

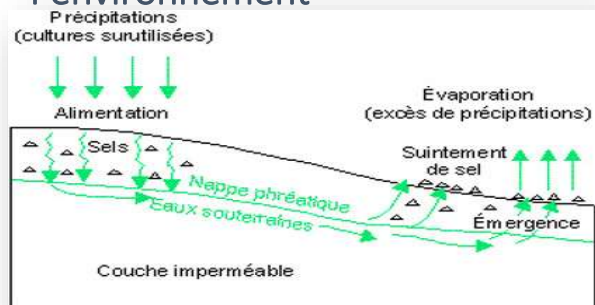
Université Abbès Laghrour
Khenchela
Faculté des Sciences
de la Nature et de la Vie



**Département d'Ecologie et
Environnement**

**Matière Salinisation,
alcalinisation et
dégradation des sols et des
eaux**

**Master II : Protection de
l'environnement**



Dr. Laiche AOUIDANE

Semestre : 3

Intitulé de l'UEF1 : Milieu Physique

Intitulé de la matière : salinisation, alcalinisation et dégradation des sols et des eaux

Crédits : 4 Coefficients : 2

Objectifs de l'enseignement

Etudier les origines de la salinité ainsi que la dynamique de l'eau dans le sol, les sols salsodiques, ainsi que les effets des sels et la mise en valeur des sols salsodiques .

Connaissances préalables recommandées

Il faut en général avoir suivi les matières suivantes : écologie générale de la 2^{ème} année licence, ainsi éco-pédologie de la 3^{ème} année licence et la matière de pédologie de Master I. Une culture générale sur l'environnement est également la bienvenue.

Contenu de la matière :

I-Définition, origines et importance de la salinité

- 1 Définition
- 2 Origines de la salinité
- 3 Dynamiques de l'eau du sol

II- les sols salsodiques

- 1- Les sels solubles et leur dynamique
- 2- Solubilité des sels
- 3- Dynamique des sels solubles
- 4- Critères caractérisant les sols salsodiques
- 5- Processus de salinisation
- 6-Classification des sols salsodiques

III-effets des sels

- 1- Définition
- 2- Effets sur les sols
- 3- Effets sur la croissance des végétaux
- 4- Risque d'alcalinisation des sols SAR

IV-mise en valeur des sols salsodiques

- 1- Généralités
- 2-L'assainissement des terrains salsodiques
- 3- Expérience de certains pays en matière de mise en valeur
- 4- Propriétés agronomiques et la mise en valeur des sols salsodiques
- 5- Amendements utilisés

i Phosphogypse

ii Fumier de ferme **Mode d'évaluation** : Examen final et contrôle continu

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	GENERALITE :	2
2.1	DEFINITION :	2
2.2	REPARTITION ET IMPORTANCE DE LA SALINISATION	3
2.2.1	DANS LE MANDE	3
2.2.2	EN ALGERIE	4
2.3	ORIGINE DE LA SALINITE	5
2.3.1	MARINE	5
2.3.2	LAGUNAIRE	6
2.3.3	GEOLOGIQUES	7
2.3.4	VOLCANIQUE	7
2.3.5	ANTHROPIQUE	8
2.4	FACTEURS INFLUENÇANT LA SALINITE	9
2.5	TYPLOGIE DES SOLS (SALES)	11
2.5.1	SOLS SALINS :	11
2.5.2	SOLS A ALCALI	12
2.5.3	SOLS A CARBONATE DE SODIUM	13
3	DYNAMIQUES DE L'EAU DU SOL	13
3.1	LES COMPOSANTES DU VOLUME DE SOL	13
3.1.1	MASSES REELLES ET APPARENTES	14
3.1.2	POROSITE	15
3.2	LES FORMES DE L'EAU DANS LE SOL	16
3.2.1	TENEUR D'EAU	17
3.2.2	MESURE PAR PERTE DE POIDS	18
3.3	REMUANTE CAPILLAIRE	18
3.4	MOUVEMENT DE L'EAU DANS LE SOL	20
3.5	EQUATION DYNAMIQUE	20
4	LES SOLS SALSODIQUES	23
4.1	HORIZON SALIQUE	23
4.2	HORIZON SODIQUE	24
4.3	LES SELS	24
4.4	DYNAMIQUE SALINE DES SOLS	24
4.5	CARACTERES DES SOLS SALSODIQUES	26
4.6	PROCESSUS DE SALINISATION	27
4.6.1	SALINISATION PRIMAIRE :	27
4.6.2	SALINISATION SECONDAIRE :	28
4.7	CLASSIFICATION DES SOLS SALSODIQUES	28

5	EFFET DES SELS	30
<hr/>		
5.1	LES EFFETS DES SELS SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL	30
5.2	EFFET SUR LA CROISSANCE DES VEGETAUX	31
5.3	RISQUE D'ALCALISATION DES SOLS SAR.	32
6	MISE EN VALEUR DES SOLS SALSODIQUE	34
<hr/>		
6.1	LES METHODES DE LA REHABILITATION	34
6.2	ISOLATION DE LA ZONE SALEE DE LA SOURCE DE CONTAMINATION	35
6.3	EVACUATION DES SELS SODIQUES ET DU NA ECHANGEABLE	35
6.4	AMENDEMENT DU SOL	36
6.5	LE LESSIVAGE	36
6.6	TRAITEMENT CHIMIQUE	37
6.6.1	LE PHOSPHOGYPSE ET SON UTILISATION	37
6.6.2	TRAITEMENT PAR LE GYPSE	38
6.7	TRAITEMENT ORGANIQUE	38
7	REFERENCES	41
<hr/>		

1 INTRODUCTION

La gestion des ressources en eaux et sols est considérée comme l'un des thèmes prioritaires pour assurer la durabilité des modes de production. Cette question concerne non seulement les préoccupations liées à la production et la qualité des produits mais également la protection de l'environnement. La salinisation des terres et des eaux est un problème majeur à l'échelle du globe et locale, surtout les régions arides et semiarides.

L'irrigation est une pratique en pleine extension : environ 8,1 millions d'hectares étaient irrigués en 1800, 41 millions en 1900, 105 millions en 1950 et plus de **222 millions d'hectares aujourd'hui**. Cette pratique, en offrant des rendements accrus et la possibilité de plusieurs récoltes par an, permet d'assurer 40 % de la production vivrière mondiale. Mais plusieurs menaces planent sur ce succès, en effet, 21 % des terres irriguées souffrent d'engorgement, de salinité et/ou d'alcalinisation qui réduisent leurs rendements. De même, 1 à 2 % des surfaces irriguées sont perdues chaque année du fait de ces deux derniers fléaux, enfin des ressources en eau limitées réduisent leurs possibilités de développement.

La salinisation des terres est un problème majeur à l'échelle du globe. Elle affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (DIALLOU , et al., 2015). D'après (Szablocs, 1989), 3,2 million d'hectares subissent la salinisation à des degrés de sévérité variable. Une bonne partie du phénomène de salinisation se trouve localisée dans les terres arides et semiarides, du fait que le processus de salinisation est plus marqué par des températures élevées durant presque toute l'année, du drainage restreint et de la faiblesse des précipitations insuffisantes pour lixivier les sels solubles du sol (FAO, 2006). Selon (SINOUSSE, 2001), en Afrique 80,5 millions d'ha sont affectés par la salinité.

Le développement des systèmes d'irrigation a permis la mise en valeur des terres arables en zones arides et semi-arides. C'est ainsi que depuis une cinquantaine d'années, des grands périmètres ont été construits en Algérie pour combler le déficit en eaux des cultures. Cependant, ces pratiques d'irrigation à grande échelle ont modifié le fonctionnement des sols et accru le risque de salinisation. En Algérie, plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (DOUAOUI & HARTANI., 2007).

2 Généralité :

2.1 Définition :

Pour les chimistes un sel est le produit qui résulte de l'action d'un acide sur une base. Beaucoup de substances chimiques sont donc des sels. Pour les agronomes, un sel est une substance dont la solubilité dans l'eau est suffisante pour gêner la croissance des plantes. Dans cette façon de voir, la calcite (le calcaire) n'est pas un sel, par contre la sylvinite et l'halite, si. La salinité est un élément naturel et un facteur écologique constitué par la présence des concentrations excessives des sels solubles dans la solution des sols (Legros, 2009).

La salinisation proprement dite, c'est l'accumulation des sels solubles dans la solution du sol.

La salinisation est l'accumulation de sels hydrosolubles dans le sol. Ces sels sont le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le carbonate (CO_3^{2-}), le bicarbonate (HCO_3^-) et le sodium (Na^+). Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau. Quand l'eau s'évapore, les sels restent (Marlet & Job, 2006).

L'accumulation de sodium est aussi appelée sodification, l'ion sodium présent sous forme de sels solubles dans la solution du sol tels que $NaCl$, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 et $NaHCO_3$, soit sous forme échangeable, liée au complexe adsorbant, soit les deux à la fois (Duchaufour, 1983). On parle alors sur la salinisation sodique ou alcalinisation est l'accumulation du sodium (Na^+) échangeable dans le complexe adsorbant du sol (CAS).

Donc la sodicité, est la richesse du complexe adsorbant en ion sodium est caractérisée par le taux de sodium adsorbé SAR (Sodium absorption ratio) et par le pourcentage de sodium échangeable (ESP) lorsqu'ils dépassent les seuils 10 et 15% (Aubert, 1983).

Les sols salsodiques sont rencontrés dans les régions arides, tempérées, maritimes et continentales, ils se différencient naturellement, sous climat caractérisé par l'excès de l'évaporation par rapport aux précipitations (Halitim, Sols des régions arides d'Algérie., 1988).

L'United States Salinity Laboratory de Riverside (USSL) a mis en place une échelle dite agronomique pour déterminer le degré de la salinité des sols et les classés, exprimée en termes de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée et l'extrait aqueux de 1/5. Cette échelle varie de 0 à 16 dS/m et elle est répartie comme suit (c) (Tableau 1).

Tableau 1 Echelle de classement de la salinité (U.S.S.L.S., 1954)

Classe	Extrait Pâte saturé		Extrait aqueux 1/5	
	Catégorie	Conductivité (dS/m)	Catégorie	Conductivité (dS/m)
1	Non salé	0-2	Faiblement salé	0.2- 0.65
2	Faiblement salé	2-4	Modérément salé	0.65-1.4
3	Modérément salé	4-8	Salé	1.4-2.2
4	Salé	8-16	Fortement salé	2.2- 3.75
5	Fortement salé	>16	Très Fortement salé	3.75-6
6			Hyper salé	>6

D'autres paramètres de la salinité sont calculés pour donner plus d'explication au phénomène de la salinisation tel que :

SAR ; Le taux de sodium adsorbé est calculé après le dosage des concentrations des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+ selon l'équation de Richards (1954) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2}}$$

Les concentrations sont exprimé en (még/l) (1)

ESP : pourcentage de sodium échangeable est le degré de saturation en sodium du complexe adsorbant. Il est exprimé par l'équation de Richards (1954)

$$ESP (\%) = \frac{Na^+}{CEC} \times 100$$

(2)

Les concentrations sont exprimé en milliéquivalent par 100 g du sol sec ; CEC la capacité d'échange cationique.

2.2 Répartition et importance de la salinisation

2.2.1 Dans le monde

Les sols salés ont un caractère azonal, ils se distribuent dans toutes les parties du monde (Servant, La salinité dans le sol et les eaux : caractéristiques et problèmes d'irrigation- drainage, 1978; Djili, Daoud, & Touaf, 2000). Selon (Daoud, 1981) ces sols occupent 24 % des terres de

la planète. Les Solonchaks se trouvent au Sahara Africain, Namibie, Asie Centrale, Australie et Amérique de Sud. Leur extension mondiale varie de 260 à 340 millions d'ha (W.R.B, 2006). Les sols salsodiques représentent le pourcentage le plus important de la superficie du monde, sous l'effet de l'agriculture intensifiée, les surfaces tendent à augmenter d'une façon considérable dans les pays en voie de développement, surtout en régions arides et semi-arides (Cherbuy, 1991). D'après (Hans, 2003), estime que près de 7 % des terres au monde sont atteintes par la salinisation, soit une surface de 920 millions d'hectares irrigués.

En Afrique, les sols salés sont représentés dans le Fossé Est Africain, la Vallée du Nil, la dépression du lac Tchad et aussi dans les régions arides d'Afrique de Sud ainsi que d'une façon plus ponctuelle dans les plaines, les sebkhas et les oasis méditerranéennes. Ils sont en outre présents dans les pays du Maghreb, leur extension dans ces zones est due aux conditions climatiques (arides et semi-arides) où les phénomènes d'évaporation sont considérables et les précipitations sont limitées (Aubert G. , 1975; Robert & Cheverry , 1996).

2.2.2 En Algérie

Les sols salés sont très répandus en Algérie essentiellement dans les zones arides et semi-arides; des travaux effectués par différents auteurs montrent que la majorité des sols agricoles en Algérie sont affectés par les sels (Durand J. , 1958). Ils sont aussi rencontrés dans quelques régions des chotts et sebkhas, en particulier sur les hauts plateaux et dans les régions semi-arides (Dogar, 1978). Ces sols occupent plusieurs zones pédoclimatiques. Sur les hauts plateaux, ils prennent une plus grande extension dans les régions sahariennes (Aubert G. , 1975). Les sols salés rencontrés en Algérie sont essentiellement des sols salins et des sols à alcali appelés Solonchaks, et rarement des Solonetz. Ces Solonchaks sont abondants et se trouvent à l'Ouest dans les basses plaines et les vallées d'Oranie, la vallée de la Mina près de Relizane et à l'Est du pays, dans les hautes plaines au sud de Sétif, Constantine et aux abords de quelques chotts et aussi dans la région d'Annaba. Ils ont une grande extension dans les régions sahariennes, de sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Aubert, 1983). D'après la carte des sols (Durand J. , 1954), (Fig. 1) les sols salés sont bien représentés dans les régions Est, mais tous les pédologues s'accordent à dire que les sols de l'Ouest sont plus salés que ceux de l'Est (Djili, Daoud, & Touaf, 2000).

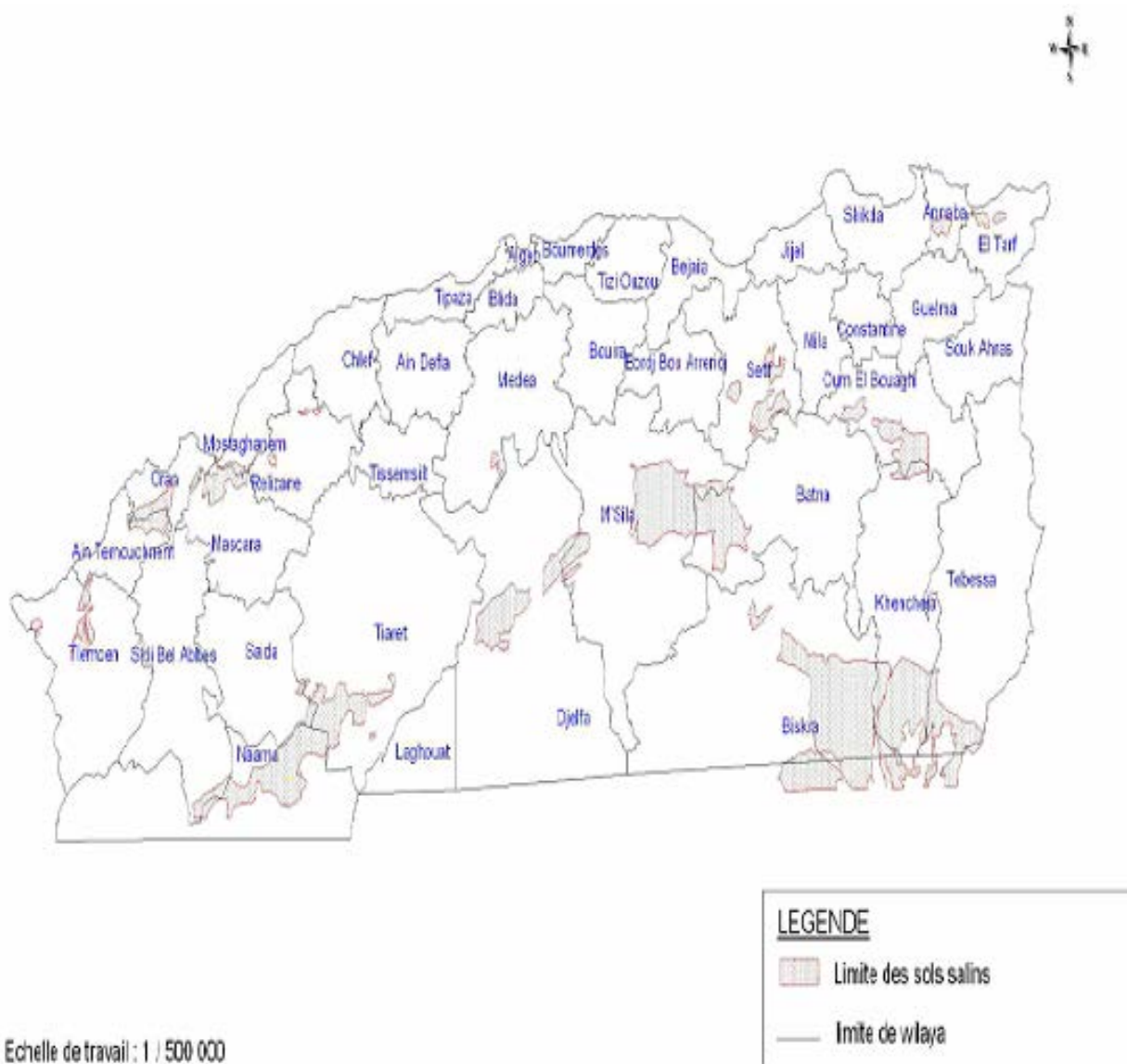


Figure 1. La répartition des sols salins dans le Nord Algérienne

2.3 Origine de la salinité

La première question que l'on se pose naturellement est : d'où vient le sel sur les continents ?

La salinisation peut avoir plusieurs origines à savoir : géologique, marine, lagunaire, volcanique et anthropique.

2.3.1 Marine

Le mot « salinisation » évoque inmanquablement les bords de mer. Certes, le sel peut être véhiculé sur la terre par les embruns (jusqu'à 750 kg par ha en une seule année) ; certes, la mer peut envahir la terre par forte marée (côtés basses) et saler les terres ; certes au niveau des côtes sableuses, l'eau de mer s'infiltré et peut créer une nappe salée qui détermine des milieux particuliers réservés aux halophytes (plantes tolérantes au sel). La Camargue est l'exemple type

de ces phénomènes (Diakhate, 1986). Mais tout cela n'est pas l'essentiel car seule une faible bande côtière est affectée. Ce qui est grave, à l'échelle de notre planète, c'est la salinisation continentale.

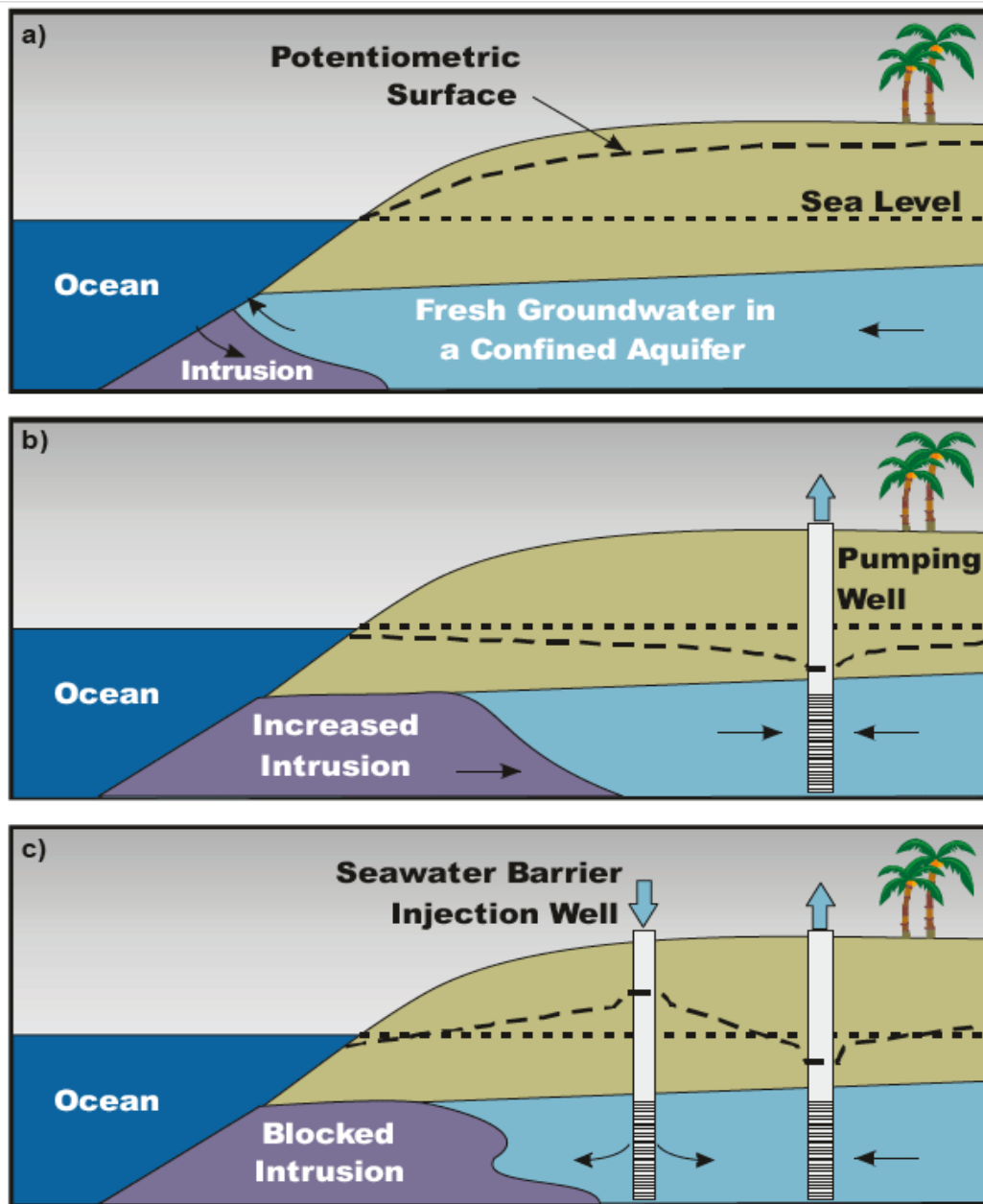


Figure 2. Schéma de salinisation des eaux souterraines par un intrusion marine

2.3.2 Lagunaire

Cette salinisation correspond à un héritage marin. Il y a eu colmatage alluvial d'une côte basse lagunaire, où se sont formés des aquifères complexes comprenant des lentilles d'eau

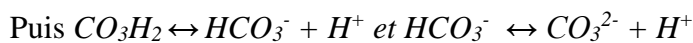
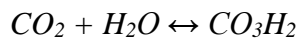
sursaturées. La nappe se trouve, en général, à une faible profondeur et elle contamine la surface par les remontées capillaires.

2.3.3 Géologiques

Les sels peuvent provenir soit de l'altération des minéraux primaires de croûte terrestres (Bryssine, 1961), soit de la dissolution des évaporites et la libération des Chlorures, Sulfates, Carbonates de Sodium et de Magnésium. Les évaporites se localisent essentiellement dans les bassins sédimentaires. D'après (Szabolcs, 1989), la superficie totale concernée par la salinisation naturelle est proche de mille millions d'hectares, soit 5% de la superficie du globe.

Celle-ci, loin de la mer, conduit à la stérilisation progressive de surfaces considérables.

L'eau de pluie, en traversant l'atmosphère, se charge de gaz carbonique. On obtient les réactions ci-après.



On voit qu'il y a production de proton H^+ c'est-à-dire d'acidité. Celle-ci est renforcée des protons fournis par les agents biologiques du sol qui respirent et rejettent donc du CO_2 . La matière organique intervient aussi. Au total, l'eau du sol est donc légèrement acide et agressive dans la durée. En conséquence, les minéraux des roches sont attaqués. C'est la réaction d'hydrolyse. Par exemple, le feldspath albite, très commun en milieu granitique, se transforme en argile au sein du sol et libère le sodium qu'il contient.



Quand il y a très peu d'eau, le sodium précipite sur place avec le CO_3^- avec lequel il coexistait en solution, ceci pour donner un sel, ici un carbonate de sodium. Ainsi observe-t-on des cristallisations de sel à la surface des terres, dans les zones désertiques, en absence de pluie pour les éliminer.

D'après (Legros, 2009), il y a 2,27% de sodium (en nombre d'atomes) dans la croûte terrestre. Donc la plupart des terres sont théoriquement susceptibles de se saler. La question est donc de comprendre pourquoi certains sols se salent effectivement et d'autres non.

2.3.4 Volcanique

Cette salinisation est liée à des manifestations généralement posthumes du volcanisme qui comprennent essentiellement les fumerolles contenant les anhydrites sulfureux et sulfhydrique

et l'acide chlorhydrique. Ces manifestations comprennent la présence de gypse et de soufre au sein des volcans. Elles comprennent également l'abondance des sources thermales à minéralisation chlorurée ou sulfatée (Servant J. , 1975).

2.3.5 Anthropique

Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique. Cette équilibre salinisation anthropique entraîne l'apparition du caractère halomorphe sur des sols. Elle modifie l'équilibre hydrologique du sol entre l'eau d'irrigation et/ou l'eau de pluie et l'eau utilisée par les cultures. Elle est également appelée salinisation secondaire et c'est la voie la plus importante et la plus rapide. Cette salinisation est due essentiellement à l'irrigation avec un eau de mauvaise qualité et/ou à un drainage insuffisant.

Tableau 2. Pourcentage des terres affectées par salinisation suite à l'irrigation (*Hans, 2003*)

Pays	% de terres atteintes	Pays	% de terres atteintes
Chine	15	Pakistan	26,20
Inde	16,60	Iran	30
USA	23	Egypte	33
Australie	8,80	Thaïlande	10
Afrique de sud	8,90	Argentine	33,70

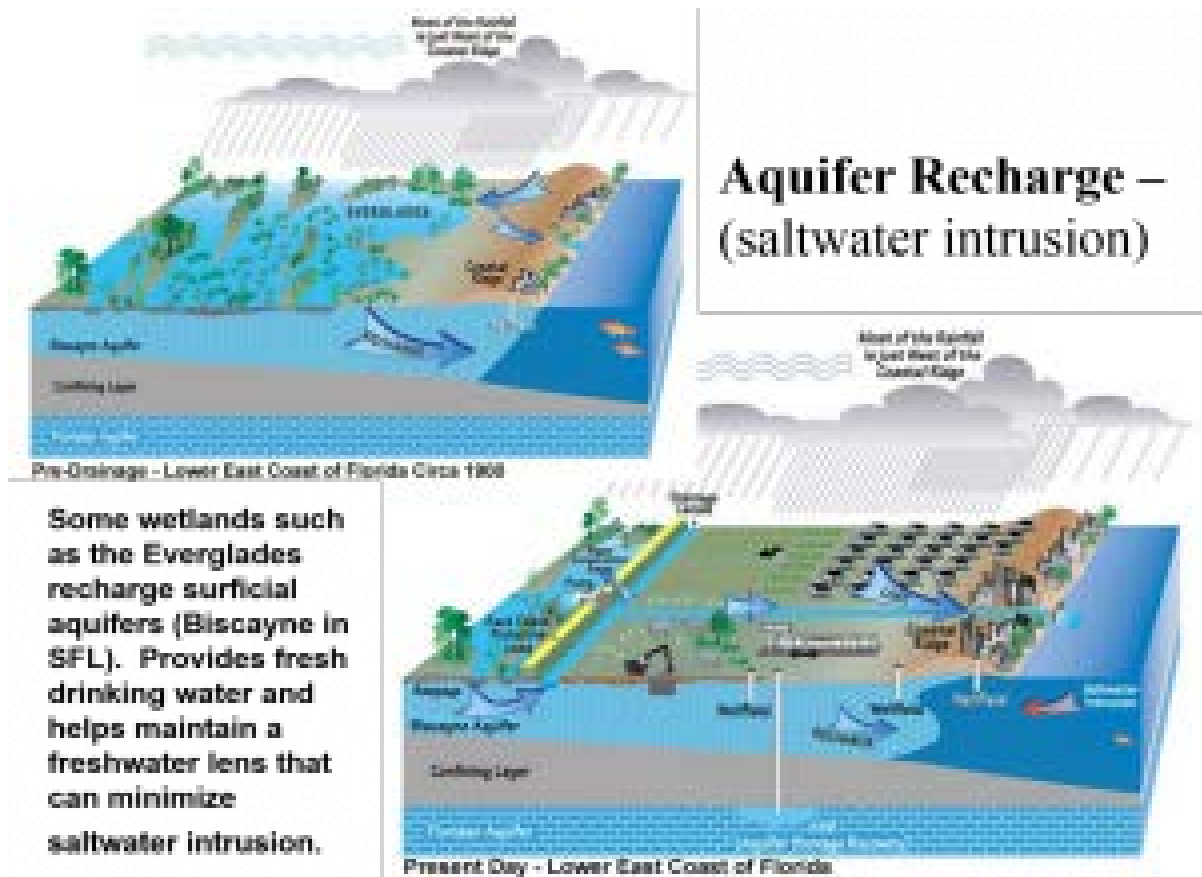


Figure 3. Salinisation des eaux et des sols par l'activité anthropiques

2.4 Facteurs influençant la salinité

Généralement les facteurs qui conduisent à une accumulation excessive de sels dans le sol peuvent être naturels ou anthropogènes.

Dans le quelle 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de salinisation “primaire”, due aux sels se formant lors de l’altération des roches ou à des apports naturels externes.

Facteurs environnementaux (naturels) provoquant une salinisation ou une sodification :

- événements géologiques, qui peuvent augmenter la concentration en sel dans les nappes souterraines et par conséquent dans les sols.
- facteurs naturels, qui peuvent diriger des nappes souterraines riches en sel vers la surface, près de la surface ou vers des couches au-dessus du niveau de la nappe phréatique ;
- infiltration des eaux souterraines dans des zones se trouvant en-dessous du niveau de la mer, à savoir des micro-dépressions avec peu de drainage ou sans drainage.

- eaux d'inondation provenant de zones qui comportent des substrats géologiques libérant de grandes quantités de sels.
- action du vent qui, dans les zones côtières, peut souffler des quantités modérées de sel vers les terres.

D'autre part, les 20% des terres salinisées, soit près de 15 Mha sur le continent Africain, ont une origine « anthropique ». On parle alors de salinisation « secondaire », induite par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation.

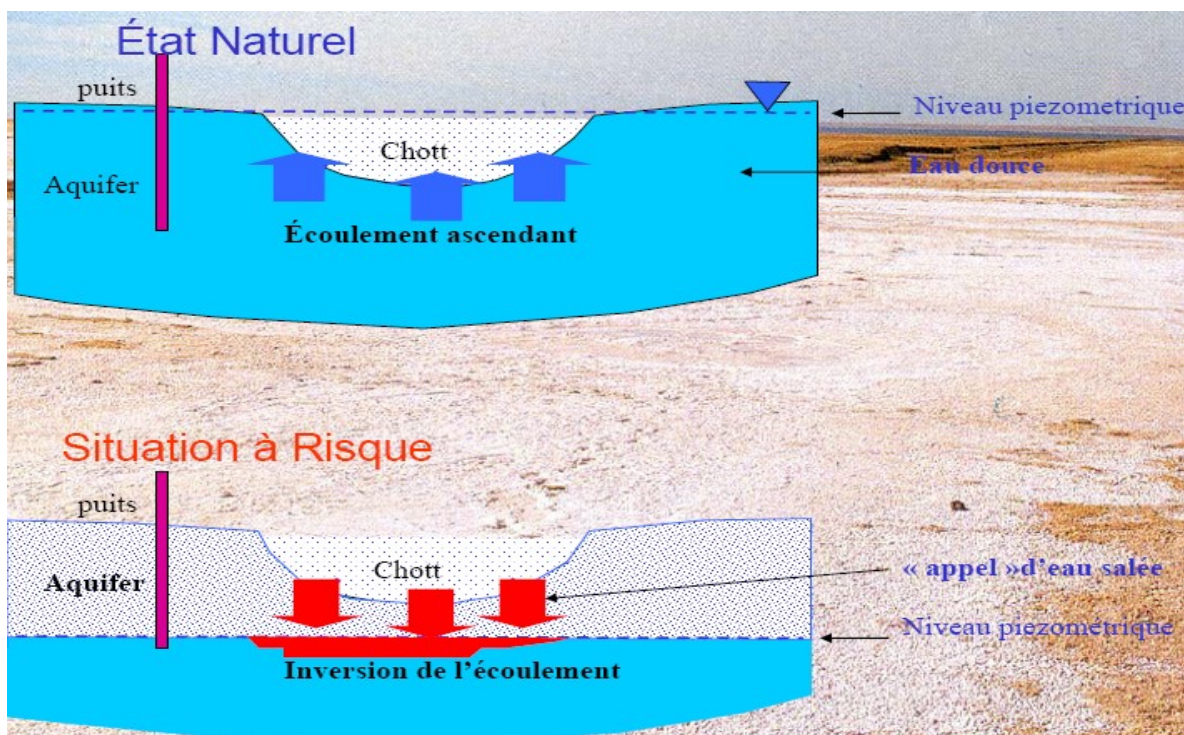


Figure 4. Processus de salinisation des sols et les facteurs influençant

Facteurs induits par l'homme pouvant entraîner une salinisation ou une sodification:

- irrigation avec des eaux riches en sels.
- élévation de la nappe phréatique due aux activités humaines (filtration de canaux et réservoirs non doublés, répartition irrégulière des eaux d'irrigation, mauvaises pratiques d'irrigation, drainage inadapté);
- utilisation d'engrais et autres apports, en particulier quand les terres soumises à une agriculture intensive ont une faible perméabilité et des possibilités limitées de lessivage.

- utilisation d'eaux usées riches en sels pour l'irrigation.
- rejet d'eaux usées riches en sel sur les sols.
- contamination des sols par des eaux riches en sel et des sous-produits de l'industrie.

Les facteurs induits par les humains dont l'influence est la plus forte sont l'utilisation des sols, les systèmes d'exploitation, la gestion des sols et la dégradation des sols. Les pratiques d'irrigation inadéquates (utilisation d'une eau d'irrigation riche en sel par exemple) et l'insuffisance de drainage provoquent une salinisation.

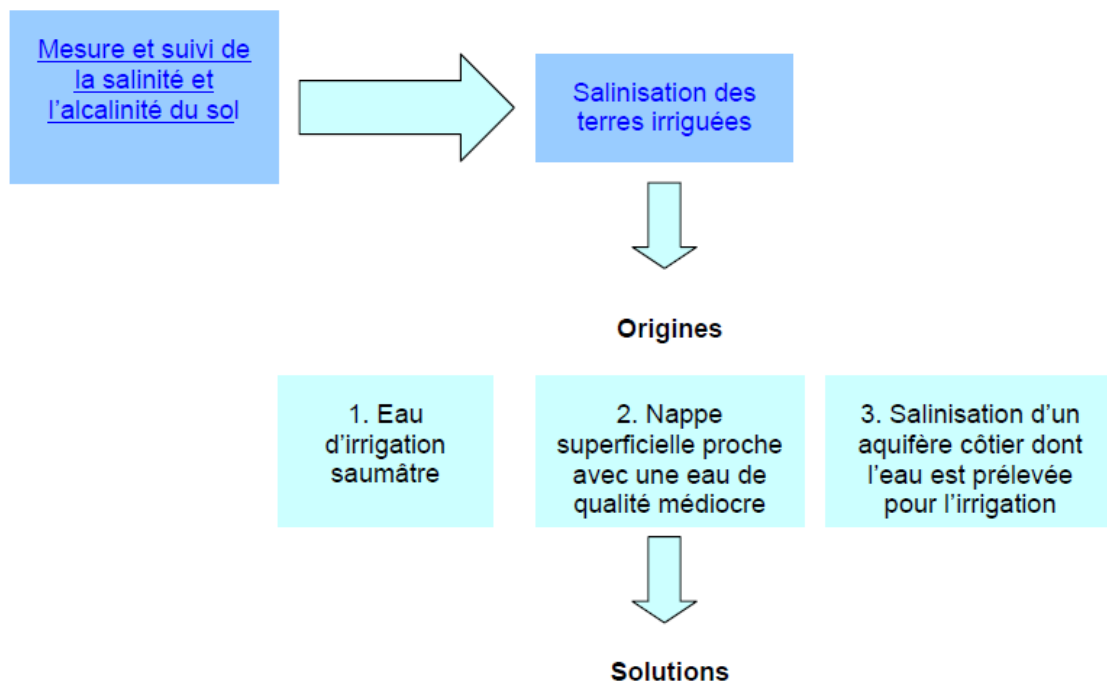


Figure 5. Schéma explicatif de processus de la salinisation des sols

2.5 Typologie des sols (salés)

Leur classification est délicate du fait des variations saisonnières ou sous l'action de l'homme, d'où le problème de divergences qui existe entre les différentes écoles : Russe, Américaine et Française (Aubert G. , 1975)

2.5.1 Sols salins :

Parmi les sols « salés » certains sont *riches en sels solubles* et leur *structure est conservée*. Ils peuvent avoir aussi une teneur en sodium échangeable assez basse pour que le SAR de leur extrait de pâte saturée soit <13 p. cent, le ESP < 16 p. cent, et la valeur Na échangeable/Capacité

totale d'échange du complexe soit < 17,5 p. cent ou 15 p. cent suivant les auteurs. (Richards, 1954; S.S.S.A, 1971).

Certains sols salins ne sont pas enrichis en sels de sodium mais en chlorure de Calcium ou de magnésium ou en un chlorure mixte de ces deux alcalino-terreux. Ces sols à « salant hygroscopique » ont été décrits depuis longtemps (1947) en Californie et plus récemment dans le sud de la France (Sevant, 1975) et sur les Hauts plateaux d'Algérie (Pouget , 1980). Ils existent en de nombreux autres pays où ils se sont formés dans un matériau Calco-magnésien.

Il est donc bien démontré qu'il existe des *sols salins*, non à alcali. Ils sont de plusieurs types mais ils se distinguent toujours très nettement des sols salés à alcali.

2.5.2 Sols à alcali

Pour nous, les sols à alcali sont caractérisés par la présence d'un horizon limoneux ou argileux présentant une structure dégradée devenue diffuse, sous l'influence des ions sodium ou potassium ou des ions sodium et magnésium sur une épaisseur suffisante - au moins 15 cm -, en surface ou en profondeur mais dans le profil de sol. Elle reste telle même en saison sèche, au moins à l'intérieur de grandes mottes de sols, prismes ou polyèdres grossiers.

Pour pallier le manque de précision d'une telle définition difficilement quantifiable, il a été proposé (Richards, 1954; S.S.S.A, 1971; FAO U. , 1975; U.S.D.A., 1979), de prendre une limite précise de Na/T (15 p. cent) ou de ESP = 15 p. cent, ce qui correspond à Na/T = 17,5 p. cent - ou du SAR de l'extrait de pâte saturée du sol (13 p. cent).

Certains de ces sols à alcali sont peu ou non salés, dans de nombreux cas : Relizane en Algérie, Vallée du Niger au Mali, Californie, etc., ils n'ont subi aucune migration d'argile et seule la structure diffuse de leur horizon à alcali les caractérise. Dans d'autres cas, plus fréquents, l'horizon enrichi en sodium échangeable et à pH souvent voisin de 9 est aussi un horizon d'accumulation d'argile a structure en colonnettes, en prismes grossiers ou massive et diffuse.

Il existe aussi des sols à alcali moyennement salés riches en chlorure et sulfate de sodium (conductivité de l'extrait de pâte saturée de 8 h 16 mmhos et Na/T de 15 k 18 ou 20 suivant les cas). Ils présentent généralement en surface une structure grumeleuse à polyédrique plus ou moins émoussée en pleine saison sèche, mais leur stabilité structurale est très faible. Dès qu'ils sont un peu humidifiés, malgré la présence des sels neutres, leur structure se dégrade et devient diffuse. Leur horizon à alcali, généralement superficiel, est alors très massif et leur perméabilité est très faible, surtout dès qu'ils sont humides.

2.5.3 Sols à carbonate de sodium

La présence de ce sel sodique, d'hydrolyse alcaline, imprime souvent aux sols qui le contiennent une morphologie particulière (salant noir) : pellicules humiques imprégnant les centimètres superficiels du sol, ou recouvrant les efflorescences de carbonate de sodium à sa surface (Cheverry, 1975), ainsi que certaines propriétés physiques telles que structure dégradée, diffuse, faible perméabilité, etc. et chimiques : pH élevé, dynamique spécifique des oligo-éléments, etc.

3 Dynamiques de l'eau du sol

La présence de l'eau dans le sol joue un rôle très important, on s'intéresse à l'eau libre qui peut circuler entre les grains. L'eau est un élément important du sol, empêche celui-ci ne se désintègre ne poussière et le sol est très important pour l'équilibre hydraulique, il assume diverses fonctions dans la circulation de l'eau.

3.1 Les composantes du volume de sol

En première analyse, le sol peut être représenté schématiquement comme constitué d'un volume de solides et d'un volume de vides. Le volume des solides est constitué des différents minéraux et des particules de matière organique et les vides occupent les espaces libres entre les particules (minéraux et matière organique). À son tour, le volume des vides est divisé en une phase liquide et gazeuse. La phase liquide est constituée principalement de l'eau et des éléments (sels, nitrates, etc.) en solution dans celle-ci. La phase gazeuse est constituée d'azote gazeux (N_2), d'oxygène (O_2), d'argon (Ar), de gaz carbonique (CO_2), de vapeur d'eau et d'autres gaz (CH_4 , H_2S , etc.).

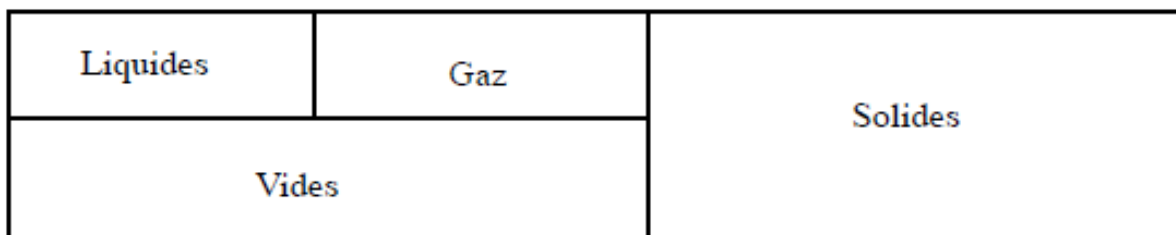


Figure 6. Représentation schématique d'un volume de sol.

La phase gazeuse est le complément de la phase liquide, les gaz remplaçant l'eau lorsque celle-ci se retire. Le volume des vides est aussi appelé porosité totale. Un bon sol agricole a une porosité d'environ 50%.

Les volumes de solides, de liquides et de gaz sont généralement exprimés en termes de m^3 ou cm^3 et parfois en termes de fractions ou pourcentages (m^3/m^3 ou cm^3/cm^3). Les relations entre les différents volumes sont représentées par les équations suivantes :

$$V_t = V_s + V_v = V_s + V_e + V_a$$

$$V_v = V_e + V_a$$

V_t = volume total du sol (cm^3)

V_s = volume des solides (cm^3)

V_v = volume des vides (cm^3)

V_e = volume d'eau ou de liquide (cm^3)

V_a = volume d'air ou de gaz (cm^3)

3.1.1 Masses réelles et apparentes

Les paramètres fondamentaux sur lesquels reposent la description générale d'un sol relèvent des relations de masse et de volume caractérisant sa constitution. Le premier est la **masse volumique réelle** " ρ_s " qui est le rapport de la masse des constituants solides sur leur volume :

$$\rho_s = M_s / V_s$$

ρ_s = masse volumique réelle du sol (g/cm^3)

M_s = masse des solides (g)

La masse volumique réelles des éléments constituant le sol est fonction du type de matériaux:

Minéraux argileux 2,00 - 2,65 g/cm^3

Quartz et feldspath (limon et sable) 2,50 -- 2,60 g/cm^3

Minéraux contenant des éléments métalliques 4,90 -- 5,30 g/cm^3

Fraction organique 1,30 -- 1,40 g/cm^3

Les valeurs moyennes des masses volumiques réelles sont généralement comprises entre les valeurs suivantes :

Sols minéraux 2,60 - 2,70 g/cm^3

Sols organiques 1,40 - 2,00 g/cm^3

Le second paramètre, la **masse volumique apparente sèche** " ρ_{as} " permet de tenir compte de l'importance relative du volume des solides et des vides du sol :

$$p_{as} = M_s/V_t = M_s/(V_s+V_v)$$

p_{as} = masse volumique apparente sèche du sol (g/cm³)

La masse volumique apparente sèche d'un sol est toujours inférieure à sa masse volumique réelle, puisque la masse solide est toujours rapportée au volume total apparent et non seulement au volume de solides. Les ordres de grandeur des masses volumiques apparentes sèches sont pour différents types de sols :

Sols sableux 1,40 - 1,70 g/cm³

Sols argileux 1,00 - 1,50 g/cm³

Sols tourbeux 0,30 - 1,00 g/cm³

La masse volumique réelle " p_e " de la phase liquide est définie comme le rapport de la masse du liquide sur son volume :

$$p_e = M_e/V_e$$

p_e = masse volumique du liquide (g/cm³)

M_e = masse de liquides (g)

Comme la phase liquide est constituée principalement de l'eau et des éléments (sels, nitrates, etc.) en solution dans celle-ci et que les sols présentent généralement de faibles concentrations et qu'ils sont soumis à de faibles variations de température, la masse volumique liquide est assimilée à celle de l'eau pure, soit 1,00 g/cm³.

3.1.2 Porosité

La porosité " p ", définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total du sol (aussi appelé le volume apparent), permet aussi de caractériser les espaces entre les particules de sol :

$$p = V_v/(V_v+V_s) = 1 - (p_{as}/p_s).$$

Dans les sols minéraux, la porosité varie entre 30 % et 60 %, alors que les tourbes peuvent présenter des porosités de près de 90 %.

Le volume relatif des vides peut aussi être exprimé par l'indice des vides " e " qui est peu utilisé en agronomie mais très utilisée en ingénierie :

$$e = V_v/V_s$$

e = indice des vides

Il existe une relation entre l'indice des vides et la porosité :

$$e = p / (1-p)$$

$$p = e / (e+1)$$

Le système poral, considéré comme un réseau de pores et de conduits de faibles dimensions communiquant entre eux, peut être décomposé en plusieurs classes de porosité. Les deux plus importantes sont :

3.1.2.1 Macroporosité :

La partie des pores dans laquelle se déroulent la majorité des transferts d'eau et d'air. Les phénomènes de mouvement de l'eau se font principalement sous l'action des forces de la gravité dans les macropores. Ce sont ces pores qui sont libérés de leur eau suite au drainage. L'espace des teneurs en eau entre la capacité au champ et la saturation provient des macropores.

3.1.2.2 Microporosité :

La partie des pores de faibles diamètres qui retiennent l'eau suite au drainage. Ils réagissent peu aux forces de la gravité mais sont le site des forces capillaires.

3.2 Les formes de l'eau dans le sol

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les grains (Fig. 7).

On distingue classiquement :

- L'eau de constitution qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les **argiles**) ;
- L'eau liée à la surface des grains, qui est solidaire des grains ;
- L'eau capillaire qui est retenue par les pores les plus fins du sol au-dessus du niveau de la nappe : la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée ;
- L'eau libre qui peut circuler dans les pores du sol sous l'effet des forces de pesanteur : le volume occupé par cette eau définit la notion de porosité efficace qui est plus petite que la porosité géométrique ;
- La glace qui se forme en fonction des conditions de température et qui mobilise en priorité l'eau libre. La formation de glace et surtout de lentilles de glace par ségrégation peut entraîner des désordres importants sur les ouvrages routiers essentiellement lorsque

le dégel se produit. Les sols susceptibles de donner lieu à la formation de lentilles de glace sont des sols contenant une part significative d'éléments fins.

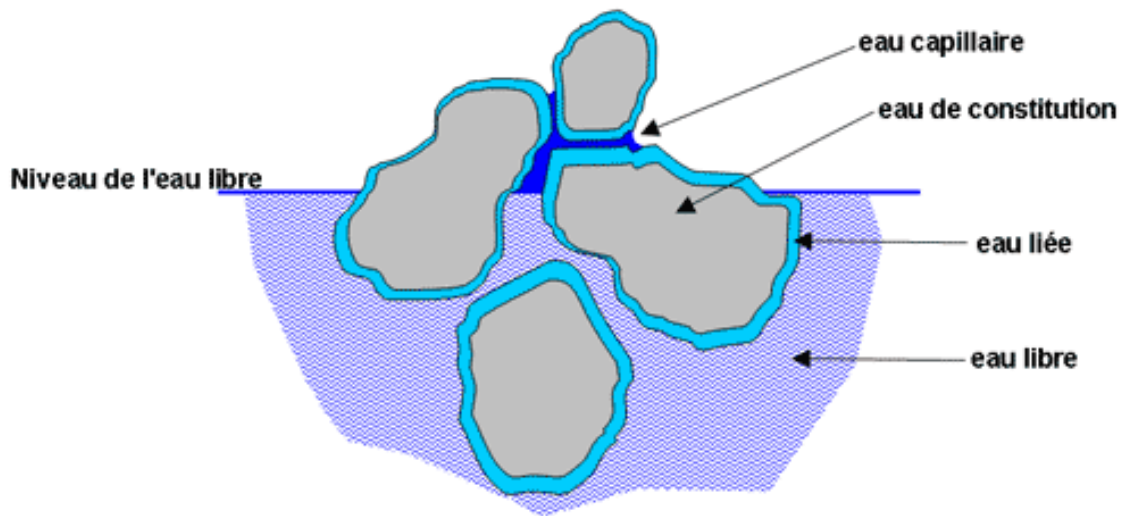


Figure 7. Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique

3.2.1 Teneur d'eau

Le premier problème que pose l'étude des relations entre le sol et l'eau consiste à exprimer les proportions de liquide présent dans un échantillon de terre. De ce point de vue trois références peuvent être utilisées :

- On peut exprimer l'humidité en g d'eau pour cent g de terre humide ;

$$H_{h100} = \frac{P_E}{P_E + P_t} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad H_h = \frac{H_{h100}}{100}$$

P_E étant le poids d'eau. P_t le poids de terre sèche de l'échantillon.

- L'humidité peut être définie par rapport au poids de la terre sèche. On écrit alors :

$$H_{s100} = \frac{P_E}{P_t} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad H_s = \frac{H_{s100}}{100}$$

- On peut enfin calculer l'humidité en considérant le volume occupé par l'eau dans un volume donné de terre.

$$H_v = H_s \cdot \Delta_a = H_s \Delta_s (1 - P)$$

Δ_a étant la densité apparente de la terre sèche.

Δ_s étant la densité absolue de la terre sèche.

P étant la porosité.

3.2.2 Mesure par perte de poids

C'est la méthode classique. Un échantillon de terre prélevé est porté à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant. La quantité d'eau P_E est donnée par la différence entre le poids de terre initial ($P_t + P_E$) et le poids P_t après dessiccation.

L'expérience montre que pour déterminer l'humidité moyenne d'une surface de terre homogène. Il faut effectuer de 10 à 20 prélèvements élémentaires pour obtenir par mélange un échantillon dont E soit mesuré à $\pm 5,5\%$ près.

3.3 Remuante capillaire

Les phénomènes de capillarité découlent de l'existence d'une tension superficielle des fluides qui se développe aux interfaces avec un autre matériau. Si l'on considère un tube de verre (Fig. 8) de faible section, les forces d'adhésion qui se développent entre la paroi du tube et l'eau entraînent une remontée de l'eau dans le tube et la formation d'un ménisque. La hauteur atteinte par l'eau sera inversement proportionnelle au diamètre du tube d :

$$h_c = \frac{4T}{p_w g d}$$

Où T est la tension capillaire, p_w la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur et d le diamètre du tube.

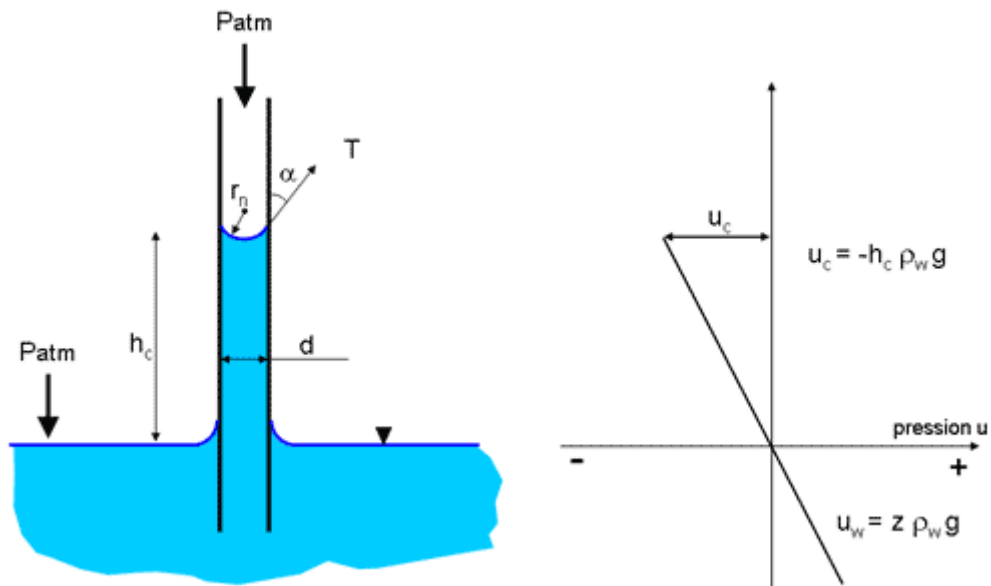


Figure 8. Tube capillaire et pressions correspondantes

Les sols contiennent des pores dont la dimension est proportionnelle au d_{10} (diamètre efficace), ces pores constituent un réseau et peuvent être assimilés à des tubes capillaires, toutefois, leur forme ne correspond pas évidemment à des tubes capillaires continus.

On propose (Terzaghi et Peck, 1967) de déterminer empiriquement la hauteur de remontée capillaire de la zone saturée au moyen de la formule suivante :

$$h_c = \frac{C}{e d_{10}}$$

Où h_c et d_{10} sont en mm, C est une constante comprise entre 10 et 50 mm^2 et e l'indice des vides, ce qui donne le tableau 4

Tableau 3. Types de sol et remontée capillaire (Terzaghi et Peck, 1967)

Type de sol	h_c (m)
Gravier	0,01 – 0,05
Sable	0,1 – 1
Silt	2 – 10
Argile	10 – 30

A titre de comparaison, le tableau 4 est proposé par Hansbo (1975), les valeurs sont pratiquement similaires.

Tableau 4. Hauteur de remontée capillaire et types de sol (Hansbo, 1975)

Sols	État lâche	État compact
Sable grossier	0,03 – 0,12 m	0,04 – 0,15 m
Sable moyen	0,12 – 0,50 m	0,35 – 1,10 m
Sable fin	0,3 – 2 m	0,4 – 3,5 m
Silt	1,5 – 10 m	2,5 – 12 m
Argile	> 10 m	> 10 m

3.4 Mouvement de l'eau dans le sol

L'eau se déplacera dans un sol si et seulement si, des forces génératrices de ce déplacement se développent. Si nous nous plaçons dans la zone saturée sous la nappe, les mouvements de l'eau peuvent être dues soit à la gravité, soit à un gradient hydraulique. Les mouvements liés à la gravité sont évidemment descendants, les autres dépendront des gradients appliqués et des propriétés locales des sols (seule l'eau libre est concernée).

Les paramètres qui entreront dans les mouvements de l'eau sont :

- D'une part une propriété intrinsèque du sol : la perméabilité ;
- D'autre part la charge hydraulique qui se traduira par un gradient.

C'est la combinaison de ces deux facteurs qu'il faudra toujours considérer.

3.5 Equation dynamique

Forme générale $J = -K \text{ grad } \Phi$

J : Densité de flux

K : coefficient de transfert

Φ : potentiel énergétique

Grad Φ : force de motrice

- **La loi de Darcy**

La **loi expérimentale de Darcy** (ou **loi de Darcy**) est une loi physique, qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux supposé isotrope à l'échelle de travail. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique du substrat et par le gradient de pression du fluide. Calculé par la formule suivante :

$$Q = -K \text{ grad } H$$

Q : débit permanent (m^3 / S)

K : Conductivité hydrolique

H : Charge hydrique

Ou est calculé par la méthodes

$$Q = K A (\Delta H / L)$$

- Q : le débit volumique (m^3/s) filtrant.
- K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.
- A : la surface de la section étudiée (m^2)
- $\Delta H/L$: Le gradient hydraulique ($i = \Delta H/L$), où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon.

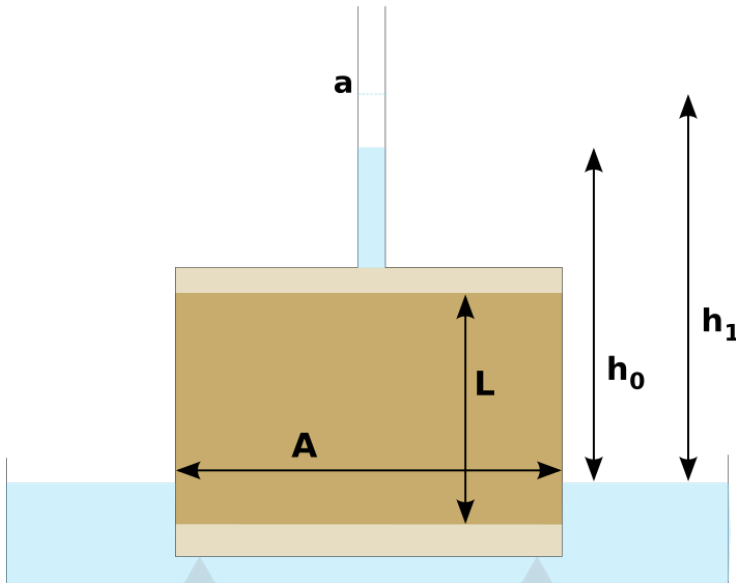


Figure 9. Montage expérimental correspondant aux expériences de Darcy

Tableau 5. Les valeurs de K_s pour calculé la perméabilité des sols

Nature du sol	K_s en m/S	K_s en m/J
Sols argileux de surface	10^{-7} à 10^{-6}	0,01 à 0,1
Sols limoneux de surface	10^{-6} à 10^{-5}	0,1 à 0,01
Sable fin	10^{-5} à 5.10^{-5}	1 à 5
Sable moyen	5.10^{-5} à $2,5. 10^{-4}$	5 à 20
Sable grossier	$2,5. 10^{-4}$ à 10^{-3}	20 à 100
Gravier	$\text{>} 10^{-3}$	$\text{>} 100$

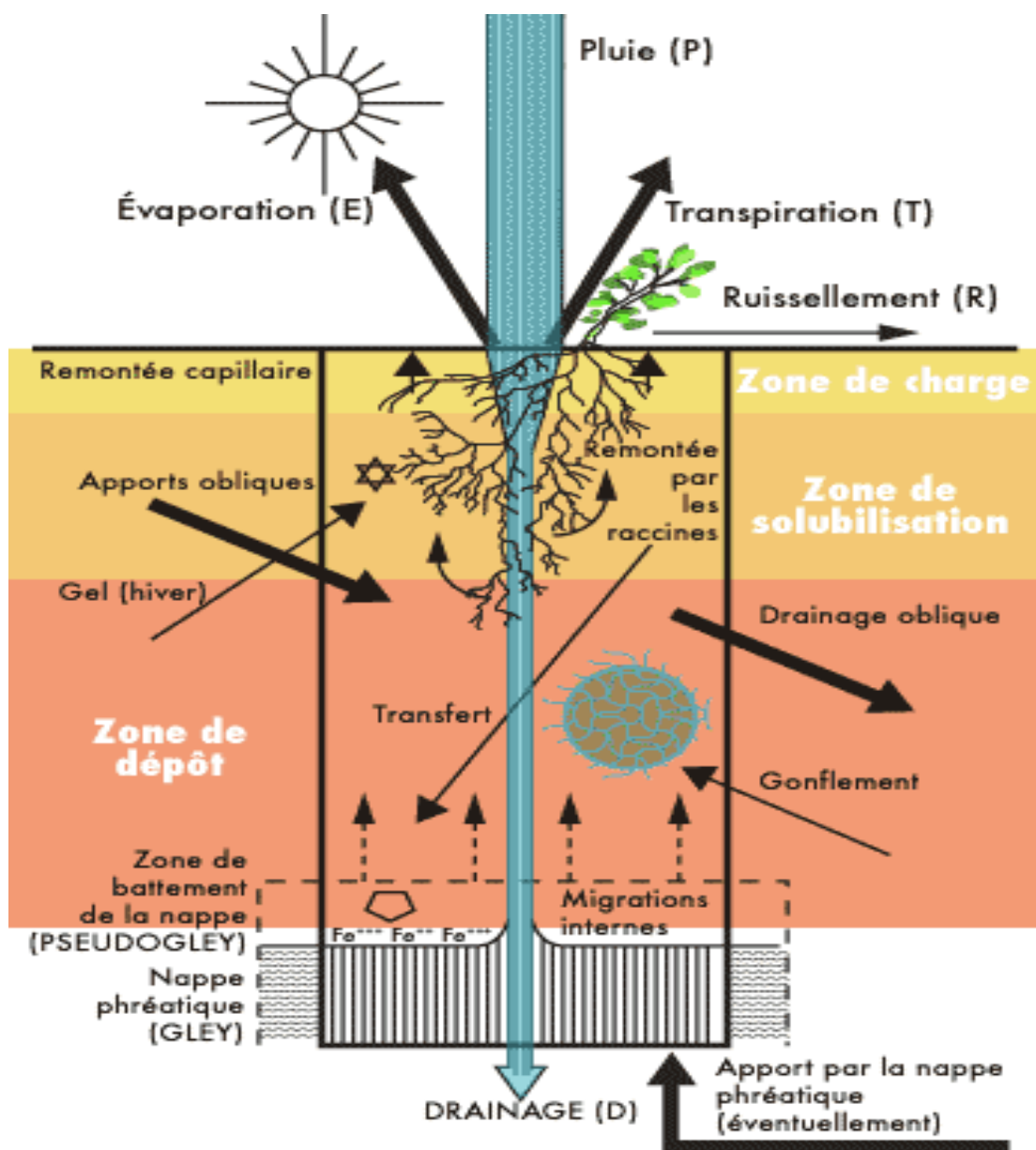


Figure 10. Schéma explicatif de bilan hydrique du sol

4 Les sols salsodiques

Dans les « sols salés » nous incluons tous les sols dont l'évolution est dominée par leur richesse en sels solubles ou par les ions en provenant et provoquant la dégradation de leur structure qui devient diffuse. Il est proposé de les dénommer « sols salsodiques » (Aubert G. , 1988).

On peut y distinguer des sols salins non alcalisés, à structure non dégradée, des sols à alcali peu ou moyennement salés et des sols très salés à alcali à structure lamellaire, boursouflée ou à pseudo-sable en surface. Ces trois catégories, très différentes les unes des autres, doivent rester distinctes.

Les sols à carbonates sodiques sont généralement salés à alcali. Certains sols salés hydromorphes sont riches en sulfures : sols thioniques.

Les sols salsodiques sont définis par la présence de deux horizons de référence essentiellement caractérisés (Loyer, 1988) :

- soit par la présence d'une certaine quantité de sels solubles dans la solution du sol (horizon salique).
- soit par la présence sur le complexe échangeable du sol d'une quantité de sodium relativement importante, par rapport aux autres cations (horizon sodique).

4.1 Horizon salique

D'après (Baize & Girard, 2009). L'horizon est d'au moins 15 à 20 **cm** d'épaisseur, apparaissant à moins de 125 cm de profondeur et enrichi en sels chlorures, sulfates ou carbonatés plus solubles que le gypse (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , $\text{Na}_2 \text{SO}_4$, NaHCO_3 , Na_2CO_3) ; le cation le plus fréquent étant le sodium.

- Enrichi en chlorures et en sulfates (sels de la série neutre), il est défini comme salique si pendant une grande partie de l'année, la conductivité de son extrait de pâte saturée atteint 8 dS/m à 25°C s'il est situé dans les 50 à 60 cm supérieurs du sol, et 16 dS/m s'il est situé plus profondément.

- Enrichi en carbonates de sodium (sels de la série alcaline), il est défini comme salique si à une période quelconque de l'année, la conductivité de son extrait de pâte saturée atteint 4 dS/m A 25°C.

4.2 Horizon sodique

Ces horizons caractérisent par une forte proportion de sodium échangeable. Ils sont affectés également par une structure dégradée et compacte, soit totalement continue, soit grossièrement polyédrique, prismatique ou en colonnes (Baize & Girard, 2009).

C'est un horizon d'au moins 10 cm d'épaisseur apparaissant à moins de 80 cm de profondeur, caractérisé soit par une structure totalement diffuse soit par une structure plus ou moins largement agrégée, massive, et toujours à porosité intra-agrégats très faible, non seulement en saison des pluies mais aussi en saison sèche. Cet horizon peut dans certains sols ayant subi une évolution plus accentuée en relation avec un pédoclimat plus humide, présenter une structure grossièrement polyédrique, prismatique ou en colonnes, tout en gardant une porosité intra-agrégats très faible.

4.3 Les sels

Les plus habituels dans ces sols sont les chlorures, sulfates, bicarbonates, carbonates, borates, nitrates, parfois fluorures de sodium. Dans quelques cas, ce sont des sels de potassium. Les sels de magnésium, sulfates en particulier peuvent s'y trouver. Enfin les chlorures de calcium ou de magnésium, ou mixtes de ces deux cations, donnent également naissance à des sols salés ; dans ce cas ils sont dits « à salant hygroscopique ». Ils sont parfois sols de mangroves des zones littorales des régions tropicales, ou sols de polders marins, sols d'oasis d'Afrique du Nord, etc... Accompagnés de sulfures de fer qui par oxydation acidifient les sols salés thioniques ou à sulfures acidifiants.

4.4 Dynamique saline des sols

L'étude de la dynamique saline s'attache à décrire, comprendre et prévoir les mouvements de solutés dans le sol et les mécanismes qui les régulent. Les flux hydriques et la diffusion ionique en phase liquide sont les principaux vecteurs de déplacement de sels dans et sur les sols. L'observation, la compréhension, la prédiction des flux d'eau et de solutés sont abordées selon différentes approches complémentaires. Pour en donner une vue générique, la plus exhaustive possible, un schéma général des processus identifiés dans les paragraphes précédents. Les pratiques agricoles de remédiations ou de prévention vis à vis de la salinité sont situées par rapport aux processus qui les fondent. Finalement l'intervention de processus spatiaux dans cette dynamique est rappelée.

Les variations de stocks salins sont soumises aux flux d'entrées/sorties en solutions comprenant : le ruissellement, les infiltrations, les remontées capillaires de la profondeur et le drainage. L'évaporation représente des flux de vapeurs d'eau, vecteurs indirects du déplacement des solutés, en effectuant le prélèvement des molécules d'eau à la surface du sol et en causant la concentration ionique, et à terme, de l'accumulation de sel sous forme solide. Ce schéma hydrologique du profil met en avant la nécessité, sur le long à terme, d'évacuer la somme des apports en sels issus de l'infiltration et des remontées capillaires par le drainage et le ruissellement superficiel, si l'accumulation saline veut être évitée. Les exemples d'applications mettant en jeu des simulations numériques sont principalement bâtis sur ce principe d'invariance des propriétés hydrodynamiques vis à vis de la salinité.

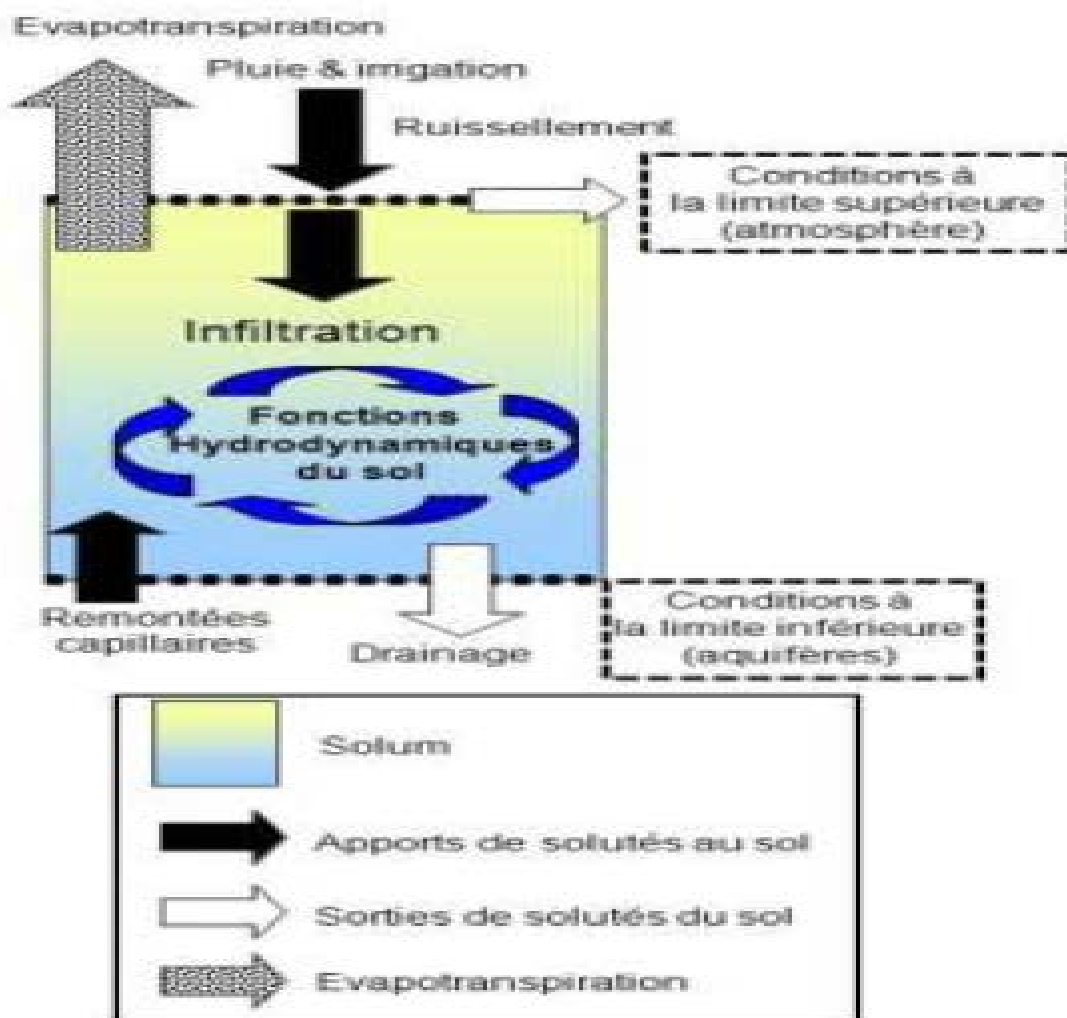


Figure 11. Les différents processus de salinisation du sol

4.5 Caractères des sols salsodiques

Les sols « Salic » chlorurés : Parmi ceux-ci, deux types peuvent être différenciés :

Les sols « Salic » chlorurés, acidifiés. D'origine marine stricte, mais influencés par l'acidité potentielle des sols de mangroves. Le pH est acide relativement.

Les sols « Salic » chlorure-sulfatés neutres. D'origine le plus souvent marine, mais parfois enrichis par du gypse sédimentaire redistribué par les eaux continentales. Le pH est proche de la neutralité. Les sulfates et chlorures sont en proportions variables et supérieurs aux bicarbonates et carbonates ; sodium, calcium et magnésium sont quantitativement variables. Expression des sels sous forme de NaCl, CaCl, et MgCl, associés à du gypse dans les profils. Salants blancs hygroscopiques à croûte saline, efflorescences ou structures poudreuses brunes superficielles. (Chotts, Sabkha, plaine alluviales)

Les sols « Salic » sulfatés. Selon deux milieux géochimiques, on peut distinguer :

Les sols « Salic » sulfatés neutres. D'origine continentale stricte, cette salinité est souvent induite par la nature d'eaux d'irrigation très chargées en sulfates et en sodium. Le pH est proche de la neutralité. $SO_4 \gg HCO_3 > Cl$ et $Na \gg Ca$ dans la solution du sol. L'expression des sels peut se faire en surface sous forme de salant blanc pulvérulent à Na_2SO_4 (thénardite) ou $Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$ (mirabilite) (Loyer J.-Y. , 1989) (Région lagunaire).

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

Les sols « Salit Bicarbonatés. Cette salinité est représentative des bassins endoréiques continentaux. Le pH est plus ou moins alcalin, toujours supérieur à 8,5. Deux faciès ont été reconnus :

Les sols « Salic » bicarbonate-sulfatés alcalins. Cette voie saline se manifeste après concentration des solutions en milieu aérobie favorisant la production de sulfates à partir des sulfures des vases originelles. L'acidité libérée par cette réaction d'oxydation est neutralisée par les carbonates de sodium et de calcium présents en larges excès dans ces milieux. Le pH des solutions de sol devient supérieur à 8,5. $HCO_3 > SO_4 \gg Cl$ et $Na > Ca$. Il peut y avoir précipitation de natron ($Na_2CO_3 \cdot 10 H_2O$) thermonatrite ($Na_2CO_3 \cdot H_2O$) et de thénardite

(Na_2SO_4) à la surface des sols, sous forme de salant blanc pulvérulent (Cheverry, 1975). (Lac du Tchad, hautes plaines mexicaines).

Les sols « Salit » carbonatés basiques. Cette voie alcaline se manifeste en milieu continental anaérobie riche en matière organique et en H_2S . La concentration des eaux sur ces milieux favorise la production de bicarbonates et carbonates sodiques et la forte élévation du pH qui en résulte ($\text{pH} > 10$), permet une dissolution de la matière organique : HCO_3 et $\text{CO}_3 \gg \text{SO}_4 \gg \text{Cl}$, et $\text{Na} \gg \text{Ca}$ (Cheverry, 1975).

4.6 Processus de salinisation

Il y a lieu de distinguer :

4.6.1 Salinisation primaire :

Résulte généralement de processus d'altération des roches. La migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des caractéristiques du milieu naturel et des précipitations. Dans les régions arides et semi-arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels solubles n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol. Dans les régions côtières l'intrusion marine et la submersion des terres provoquent la salinisation des eaux souterraines et celle des sols.

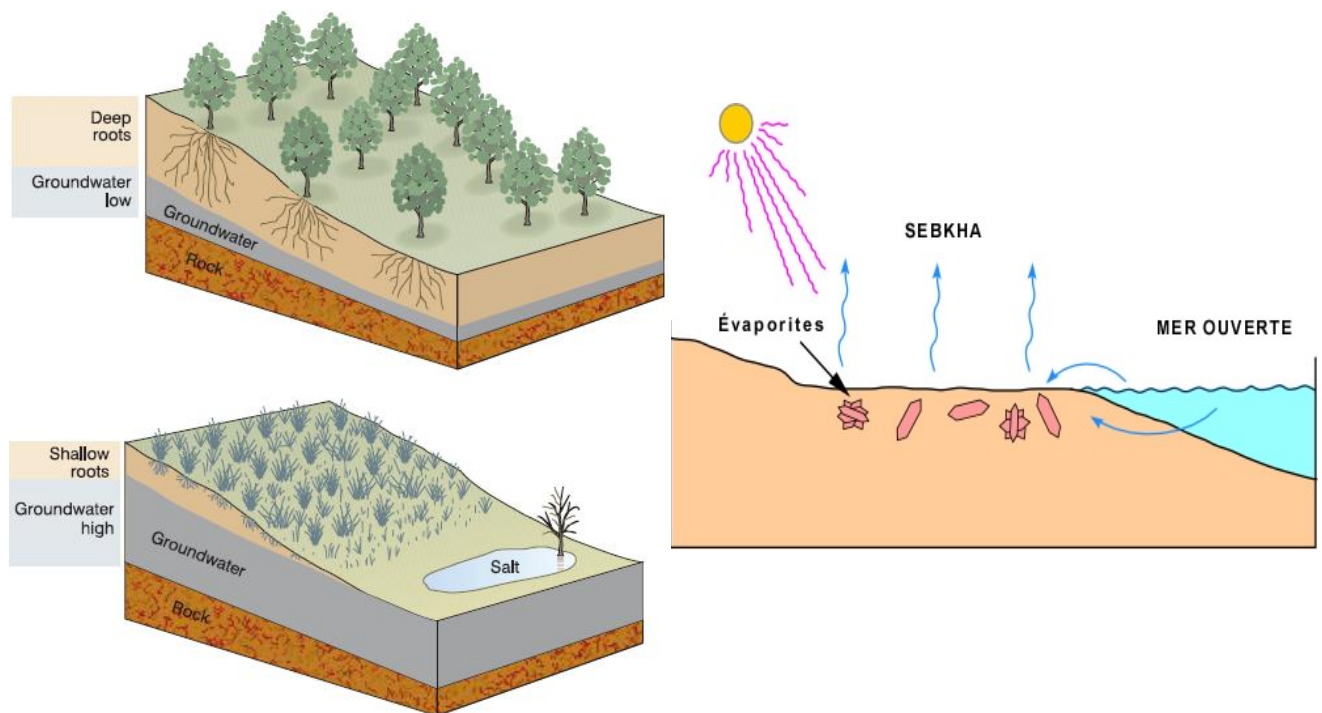


Figure 12. Schéma explicatif de la salinisation primaire

4.6.2 Salinisation secondaire :

Elle résulte de divers facteurs dont l'irrigation avec des eaux de mauvaise qualité, un lessivage insuffisant, un drainage inefficace, un taux important d'évaporation, remonter des eaux souterraines. Lorsque les sols reçoivent un excès de sels solubles, il y a l'échange de Na^+ et les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} fixée sur les minéraux argileux « Alcalisation ». Il faut une quantité considérable de Na^+ pour qu'il y ait adsorption par l'argile. Le Mg^{2+} et Ca^{2+} échangé précipitent par suite d'évaporation. Au-dessous de 15% de Na échangeable on parlera de sol alcalin. Il apparaîtra une dégradation des propriétés physique du sol.

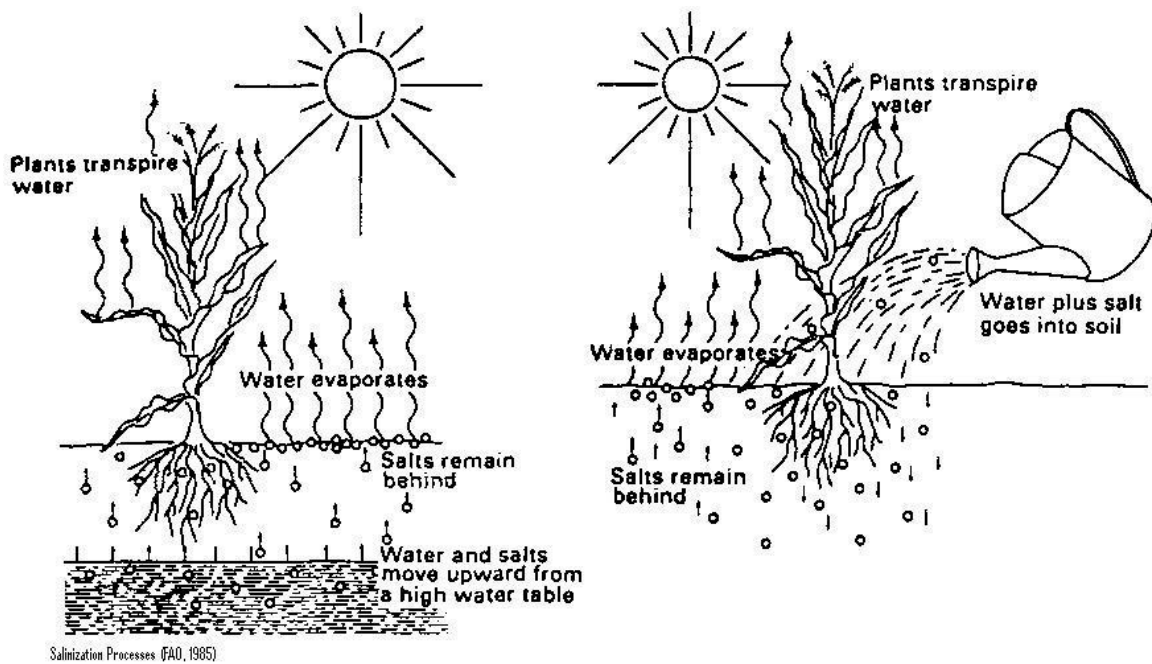


Figure 13. Schéma de processus de salinisation secondaire

4.7 Classification des sols salsodiques

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

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

- Des « sols salins à complexe calcique » caractérisés dans la solution du sol et dans le complexe adsorbant par une dominante du calcium et du magnésium sur le sodium et le potassium. C'est le cas de sols calcaires et gypseux dont la composition cationique de

la solution du sol est comprise entre ces limites : $1 < \text{Ca}+\text{Mg}/\text{Na}+\text{K} < 4$, et $\text{Ca}/\text{Mg} \geq 1$. La structure de ces sols reste stable même après dessalement. Une légère alcalinisation (augmentation de pH) se manifeste (sols Sodic).

- On peut y adjoindre « des sols salins à complexe magnésien » dont le comportement structural en l'absence de calcium, c'est-à-dire hors des milieux calcaires et gypseux, se rapproche des sols sodiques précédents. Dans la solution du sol, le magnésium associé aux bicarbonates et carbonates (très peu solubles) entraîne une réaction alcaline ; associé aux sulfates et surtout aux chlorures, sels beaucoup plus solubles, sa réaction est neutre. On a dans la solution du sol : $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Na}+\text{K} > 1$, avec $\text{Ca}/\text{Mg} < 1$ et $\text{Na}/\text{Mg} < 1$. Après dessalement, l'hydrolyse du complexe magnésien par des eaux douces provoque une forte alcalinisation (augmentation de pH), suivie d'une dégradation de structure possible (avec évolution vers les sols Sodic) : « Smolniza » des Balkans (Szablocs, 1989).

5 Effet des sels

L'accumulation des sels est une des principales menaces physiologiques qui pèsent sur les écosystèmes. Le sel perturbe le développement des végétaux en limitant leur assimilation des éléments nutritifs et en réduisant la qualité de l'eau à disposition pour les végétaux. Il affecte le métabolisme des organismes du sol et mène à une réduction importante de la fertilité du sol.

5.1 Les effets des sels sur les propriétés physiques du sol

L'excès de sels dans un sol modifie les propriétés physiques et chimiques. Cette altération des conditions édaphiques constitue un stress indirect pour la croissance des plantes (Gregory , 2005).

Plusieurs chercheurs tel que (Aubert G. , 1983; Sigala, Fies, & Guennelon, 1988), ont constatés que le sodium échangeable influe sur le taux de dispersion des argiles, donc la présence des sels transforme profondément l'évolution du sol, elle influence en particulier :

- * Les rapports sol- eau ;
- * Les propriétés physiques du sol, structure, porosité, perméabilité donc circulation des solutions ;
- * L'état physique de certains éléments « en solution, pseudo-solution ou dispersion » et par conséquent les possibilités de leurs migrations.
- * Stabilité structurale : La stabilité d'un sol dépend des cations mis en jeu pour la saturation du complexe et le taux d'agrégats stables est décroissant suivant les cations fixés sur le complexe absorbant $Ca^{2+} < Mg^{2+} < K^+ < Na^+$. La stabilité structurale décroît dans les sols dès que, le taux de sodium échangeable atteint 12 à 15%. Le Na^+ par son pouvoir gonflant et dispersant d'argiles réduit la macro porosité.
- * Effet sur la perméabilité : La réduction de la perméabilité des sols salés est une conséquence directe de la dispersion des colloïdes par le sodium échangeable. Le sodium réduit la percolation alors que le K^+ l'augmente. Par contre les sols saturés par le Ca^{2+} ont une meilleure perméabilité que ceux saturés par le Na^+ et K^+ .

* Effet sur rétention en eau : Possédant des éléments hygroscopiques, les sols salés peuvent rester humides même en saison sèche, mais selon (Halitim A. , 1973), en raison du potentiel osmotique de la solution du sol, cette réserve hydrique n'est pas toujours disponible.

5.2 Effet sur la croissance des végétaux

Les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets que le sel provoque chez les plantes :

- Le stress hydrique : une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau. Cela nécessite un ajustement osmotique.
- Le stress ionique : en dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique.
- Le stress nutritionnel : des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale. En particulier, vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires, le Sodium entre en compétition avec le Potassium et le Calcium, les chlorures avec le nitrate, le phosphate et le sulfate.

La salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité. Durant le début et le développement du stress salin à l'intérieur de la plante, tous les processus majeurs tels que : la photosynthèse, la synthèse des protéines, le métabolisme énergétiques... sont affectés. La première réponse est la réduction de la vitesse d'extension de la surface foliaire, suivi par l'arrêt de l'extension avec l'intensification du stress (Parida & Das, 2005), donc la diminution de la biomasse sèche et fraîche des feuilles, tiges et racines (Chartzoulakis & Klapaki, 2000).

Le taux de la chlorophylle et des caroténoïdes des feuilles diminue en général sous les conditions de stress salin. Les feuilles les plus âgées commencent à développer une chlorose et finissent par tomber pendant une période prolongée de stress salin (Agastian, Kingsley, & Vivekanandan , 2000).

Une forte salinité exerce également une action d'inhibition de l'activité des microorganismes dans le sol, ce qui ralentit l'évolution et la dégradation de la matière organique (Gallili, 1980).

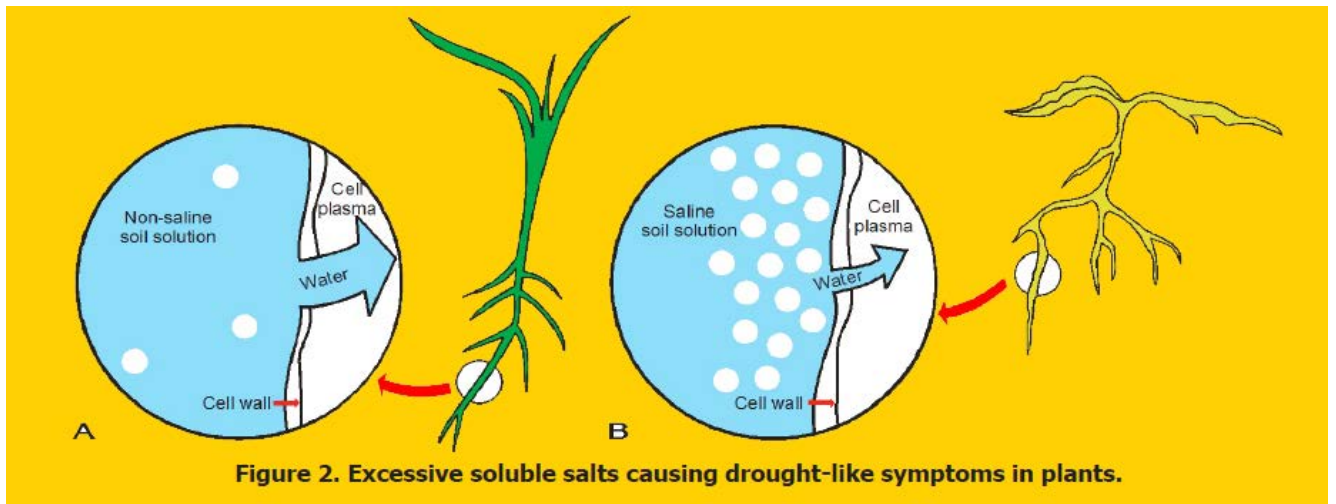


Figure 14. Effet de l'excès des sels solubles sur les plantes

5.3 Risque d'alcalinisation des sols SAR.

Le degré d'alcalinisation d'un horizon donné en fonction de la composition ionique de la solution du sol à ce niveau. Déterminé sur un extrait aqueux à saturation. Il est donc concevable d'exprimer le degré d'alcalinisation du sol en fonction des valeurs du SAR des solutions du sol. Différentes relations ont été proposées localement, à partir de l'étude de périmètres irrigués. Deux seront citées :

US Salinity Laboratory, 1954 ; relation valable pour $\text{Na/T} < 50 \%$.

$$\text{Na/T sol} = \frac{100(-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})}{1 + (-0,0126 + 0,01475)}$$

Tunisie, (Cruesl, 1970).

$$\text{Na/T } \% \text{ sol} = 0,988 \text{ SAR} - 0,61$$

Ce paramètre quantifie le rapport du sodium au calcium et au magnésium en termes de capacité du sodium à dominer le complexe d'échange du sol. Plus la SAR est faible, moins l'eau risque de provoquer une dégradation structurelle des sols sensibles. Le tableau 1 indique les niveaux auxquels le SAR indique un risque pour la structure du sol. La susceptibilité des différents types de sol à la dégradation est comme suite quantifiée dans le tableau.

Tableau 6. La limite de SAR basons sur le type du sol

Sols	Pas de risque	Risque Léger à Modérer	Risque grave
2:1 Argile	<6	6-9	>9
1:1 Argile	<16	16-24	>24
Sable, CE >1.5 dS/m	<16	16-24	>24
Sable, CE <1.5 dS/m	<6	6-9	>9

Les argiles 2:1 telles que la montmorillonite, l'illite et la smectite sont les minéraux argileux communs trouvés dans les terres noires et les sols salsodiques jaunes.

Les argiles 1:1 telles que la kaolinite sont couramment trouvées dans les terres autobronzantes rouge-brun (krasnozems). Le SAR à laquelle une argile 2:1 est à risque est plus faible que pour une argile 1:1, car les liaisons contenant les plaquettes d'argile 2:1 ensemble sont plus instables dans l'eau que celles d'un minéral argileux 1:1.

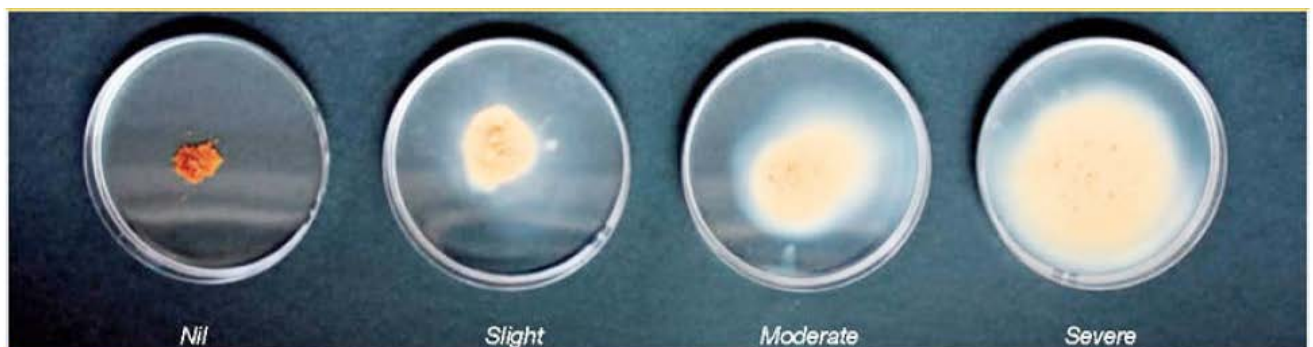


Figure 15. Dégradation des sols avec l'augmentation du taux de la salinité

6 Mise en valeur des sols salsodique

En général, la mise en valeur implique l'évacuation de l'excédent des sels solubles et du sodium échangeable ; dans certains types de sol, il faut souvent améliorer en outre, les propriétés physiques (Massoumi, 1968).

Les sols salsodiques caractérisent par trois types de problème : la difficulté d'absorption de l'eau qui est liée à la pression osmotique des solutions riches en sels dissouts, la dégradation des propriétés physiques du sol due à la fixation du sodium sur le complexe adsorbant et la toxicité des sels. La mise en valeur des sols salsodiques est délicate, les méthodes diffèrent selon le type de salure identifié (salinité ou alcalinité) ou les deux au même temps. Un bon diagnostic s'avère indispensable avant toute intervention (Cherbuy, 1991). L'utilisation et la récupération des sols salés constituent un travail d'autant plus long et délicat quand ces terrains sont situés en zones arides (Nahai, 1975).

6.1 Les méthodes de la réhabilitation

Dans le cadre de la réhabilitation des sols salsodiques, plusieurs méthodes existent. C'est en fonction du type de sol (salin, à alcali ou sulfato-acide) qu'elles sont choisies. L'objectif à viser est de ramener la salinité au seuil toléré par les cultures, de conserver le sol, ainsi d'amélioration de la composition chimique du complexe adsorbant en éliminant l'excès du sodium échangeable. Le choix de type d'amendement est important selon que le sol est calcaire ou non et aussi la détermination de la dose de lessivage efficace, laquelle est fonction des conditions pédoclimatiques et des exigences culturales.

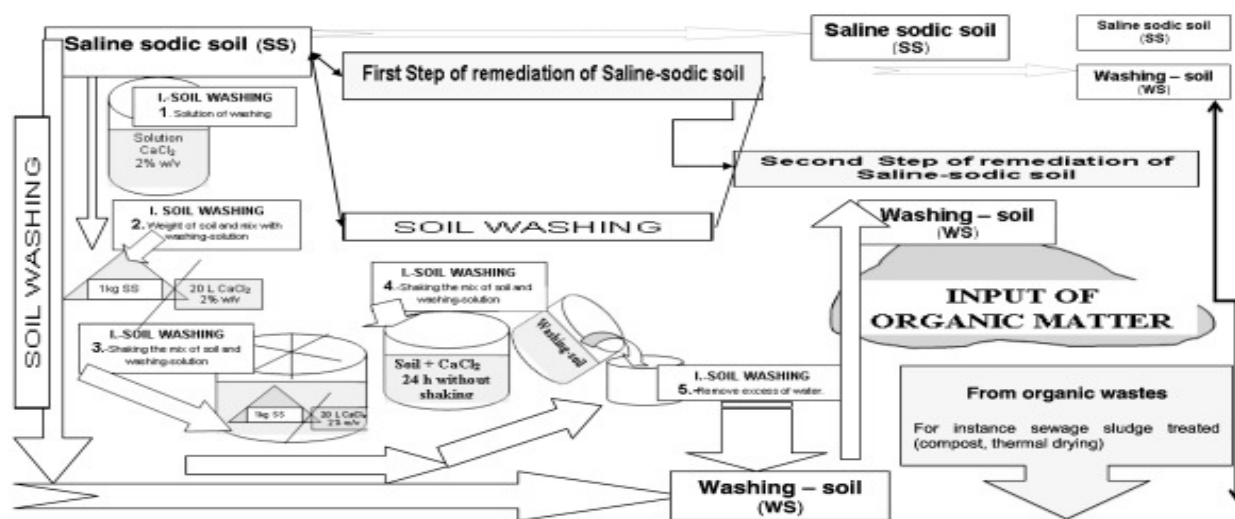


Figure 16. Méthodes de récupération des sols salins

6.2 Isolation de la zone salée de la source de contamination

Après avoir déterminé l'origine de la salinité, donc la première étape consiste à la mise en place d'un réseau de drainage efficace ou de récupérer l'ancien système de drainage afin de maintenir la nappe en dessous de la profondeur critique et surveiller son niveau en périodes d'irrigation, donc est recommander de conduire un aménagement agricole de terrain avant de commencer la réhabilitation.

Pour l'élaboration d'un plan d'amélioration des sols salés devrait être confiée à une personne compétente ; le plan devrait normalement :

- Evaluer le degré actuel de salinisation des sols dans la région ; par la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturé et la perméabilité des sols.
- Définir les différents types de salinisation des sols et leurs causes
- Fournir une carte où sont indiquées toutes les zones de salinisation, ainsi les effets de rapport aux plans d'eau, et les effets de la salinisation sur les plans d'eau et les terres avoisinantes.
- Décrire la relation entre les types de sol et la salinité.
- Décrire et définir les solutions recommandées pour lutter contre la salinisation des sols
- Fournir une analyse des coûts des diverses mesures de correction et de prévention
- Décrire les méthodes de cultures, semis direct ou le travail réduit du sol, les solutions de cultures.

6.3 Evacuation des sels sodiques et du Na échangeable

Il est essentiel d'appliquer une quantité suffisante d'eau aux sols salins et de la laisser s'infiltrer dans le sol dans le but de lessiver les sels en excès. Le maintien d'un équilibre favorable de sels dans le sol nécessite ~es méthodes d'irrigation appropriées et efficaces.

Les sols salins à complexe sodique sont caractérisés par des taux de sodium échangeable supérieur à 15 % dont l'effet est déjà cité. Pour éliminer l'excès du sodium de la solution, il suffit d'irriguer avec des doses de lessivage calculées. Par contre, pour éliminer le sodium fixé sur le complexe adsorbant du sol, deux étapes sont à réaliser.

6.4 Amendement du sol

Il existe divers types d'amendements, les principaux sont : gypse, phosphogypse, plâtre, sulfate de fer, soufre, chrome de calcium, la chaux et le nitrate de chaux. Ces divers types d'amendement sont tous pour objet de déplacer le sodium échangeable par le calcium (Gupta & Abros, 1990). L'apport d'amendements chimiques à base de calcium pour le déplacement de sodium échangeable ou bien par un apport d'une eau d'irrigation riche en cations bivalents sont deux stratégies de remédiation des sols salés (Tejada, Garcia, Gonsalez, & Hernandez, 2006). Ces amendements chimiques sont des matières d'approvisionnement des sols en cations bivalents (généralement Ca^{+2}) et aussi pour le déplacement du Na échangeable, donc leur désodisation. Par ailleurs, l'utilisation simultanée de deux amendements (minéral et organique) a plus d'impact sur les propriétés physiques et chimiques des sols salés où ils provoquent un dessalement rapide (Halitim A. , 1973). Les sols sodiques réclament l'utilisation des amendements calciques pour diminuer le taux de saturation en sodium des sols agricoles (Dommergues & Mangenot, 1970).

6.5 Le lessivage

Les apports d'eau de lessivage doivent être suffisamment importants pour lessiver les sels solubles et les entraîner en profondeur. Généralement deux méthodes sont utilisées :

Le lessivage permanent ; Le lessivage intermittent.

Dans le cas du lessivage permanent, l'eau est épandue sur le sol est maintenue à une hauteur de 10 cm environ par des apports fréquents. Cette méthode est préconisée lorsqu' il existe une bonne perméabilité du sol, plan d'eau élevé (saumâtre) et un taux d'évaporation important.

Dans le cas du lessivage intermittent, l'épandage d'une quantité d'eau suffisante pour dissoudre les sels solubles, suivi d'un apport pour les lessiver. Cette opération est répétée à intervalles réguliers. Cette méthode est préconisée dans les conditions suivantes : sol peu perméable, nappe phréatique profonde (eau non saumâtre ou peu), périodes où l'évapotranspiration est faible.

(Durand J. , 1958), note que, dans les sols lourds le dessalement n'est efficace que si l'argile est débarrassée par l'ion Na^+ ou empêché par des concentrations suffisantes de Ca^{2+} fournies par des amendements à base de gypse. **Durand** a une vue plus optimiste de la question de la nappe phréatique en Algérie. Il dit que le lessivage par une épaisseur de 10cm d'eau fait passer la salure initiale du sol de 2% à moins de 1% et que l'existence d'un plan d'eau à 1,70 m de

profondeur n'empêche pas la culture, étant donné d'un seul lessivage maintient la salure du sol à un niveau suffisamment bas pour une année entière.

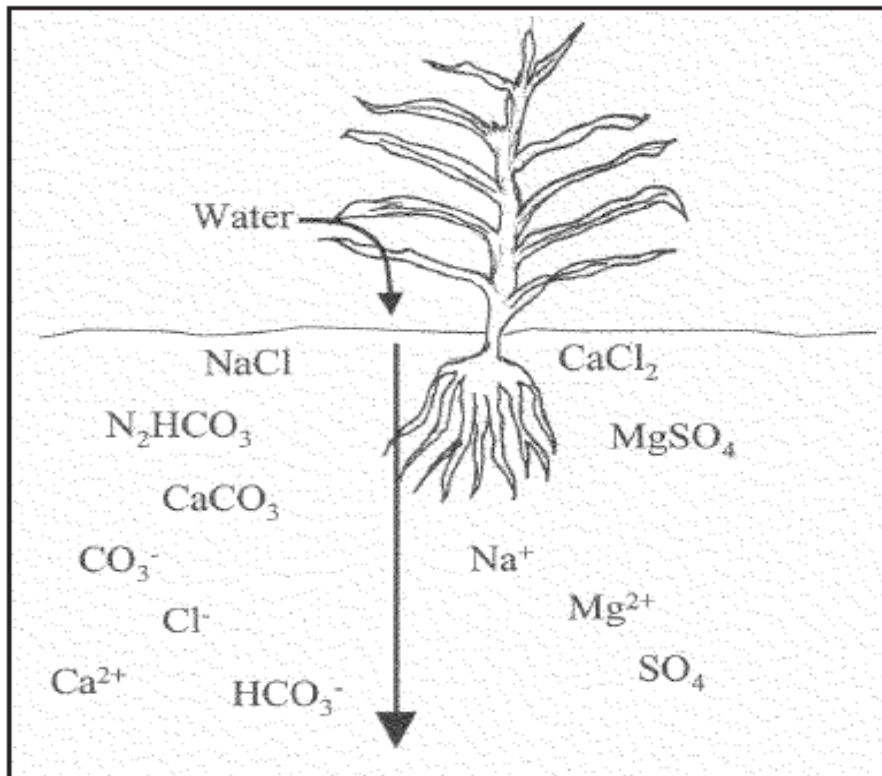


Figure 17. La lixiviation consiste à ajouter suffisamment d'eau au sol pour dissoudre les sels et les évacuer de la zone racinaire.

6.6 Traitement Chimique

6.6.1 Le phosphogypse et son utilisation

Le phosphogypse contribue à la mise en valeur des sols salés en vue d'une meilleure productivité. Il peut être apporté à un sol salé ou solonchaks caractérisé par une CE > 4 dS/m et un ESP > 15 % et un pH < 8,5, à un sol salé à alcali, caractérisé par une CE > 4 dS/m, un ESP > 15 % et un pH > 8,5 et aussi à un sol à alcali, caractérisé par une CE < 4 dS/m, un ESP > 15 % et un pH variant entre 8,5 et 10 (Zouggari, Djallem, & Aghiri, 1987).

Le phosphogypse, lequel contient une proportion élevée en CaSO₄, 2H₂O, est un amendement efficace et largement utilisé dans les sols salsodiques (Dominguez, Del Campillo, & Delgado, 2001). Son utilisation dans la mise en valeur des sols salés en Inde et au Etats-Unis d'Amérique a donné des résultats très encourageants. Il a aussi l'effet d'augmenter les teneurs en phosphore assimilable pour les cultures et de réduire sa résorption dans les sols (Delgado, Madri, Kasem, & Del Campillo, 2002). Son utilisation dans la mise en valeur des sols salés du Bas Chélif, a montré des effets importants sur le déplacement du sodium échangeable par le calcium

(Benamar, 1991). Pour le cas des sols de In Salah, le type d'amendement retenu en tenant compte d'absence d'une source de calcaire dans la région sont les sels solubles de calcium et plus précisément le gypse ou le phosphogypse dont l'effet est prouvé par beaucoup de travaux antérieurs (Summer, 1996).

6.6.2 Traitement par le gypse

La plupart des sols sodiques ont besoin d'amendements chimiques pour retrouver leur productivité. Le gypse et le soufre sont les plus communs. Comme la plupart des amendements sont coûteux, il est toujours bon de faire analyser le sol pour déterminer le type et la quantité nécessaires. Il n'est pas toujours indispensable d'apporter des amendements pour améliorer des sols sodiques. Certains sols sodiques, par exemple, contiennent du sulfate de calcium (gypse) et, lorsqu'ils sont lessivés. L'eau dissout le gypse et libère le calcium. Ce calcium dissous remplace le sodium adsorbé. Les sels de sodium formé par réaction peuvent être enlevés par lessivage. Dans les sols calcaires, le risque est faible car le calcium se fixe sur le complexe absorbant. On rappelle ici que les divalents, en particulier Ca^{2+} , sont absorbés préférentiellement aux monovalents, en particulier Na^+ . C'est très important. En effet, la solubilité naturelle de CaCO_3 dans une eau, même très salée, suffit pour que le complexe absorbant soit saturé à 50 % par du Ca^{2+} . La proportion monte à 80% si l'eau n'est que faiblement minéralisée. On peut utiliser H_2SO_4 qui acidifie le milieu ce qui favorise la dissolution des carbonates et fournit au milieu des ions Ca^{2+} . Mais c'est difficile, et la rentabilité n'est pas démontrée (Legros J. , 2007).

6.7 Traitement Organique

L'efficacité de l'ajout de deux déchets organiques (compost broyé de coton, CGCC et fumier de volaille, PM) à un sol salin dans des conditions de terres sèches a été étudiée par (Tejada, Garcia, Gonzalez, & Hernandez, 2006) sur une période de 5 ans dans une région semi-aride de l'Espagne. Les déchets organiques ont été appliqués à raison de 5 et 10 t de matière organique par hectare. Un an après le début du test, une végétation spontanée est apparue dans les parcelles traitées, en particulier celle recevant une dose élevée de PM. Après 5 ans, la couverture végétale dans cette parcelle traitée était d'environ 80% (comparé aux 8% du sol témoin). L'effet sur les propriétés physiques et chimiques du sol, la biomasse microbienne du sol et six activités enzymatiques du sol (activités de déshydrogénase, d'uréase, de protéase, de β -glucosidase, d'arylsulfatase et de phosphatase) ont été vérifiés. Les deux déchets organiques ajoutés ont eu un effet positif sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, bien qu'à la fin de

la période expérimentale, les propriétés physiques du sol, telles que la densité apparente, aient augmenté de façon plus significative dans les sols amendés (23%) et le pourcentage de sodium échangeable (ESP) a diminué plus significativement dans les sols amendés par le CGCC (50%) par rapport au sol non amendé. Les hydrates de carbone hydrosolubles et les propriétés biochimiques du sol étaient plus élevés dans les sols amendés aux PM que dans les sols amendés par les CGCC (70% pour les hydrates de carbone hydrosolubles et 34, 18, 37, 39, 40 et 30% pour l'uréase, les protéases, activités β -glucosidase, phosphatase, arylsulfatase et déshydrogénase, respectivement). Après 5 ans, le pourcentage de couverture végétale était > 50% dans toutes les parcelles traitées tandis que dans le sol témoin est de 8% seulement.

Table des Figures

Figure 1. La répartition des sols salins dans le Nord Algérienne.....	5
Figure 2. Schéma de salinisation des eaux souterraines par un intrusion marine	6
Figure 3. Salinisation des eaux et des sols par l'activité anthropiques	9
Figure 4. Processus de salinisation des sols et les facteurs influençant.....	10
Figure 5. Schéma explicatif de processus de la salinisation des sols	11
Figure 6. Représentation schématique d'un volume de sol.	13
Figure 7. Les formes de l'eau dans le sol. Une vue schématique.....	17
Figure 8. Tube capillaire et pressions correspondantes.....	19
Figure 9. Montage expérimental correspondant aux expériences de Darcy	22
Figure 10. Schéma explicatif de bilan hydrique du sol.....	23
Figure 11. Les différents processus de salinisation du sol	25
Figure 12. Schéma explicatif de la salinisation primaire	27
Figure 13. Schéma de processus de salinisation secondaire	28
Figure 14. Effet de l'excès des sels solubles sur les plantes.....	32
Figure 15. Dégradation des sols avec l'augmentation du taux de la salinité	33
Figure 16. Méthodes de récupération des sols salins	34
Figure 17. La lixiviation consiste à ajouter suffisamment d'eau au sol pour dissoudre les sels et les évacuer de la zone racinaire.....	37

Liste des Tableaux

Tableau 1 Echelle de classement de la salinité (U.S.S.L.S., 1954).....	3
Tableau 2. Pourcentage des terres affectées par salinisation suite à l'irrigation (Hans, 2003)8	
Tableau 3. Types de sol et remontée capillaire (Terzaghi et Peck, 1967)	19
Tableau 4. Hauteur de remontée capillaire et types de sol (Hansbo, 1975).....	20
Tableau 5. Les valeurs de KS pour calculé la perméabilité des sols	22
Tableau 6. La limite de SAR basons sur le type du sol	33

7 Références

- Agastian, P., Kingsley, S., & Vivekanandan, M. (2000). Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica*, 38, 287–290.
- Aubert, G. (1975). Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Ann. INA El-Harrach*, 6(1), 181-196.
- Aubert, G. (1983). Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. *Cahier ORSTOM*, 20(1), 73-78.
- Aubert, G. (1988). Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodique. *Communication présentée à la XIIe Conférence de l'Association internationale de science de la sol*. 10, pp. 73-78. New Delhi: Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol. XX, no 1, 1983: 73-78.
- Baize, D., & Girard, M.-C. (2009). *Référentiel pédologiques 2008*. Versailles Cedex: Edition Quae.
- Benamar, A. (1991). *Contribution à l'étude des conditions d'utilisation du phosphogypse dans la mise en valeur des sols salés des plaines du Bas Chéiff*. Alger: Thèse de Magister. INA, El-Harrach.
- Bryssine. (1961). La salinité des sols et ses problèmes. *Les cahiers de la recherche Agronomique*, 12, 37-57.
- Chartzoulakis, K., & Klapaki, G. (2000). Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Sci Hort*, 86, 247-260.
- Cherbuy, B. (1991). *Les sols salés et leur réhabilitation*. Renne: Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie Renne.
- Chevry, C. (1975). *Contribution à l'étude pédologique des polders du Lac Tchad*. Paris: Trau. et Dot. de O.R.S.T.O.M.
- Cruet. (1970). *Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées*. Paris: Rapport technique PNUD/UNESCO.
- Daoud, Y. (1981). *Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des sels dans un sol irrigué du périmètre du Haut Cheliff* (Vol. Thèse magister). Alger: INA. El-Harrach.
- Delgado, A., Madri, S., Kasem, L., & Del Campillo, M. (2002). Phosphorus fertilizer recovery from calcareous marsh soils amended with humic and fulvic acids. *Plant Soil*, 245, 277-286.
- Diakhate, M. (1986). Le barrage de Diama: essai sur l'évaluation de ses impacts potentiels. *Revue de Géographie de Lyon*, 61, 43-61.
- DIALLOU, M., NDIAYE, O., MAHAMAT, S., TINE, A., DIOP, A., & GUISSSE, A. (2015). ETUDE COMPARATIVE DE LA SALINITE DE L'EAU ET DES SOLS DANS LA ZONE. *African Crop Science Journal*, 23(02), 101-111.
- Djili, K., Daoud, Y., & Touaf, L. (2000). La salinisation et la sodisation des sols en Algérie. *Proceeding of the Congress*. (pp. 215-223). El oued: Université El oued.
- Dogar, M. (1978). *Méthodes d'analyse des sols salés alcalins*. Alger: INA, Alger.

- Dominguez, R., Del Campillo, F., & Delgado, A. (2001). Effect of soil properties and reclamation practices on phosphorus dynamics in reclaimed calcareous marsh soils from the Guadalquivir Valley, SW Spain. *Arid Land Res. Manage.*, 15, 203-221.
- Dommergues, Y., & Mangenot, F. (1970). *Ecologie microbienne du sol*. Paris: Ed. Masson et Cie.
- DOUAOUI, A., & HARTANI., T. (2007). Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. *Actes de l'atelier régional SIRMA.*, 23-32.
- Duchaufour, P. (1983). *Pédologie et classification* (Vol. 2ème Edition). Paris, France: Masson.
- Duchaufour, P. (1988). *Abrégé de pédologie*. Paris, France: 2e éd., coll. « Abrégés de Sciences », Masson.
- Durand, J. (1954). *Recherches sur les sels apportés au sol par les pluies. Travaux des sections pédologie et agrologie*. Alger: Services des Etudes Scientifiques. Bir Mourrad Rais.
- Durand, J. (1958). *Les sols irrigables. Etude pédologique*. Alger: Alger.
- FAO. (2006). *Conférence électronique sur la salinisation : extension et stratégies de prévention et. IPTRID, CISEAU*. Récupéré sur <http://www.dgroups.org/groups/fao/salinization-conf/>
- FAO, U. (1975). Carte Mondiale des sols - 1/500.000,. *UNESCO, légende , 1*.
- Gallili, T. (1980). *Transfert sels - matière organique en zones arides méditerranéennes*. Nancy: Univ. Nancy INPL.
- Gregory , B. (2005). *Ecophysiologie de semis de coniferes ectomycorhizes en milieu salin et sodique*. Québec: Université Laval.
- Gupta, & Abros. (1990). *Salt Affected Soils, their reclamation and management for crop production*. Pall: C.S.S.R.I.Karmal Pall.
- Halitim, A. (1973). *Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture*. Renne: Thèse de 3 eme cycle université Renne.
- Halitim, A. (1985). *Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols*. Rennes: Université de Rennes.
- Halitim, A. (1988). *Sols des régions arides d'Algérie*. Batna, Algérie: Office de publication universitaire.
- Hans. (2003). Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. *Plant and soils*, 257, 5-7.
- Hans, L. (2003, 12). Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. *Plant and Soil*, 257(2), 5-7.
- Legros, J. (2007). *Les grands sols du monde*. Romandes: PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES.
- Legros, J.-P. (2009, 06 22). LA SALINISATION DES TERRES DANS LE MONDE. *Académie des Sciences et Lettres de Montpellier*, 40, 257-269.
- Loyer, J. (1988). *Les sols salsodiques* . Paris: 5ème version .

- Loyer, J.-Y. (1989). *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal; Caractérisation, distribution et évolution sous cultures*. Paris: O.R.S.T.O.M.
- Marlet, S., & Job, J.-O. (2006). Processus et gestion de la salinité des sols. *J.R. Traité d'irrigation*, 02(03), 1-28. doi:978-2743009106
- Massoumi, A.-M. (1968). *Caractérisation et amélioration des sols salés et alcalins*. Paris: O.R.S.T.O.M.
- Nahai. (1975). *Principe de conservation des sols*. Paris: O.R.S.T.O.M.
- Parida, A., & Das, A. (2005). Salt tolerance and salinity effect on plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 60, 324–349.
- Pouget, M. (1980). *Les relations sol-végétation dans les steppes Sud-Algéroises*. Paris: ORSTOM.
- Richards, L. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. New York: USDA Agr. hand book.
- Robert, M., & Cheverry, C. (1996). Les ressources mondiales en eaux et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahier Agriculture*, 5, 243. 248.
- S.S.S.A. (1971). *Glossary of soil science terms*. Madison : Wis. USA .
- Servant, J. (1975). *Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphe. Exemple des sols salés du Sud et sud-ouest de la France*. Montpellier: Thèse de doctorat d'état.
- Servant, J. (1978). La salinité dans le sol et les eaux : caractéristiques et problèmes d'irrigation-drainage. *Bull. B.R.G.M.*, 3(2), 123 -142.
- Servant, J. (1975). *Contribution à l'étude pédologique des terrains hydromorphe. l'exemple des sols sud et sud-ouest de la France*. Montpellier: Thèse de Doctorat d'état.
- Sigala, F., Fies, J., & Guennelon, R. (1988). Tests de comportement des sols salés ou non salés vis à vis de l'eau. *INRA .Sc. Des sols. Avignon .FR C .I.H.E.A.M*, 169-181.
- SINOUSSI, S. (2001). *Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale*. Blida: Université de Blida.
- Summer, M. (1996). *Sodic Soil : New perspectives. Ed. Australian Sodic Soils. Distribution : Properties and management*. Melbourne: CSIRO. Melbourne.
- Szabolcs, I. (1989). *Salt-affected Soils*. Florida, USA: CRC Press.
- Szabolcs, I. (1989). *Salt- affected soils*. Florida: CRS pressinc.
- Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J., & Hernandez, M. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation influence of the physical, chemical and biological properties on soil. *Soil biology and biochemistry*, 38, 1413-1421.
- U.S.D.A. (1979). *Soil taxonomy*. Washington - USA. : US Dept. Agri. Govt. print. Office.
- U.S.S.L.S. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (Vol. VIII). Washington: U. S. Dept. Agric. Handbook 60,.
- W.R.B. (2006). *A framework for international classification, correlation and communication*. New York: Word reference base for soil resources.

Zouggari, H., Djalle, M., & Aghiri, A. (1987). *Rapport relatif à la possibilité d'utilisation du phosphogypse en Agriculture*. Alger: INRA.