) C),
- l'existence d'une salinisation à faciès carbonaté sodique,
- l'importance de l'hydromorphie,
- le faciès poudreux en surface.

2 - Le sous-groupe des sols peu à moyennement salés à alcali permet de rendre compte des sols halomorphes à horizon (B) prismatico-columnaire que l'on trouve sous pelouse sub-halophile dans les dépressions intérieures du Roussillon. Ces sols ont été désignés sous le terme de proto-solonetz (cas n° 6 dans le sous-chapitre précédent).

(1) - Ces sols possèdent le caractère sodique, mais les critères nécessaires au diagnostic "à alcali" sont insuffisamment exprimés. Ils ne peuvent pas être rangés dans la première sous-classe en raison de l'absence du caractère salé et de l'état semi-dégradé de la structure.

B - SECOND DEMI - GROUPE

Il n'existe pas dans l'actuelle classification. Sa création est proposée pour rendre compte de sols qui -comme dans les palus du Médoc-(cas n° 4 dans le sous-chapitre précédent)-ne présentent qu'une très faible salinité (absence de caractère salé) mais possèdent un caractère sodique indéniable sans être véritablement alcalisés : structure semi-dégradée, $\text{pH} \leq 8,8$, absence d'ions $\text{CO}_3^{=}$. Les sols alcalisés non salés seront évidemment inclus dans ce demi-groupe.

Deux sous-groupes sont proposés :

- a - Sous-groupe des sols sodiques faiblement à alcali : profil pédologique A C ou A (B) C, structure semi-dégradée, $\text{pH} < 8,8$.
- b - Sous-groupe des sols à alcali : profil pédologique A C ou A (B) C, structure dégradée et pH pouvant dépasser 8,8.

V - SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS

En résumé, les nouveaux éléments proposés intéressent les points suivants :

- 1 - les critères du diagnostic avec l'individualisation de trois caractères principaux dont j'ai précisé l'intensité et le type de distribution dans le profil pédologique,
- 2 - l'introduction de ces critères dans la définition de la classe, des sous-classes et des groupes en ce qui concerne les sols non lessivés,
- 3 - la création d'un nouveau groupe (les solontchaks à complexe sodique) dans la sous-classe des sols à structure non dégradée où certaines propositions ont été également faites en ce qui concerne l'introduction de demi-groupes et de sous-groupes,
- 4 - la création de demi-groupes et d'un nouveau sous-groupe dans la sous-classe à structure dégradée au niveau du groupe non lessivé.

Compte-tenu de ces propositions, la classification française des sols halomorphes répondrait alors au schéma suivant de la classe des sols salsodiques.

CLASSE DES SOLS SALSODIQUES

Sols possédant au moins un des trois caractères suivants :

- caractère salé, lequel se décompose en permanent, semi-permanent, salé en profondeur,
- caractère sodique,
- caractère à alcali.

A - SOUS - CLASSE DES SOLS SALSODIQUES A STRUCTURE NON DEGRADEE

Sols possédant obligatoirement le caractère salé et pouvant présenter le caractère sodique. Profil pédologique de type A C ou A (B) C.

a - Sols ne possédant que le caractère salé : groupe des solontchaks à complexe Ca-Mg

Demi-groupes :

- . hyper-solontchaks (caractère salé permanent),
- . crypto-solontchaks (caractère salé en profondeur).

Sous-groupes au sein des demi-groupes :

- . à accumulation gypseuse : superficielle,
profonde,
- . à salant hygroscopique,
- . à horizon superficiel poudreux,
- . modal.

b - Sols où les caractères salé et sodique coexistent : groupe des solontchaks à complexe Na-Mg

Demi-groupes :

- . hyper-solontchaks (caractère salé permanent),
- . crypto-solontchaks (caractère salé en profondeur).

Sous-groupes au sein des demi-groupes :

- . à accumulation gypseuse : superficielle,
profonde,
- . à salant hygroscopique,
- . à horizon superficiel poudreux,
- . acidifié,
- . modal.

c - Eventualité d'un groupe spécifique des sols sulfatés acides des bassins paraliques tropicaux
(JH. DURAND - 1973).

B - SOUS - CLASSE DES SOLS SALSODIQUES A STRUCTURE DEGRADEE
ET SEMI - DEGRADEE

Sols possédant obligatoirement le caractère à alcali ou le caractère sodique faiblement à alcali et pouvant présenter le caractère salé.

a - Groupe des sols non lessivés : profils pédologiques de type A C ou A (B) C

Demi-groupe des sols salés à alcali (caractères salé + à alcali)

- . sous-groupe des sols très salés à alcali,
- . sous-groupe des sols peu à moyennement salés, à alcali

Demi-groupe des sols sodiques et à alcali (caractère sodique faiblement à alcali ou à alcali uniquement)

- . sous-groupe sodique,
- . sous-groupe à alcali.

b - Groupe des sols lessivés : profil pédologique de type ABC : les solonetz (pour mémoire).

c - Groupe des sols lessivés à argile dégradée : profil pédologique de type ABC : les solod (pour mémoire).

CONCLUSIONS GENERALES

I - CONCLUSIONS D'ORDRE PEDOLOGIQUE

- . Les sols halomorphes étudiés ont une origine marine actuelle ou récente, ce qui les différencie des sols halomorphes continentaux.
- . La genèse et l'évolution de ces sols résultent de l'action combinée du climat et du type d'environnement marin.
- . Le profil salin constitue un concept central dans l'étude pédologique de l'halomorphie.
- . Les traits originaux de la pédogénèse des sols halomorphes maritimes sont plus l'évolution et les transformations de l'héritage salin que celles de l'héritage sédimentaire.

A - LES SOLS HALOMORPHES MARITIMES COMPARES AUX SOLS HALOMORPHES CONTINENTAUX

Les sols halomorphes maritimes se différencient des sols halomorphes continentaux, non seulement au plan géographique, mais également en ce qui concerne la nature des sels et le développement des profils pédologiques.

1 - Nature des sels

Le chlorure de sodium est le sel le plus abondant dans les sols halomorphes maritimes alors que les sols salés continentaux peuvent renfermer en quantités importantes d'autres sels tels que le sulfate de sodium et le carbonate de sodium. Dans d'autres secteurs halomorphes du domaine continental les sels dominants peuvent également être le sulfate et le chlorure de magnésium. Enfin, une autre caractéristique des terrains halomorphes maritimes océaniques est la présence de sols sulfatés acides particulièrement bien représentés dans les mangroves tropicales.

2 - Développement des profils

Les sols halomorphes maritimes occupent des matériaux alluvionnaires et présentent un profil pédologique non lessivé, de type A C ou A (B) C. Ce fait est dû à leur âge récent et au niveau souvent élevé de la salinité qui freine l'évolution pédologique par lessivage de l'argile.

Les profils pédologiques lessivés de type A B C sont observables dans les aires halomorphes continentales. Ils caractérisent les solonetz et les solod que l'on trouve sur de grandes surfaces au sein des principaux continents (Union Soviétique, Afrique tropicale, Australie, etc). Ce type d'évolution pédologique

est corrélé avec une baisse de la salinité. Ces sols ne sont pas représentés dans notre pays. Cependant, j'ai montré que le stade proto-solonetz était observable dans des dépressions intérieures du Roussillon, qui présentent un certain caractère de continentalité.

B - L'INFLUENCE DU CLIMAT ET DU TYPE D'ENVIRONNEMENT MARIN

Au sein des sols halomorphes maritimes, la présente étude fait apparaître des différences entre les sols du littoral méditerranéen et ceux des marais atlantiques.

1 - Les sols maritimes méditerranéens sont fortement affectés par l'halomorphie non seulement dans les secteurs soumis à l'action directe des eaux marines (bas lidos submersibles) mais également, et surtout, dans les basses plaines soumises à l'action de la nappe phréatique salée. Cette salinisation est la conséquence :

- d'une situation topographique basse à proximité d'une mer sans marée, ce qui élimine tout drainage périodique gravitaire,
- de la présence d'eaux souterraines fortement minéralisées et situées à faible profondeur sous la surface du sol,
- de l'action d'un climat évaporant, de caractère semi-aride.

2 - Les sols situés en bordure de l'Atlantique ne sont fortement affectés par l'halomorphie que dans les secteurs submersibles de la slikke et du schorre.

Ailleurs, dans les zones de "marais", les phénomènes de salinisation et de sodisation ne sont fortement prononcés que dans la partie profonde des sols. Le caractère sodique apparaît toutefois plus proche de la surface que le caractère salé. Cet état de désalinisation est la conséquence :

- d'un climat maritime tempéré à saisons beaucoup moins contrastées que dans le cas précédent et dont les précipitations sont plus régulièrement distribuées au cours de l'année,
- d'un régime de marées favorable au drainage périodique gravitaire,
- de travaux de mise en valeur qui ont favorisé la désalinisation.

C'est ainsi, que sous des influences encore plus marquées, les caractères de salinité sont complètement absents dans les sols d'alluvions marines du Nord et du Pas-de-Calais qui ont pourtant subi l'influence des inondations marines au cours de la dernière guerre. Dans ces terrains, sous le climat de la Flandre et sous l'influence des travaux de mise en valeur, les sels sont facilement éliminés de la partie des alluvions qui intéresse le pédologue et l'agronome.

3 - Un cas intermédiaire nous est fourni par les sols halomorphes des Marismas du Guadalquivir, en Espagne. Ces sols sont situés en bordure de l'Atlantique et soumis à un climat méditerranéen de type semi-aride. Les caractères de salinité y apparaissent aussi fortement marqués que dans les sols de Camargue. On

peut donc dire, que dans ce cas, l'influence du climat est prépondérante sur le type d'environnement marin. Cependant, il faut noter que la situation océanique des Marismas semble plus favorable aux travaux de mise en valeur que ne l'est la bordure méditerranéenne, si l'on en juge par le résultat des travaux d'aménagement agricole réalisés dans cette région.

C - LE PROFIL SALIN CONSTITUE UN CONCEPT CENTRAL DANS L'ETUDE PEDOLOGIQUE DE L'HALOMORPHIE

Le profil salin, qui traduit la distribution qualitative et quantitative des sels dans le profil pédologique, peut être considéré comme la résultante des actions antagonistes : entre les facteurs de salinisation qui provoquent la remontée ascendante des sels et les facteurs de désalinisation qui tendent à les entraîner vers le bas.

Ces facteurs ont été analysés plus haut en termes de climat, de matériau et de type d'environnement marin.

Si les facteurs de salinisation sont dominants, il y a maintien, dans le sol, d'un stock élevé de sels malgré un certain lessivage hivernal ; le niveau de salinité reste toujours très important et le processus évaporatoire se manifeste par des accumulations salines superficielles, caractéristiques des sols salés de la sansouire méditerranéenne dont le profil salin est typiquement ascendant.

Si les facteurs de désalinisation se manifestent modérément, la dynamique saline peut demeurer ascendante, mais elle est contrariée et les conditions de salinité régnant à la surface du sol sont bien moins élevées que dans le cas précédent : exemple des pelouses halophiles à recouvrement végétal dense.

Enfin, si les facteurs de désalinisation l'emportent -qu'il s'agisse de facteurs naturels ou artificiels- le profil salin est de type descendant, la salinité augmentant toujours avec la profondeur et le niveau de salinité pouvant être très faible dans le premier mètre du profil : c'est le cas des sols des marais du Médoc non soumis aux submersions.

Le profil salin est donc l'indicateur, non seulement du niveau de la salinité, mais également de la tendance évolutive. Son étude m'a conduit à distinguer quatre formes caractéristiques dont j'ai tenté d'interpréter le déterminisme (profil salin global). A la notion de profil salin global sont venus s'ajouter celles de profil des ions et celle de profil des sels, l'interprétation générale des processus de l'halomorphie s'appuyant sur ces données.

D - LES TRAITS ORIGINAUX DE LA PEDOGENESE HALOMORPHE

1 - L'halomorphie en tant que phénomène pédologique

Les sols halomorphes diffèrent des autres sols, par la présence de constituants particuliers que sont les sels solubles. Le devenir des sels dans le sol est fortement dépendant du régime général des eaux, des conditions climatiques et de l'environnement margino-littoral.

Les caractères d'halomorphie sont susceptibles d'apparaître dans des sols qui en étaient jusqu'alors exempts : inondations à l'eau de mer, irrigation avec des eaux salines, remontée de la nappe sous l'influence de pratiques agricoles.

La salinisation et la sodisation du matériau se traduisent par des traits spécifiques, observables sur le terrain : nanisme et disparition des cultures, apparition d'une flore caractéristique, efflorescences salines.

Mais ces traits ne suffisent pas à un diagnostic et à une classification pédologiques détaillées et il est nécessaire d'avoir recours aux analyses, les résultats analytiques revêtant une grande importance dans le cas de l'étude des sols halomorphes. On peut dire que pour ceux-ci, l'étude pédologique est plus chimique que morphologique.

Compte-tenu du caractère mobile des constituants spécifiques, les critères chimiques retenus pour le diagnostic et la classification présentent des valeurs, variant assez notablement d'une mesure à l'autre. L'étude pédologique du terrain halomorphe implique donc des mesures saisonnières permettant de fixer la fourchette de variation des caractères de l'halomorphie.

Ces caractères sont d'ailleurs susceptibles de disparaître de certains sols qui perdent ainsi leur état halomorphe sous l'influence de facteurs naturels ou artificiels.

En résumé, l'halomorphie, en tant que phénomène pédologique, peut être décrite de la manière suivante : rapidité d'acquisition, diagnostic essentiellement chimique, variabilité des mesures nécessitant une étude saisonnière, réversibilité.

2 - Le devenir et l'évolution des héritages minéraux

Les terrains halomorphes ayant fait l'objet de cette étude ont été définis par un double héritage : l'héritage sédimentaire qui caractérise leur nature alluviale et qui traduit la composition des roches et des sols constituant le bassin versant et l'héritage salin qui résulte des conditions particulières de la sédimentation en milieu marin ou laguno-marin.

a - Devenir et évolution de l'héritage salin

Cet aspect constitue le trait original de l'étude pédologique du milieu halomorphe. J'ai montré que l'héritage salin, exprimé par la composition saline de la nappe phréatique, était soumis, dans le sol, et dans la solution du sol, à un transfert, à un stockage et à des transformations chimiques se matérialisant par quelques grands types de différenciations des sels dans le profil pédologique, avec néoformation de certains composés solubles, dans la voie saline neutre et dans la voie saline alcaline.

b - Devenir et évolution de l'héritage sédimentaire

Cet aspect apparaît conditionné par le devenir de l'héritage salin.

En milieu fortement salé de la voie neutre, toute évolution pédologique impliquant une redistribution des constituants granulométriques, est bloquée en raison du caractère flocculant des sels. Cependant, il

a été montré que les accumulations salines peuvent avoir un effet mécanique sur la désagrégation et la pulvérisation de la structure dans l'horizon de surface : genèse des horizons superficiels poudreux. Dans ces conditions, les sols sont du type solontchak et j'ai séparé les solontchaks à complexe sodique, caractéristiques des aires maritimes, des solontchaks à complexe calci-magnésique que l'on trouve en position continentale, en milieu salé, riche en alcalino-terreux.

. En milieu soumis à la désalinisation sous des influences naturelles ou artificielles, les conditions physico-chimiques sont favorables à la désagrégation et à la dégradation de la structure par diminution de l'effet flocculant des sels et apparition fréquente d'une forte basicité, conséquence des différenciations salines de la voie alcaline. Dans ces conditions, les sols sont du type salé à alcali, le stade sol halomorphe à profil lessivé de type solonetz n'étant cependant pas atteint dans le cadre des terrains qui ont été étudiés dans la présente étude.

Il n'apparaît pas non plus, dans ce cadre, que les minéraux argileux de l'héritage sédimentaire soient affectés par de notables transformations sous l'influence des conditions salines.

En résumé, l'évolution pédologique des sols halomorphes maritimes étudiés ici apparaît très faible en ce qui concerne les constituants granulométriques. Les traits spécifiques de cette évolution sont en définitive ceux qui sont liés au transfert, au stockage et aux transformations, dans le sol, des produits solubles de la phase saline.

II - CONCLUSIONS D'ORDRE AGRONOMIQUE

L'halomorphie peut être considérée comme le phénomène pédologique le plus agressif vis-à-vis des plantes cultivées dont elle peut inhiber totalement la croissance sur de vastes surfaces. Elle peut être comparée, au plan agrologique, à une maladie du sol nécessitant un diagnostic précis et des "soins" appropriés.

. L'étude pédologique fournit un diagnostic immédiatement interprétable en termes agronomiques.

. La connaissance des conditions de genèse du profil salin conduit à définir des moyens de lutte préventive contre la salinisation.

. Les principes de la lutte curative reposent sur une bonne connaissance des mécanismes de la pédogénèse halomorphe.

A - LE DIAGNOSTIC EN TERMES AGRONOMIQUES

Les mesures de salinité effectuées sur les extraits de pâte saturée sont immédiatement interprétables en termes agronomiques. Il n'en n'est pas de même des mesures effectuées sur des extraits de type 1/5 ou 1/10. Une simple mesure de conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée permet de définir grosso-modo la valeur de la pression osmotique régnant dans la solution du sol. La connaissance de la composition

anionique et cationique de l'extrait aqueux permet au spécialiste de déterminer l'aspect plus ou moins toxique de la salinité vis-à-vis de la plante (certains sels sont connus comme plus toxiques que d'autres). Enfin, les profils salin et sodique sont des données globales très utiles à l'agronome.

B - LES MOYENS PREVENTIFS CONTRE LA SALINISATION ET LA SODISATION DES TERRES

Il a été montré que les phénomènes d'halomorphie affectant les sols étudiés sont la plupart du temps la conséquence des effets de la nappe salée et de la remontée des sels. La lutte préventive contre la salinisation implique donc, en premier lieu, le contrôle du plan d'eau, par drainage. Elle fait appel, en second lieu, aux techniques visant à interdire la remontée des sels par rupture du lien capillaire : modification de la texture par sablage et de la structure par apports de matière organique, façons superficielles, enherbement, etc.

Enfin, le contrôle de la salinité et la détermination du paramètre S.A.R. des eaux d'irrigation permettent de prévoir le risque d'une salinisation et d'une sodisation d'origine secondaire.

C - L'AMELIORATION ET LA MISE EN VALEUR DES SOLS HALOMORPHES : LES MOYENS CURATIFS

La mise en valeur des terrains fortement salés et sodiques nécessite :

- un processus de désalinisation destiné à débarasser le sol des sels solubles, lesquels doivent être entraînés en profondeur et éliminés par le réseau de drainage,
- un processus de désodisation destiné à remplacer, sur le complexe absorbant du sol, le sodium par le calcium échangeable.

Ce double processus peut être réalisé par l'apport d'irrigations massives en présence d'une source de calcium soluble qui est ordinairement constituée par le gypse ou le plâtre. Nous avons effectué, en Camargue (CONCARET et SERVANT - 1974), des essais de ce type et avons constaté que des apports de SO_2 dans les eaux d'irrigation avaient des effets comparables à ceux du plâtre, dans le cas de sols calcaires. L'effet de ces amendements se caractérise par une meilleure perméabilité des terrains pour les eaux d'irrigation apportées par submersion. Dans ces conditions, le processus de désalinisation est possible puisque les solutions s'infiltrent. Ce processus apparaît très difficile dans le cas des parcelles qui ont reçu une irrigation de submersion sans apports de plâtre ou de soufre car il y a alors imperméabilisation du terrain et les eaux stagnent en surface, sans pouvoir s'infiltrer.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLARD (A.), DUBREUIL (J.) et MARIONNAUD (J. M.) - 1974. - Contribution de la méthode historique à la résolution d'un problème de géologie récente : exemple du bas-Médoc (Gironde). Bull. B. R. G. M., section I, géologie de la France, 1 : 1 - 14.
- ALLISON LOWEL (E.) - 1964 . - Salinity in relation to irrigation, Adv. in Agron., 16 : 139 - 180.
- AUBERT (G.) et LEJAILLE (G.) - 1943. - Observations sur l'évolution de la nappe phréatique en zone irriguée à Relizane (Algérie). Ministère de l'Agriculture, extrait des Annales, 67 : 3 - 10, Paris, Imp. Nationale.
- AUBERT (G.) - 1951. - Les sols des régions semi-arides d'Afrique, et leur mise en valeur. Pub. U. N. E. S. C. O., n° 9 : 28 - 39.
- AUBERT (G.) et DUCHAUFOUR (Ph.) - 1956. - Projet de classification des sols. 6ème Congrès International de la Science du Sol. Vol. E : 597 - 604, Paris.
- AUBERT (G.) - 1963. - Classification pédologique utilisée par les pédologues français. Cah. Ped. O. R. S. T. O. M., 3, p. 3.
- AUBERT (G.) - 1965. - La classification des sols. Tableau des classes, sous-classes, groupes et sous-groupes de sols utilisés par la section de pédologie de l'O. R. S. T. O. M. Cah. Ped. O. R. S. T. O. M. 3 (4) : 89 - 90.
- AUBERT (G.) et BOULAIN (J.) - 1967. - La pédologie. Que Sais-Je? n° 352, Presses Univ. de France, 126 p.
- AVIAS (J.) - 1953. - Sur la formation actuelle de gypse dans certains marais côtiers de la Nouvelle-Calédonie. C. R. 19ème Sess. Congr. Géol. Internation. 4, 4 : 7 - 9.
- AVIAS (J.) - 1958. - Note préliminaire sur l'existence de vases bariolées gypsifères actuelles dans les marais côtiers de la Nouvelle-Calédonie. C. R. Soc. Géol. France 16 : 396 - 397.
- BABCOCK (K. L.) - 1960. - Evidence for sodium fixation in salt affected soils. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 24 : 85 - 86.
- BALDWIN - 1938. - in précis de pédologie par Ph. DUCHAUFOUR.
- BAUDIERE (A.) et SIMONNEAU (P.) - 1968. - Etude phytosociologique du cordon littoral du Barcarès - Leucate. Vie et milieu C, 19, 1 c : 11 - 48.
- BAUDIERE (A.) et SIMONNEAU (P.) - 1972. - Esquisse phytosociologique du cordon littoral audois. Bull. Soc. Et. Sc. Nat. Nîmes, 52 : 75 - 107.
- BAUDIERE (A.), SIMONNEAU (J.) et SIMONNEAU (P.) - 1973. - Contribution à l'étude de la végétation halophile de la plaine du Roussillon. Labo. de Bota., Centre Universitaire de Perpignan, 162 p.

- BA ZILEVITCH (N.I.) et PANKOVA (E.I.) - 1969. - Classification of soils according to their chemistry and degree of salinisation. In Agro. es. talaj., 18, supplementum : 219 - 226.
- BEAR (F.E.) - 1955. - Chemistry of the soil, Reinhold pub. Corp. New-York, x p.
- BELKHOJDA (K.) - 1972. - Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale). Contribution à l'étude de leur mise en valeur. D.R.E.S., n° 4, 103 p., Tunis.
- BIGGAR (J.W.) et NIELSEN (D.R.) - 1960. - Diffusion effects in miscible displacement occurring in saturated and unsaturated porous material. Jour. Geophys. Res., 65 : 2887 - 95.
- BLATT (H.), MIDDLETON (G.) et MURRAY (R.) - 1972. - Origin of sedimentary rocks. 634 p. Prentice hall. Inc. Englewoods cliffs, New-Jersey, U.S.A.
- BOISCHOT (P.) et DUPUIS (M.) - 1945. - Dégâts occasionnés par l'inondation à l'eau de mer sur les sols agricoles de la région de Dunkerque. C.R. Acad. Agric. France : 1 - 6.
- BONFILS (P.) - 1966. - Protocoles d'analyses des eaux et des extraits aqueux de sol. S.E.S., n° 69, I.N.R.A., Montpellier.
- BONFILS (P.) - 1967. - Méthode d'analyse des sols S.E.S. n° 91, I.N.R.A. Montpellier, 156 p.
- BOULAIN (J.) - 1956. - Quelques données numériques sur l'hétérogénéité des sols salins, Serv. Et. Sci., Alger Birmandreis, 1 : 3 - 7.
- BOULAIN (J.) - 1957. - Etude des sols des plaines du Chélif. Thèse Sciences, Université d'Alger, 581 p.
- BOUTEYRE (G.) et TONI (Cl.) - 1972. - Géomorphologie et étude des sols sodiques des plaines alluviales. Exemple de la Camargue. Science du Sol, 2 : 3 - 30.
- BOWER (C.A.), REITEMEIER (R.F) et FIREMAN (M.) - 1952. - Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Sc., 73 : 251 - 261.
- BOWER (C.A.) et GOERTZEN (J.O.) - 1955. - Negative adsorption of salts by soils. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 19 : 147 - 151.
- BOWER (C.A.) - 1959. - Determination of sodium in saline solutions with a glass electrode. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 23 : 29 - 30.
- BOWER (C.A.) et HATCHER (J.T.) - 1961. - Characterization of salt affected soils with respect to sodium. Soil Sc. 93 : 275 - 280.
- BOWER (C.A.) - 1969. - Origin, properties and amelioration of sodic soils. Agro es Talaj, 18, supplementum ; 69 - 72.
- BRAITSCH (O.) - 1971. - Salt deposits. Their origin and composition. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 297 p.
- BRAUN-BLANQUET (J.), ROUSSINE (N.) et NEGRE (R.) - 1952. - Les groupements végétaux de la zone méditerranéenne. C.N.R.S., Vaison-la-Romaine, 270 p.
- BREWER (R.) - 1964. - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and sons inc., New-York, London, Sidney, 470 p.
- BUSSON (G.) - 1974. - Sur les évaporites marines : sites actuels ou récents de dépôts d'évaporites et leurs transposition dans les séries du passé. Rev. Géogr. phys. et de Géol. dyn., 16, 2 : 189 - 208.
- CAILLERE (S.) et HENIN (S.) - 1963. - Minéralogie des argiles. Masson et Cie edit., Paris.

- CALLANE (B.) et DUPUIS (J.) - 1972. - Recherches sur la dynamique du fer dans les formations littorales et les sols de prés salés. Science du Sol, 2 : 32 - 61.
- CALLOT (G.) et SERVAT (E.) - 1964. - Etude pédologique du Roussillon. E.N.S.A. Montpellier, S.E.S. n° 1, 191 p.
- CALLOT (G.) et FAVROT (J.C.) - 1965. - Etude pédologique des marais du Médoc. E.N.S.A. Montpellier, S.E.S. n° 34, 86 p.
- CHAMAYOU (H.) - 1971. - Cours de physique du sol. E.N.S.A. Montpellier, 97 p.
- CHAMAYOU (H.) - 1972. - Les argiles et le sol. D.E.A. de pédologie E.N.S.A. Montpellier, 73 p.
- CHAMAYOU (H.) - 1973. - Cours de bioclimatologie. E.N.S.A. Montpellier, 124 p.
- CHAMLEY (H.), PAQUET (H.) et MILLOT (G.) - 1962. - Les minéraux argileux des vases méditerranéennes. Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, 15, 4 : 161 - 169.
- CHEVERRY (C.) - 1974. - Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental sub-aride dans des sédiments argileux et organiques. Thèse Sciences, Univ. de Strasbourg, 275 p.
- CHILD (E.C) - 1969. - An introduction to the physical basis of soil water phenomena, J. Wiley and sons ed., 493 p.
- C. N. A. B. R. L. ⁽¹⁾ - 1970. - Etude hydrogéologique, pédologique et de la salinité (Camargue). Rapport ronéotypé. Direction Départementale de l'Agriculture. Arles 13, 362 p.
- COINTEPAS - 1968. - Exposé sur les sols salés de Tunisie. Réunion de pédologues à l'O. R. S. T. O. M., Bondy le 26-9-68.
- COLLIS-GEORGE, HENIN (S.) et KELLY (J.A.) - 1963. - Etude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation. C.R. Acad. Sc. Paris, 273 : 242 - 244.
- COMMONWEALTH BUREAU OF SOILS - 1971. - Bibliography on: sodium in soils, reclamation of saline and alcali soils, movement and leaching of salts in salt affected soils, Harperden, England.
- CORRE (J.J.) - 1961. - Une zone de terrains salés en bordure de l'étang de Mauguio. Etude du milieu et de la végétation. Bull. Serv. Carte Phytogéog. 6, 2, 105 - 151 et 7, 1 : 9 - 47.
- CORRE (J.J.) et RIOUX (J.A.) - 1962. - Recherches phytoécologiques sur les milieux psammiques du littoral méditerranéen français. Oecol. Plant, IV : 177 - 194.
- CORRE (J.J.) - 1975. - Etude phytoécologique des milieux littoraux terrestres en Languedoc et en Camargue. Thèse d'Etat à paraître. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- C. P. C. S. ⁽²⁾ - 1967. - Classification française des sols, document ronéo., Grignon, 87 p.
- DAMOUR et LESAGE - 1972. - Etude de trois systèmes d'assainissement dans les marais de l'ouest. Bull. Tech. Inf. L₂ Agro, D₁₂.
- DAY (P. R.) et FORSYTHE (W. M.) - 1957. - Hydrodynamic dispersion of solutes in the soil moisture stream. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 21 : 477 - 480.

- DELOFFRE - 1947. - in G. DELAINE, 1969, les wateringues du Nord de la France, 1 vol. , 329 p.
- DEMOLON (A.) - 1960. - Dynamique du sol. 5ème édition, Dunod ed. Paris, 520 pages.
- DODD (D. D.), RENNIE (D. A.) et COUPLAND (R. T.) - 1964. - The nature and distribution of salts in uncultivated saline soils of Saskatchewan. Can. Jour. Soil Sc., 44, 2 : 165 - 175.
- DOERING (E. J.), REEVE (R. C.) et STOCKINGER (K. R.) - 1964. - Salt accumulation and salt distribution as an indicator of evaporation from fallow soils, Soil Sc., 97, 5 : 308 - 312.
- DRIESSEN (P. M.) et SCHOORL (L.) - 1973. - Mineralogy and morphology of salt efflorescences on saline soils in the Great Konya basin. Jour. Soil Sc., 24, 4 : 436 - 442.
- DUBUIS (A.) et SIMONNEAU (P.) - 1968. - Les prairies à fétuque dans la basse plaine du Roussillon. Vie et Milieu, 19 : 287 - 302.
- DUBOUL-RAZAVET (Ch.) - 1956. - Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du delta du Rhône. Soc. Géol. de France, mémoire n° 76, 234 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1968. - L'évolution des sols. Essai sur la dynamique des profils, Masson et Cie ed. Paris, 91 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) et collaborateurs - 1970. - Précis de pédologie. 3ème édition, Masson ed. Paris, 481 p.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1972. - Processus de formation des sols. Biochimie et géochimie. C. R. D. P., Nancy, 183 p.
- DURAND (J. H.) - 1956. - Les sols salins des Hamadenas. Terres et eaux, 12 p.
- DURAND (J. H.) - 1958. - Les sols irrigables. Etude pédologique. Alger, 185 p.
- DURAND (J. H.) - 1973. - Géochimie des sols des bassins paraliques. Données générales sur leur mise en valeur. Agro. Tropic., 28, 6 - 7 : 640 - 663.
- DUTIL (P.) - 1971. - Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse d'Etat, Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg, 346 p.
- DUTIL (P.), DELIBRIAS (G.) - 1973. - Contribution à l'étude des formations quaternaires récentes du bas-Médoc par diverses mesures d'âge au radio-Carbone 14. Document à tirage limité.
- DYER (K. L.) - 1965. - Interpretation of chloride and nitrate distribution patterns in adjacent irrigated and non irrigated Panoche soils. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 31 : 464 - 466.
- EMBERGER (L.) - 1954. - Une classification biogéographique des climats. Recueil trav. lab. bot. géo. Fac. Sci. Univ. Montpellier, Bot., 7 : 3 - 43.
- ENJALBERT (H.) - 1960. - Les pays aquitains. Le modelé et les sols. Imp. Bière, Bordeaux, 618 p.
- EL SWAIFY et al - 1967. - Negative adsorption by vermiculite. salt exclusion from inter layer volumes. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 31 : 464-466.
- EL SWAIFY (S. A.) - 1973. - Structural changes in tropical soils due to anions in irrigation waters. Soil Sc., 115, 1 : 64-72
- FERHENBACHER (J. B.) et al - 1963. - Comparaison of electrode and flame photometer methods for sodium analysis of soil water. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 27 : 150 - 152.
- FEODOROFF (A.) et RAFI (A.) - 1964. - Evaporation de l'eau du sol à partir du sol nu, in l'eau et la production végétale. INRA Paris, x pages.

- FRIPIAT (J.), CHAUSSIDON (J.), et JELLI (A.) - 1971. - Chimie - physique des phénomènes de surface. Applications aux oxydes et aux silicates. Masson et Cie, 387 p.
- GARDNER - 1958. - in HILLEL (D.) - 1971. - Soil water physical principles and processes. Academic press, New-York, London.
- FILIPOVSKY (G.) - 1969. - Results of investigations on the possibilities of reclaiming some salt affected soils of Yugoslavia, Agro. es Talaj, supplementum, 18 : 385 - 389.
- GARNIER (M.) - 1967. - Climatologie de la France. Sélection de données statistiques. Météo. Nat. Paris, x pages.
- GAUCHER (G.) - 1947. - Méthodes actuelles d'étude des terrains salés en Afrique du Nord. C. R. Conf. Ped. Médit., Alger - Montpellier : 464 - 473.
- GAUCHER (G.) et BURDIN (S.) - 1974. - Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Presses Univers. de France, 230 p.
- GEDROITZ (K. K.) - 1926. - in J. S. JOFFE
- GEZE (B.) et SERVAT (E.) - 1950. - Sur les sols salins d'origine continentale de la plaine languedocienne. Congrès Int. Sc. Sol, Amsterdam, 1 : 394 - 396.
- GLINKA (K. D.) - 1963. - Treatise on Soil Science. Translated from russian, published by the Israel program for scientific translations, Jerusalem, 674 p.
- GOT (H.) - 1967. - Contribution à l'étude sédimentologique des terrasses quaternaires du Roussillon. Bull. Soc. Géol. France 7, 9.
- GCUNY (P.) - 1964. - Problèmes agronomiques en Camargue. Ann. Agro., 15 : 193 - 204.
- GRANDE-COVIAN (R.) - 1971. - Salt affected soils of the Guadalquivir river delta. In European solonetz, SZABOLCS (I.) editor.
- GRIM (R. E.) - 1953. - Clay mineralogy. Mac Grawhill book company inc.
- HAMIDAMI (A. S.) - 1969. - A pattern of vertical movement of chlorides and sulfates in red sandy loam under limited wetting. Mysore Journ. Agric. Sc., 3 : 128 - 133.
- de HAAN (F. A.) et BOLT (G. H.) - 1963. - Determination of anion adsorption by clay. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 27, 6 : 636 - 640.
- HENIN (S.) et ROBICHET (O.) - 1950. - Observations sur le gel du sol et ses conséquences agronomiques. Ann. Agro. Série, A : 732 - 748.
- HENIN (S.), GRAS (R.) et MONNIER (G.) - 1969. - Le profil cultural. Masson et Cie éditeurs, Paris, 331 p.
- HENIN (S.), MONNIER (G.) et HUTTER (W.) - 1963. - Etude sur la mise en valeur des marais de l'ouest. S. A. R. V., n° 7, L₂ Agro 218, 30 p.
- HILGARD (E. W.) - 1906. - Soils, their formation, properties, composition and relations to climate and plant growth. New-York, London, 593 p.
- HILLEL (D.) - 1971. - Soil and water physical principles and processes, Academic press. New-York, London, 288 p.
- HEURTEAUX (P.) - 1970. - Rapport des eaux souterraines avec les sols halomorphes et la végétation en Camargue. La Terre et la Vie, 4 : 467 - 510.

- HEURTEAUX (P.) - 1971. - Etude expérimentale de l'évaporation en Camargue. Première partie : l'évaporation des surfaces d'eau libre. Centre d'Ecologie de Camargue, 18 p.
- HEURTEAUX (P.) - 1974. - Etude expérimentale de l'évaporation en Camargue. Seconde partie : évaporation potentielle d'un sol gazonné, des roselières et des rizières, des sols nus limoneux et sableux (à parafre). Centre d'Ecologie de Camargue.
- IVANOVA (E. N) et ROZANOV (AN.) - 1939. - Classification of salinized soils. Pedology (U. S. S. R.), 7 ; 44 - 52.
- JABER (A.) - 1970. - Contribution à l'étude expérimentale des mouvements-ascendant et descendant - des solutions de sels de sodium (carbonate, sulfate, chlorure) et de certains aspects de leur action physique sur un sol soumis à l'influence d'une nappe peu profonde dans laquelle ils sont dissous. Thèse 3ème Cycle. Université de Paris 122 pages.
- JACKSON (M. L) - 1958. - Soil chemical analysis. Prentice hall inc. Englewood cliffs, N. J. U. S. A.
- JANITZKY (P.) et WHITTIG (L. D.) - 1965. - Natural leaching processes in some salt affected soils of California. Agro. es Talaj., 14 : 251 - 262.
- JOFFE (J. S.) - 1949. - Pedology, 2ème édition, New-Brunswick, N. J. U. S. A. 662 p.
- KELLEY (W. P.) - 1957. - Adsorbed Na, cation exchange capacity and percentage Na saturation of alkali soils, Soil Sc., 84 : 473 - 478.
- KOUHESTANI (E.) - 1964. - Contribution à l'étude de l'effet des ions alcalins et alcalino-terreux sur quelques propriétés physiques du sol et en particulier sur sa structure. Thèse d'Université. Université de Paris (Sorbonne). 60 pages.
- KELLEY (W. P.) - 1963. - Use of saline irrigation water. Soil Sc., 95, 6.
- KOVDA (V. A.) - 1937. - Solontchak and solonetz. Acad. of Science of U. S. S. R. , Dokutchaev Institute, Leningrad - Moscow.
- KOVDA (V. A.) et SAMOILAVA (E. M.) - 1969. - Some problems of soda salinity. In Agro. es Talaj., tome 18, supplementum : 21 - 35.
- KOVDA (V. A.), LOBOVA (Y. V.) et ROSANOV (B. G.) - 1967. - Classification of the world's soils. Sov. Soil Sc., 7 : 851 - 863.
- KRUPKIN (P. I.) - 1963. - Movement of salt solutions in soils and soils materials. Sov. Soil Sc. : 6, 567 - 574
- KUBIENA (W.) - 1953. - The soils of Europe, London, Thomas Murby and Cie, 317 p.
- KUHNHOLTZ - LORDA (G.) - 1923. - Essai de géographie botanique sur les dunes du Golfe du Lion. Thèse, Fac. Sc. de Paris, 307 p.
- LACROIX (A.) - 1910. - Minéralogie de la France et de ses colonies. Ch. Béranger édit. Paris.
- LAGERWERF (J. V.), AKIN (G. W.) et MOSES (S. W.) - 1965. - Detection and determination of gypsum in soils. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 29 : 535 - 540.
- LATOUCHE (C.) - 1971. - Les argiles des bassins alluvionnaires aquitaniens et des dépendances océaniques. Contribution à l'étude d'un environnement. Thèse Sc. Nat., Université de Strasbourg, 415 pages.
- LAURENT (G.) - 1932. - Les terres salées du Roussillon. Impr. Louis JEAN, Gap 05 - 290 p.
- LEGROS (J. P.) - 1973. - Eléments de statistique appliqués à la Science du Sol. INRA, S. E. S. n° 214, E. N. S. A. Montpellier.

- LEMEE (G.) - 1967. - Précis de biogéographie. Masson et Cie éditeurs, Paris.
- LEO (M. W.) - 1963. - Effect of cropping and fallowing on soil salinization, Soil Sc., 96, 6 : 422 - 427.
- LEVY (A.) - 1971. - Eaux saumâtres et milieux margino-littoraux. Revue de Géogr. phys. et de Géol. dyn. 13, 3 : 269 - 278.
- LLYOD et al. - 1965. - Miscible displacement of soluble salt in reclaiming a salted soil. Soil Sc., 100, 5 : 348 - 355.
- LONGENECKER (D. E.) - 1960. - Influence of soluble anions on some physical and physico-chemical properties of soils. Soil Sc., 90 : 185 - 191.
- Mc NEAL et COLEMAN - 1966. - Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 30, 3 : 308 - 312.
- Mc NEAL - 1968. - Prediction of the effect of mixed salt solutions on soil hydraulic conductivity. Soil Sc. Soc. Am. Proc., 32 : 190 - 193.
- MARSHALL et GURR - 1954. - Movement of water and chlorides in relatively dry soils. Soil Sc., 77 : 147 - 152.
- de MARTONNE (E.) - 1926. - C. R. Ac. Sci., 182 : 1395 - 1398.
- MASSOUMI (A. M.) - 1968. - Etude expérimentale sur le mécanisme du mouvement capillaire de l'eau et des sels solubles dans le sol. Influence des rapports cationiques des solutions et de la texture sur le processus d'alcalinisation. Thèse Doct. - Ing. Univ. de Paris 120 p.
- MILJKOVIC et al - 1959. - Salt affected soils of Yugoslavia. Soil Sc., 88 : 51 - 55.
- MILJKOVIC (N.) et PLAMENAC (N.) - 1971. - Solonetz soils of Yugoslavia. Their properties and possibilities of utilisation. In European Solonetz, I. SZABOLCS editor.
- MILLOT (G.) - 1962. - Géologie des argiles. Masson et Cie Paris, 499 p.
- MITRA (S. P.) et SINGH (R.) - 1959. - Salt movement in alkali profiles. Agro. es Talaj. 8, 2 : 131 - 136.
- MOINEREAU (J.) - 1973. - Dynamique et processus de l'érosion. Cours de spécialisation Science du sol et aménagement. S. E. S. Montpellier, 1 vol. ronéo, 57 p.
- MOLINIER (R.) - 1963. - L'évolution du relief et les caractères de la végétation en Camargue. 28 p.
- MONACO (A.) - 1973. - Les minéraux argileux dans le cycle sédimentaire. Applications à la bordure méditerranéenne. In Quaternaire, Géodynamique stratigraphie et environnement. 9ème Congrès INQUA, Christchurch.
- MONEM BALBA et SOLIMAN (M. F.) - 1969. - Salinization of homogeneous and layered soil columns due to upward movement of saline groundwater and its evaporation. Agrochimica, 13, 6 : 543 - 550.
- MORIZET (J.), DEJOU (J.) et GUYOT (J.) - 1970. - Les sols de type vertique et sodique du marais rochefortais (St Laurent-de-la-Frêe). Bull. Ass. Fr. Et. Sol. 5 : 11 - 22.
- MOULINIER (H.) et MAZOYER (R.) - 1966. - Le problème des sels solubles dans les sols de serre. Ann. Agro. 17, 4 : 351 - 366.
- MUNTZ et GAUDECHON - 1909. - De la diffusion des engrais salins dans la terre. Ann. Sc. Agro., 1 : 379 - 411.
- PALLMANN (H.) - 1947. - Pédologie et phytosociologie. C. R. de la Confér. Péd. Médit., Alger - Montpellier : 3 - 36

- PAK (K. P.) - 1971. - Solonetz of the european part of the U. S. S. R. and their reclamation. In European Solonetz, I. SZABOLCS ed. Budapest.
- PEDRO (G.) - 1957. - Mécanisme de la désintégration du granite et de la lave de Volvic sous l'influence des sels de cristallisation. C. R. Acad. Sc. Paris, 245, 3 : 333 - 335.
- PEDRO (G.) - 1964. - Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches. Thèse, Ann. Agro., 2, 15 et Ann. Agro., 3, 15.
- PEDRO (G.) - 1972. - Cours de géochimie donnés à l'E. N. S. A. de Montpellier D. E. A. de Pédologie.
- PETROSIAN (G. P.) et TCHICHIAN (A. I.) - 1969. - Soda saline soils of the Ararat plain and method for their reclamation. In Agro. es Talaj. 19, supplementum : 121 - 137.
- PLET - LAJOUX (C.), MONNIER (G.) et PEDRO (G.) - 1971. - Etude expérimentale sur la genèse et la mise en place des encroûtements gypseux. C. R. Acad. Sc. Paris, 272 : 3 017 - 3 020
- POLYNOV et FILOSOV - 1980. - Change in solutions during their capillary rise in soils and soils materials. Izv. Nauch. Mel. 21 (traduction en langue anglaise communiquée par I. SZABOLCS).
- PORTA (J.) - 1972. - Contribution à l'étude et à l'amélioration des sols sodiques riches en gypse : expériences de laboratoire sur les sols de Ciudad Real (Espagne). D. E. A., Fac. Sc. Nancy, 34 p.
- POUGET (M.) - 1973. - Une manifestation particulière et méconnue de la salure dans les steppes du Sud-Algérois : les plages de salure sur les glaciais quaternaires à croûte calcaire. Bull. Soc. Nat. Af. Nord. 1 - 2 : 15 - 24.
- QUIRK (J. P.) et SCHOFIELD (R. K.) - 1955. - The effect of electrolyte concentration on soil permeability. Journ. Soil. Sc., 6, 2 : 163 - 178.
- REEVE (R. C.) et BOWER (C. A.) - 1960. - Use of high salt waters as a flocculent and source of divalent cations for reclaiming sodic soils. Soil Sc., 90, 2 : 139 - 144.
- REEVE (R. C.) et TAMADDONI (G. H.) - 1965. - Effect of electrolyte concentration on laboratory permeability and field intake of a sodic soils. Soil Sc., 99, 6 : 261 - 266.
- RIGOMIER (D.), DUPUIS (J.) et JAMBU (P.) - 1971. - Les phénomènes de maturation du sol et leurs incidences sur les modifications de l'activité biologique dans une séquence d'assèchement des vases marines (près-salés et polders de l'anse de l'Aiguillon). Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn. 13, 2 : 101 - 122.
- RICHARD (M.) et GOUNY (P.) - 1965. - Contrôle de la salinité. Ann. Agro. 16, 6 : 625 - 635.
- RICHARDS et al. - 1954. - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, Agricultural handbook n° 60, 160 p.
- RISSLER (E.) - 1897. - Géologie agricole, tome IV, Berger - Levrault ed. Paris, 415 p.
- ROBERT (M.) et TEISSIER (D.) - 1973. - Méthodes de préparation des argiles des sols pour les études minéralogiques. Labo. des sols, I. N. R. A., Versailles, 15 p.
- RODE (A. A.) - 1962. - Soil Science. Israel program for scientific translations. Jerusalem, 517 p.
- ROWELL (D. L.) et al. - 1969. - The effect of the concentration and movement of solutions on the swelling, dispersion and movement of clay in saline and alkali soils. Jour. Soil Sc., 20, 1 : 176 - 188
- RUELLAN (A.) - 1964. - Les sols salés et alcalinisés en profondeur de la plaine du Zebra (Basse Moulouya), 8ème Cong. Int. Sc. Sol., 6, 32 : 937 - 947.

- RUELLAN (A.), DELÉTANG (J.) - 1967. - Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. Initiations. Documentations Techniques, n° 5, O.R.S.T.O.M. Paris.
- SANSON (J.) - 1945. - Recueil de données statistiques relatives à la climatologie de la France. Météor. Nat. Paris.
- SAUVAGE (Ch.) - 1961. - Recherches géobotaniques sur les suberaies marocaines. Trav. Inst. Sc. Chéri-fien, Série botanique n° 21, Rabat.
- SAWHNEY (B. L.), JACKSON (M. L.) et COREY (R. B.) - 1959. - Cation exchange capacity determination of soils as influenced by the cation species. Soil Sc., 87 : 243 - 248.
- SHA MUHAMMED et al. - 1969. - Modification of the high salt water method for reclaiming sodic soils. Soil Sc., 108, 4 : 249 - 256.
- SCHOELLER (H.) - 1962. - Les eaux souterraines, Masson et Cie, ed. 642 pages.
- SCOTTER (D. R.) et RAAT (P. A. C.) - 1970. - Movement of salt and water near crystalline salt in relatively dry soils. Soil Sc., 109 : 170 - 178.
- SELYAKOV (S. N.) - 1965. - Water and soil classification by nature of salinisation. Sov. Soil Sc., 1 : 37 - 39.
- SHVARTS (O.) - 1961. - Salt transformations in the soils of Iracq. Sov. Soil Sc., 1 : 36 - 39.
- SERVANT (J.) - 1964. - Etude pédologique d'un domaine en zone salée. Mas d'Uston (66), I.N.R.A., S.E.S. n° 8, E.N.S.A. Montpellier, 27 p. carte au 1/10 000.
- SERVANT (J.) et SIMONNEAU (P.) - 1964. - Etude pédologique du littoral de l'Aude et des Pyrénées - Orientales. INRA⁽¹⁾, S.E.S ⁽¹⁾, n° 27, E.N.S.A. ⁽¹⁾ Montpellier, 57 p., Cartes au 1/50.000
- SERVANT (J.) et SERVAT (E.) - 1966. - Introduction à l'étude des sols salés du littoral Languedoc - Roussillon. Ann. Agro., 17, 1 : 53 - 73.
- SERVANT (J.) et FAVROT (J. C.) - 1966. - Sur les sols salés du Languedoc - Roussillon, essai de classification. Congrès sols méditer. Madrid : 1 - 6.
- SERVANT (J.) et COUSTURIE (B.) - 1967. - La mise en valeur du delta de l'Orb sur le littoral languedocien. La Potasse, n°9 : 153 - 156.
- SERVANT (J.) - 1969. - Caractéristiques principales des sols salins à alcalins de la plaine du Roussillon. Sc. du Sol, n° 2 : 5 - 19.
- SERVANT (J.) - 1969. - Excursion pédologique en Roussillon, feuille de Perpignan - Argelès. Serv. d'Et. des Sols, INRA, Montpellier, n° 126, 33 p.
- SERVANT (J.) - 1970. - Etude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols. Conséquences pédologiques. Science du Sol, n° 2 : 87 - 101

(1) I. N. R. A. : Institut National de la Recherche Agronomique.

S. E. S. : Service d'Etude des Sols.

E. N. S. A. Montpellier : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

- SERVANT (J.) - 1970. - Notice explicative de la carte pédologique au 1/100 000, feuille de Perpignan - Argelès/mer. Serv. d'Et. Sols et de la Carte Pédo. de France, C. N. R. A. Versailles, 114 p. Carte au 1/100 000.
- SERVANT (J.) et SERVAT (E.) - 1971. - Les sols sodiques de France. Sous Com. Et. Sols Sod. Soc. Int. Sc. Sol, Séville, 18 p.
- SERVANT (J.) et NAERT (B.) - 1971. - Les sols salés du Havre-de-Lessay (Cotentin). S. E. S. Montpellier, note ronéo, tirage limité.
- SERVANT (J.) et CHOHAN (T.) - 1971. - Sur les sols sodiques de Camargue, variations saisonnières de la salinité des sols et des nappes, premiers résultats. Bull. Ass. Fr. Et. Sol, 6 : 23 - 31.
- SERVANT (J.) - 1972. - Les sols des marais et basses plaines maritimes in Sols, paysages, aménagements. S. E. S. n° 175, E. N. S. A. Montpellier, 173 p.
- SERVANT (J.) - 1973. - Le profil salin des sols. Méthodes d'étude et signification. Application aux sols halomorphes du Midi de la France. Ann. Agro., 24, 3 : 375 - 393.
- SERVANT (J.) - 1974. - Sur le rôle des cristaux de chlorure de sodium dans la genèse d'une structure poudreuse à la surface de certains sols salés. C. R. Acad. Sc. Paris, 278 : 589 - 591.
- SERVANT (J.) - 1974. - Les sols des Wateringues du Nord et du Pas de Calais. Notice explicative. Carte des sols au 1/80 000, I. N. R. A., S. E. S., E. N. S. A. Montpellier, 95 p.
- SERVANT (J.) - 1974. - Distribution, formes et influences des sels dans les sols de type halomorphe, Cong. Soc. Sav. Besançon, 12 p.
- SERVAT (E.) - 1966. - Sur quelques problèmes de cartographie pédologique en région méditerranéenne. C. R. Conf. sur sols méditer. : 407 - 411, Madrid.
- SERVAT (E.) et CALLOT (G.) - 1966. - Notice explicative de la carte des sols du Roussillon au 1/50 000 - S. E. S. n° 66, I. N. R. A., Montpellier
- SERVAT (E.) - 1968. - Sur l'aménagement de la Camargue E. N. S. A. Montpellier, 20 p.
- de SIGMOND et ARANY - 1929. - A bibliography relating to alkali and saline soils. Trans. of the Alk. Subcom. of the Int. Soc. of Soil Sc. : 41 - 80.
- SIMONNEAU (P.) - 1967. - Les dépressions fermées du Roussillon. Vie et Milieu. Biologie terrestre, 18 : 51-69.
- SOIL SURVEY STAFF - 1960. - Soil classification, 7 th approximation. U. S. Depart. of Agric., 265 p.
- SZABOLCS (I.) - 1961. - The effect of drainage and irrigation on the soil formation processes in the region beyond the Tisza in the Great Hungarian Plain. Inst. Rec. Sc. Soil, Budapest, 12 p.
- SZABOLCS (I.) - 1965. - Salt effected soils in Hungary, Symp. on sodic soils, 14 : 275 - 290, Budapest.
- SZABOLCS (I.) et LEZTAK (J.) - 1968. - The movement of different salt solutions in soils profiles, Pub. n° 83, Symp. of Wageningen Int. Ass. of Scient. Hydr.
- SZABOLCS (I.) - 1971. - (Editor) European solonetz soils and their reclamation. Akademiai Budapest, 203 p.
- THOMAS (G. W.) et SWOBODA (A. R.) - 1970. - Anion exclusion on chloride movement in soil. Soil Sc., 110 : 163 - 166.
- TURC (L.) et al. - 1963. - Cartes d'E. T. P., interprétation et utilisation. Bull. Tech. Gen. Rur. n° 60.
- TRIAT (J. M.) et TURC (G.) - 1974. - Evaporites paléogènes du domaine rhodanien. Revue Geog. phys. et Géol. dyn., 16, 2 : 235 - 262.

- U. N. E. S. C. O. - 1957. - Utilisation des eaux salines. Paris, 107 pages.
- VAN DEN BERG et VISSER (W. C.) - 1964. - Water and salt balances. In working document F. A. O. / U. N. E. S. C. O. (tirage limité).
- VAN DER MOLEN - 1956. - Desalinization of saline soils as a column process. Soil. Sc., 81, 1 : 19 - 28.
- VAN OLPHEN (H.) - 1963. - An introduction to clay colloid chemistry. Inter-science publishers, 301 p.
- VAN SHAIL (J. C.) et STEVENSON (D. S.) - 1967. - Water movement above shallow water tables in southern Alberta. Jour. of Hydr., 5 : 179 - 186.
- VARALLYAY (G. Y.) - 1957. - Balance des sels dans les sols situés entre le Danube et la Tisza, Agro. es Talaj. 16 : 52 - 54.
- VARALLYAY (G. Y.) - 1971. - Bibliographie. In European Solonetz (voir I. SZABOLCS) : 166 - 204.
- VATAN (A.) - 1951. - Etude pétrographique des matériaux sableux côtiers du Golfe du Lion entre le Cap Cerbère et l'embouchure du Rhône. Congrès sédiment. et quaternaire.
- VERGER (F.) - 1968. - Marais et Wadden du littoral français. Bordeaux, Biscaye imp. 544 p.
- VERNET (A.) - 1964. - Evaporation de l'eau du sol. In L'eau et la production végétale : 415 - 417, INRA, Paris.
- VIELLEFONT (J.) - 1969. - La pédogénèse dans les mangroves tropicales. Un exemple de chronoséquence, Sc. du sol, 2 : 115 - 148.
- VILENSKII - 1924. - in GLINKA (1963). Treatise on soil Science.
- VIGO (G.) - 1974. - Contribution à l'étude des substrats des aires culicidogènes du littoral Languedoc-Roussillon. Thèse de doctorat d'Université, Montpellier, 325 p.
- WHITTIG (L. D.) et JANITSKY (P.) - 1963). - Mecanism of formation of sodium carbonate in soils. Sov. Soil Sc., 14, n° 2 : 303 - 322.
- WILBERT (J.), CALLOT (G.) et SERVANT (J.) - 1973. - Guide de l'excursion pédologique sur la feuille au 1/100 000 de Lesparre en Médoc (tirage limité).
- YAALON (D. H.) - 1965. - Downward movement and distribution of anions in soils profiles with limited wetting. In Experimental Pedology, : 157 - 164. London Butterworth.

TABLE DES MATIERES

RESUME	
AVANT PROPOS	
SOMMAIRE	
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : LES BASES, LES OBJECTIFS ET LE CADRE DES RECHERCHES	5
CHAPITRE 1 : ETAT ACTUEL DES CONNAISSANCES ET PROBLEMES POSES PAR L'ETUDE DES SOLS HALOMORPHES. L'ORIENTATION DES RECHERCHES	6
I - Les études du terrain halomorphe	6
II - L'étude des sols salés. Fondements historiques et évolution des idées.....	7
A - L'école soviétique	7
B - L'école américaine	9
C - L'école française	10
D - La littérature spécialisée	11
III - Le point des études sur les sols halomorphes du territoire français	11
IV - Bases et objectifs des recherches	13
A - L'état des connaissances à l'issue des travaux de cartographie	13
B - L'orientation des nouvelles recherches	16
CHAPITRE 2 : LE CADRE DES ETUDES ET LES CARACTERISTIQUES DU MILIEU NATUREL	19
21 - LE CADRE GEOGRAPHIQUE ET L'HERITAGE SEDIMENTAIRE	19
I - Caractéristiques générales et situation des terrains étudiés	19
A - La région méditerranéenne littorale	20
B - Les marais du Médoc	21
II - Origine et nature des matériaux constituant les sols : l'héritage sédimentaire	22
A - Les alluvions des marais du Médoc	22
B - Les alluvions des aires halomorphes dans la région méditerranéenne.....	25
22 - LES FACTEURS DU MILIEU GENERATEURS DE L'HALOMORPHIE, L'HERITAGE SALIN ET L'INFLUENCE DES CLIMATS	29
221 - Origine et nature de l'héritage salin	29
I - Rappel de données chimiques	30
II - Sources et nature de la salinité.....	31
A - Les origines de la salinité	31
B - Etude de la nature des sels contenus dans les eaux de submersion et dans les nappes des zones littorales.....	34
C - Etude de la nature des sels contenus dans les eaux d'inondation et dans les eaux souterraines des zones halomorphes situées à l'intérieur des terres	38

222 - L'influence des climats	40
I - Les caractéristiques générales des zones climatiques	40
A - Caractérisation globale	40
B - Les particularités de chaque zone	41
1 - Les marais du Médoc	41
2 - Les régions littorales méditerranéennes	42
II - Les facteurs climatiques influant sur les processus de l'halomorphie	43
A - Cas des régions méditerranéennes	44
B - Cas des marais du Médoc	45
223 - Conclusions	45
23 - LES PAYSAGES HALOMORPHES ET LA VEGETATION NATURELLE	47
24 - CARACTERISTIQUES DES STATIONS FAISANT L'OBJET D'ETUDES SAISONNIERES DETAILLEES	50
I - Les stations du Roussillon	50
A - Caractéristiques générales	50
B - Minéralogie des argiles	53
II - Les stations de Camargue	54
DEUXIEME PARTIE : LA CARACTERISATION DES SOLS HALOMORPHES	55
CHAPITRE 3 : MESURE ET EXPRESSION DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE D' ECHANTILLONS DE SOL	56
31 - MESURE DE LA SALINITE	56
I - Les extraits de pâte saturée	57
A - Mesure et expressions de la salinité	58
B - Echelle de salinité	59
II - Les extraits aqueux à forte dilution	60
A - Conductivités	60
B - Echelle de salinité	61
III- Comparaisons entre les compositions ioniques des différents extraits	61
IV- Conclusion	63
32 - DETERMINATION DES CATIONS ECHANGEABLES D'ECHANTILLONS DE SOLS SALES	64
CHAPITRE 4 : FORMES ET DISTRIBUTIONS DES COMPOSANTS SOLUBLES ET ECHANGEABLES DANS LE PROFIL DES SOLS HALOMORPHES	66
41 - ETUDE DE LA SALINITE DANS UNE TRANCHE DE SOL. NOTION DE PROFIL SALIN....	66
42 - LE PROFIL SALIN GENERAL	68
421 - Inventaire et classement des principales formes de profils salins	68
1 - Profil salin de type A	68
2 - Profil salin de type B	70

3 - Profil salin de type D	70
4 - Profil salin de type C	71
5 - Comparaison avec d'autres résultats publiés dans la littérature	72
422 - Variations saisonnières de la salinité et des profils salins : l'exposé des faits	72
I - Etudes en Camargue (mas du Grand-Manusclat)	73
A - Sols nus	73
B - Sols couverts par une végétation affectée par la salinité	74
C - Engane inondable	75
D - Commentaires généraux	75
II - Etudes en Roussillon	76
A - Variations de salinité sans changement de forme du profil salin	76
B - Variations de salinité s'accompagnant d'un changement de forme du profil salin	77
C - Profils salins moyens	79
423 - Commentaires et interprétations des données du profil salin général	79
I - Le profil salin sous sol nu de sansouire ou tache salée	80
II - Cas des sols de pelouse, Comparaison avec le sol nu	85
III - Cas du profil salin de type C.....	87
43 - ETUDE DETAILLEE DES DISTRIBUTIONS SPECIFIQUES DES IONS " SOLUBLES " DANS LE PROFIL DES SOLS HALOMORPHES : LES PROFILS IONIQUES	87
431 - Profil des anions	88
I - Exposé des résultats	89
A - Profils d'été	89
B - Profils d'hiver	89
II - Commentaires et interprétation	89
432 - Profil des cations	91
I - Caractéristiques générales des profils cationiques	92
II - Cas des profils cationiques d'hiver	93
433 - Conclusion à l'étude des profils d'ions	94
44 - INTERPRETATION DES DONNEES DE L'ANALYSE IONIQUE EN TERMES D'ESPECES SALINES. LES DIFFERENTS TYPES DE PROFILS DES SELS ET LEUR SIGNIFICATION....	96
I - Expression hypothétique de la composition saline, Principes de la formation des sels	96
II - Appli cation à l'étude du profil des sels dans quelques stations du Roussillon	100
A - L'apparition et l'accumulation superficielle du chlorure de calcium	100
B - Etude du second type : l'accumulation du gypse	104
C - Etude du troisième type : l'apparition du bicarbonate de sodium	106
D - Etude d'un quatrième type : l'apparition du carbonate de sodium	107
III - Conclusion	108
IV - Diagnostic des sels par la voie des études au microscope et aux rayons X	109
A - Etudes au microscope polarisant	109
B - Etudes au microscope électronique à balayage	111
C - Etudes aux rayons X	111

45 - RELATIONS ENTRE LA SALINITE, LA SODICITE ET L'ALCALINITE DANS LE PROFIL DES SOLS HALOMORPHES	112
I - Relations entre les cations solubles et échangeables	112
A - Valeurs et variations du paramètre S.A.R. dans le profil salin. Conséquences sur la sodisation du complexe absorbant	112
B - Cas des autres cations échangeables	114
II - Influence de la salinité et de la sodicité sur le pH des sols halomorphes	115
III - Commentaires et interprétation des données	118
CHAPITRE 5 : INFLUENCE DES CONDITIONS SALINES ET SODIQUES SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET SUR LA MORPHOLOGIE DES SOLS HALOMORPHES	119
51 - ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE DES SOLS HALOMORPHES	119
I - Rappel de données physico-chimiques	119
II - L'étude de la perméabilité d'échantillons de sols salés et sodiques	121
A - Les faits expérimentaux à partir d'échantillons de sol initialement non salés	121
B - Etude de la perméabilité d'échantillons de sols halomorphes	125
C - Etude de la stabilité structurale par l'analyse d'agrégats	126
D - Conclusion	127
52 - LES TRAITES MORPHOLOGIQUES EN RELATION AVEC LA SALINITE ET LA SODICITE	128
I - Influence des accumulations salines	128
A - Les horizons d'accumulation des chlorures	128
1 - Le salant blanc	128
2 - Le salant pulvérulent	130
3 - Le salant hygroscopique	133
B - Les horizons d'accumulation du gypse	133
1 - Forme et distribution des cristaux	133
2 - Influence des cristallisations gypseuses sur le comportement structural du sol.	135
II - Influence de la sodicité : problème de la dégradation de la structure	136
TROISIEME PARTIE : SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DES DONNÉES	139
CHAPITRE 6 : LES PROCESSUS PÉDOLOGIQUES DE L'HALOMORPHIE	140
I - Transfert des ions et stockage des sels	142
A - Influence des facteurs du milieu naturel	142
B - Résultantes de ces mécanismes au travers du concept de profil salin	143
II - L'échange de cations et la sodisation du complexe	146
III - Les transformations salines de la série neutre	147
IV - Les transformations salines de la série alcaline	148
V - Les modifications de l'état structural	148
VI - Le devenir des minéraux argileux de l'héritage sédimentaire	149

CHAPITRE 7 : DIAGNOSTIC ET CLASSEMENT DES SOLS DE LA SEQUENCE HALOMORPHE DANS LE SUD ET LE SUD-OUEST DE LA FRANCE . LES INCIDENCES SUR LA CLASSIFICATION GENERALE DES SOLS HALOMORPHES	151
71 - LES CRITERES DU DIAGNOSTIC	151
I - Rappel des critères et des types de sols actuellement retenus dans la classification française	151
II - Les précisions apportées par la présente étude	152
A - Les critères physiques et morphologiques	152
B - Les critères chimiques proposés	153
72 - LA MISE EN OEUVRE DE CES CRITERES DANS LE CLASSEMENT DES SOLS DE LA SEQUENCE HALOMORPHE DU SUD ET DU SUD-OUEST DE LA FRANCE	154
I - Schéma de classement	153
II - Etude des différents cas	156
A - Premier cas : structure non dégradée, profil AC, caractère salé uniquement	156
B - Second cas : structure non dégradée, profil AC, coexistence des caractères salé et sodique	157
C - Troisième cas : structure non dégradée, profil A(B)C, coexistence des caractères salé et sodique	160
D - Quatrième cas : structure semi-dégradée, profil AC ou A(B)C, présence de caractère sodique en l'absence de caractère salé	160
E - Cinquième cas : structure dégradée, coexistence des caractères salé et à alcali, profil de type AC	161
F - Sixième cas : structure dégradée, coexistence des caractères salé et à alcali, profil A(B)C	162
G - Autres types de sols présentant des caractères d'halomorphie	163
H - Conclusion	164
1 - Séquence méditerranéenne	164
2 - Séquence atlantique	164
73 - PROPOSITIONS POUR UNE REVISION DE LA CLASSIFICATION FRANCAISE DES SOLS HALOMORPHES	165
I - Définition de la classe	165
II - Définition des sous-classes	166
III - Etude des groupes et sous-groupes de la première sous-classe	166
IV - Etude des unités de la deuxième sous-classe	167
V - Synthèse des propositions	169
CONCLUSIONS GENERALES	173
I - Conclusions d'ordre pédologique	173
II - Conclusions d'ordre agronomique	177
BIBLIOGRAPHIE	179
TABLE DES MATIERES	190