

LES SYSTÈMES HALOMORPHES**LOS SISTEMAS HALOMORFOS****J. SERVANT****RÉSUMÉ**

La salinité est un phénomène complexe faisant intervenir l'histoire géologique ou sédimentaire (les sources de salinité), le climat (influence de l'aridité), la topographie (bassins alluviaux ou sédimentaires) et l'influence de l'homme (irrigation, modifications du couvert végétal).

Elle met en jeu des mécanismes de transfert et de stockage des sels dans la couverture pédologique (dont rôle des organisations sédimentaires) et se traduit par des interactions entre les sels et les composants ordinaires du sol (dont génèse des horizons superficiels

La salinité conduit aux formes les plus agressives de la dégradation des sols et génèse, dans des conditions particulières d'évolution, aussi bien l'hyperbasicité qui caractérise les sols à alcali que l'hyperacidité qui se développe dans les sols de mangrove tropicale.

La prise en compte des diverses composantes en interaction qui règlent la dynamique de la salinité dans le paysage, conduit à analyser les systèmes halomorphes en distinguant les systèmes maritimes et les systèmes continentaux.

RESUMEN

La salinidad es un fenómeno complejo en el que participan la historia geológica o sedimentaria (puentes de salinidad) el clima (influencia de la aridez), la topografía (cuencas aluviales o sedimentarias) y el influencia del hombre (el riego, modificación de la cobertura vegetal).

La salinidad desarrolla mecanismo de transferencia y stocks de sales en la cobertura pedológica (cuyo rol de las organizaciones sedimentarias) y se traduce por interacciones entre las sales y los componentes habituales del suelo (por tanto genesis de horizontes superficiales polvoriento).

La salinidad da lugar a las formas más agresivas de la degradacion de suelos y genera en condicion especiales de la evolución, tambien la hiperalcalinizacion que caracteriza los suelos alcalinos, que la hiperacidez que se desarrolla en los suelos de mangle tropical.

Si tenemos en cuenta las diferentes componentes cuya interaccion regula la dinámica de la salinidad en el paisaje ello nos lleva a distinguir entre sistemas maritimos y sistemas continentales en el analisis de los sistemas halomorfos.

La contamination des sols par des sels plus solubles que le gypse, et les conséquences pédologiques et écologiques qui en résultent, sont désignés sous le terme d'halomorphie. Celle-ci procède de différents mécanismes qui sont déterminants dans la genèse et l'évolution des terrains halomorphes et des sols salsodiques. On peut citer la salinisation, la sodisation, l'alcalisation ainsi que la sulfato-réduction et la sulf-oxydation ces dernières se produisant dans les mangroves tropicales (Fig. 1)

L'halomorphie conduit aux formes les plus agressives de la dégradation des terres en provoquant : l'hypersalinité (qui inhibe la croissance des végétaux même résistants), l'hyperbasicité ($\text{pH} > 9$) qui génère la dégradation physique du sol.) et l'hyperacidité ($\text{pH} < 3$) qui entraîne la destruction des minéraux argileux des sols de type sulfaté acide).

Ces différents phénomènes sont d'ailleurs d'un grand intérêt scientifique de par la nature des cycles biogéodynamiques qui contrôlent leur genèse et leur évolution ainsi que par la nature des pratiques qui ont été inventées par les agronomes pour tenter de transformer ces sols en terres arables.

Une caractéristique fondamentale de l'halomorphie est en effet son aspect réversible c'est-à-dire sa susceptibilité à s'atténuer, voire à disparaître, sous l'effet des techniques agro-pédologiques et hydro-agricoles adaptées à la nature des sols et à l'origine de la salinisation.

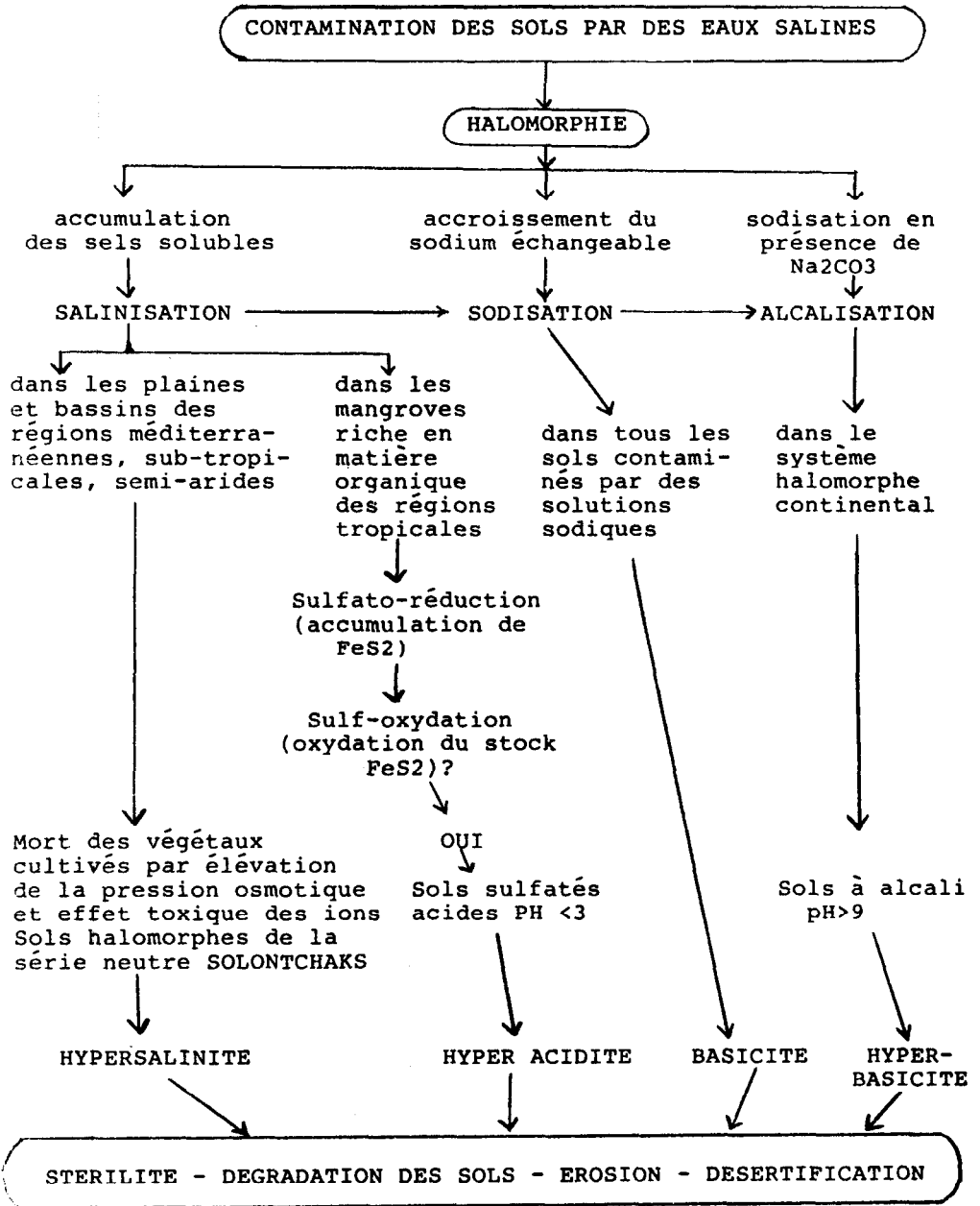


Fig. I : Effets de la contamination des sols par des eaux salines

Fig. I : Efecto de la contaminación de los suelos para las aguas salinidades

L'autre versant de cette réversibilité s'exprime par la possibilité néfaste qu'ont des sols sains d'acquérir le caractère halomorphe, sous l'influence de pratiques agricoles, dont les conséquences à long terme n'ont pas été envisagées. Il s'agit du phénomène connu sous le nom de salinisation secondaire des sols et qui correspond à l'extension des surfaces salées, en particulier dans les plaines irriguées avec des eaux de mauvaise qualité en l'absence d'un drainage efficace. La salinisation, la sodisation, l'alcalisation, la sulfoxydation s'inscrivent donc comme des risques majeurs dans le cortège des processus conduisant à la dégradation de l'environnement suite à des pratiques agricoles, pastorales ou sylvicoles mal conduites dans des régions sensibles, aux équilibres fragiles (zones semi-arides).

Le terme de plaine doit maintenant retenir notre attention car l'halomorphie est un phénomène qui sévit dans les surfaces planes et dans les dépressions, affectant dans la plupart des cas, des alluvions modernes ou anciennes et ceci à des altitudes très variables, depuis les marais situés en bordure de la mer, jusqu'aux alti-planos s'étendant à 4000 mètres d'altitude dans les Andes. Ces deux exemples illustrent déjà deux grands types de systèmes halomorphes : le système halomorphe maritime et le système halomorphe continental. Le terme de système halomorphe, utilisé ici, répond au souci d'une analyse dynamique du fonctionnement d'un paysage influencé par les sels en termes de flux de matière, d'organisation et de distribution de la salinité, d'interactions entre les agents de l'halomorphie et les constituants du sol, de transformations biogéochimiques, d'occupation du sol par la flore spécialisée etc.

I. ELEMENTS POUR UNE APPROCHE DE LA DYNAMIQUE SALINE

1. Contamination saline

La contamination des terres par les sels s'effectue par l'intermédiaire de l'eau qui est le vecteur de la salinité dans la majorité des cas, exception faite, toutefois, des particules de sel pouvant être transportées par le vent lorsque les sols salés présentent une structure poudreuse, pseudosableuse, riche en microcristaux de sel.

Le processus de contamination peut être analysé en termes de sources de la salinité et de mécanismes de la contamination.

1.1. Sources de la salinité (voir tableau 1)

- a) les eaux marines actuelles,
- b) les aquifères salés,

- c) l'altération des minéraux primaires libérant du sodium, du magnésium et du calcium et leur combinaison avec le CO₂ de l'air dans les zones arides.
- d) l'influence du volcanisme et de l'hydrothermalisme dans les bassins tectonique (Rift Valley, Vallée de la mort, selins de Limagne en France etc.)
- e) la dissolution des roches salines ou évaporites qui constituent l'amont de bassins sédimentaires
- f) les eaux d'irrigation chargées en sels solubles

1.2. Mécanismes de la contamination

a) les submersions marines périodiques caractérisent les zones littorales salées dans les régions tempérées et tropicales. (Slikke, Schore, Mangroves). Elles sont générées par les marées dont celles de fortes eaux qui atteignent les zones "herbues" des marais maritimes.

b) l'imprégnation capillaire du sol à partir d'une nappe peu profonde - source de salinité - constitue un processus très fréquent dans les terrains halomorphes.

Il est d'autant plus marqué :

- que la nappe est proche de la surface,
- que les caractéristiques climatiques sont peu favorables au lessivage, (zones semi-arides)
- que le matériau pédologique présente une bonne conductivité hydraulique vis-à-vis de la solution saline.

Pour ce dernier point il faut noter que la remontée capillaire est particulièrement élevée dans les sols de limons sableux comme en témoigne le tableau ci-après (Van den Berg et Visser 1964).

On remarque ainsi, que dans un sol de limon sableux, il faut maintenir la nappe à au moins 2 mètres de profondeur, si l'on veut que la remontée capillaire soit inférieure à 0,5 mm/jour.

Dans les plaines alluviales soumises à des phénomènes d'halomorphie, les structures sédimentaires peuvent ainsi commander la distribution de la salinité en fonction de l'organisation des alluvions, dont les bourrelets de limons sableux peuvent être des sites particuliers d'accumulation saline jouant le rôle de mèches et redistribuant les sels vers les points bas plus argileux.

c) l'irrigation avec des eaux chargées en sels, conduite sans respect des normes de lessivage est à l'origine de la salinisation secondaire des sols dans les périmètres irrigables des régions sèches.

- formation des sels par
évaporation de l'eau de mer

composition ionique
d'une eau de mer en g %.

Cl⁻ 19,0
Na⁺ 10,6
SO₄= 2,7
Mg⁺⁺ 1,3
Ca⁺⁺ 0,4
K⁺ 0,4
-
HCO₃ 0,1
autres 0,1

composition chimique
du cristallinat après
évaporation g %.

NaCl 26,8
MgCl₂ 3,3
MgSO₄ 2,2
CaSO₄ 1,3
KCl 0,7
CaCO₃ 0,1
autres 0,2

- Lithosphère

0,5 % Cl- 3% Na₂O
0,5 % SO₄= 3,6% MgO

- Minéraux sodiques

- . plagioclases sodiques
- . néphéline (feldspathoïde)
- . riebeckite (amphibole)
- . zeolithes (analcime, sodalite)

- Evaporites

NaCl	halite
MgSO ₄ , 7H ₂ O	epsomite
Na ₂ SO ₄ , 10H ₂ O	mirabilite
MgCl ₂ , 6H ₂ O	bischofite
CaMg ₂ Cl ₆ , 12H ₂ O	tachydrate
Na ₂ CO ₃	natron
Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃	trona
2Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	burkeite
CaSO ₄ , 2H ₂ O	gypse

Tableau 1 : Sources de la salinité

: distance : : à la nappe (cm) :	t e x t u r e d u s o l			
	A et AL	L	LS	S
: 25 :	10	10	-	10
: 40 :	4	3	-	2,5
: 50 :	2,5	1	-	1
: 75 :	1	-	-	0,5
: 100 :	0,5	-	10	0,2
: 150 :	0,2	-	1,4	-
: 200 :	-	-	0,5	-

Tableau 2 : Remontée capillaire en mm/jour

Il faut d'autre part noter que l'irrigation dans les zones sèches - même conduite avec des eaux de bonne qualité - peut provoquer la remontée d'aquifères salés dans des zones mal drainées qui se salinisent.

d) le transfert éolien de poussières salines issus de l'horizon superficiel poudreux des sols salés est également un processus de contamination dans les zones sèches.

2. La dynamique des sels dans le sol - les profils salins

- Le profil salin constitue la séquence verticale d'informations décrivant la salinité dans le sol, cette séquence intéressant classiquement la tranche de sol comprise entre la nappe phréatique et la surface. La méthode la plus simple consiste à mesurer les conductivités électriques des différentes couches de sol, soit sur échantillons : extraits de pâtes saturées ou prélèvements de solutions par bougies poreuses soit par mesures in situ : salinity sensors.

- Quatre principaux types de profils salins ont été mis en évidence (2)* que l'on peut considérer comme les extrêmes caractéristiques de la fonction salinité, chacun d'entre eux ayant une signification en termes de dynamique des sels. (voir figures II).

a) le type A, à maximum superficiel, caractérise un processus ascendant de salinisation dans les sols à nappe salée peu profonde. Ces sols très salés sont faiblement colonisés par une végétation d'halophytes très résistants.

b) Le type B qui présente un maximum marqué de salinité entre la surface du sol et la nappe est caractéristique d'un processus temporaire de désalinisation, c'est-à-dire par un transfert des sels vers le bas, sous l'influence de la pluie ou de l'irrigation.

c) Le type D montre une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Il est caractéristique des pelouses à recouvrement végétal dense où la salinisation est contrariée par un lessivage des horizons de surface rendue possible grâce à la bonne perméabilité de ces horizons (rôle du chevelu racinaire).

d) Le type C est intermédiaire entre A et l'ensemble B ou D : il traduit la reprise d'un processus de salinisation après une période de désalinisation. Il est caractéristique des zones salées inondables.

3. Les voies biogéochimiques de la différenciation saline

Les solutions salines imprégnant le sol sont générées par la source de salinité (par exemple la nappe phréatique). Leur état salin reflète la composition chimique initiale de l'eau de cette source mais est également soumis à des transformations qui modifient sa composition au cours du transfert latéral dans les paysages ou vertical dans le profil pédologique - des solutions salines dans le milieu poreux du sol.

Ces transformations mettent en jeu différents phénomènes biogéochimiques et en particulier :

- la précipitation des sels peu solubles tels que le carbonate de calcium et le gypse sous l'influence de l'évapotranspiration,

- les échanges de cations entre la solution d'imprégnation et les minéraux argileux du sol (par exemple la solution cède du sodium et reçoit du calcium),

* cf bibliographie

: fonctionnement du	: type de paysage	: type de profil	:
: sol halomorphe	: et végétation	: salin	:
:	:	:	:
:salinisation <u>per</u>	: "sansouire" de Camargue	type A	:
: <u>ascensum</u> - nappe	: hypersalinité Faible:	surtout en été	:
:salée peu profonde	: recouvrement végétal:		:
:	: (sols nus)		:
:	: <u>Arthrocnemum glaucum</u>		:
:	:	:	:
:désalinisation	: zones inondables		:
:temporaire	: pendant la saison	type B	:
:	: humide	surtout en période	:
:	: <u>Salicornia fruticosa</u>	humide	:
:	:	:	:
: salinisation	: pelouse à recouvre-		:
: atténuée	: ment végétal dense	type D	:
:	: graminées+halophytes:	toute l'année	:
:	:	:	:
:resalinisation	: zones inondables	type C	:
:	: marais salés	en été	:
:	:	:	:

Tableau 3 : Les quatres types de profil salin et le fonctionnement du sol halomorphe

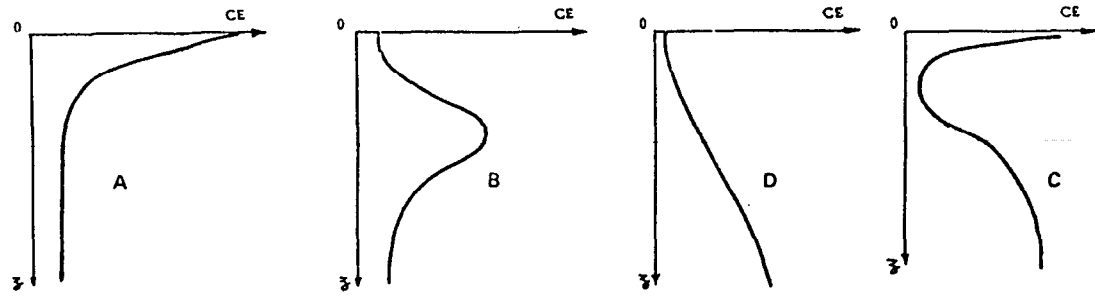


Fig. IIa : Formes de profils salins

Fig. IIa : Formas de perfiles salinos

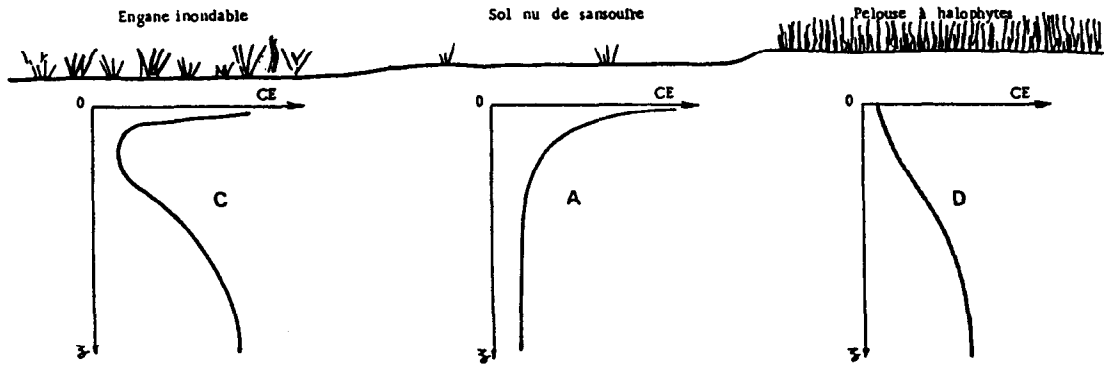


Fig. IIb : Distribution estivale des formes dans le paysage

Fig. IIb : Distribución estival de las formas en el paisaje

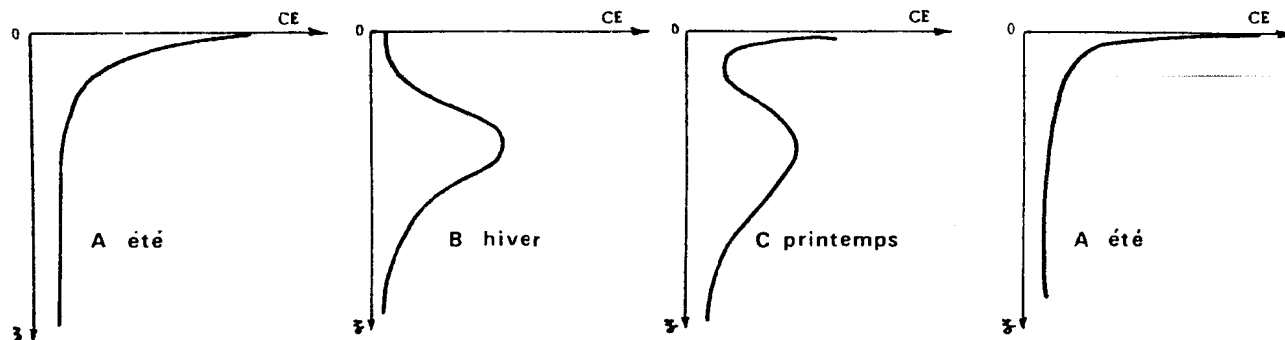


Fig. III : Variations saisonnières du profil salin dans le sol nu de type limons/sables

Fig. III : Variaciones estacionales del perfil salino en el suelo desnudo de tipo limoso/arenoso

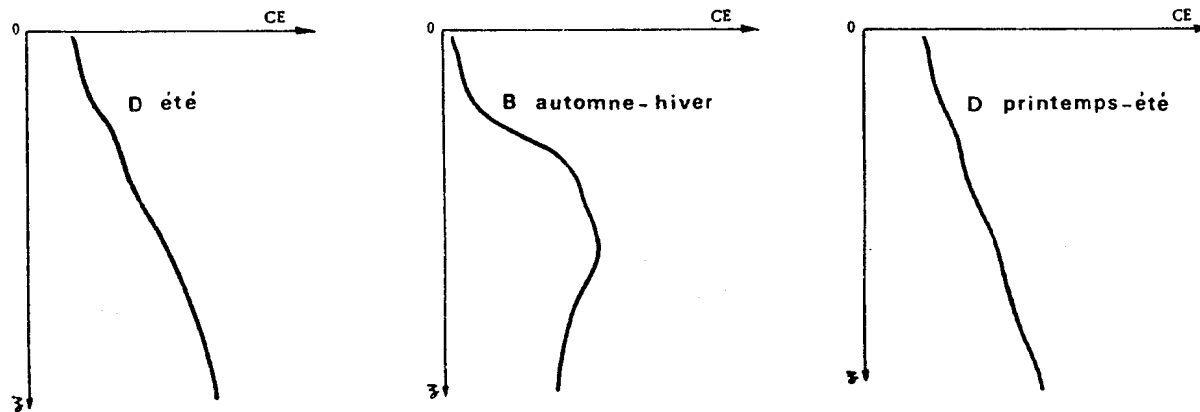


Fig. IV : Variations saisonnières du profil salin dans le sol de pelouse halophile

Fig. IV : Variaciones estacionales del perfil salino en el suelo de césped halófilo

- la réduction bactérienne des sulfates (formation de sulfures insolubles) dans les sols de marais maritimes riches en matière organique (mangroves tropicales).

Dans la solution du sol, le sous système $[Ca^{++}, Co_3^{=}, HCo_3, So_4^{=}]$ constitue donc la partie sensible, soumise aux transformations biogéochimiques alors que le sous-système $[Na+Mg^{++}]$ n'est affecté que par les échanges de cations et que le sous-système $[Cl^{-}]$ est totalement "inerte" vis-à-vis de ces processus.

Deux cas peuvent être envisagés :

3.1. Cas général (voir figure V)

Après précipitation du carbonate de calcium deux voies, l'une neutre, l'autre alcaline conduisent aux ségrégations salines qui caractérisent deux grands types de sols salés.

La voie neutre s'accompagne généralement de la précipitation de gypse dont la solubilité est faible (2g/litre dans H_2O). Par la suite, les sels solubles se concentrent au cours de l'évaporation et trois types de facies peuvent s'exprimer, qui caractérisent les solontchaks.

a) le salant blanc typique ($NaCl, Na_2So_4, MgSO_4$);

b) le salant blanc à caractère hygroscopique ($NaCl, MgSO_4, MgCl_2$) ce caractère étant donné par les sels de magnésium et en particulier la bischofite ($MgCl_2, 6H_2O$);

c) Le salant hygroscopique : le sol, même au coeur de la saison sèche, présente une surface humide et foncée. On parle également de facies "tâche d'huile". Ce caractère est dû aux chlorures de calcium et magnésium. (bischofite et tachydrite dont les formules sont respectivement $MgCl_2, 6H_2O$ et $Mg_2CaCl_6, 12H_2O$).

Dans tous les cas il s'agit de "sels neutres" et le pH du sol n'excède pas 8,5.

. La voie alcaline

Après précipitation du carbonate de calcium, les ségrégations salines fortement sodiques renferment des sels alcalins : $(Na_2Co_3, 2Na_2So_4)(Na_2Co_3)$ etc. Le pH du sol est élevé et peut dépasser 10. Les argiles et la matière organique sont dispersés. Le milieu est compact et imperméable. En surface du sol se forme une pellicule noirâtre d'humates alcalins (salant noir). Les sols de cette série sont des sols à alcali quand leur profil est peu différencié. Il passent à des solonetz quand le profil est lessivé et renferme un horizon Bt à structure en colonnettes à sommets arrondis.

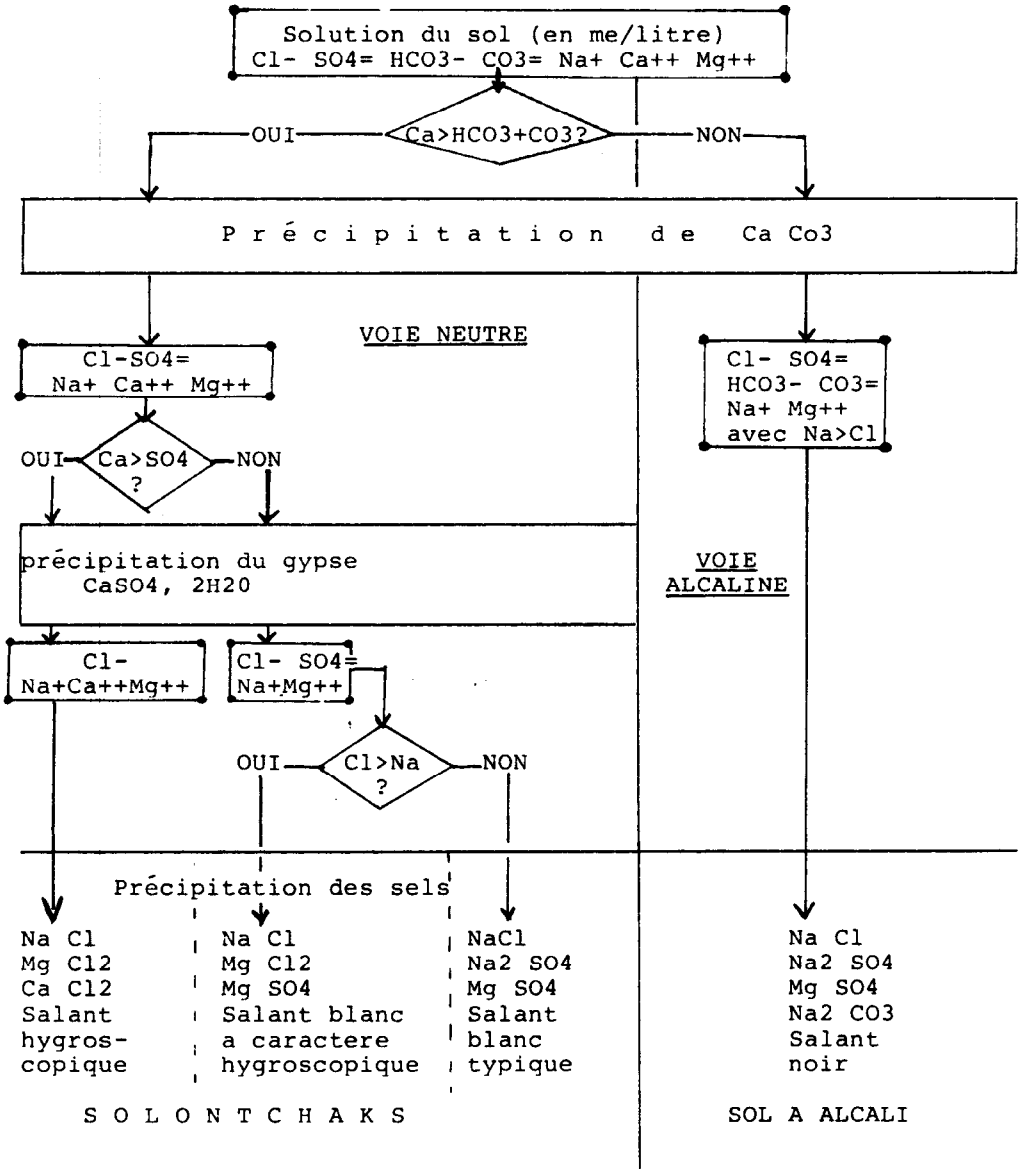


Fig. V : Ségrégations salines au cours de la concentration des solutions dans les sols halomorphes

Fig. V : Segregaciones salinas durante la concentración de las soluciones en los suelos halomorfos

3.2. Cas des marais maritimes

Dans les marais maritimes et en particulier dans les mangroves tropicales riches en matière organique et en fer et pauvres en calcium, se produit la réduction bactérienne des sulfates de l'eau de mer qui sont transformés en sulfures insolubles et en particulier en pyrites (FeS_2). Le milieu reste légèrement alcalin suite à la genèse d'une alcalinité d'échange au cours du processus biogéochimique, de réduction. Il se forme des vases noires d'estrans maritimes découpés par un système de chenaux par où circule l'eau de mer et par où s'évacuent les eaux de drainage au cours de marées basses et sous l'influence des pluies tropicales.

La mise en valeur des mangroves à des fins agricoles passe par la maîtrise de l'eau: (lutte contre l'influence marine et le drainage). Elle est rendue nécessaire dans certaines régions à forte densité de population ou ces terres peuvent produire du riz (Asie du Sud-Est). Mais l'aération du sol entraîne l'oxydation des sulfures (Sulf-oxydation) avec genèse d'acide sulfurique qui attaque les minéraux argileux et provoque leur destruction. Le pH est hyperacide ($\text{pH} = 2 \text{ à } 3$). Les sols sont désignés sous le terme de sols sulfatés acides.

4. Intéractions entre les composants salins et le matériau pédologique.

Plusieurs types d'interactions peuvent être identifiés qui ont déjà été évoqués dans les pages précédentes.

a) au plan biochimique interactions d'oxydo-réduction entre les sulfates d'origine marine et le sédiment hydromorphe et organique des mangroves (Sulfato-réduction);

b) au plan physicochimique, échanges de cations entre la solution du sol et les minéraux argileux : en présence de solutions sodiques les argiles deviennent sodiques et cèdent du calcium qui passe en solution. En milieu riche en ions HCO_3 et/ou SO_4 le calcium est mobilisé pour former du calcaire ou du gypse par précipitation.

En milieu pauvre en ions $\text{SO}_4=$ le calcium cédé reste en solution et participe à la formation des chlorures alcalino-terreux (Ca Cl_2 et tachydrate) qui caractérisent le salant hygroscopique.

c) Au plan physique il faut noter la formation des horizons superficiels poudreux épais de 3 à 10 cm qui se développent en saison sèche dans le cas des solontchaks.