

PREMIERE PARTIE :
SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

La salinisation des sols

Première partie : Synthèse bibliographique

Introduction

Le sujet sur la salinité des sols est large et varié. L'examen d'une bibliographie complète est donc difficile. Dans cette partie, la bibliographie se limite qu'aux sujets qui sont directement liés à la recherche menée dans cette thèse. Tout d'abord, la salinisation du sol est brièvement discutée dans le **Chapitre.I**. Les méthodes de mesure de la salinité du sol, en particulier, l'utilisation de l'induction électromagnétique (IEM), qui mesure la conductivité électrique apparente du sol (CEa), a révolutionné la façon dont ces informations peuvent être collectées et peut améliorer significativement l'interprétation de la salinité. Cette question est abordée dans le **Chapitre.II**. Nous terminerons cette partie bibliographique par les systèmes de classification des sols salés, dans laquelle nous citerons les systèmes de classification Américain de l'USDA (Soil Taxonomy) et la classification Française (CPCS, 1967), qui seront abordés dans le **Chapitre. III**.

Chapitre I. La salinisation des sols

I.1. Définition

Le terme de salinité se rapporte à la présence des principaux solutés inorganiques dissous (essentiellement des ions Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- et CO_3^{--}) dans des échantillons aqueux. La salinité est quantifiée en termes de la concentration totale de ces sels solubles, ou plus concrètement, en termes de conductivité électrique de la solution, parce que les deux sont étroitement liés (USSL, 1954).

La salinisation est l'accumulation des sels solubles (plus solubles que le gypse) à la surface du sol et dans la zone racinaire (Mermoud, 2006).

La conductivité, inverse d'une résistivité (en ohms), a longtemps été exprimée en mhos (en inversant l'ordre des lettres). Dans le système international on se réfère désormais au Siemens (S), et à ses subdivisions (milli = m et micro = μ), pour exprimer une conductivité électrique (FAO, 1988) :

- $1\text{dS/m} = 1\text{mS/cm} = 1\text{mmhos/cm} = 0.1\text{ S/m} = 1000\ \mu\text{S/cm}$.
- Conductivité en mmol (+) par litre: $\text{mmol (+) / l} = 10 \times \text{CE (CE en dS/m)}$
Pour l'eau d'irrigation et les extraits de sol dans la gamme 0,1-5 dS / m.
- Conductivité en pression osmotique en bars: $\text{PO} = 0,36 \times \text{CE (CE en dS / m)}$
Pour les extraits du sol dans la gamme de 3 à 30 dS / m.
- Conductivité en mg / l:
 $\text{mg / l} = 0,64 \times \text{CE} \times 10^3$, ou (CE en dS / m)
 $\text{mg / l} = 640 \times \text{CE}$

Pour les eaux et extraits de sol ayant une conductivité jusqu' à 5 dS / m.

- mmol / l (analyse chimique) en mg / l:
- Multipliez mmol / l pour chaque ion par son poids moléculaire pour obtenir la somme.

I.2. la salinisation dans le monde

Selon les estimations les plus récentes de la FAO, la salinisation affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (**Legros, 2009**). La plupart de ces terres affectées par le sel sont situés dans les zones arides et semi-arides, en Afrique du Nord, en Asie orientale, en Asie centrale et du Sud de l'Asie (**FAO, 2006**).

Les sols salés sont principalement situés dans les zones arides, et leur proportion est notablement élevée au proche (Egypte, Tunisie) et moyen orient (Iran, Pakistan, Bangladesh), en Asie centrale (Ouzbékistan), au nord de la Chine et en Argentine. Les sols sodiques sont particulièrement étendus en Australie, mais aussi dans certaines situations spécifiques, comme en Hongrie ou en Ouzbékistan. Par comparaison, le développement d'une salinité liée aux activités humaines ne concernerait que 77 millions d'hectares (**Marlet et Job, 2006**).

Dans les pays du Maghreb, les dommages de la salinisation sont connus, à cause de la mauvaise gestion des eaux d'irrigation (**Djili K et al, 2003**).

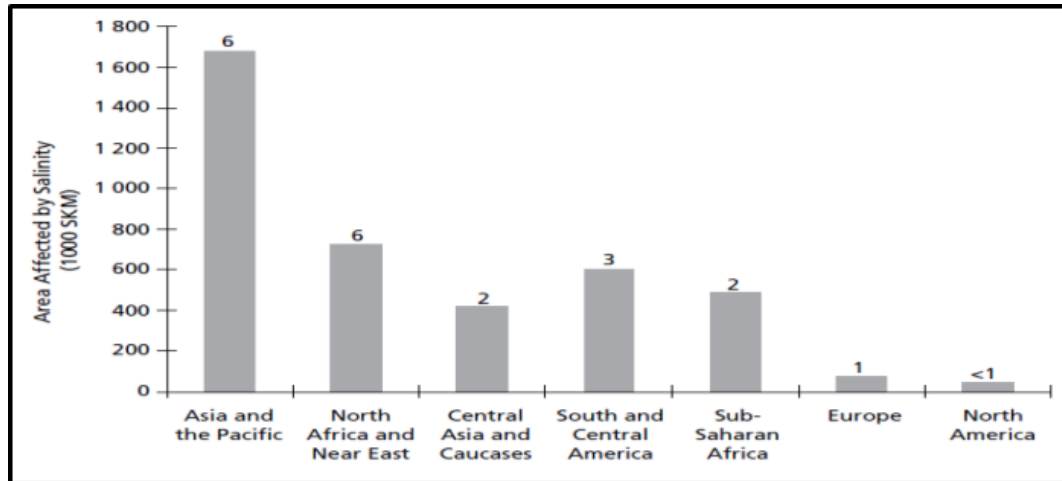


Figure 1. Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde (**FAO, 2006**)

I.3. La salinisation en Algérie

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (**Halitim, 1985**). Selon **Le Houerou (1993)**, les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10-15 % de terres irriguées, sont concernées par ces problèmes. Bien que le problème d'alcalinisation, selon **Daoud et Halitim (1994)** ne se pose plus, on estime que les terres salinisées seront difficilement récupérables. La plupart de ces sols sont situés, en région

aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (Halitim, 1973). Selon Djili (2000), les sols salés sont localisés au Nord qu'au Sud Algérien, et s'expriment mieux entre les isohyètes 450 mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques (Fig.3).

Selon l'INSID (2008), la salinité est observée dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia), dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sebkhass (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.) (Fig.2).

Les sels les plus fréquents, dans les régions arides et semi- arides, sont surtout les chlorures, les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988).

Selon Aubert (1975), les sols salés d'Algérie sont caractérisés, en général, par une conductivité électrique supérieure à 7dS/m et un pourcentage de sodium échangeable (ESP) qui varie de 5 à 60 % de la CEC.

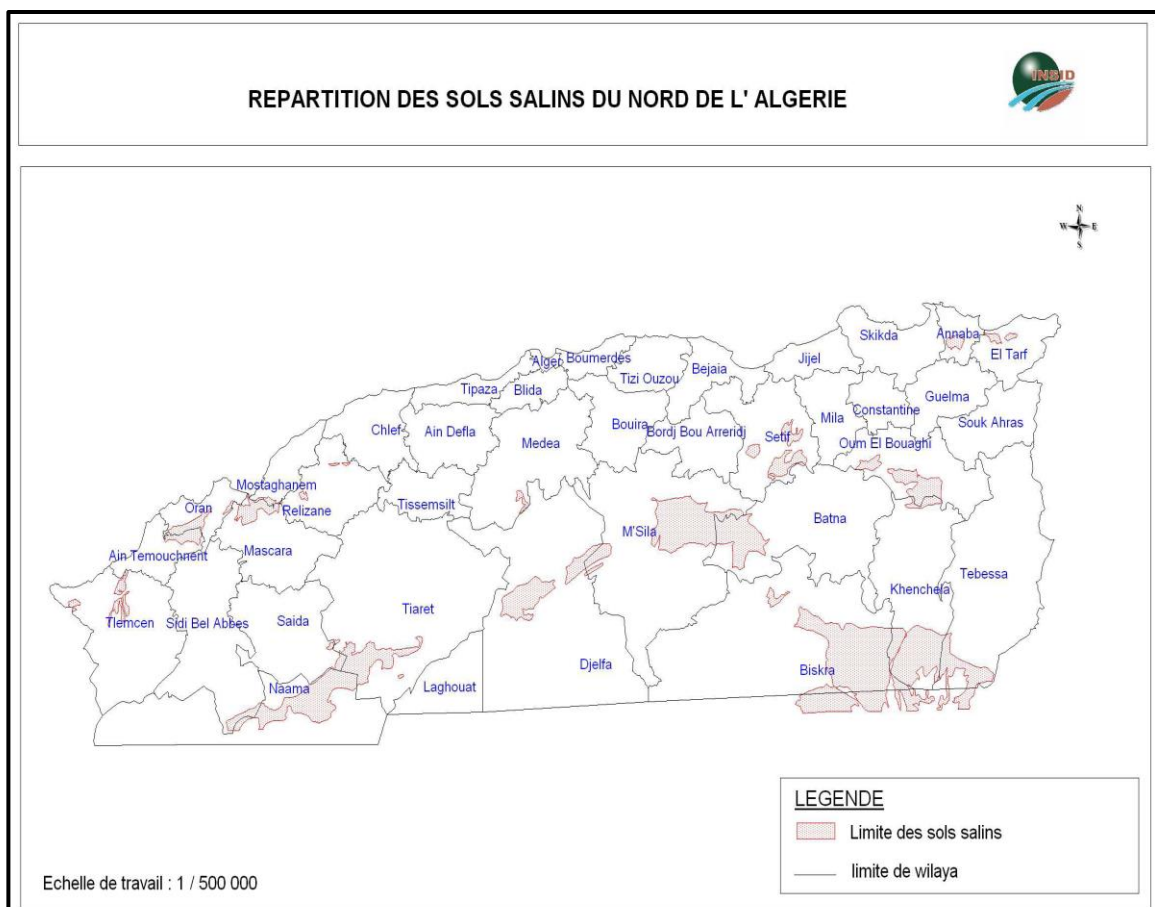


Figure 2. Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie (INSID, 2008)

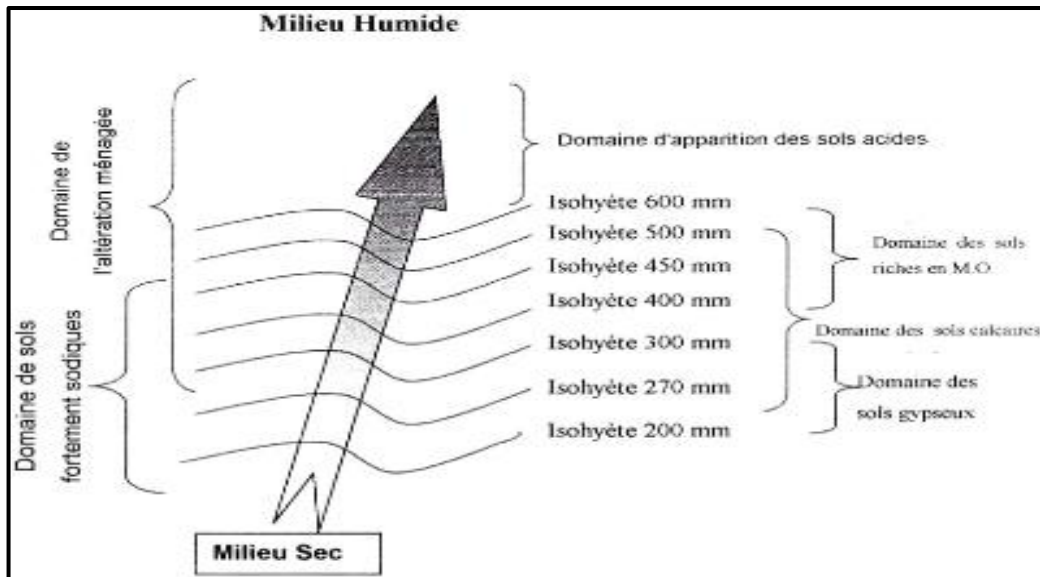


Figure 3. Représentation schématique de la distribution de quelques domaines pédologiques dans le Nord de l'Algérie (Djili, 2000)

I.4. Les mécanismes de la salinisation

Les sols salés sont formés à partir de trois processus physico-chimiques qui sont la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation (Montoroi, 2005). Ces mécanismes peuvent s'associer différemment suivant les caractéristiques du milieu d'accumulation (Ilou, 1995).

I.4.1. La salinisation

Le mécanisme de la salinisation des sols se produit lorsque la minéralisation de la solution du sol dépasse un certain seuil sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, drainage insuffisant, altération des minéraux et accumulation...). Au-delà de ce seuil, les végétaux subissent une sécheresse physiologique due à une pression osmotique très forte et à une toxicité en certains éléments (Montoroi, 2005).

La teneur d'une solution de sol en sels solubles est déterminée par sa conductivité électrique (CE), rapportée à une température standard (en général 25°C) et exprimée en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Celle-ci est d'autant plus élevée que la concentration ionique de l'électrolyte l'est aussi (Montoroi, 2005).

On définit en général deux types de salinisation, la salinisation primaire et la salinisation secondaire.

1) La salinisation primaire

Elle résulte de la présence initiale de sels dans le sol ou dans la nappe phréatique et peut affecter des milieux naturels sans qu'il y ait intervention directe de l'homme.

L'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques conduit à des sels souvent solubles, en particulier les chlorures, les sulfates, les carbonates, les bicarbonates et parfois les silicates de ces métaux (**Zahow et Amrhein, 1992**).

Selon **Aubert (1975)** et de façon générale « les sols sodiques en Afrique du Nord proviennent principalement d'une action de la mer (pas actuelle) ou de la présence de dépôts lagunaires salés et gypseux répartis dans l'échelle stratigraphique depuis le Trias jusqu'au Quaternaire. En Algérie, les couches géologiques salifères, comme le gypse triasique; grès du Crétacé moyen; marnes sénoniennes dans le Sud-Constantinois; poudingues, grès et limons rougeâtres de l'Oligocène continental (Aquitainien) ; poudingues et grès cartésiens; argiles, grès et poudingues helvétiens; gypse, marnes et calcaires du Sahélien; grès du Pliocène continental (bassins fermés des Hautes Plaines); formations quaternaires des plaines littorales, des basses plaines oranaises et des dépressions fermées. (**Benchetrit, 1956**).

2) La salinisation secondaire

C'est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles causé par l'approvisionnement en eau pour l'irrigation et qui aboutit à la formation d'un sol salin. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire ; cet apport est toujours associé à un apport de sels (**FAO, 2006**). Un excès d'eau entraîne la remontée d'une nappe phréatique salée, tandis qu'un manque d'eau provoque une lixiviation insuffisante des sels (**Boivin et al, 2002**). Les sols affectés par salinisation secondaire est de 20% à 50% des terres irriguées en Algérie (**Douaoui et Hartani, 2007**)

I.4.2. La sodisation

Le processus de sodisation se produit lorsque le complexe organo-minéral d'échange est progressivement saturé par l'ion Na^+ (horizon sodique). Les agrégats deviennent instables à partir d'un certain seuil et la dégradation des propriétés physique du sol est potentielle (**Servant, 1978**).

On détermine la sodisation par le pourcentage de sodium échangeable **ESP** (**Exchangeable Sodium Percentage**) par rapport à la capacité d'échange des cations (CEC).

$$\text{ESP} = 100 * \text{Na échangeable (en meq/l)} / \text{CEC (en meq/l)}.$$

Si cette valeur est supérieure à 15%, on parle d'un sol sodique. Ce pourcentage est en étroite relation avec un paramètre utilisé par l'école de Riverside, aux USA, qui est le **SAR** (**Sodium Absorption Ratio**) de l'extrait de la pâte saturée.

Le SAR est défini par l'expression :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) / 2)^{0.5}$$

Dans laquelle : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} sont les teneurs en meq/l de la solution.

La sodisation des sols est l'une des conséquences les plus dommageables et la plus répandue de l'irrigation, en zone aride. Elle influe sur la perméabilité en favorisant le gonflement et la dispersion des colloïdes du sol et entraîne des problèmes de toxicité des plantes (Ilou, 1995).

I.4.3. L'alcalinisation

Le processus d'alcalinisation intervient lorsqu'un sol à complexe saturé en sodium se transforme physiquement suite aux réactions d'échange entre l'ion Na^+ et les protons au moment d'une humectation (Montoroi, 2005).

L'alcalinisation se traduit par une augmentation du pH du sol suite à l'accumulation de bases faibles. Elle peut être d'origine naturelle ou due à une irrigation mal contrôlée.

Les eaux d'irrigation faiblement minéralisées présentent une alcalinité résiduelle calcite positive, c'est à dire un excès de carbonates (bases faibles) par rapport au calcium. La concentration de ces eaux par évaporation au cours de l'irrigation entraîne la précipitation de la calcite. Au fur et à mesure que les processus de concentration et de précipitation de la calcite se poursuivent, la teneur en calcium décroît alors que les carbonates s'accumulent.

I.5. Dynamique de la salinité dans les sols

I.5.1. Dynamique des sels dans les sols irrigués

Selon M. Lahlou *et al* (2002), un apport massif d'eau suite à une irrigation ou à une forte pluviométrie entraîne une dissolution des minéraux qui existent naturellement dans le sol, tel que la calcite ou le gypse, et leur percolation profonde jusqu'au nappes phréatiques (Fig.4). L'eau des nappes devient ainsi plus chargée. Lorsque la nappe s'approche de la surface et qu'elle devient facilement exploitable à des fins d'irrigation, les sels initialement dissous précipitent sous l'effet de l'évapotranspiration et entraînent une augmentation de la concentration saline dans les sols. En plus si la nappe est surexploitée à proximité de la mer, et que le niveau de la nappe descend en dessous du niveau de la mer, l'eau de cette dernière remonte pour équilibrer le niveau et entraîne l'augmentation de la concentration en sels dans la nappe.

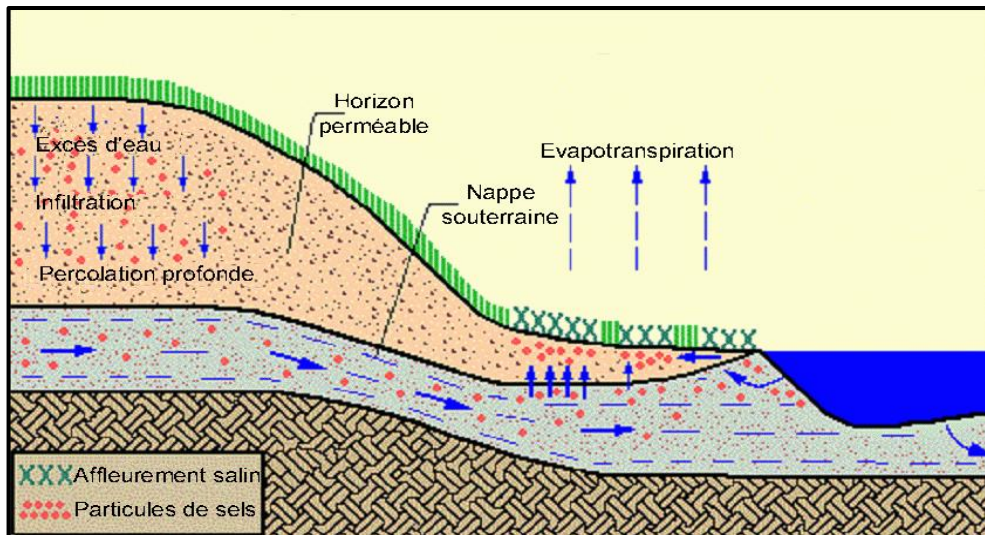


Figure 4. Le cycle des sels dans le sol (Lahlou *et al*, 2002)

L'irrigation ne fait qu'aggraver ce problème, en effet, les sels sont apportés dans le sol à chaque irrigation, la culture prélève dans le sol ses besoins en eau, en laissant sur le sol une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante.

I.5.2. Le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols

L'abondance de l'ion sodium dans le sol confère à ce dernier des caractères particuliers. Mais cet ion peut exister sous deux formes distinctes :

- la forme saline (NaCl , Na_2SO_4) l'ion sodium reste sous forme neutre.
- la forme alcalinisante (échangeable) liée au complexe absorbant. En présence de cette dernière forme les solutions du sol s'enrichissent en sels alcalins (carbonate ou bicarbonate de sodium) qui confère au sol un pH fortement élevé.

Servant (1975), en fonction de ces deux formes de l'ion sodium, proposa le terme de "sols salsodiques" pour désigner la classe des sols sujets. L'ion sodium peut provenir de différentes sources :

- présence d'une nappe salée dont les éléments saturer le complexe absorbant par échange avec les ions alcalinoterreux (Ca^{++} et Mg^{++}) on parle de saturation indirecte (**Duchaufour, 1977**) ;
- Une saturation directe du complexe par altération des roches contenant des minéraux sodiques.

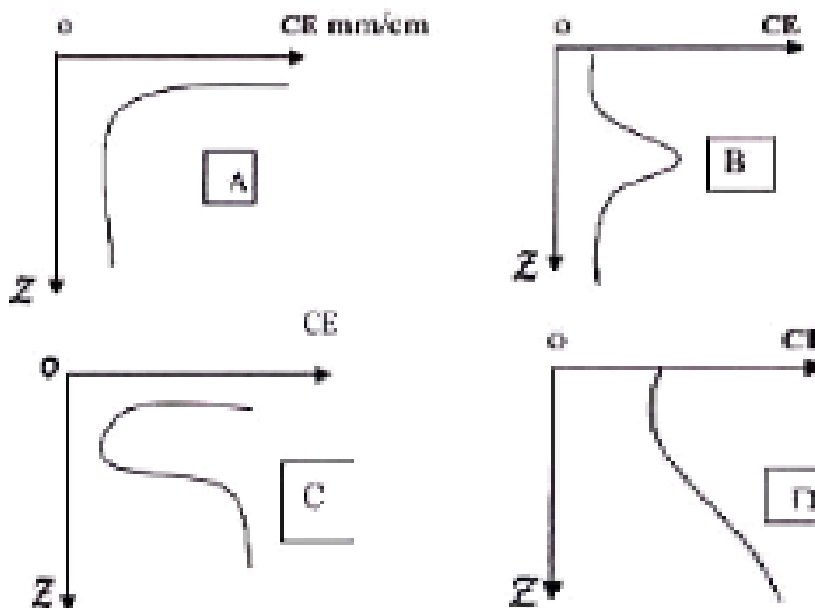
La nappe souterraine en traversant des couches d'alluvions sodiques, transporte des éléments alcalinisants dont elle s'est chargée. Selon **Duchaufour (1977)**, l'ion sodium ne peut subsister qu'en climat sec où le drainage naturel est empêché par la forte évaporation qui sévit. En climat humide, tous les sels de sodium étant très solubles, sont rapidement transportés du

profil par les eaux de drainage. A cet effet, deux conditions sont nécessaires à la formation des sols salsodiques:

- . Une condition climatique (ces sols sont quasi inexistant dans les régions humides)
- . Une condition de station qui nécessite la présence d'une source de sodium.

Selon **Servant (1976)**, il est possible de distinguer quatre formes principales de salinisation (**Fig.5**) :

- La forme A** : est une salinisation.
- La forme B** : est une désalinisation temporaire.
- La forme D** : est une désalinisation permanente
- La forme C** : est une résalinisation



Z : profondeur en centimètres

CE : conductivité électrique en mmhos/cm

Figure 5. (A, B, C, D). Les différents types de profils salins (Servant, 1976)

Selon **Halitim (1988)**, dans la zone aride de l'Algérie, il existe trois types de profils salins, semblables aux profils salins décrits par **Servant (1975)** : les profils descendants, ascendants et convexes.

- **Le profil descendant**

Le maximum de salinité se situe dans la partie inférieure du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols à croûtes et encroûtement calcaires et dans les sols à encroûtement gypseux de surface des parties amont et médiane de la séquence du Zahrez. Ce type de profil

salin a été qualifié de descendant par **Servant (1975)**. Il indique que le profil a subi une phase de lixiviation des sels solubles.

- **Le profil ascendant**

Le maximum de salinité est observé dans la partie supérieure du profil. Les sols sont influencés par une nappe salée peu profonde et sont, généralement, localisés dans les zones basses et déprimées des séquences. Les horizons les plus salés se localisent alors au-dessus des horizons gypseux et calcaires quand ces derniers sont présents. C'est le profil salin ascendant ou type A (**Servant, 1975**). Quand la concentration en sels est très forte et que la texture est argileuse, une couche de pseudosables et des efflorescences salines se forment, à la surface du sol. Cette couche de pseudosables peut exister même s'il n'y a pas de nappe, à condition que les autres caractéristiques (une texture argileuse et une forte salinisation) soient présentes.

- **Le profil convexe**

La partie médiane du profil correspond à un maximum de salinité. Les profils concernés par ce mode de distribution des sels sont en général des sols dont la dynamique saline est caractérisée par une remontée capillaire et une lixiviation des sels. Ils correspondent au type B (**Servant, 1975**) et peuvent aussi caractériser une phase de désalinisation des profils du deuxième type.

1) Rôle du climat dans le processus de salinisation

La forte demande évaporatoire qui caractérise les zones arides et semi-arides entraîne une concentration des eaux en surface des sols. Il en résulte une précipitation des sels qui vont s'accumuler au fil du temps. De cette accumulation découlent des dégradations salines des sols qui peuvent se manifester au cours de la pédogenèse naturelle ou apparaître secondairement suite à l'irrigation (**Ilou, 1995**).

Même si les sels peuvent remonter en période sèche, les profils salins sont généralement du type D dès que la pluviométrie annuelle acquiert une certaine importance. En d'autres termes, la salinité s'accroît avec la profondeur en relation avec la lixiviation du sodium par les pluies. Le rapport entre les conductivités électriques du haut et du bas des profils est alors voisin de 1/5 (**Morizet et al, 1970**). C'est le même phénomène qui se produit dans la partie nord de l'Algérie (**Djili, 2000**). En revanche, dans les zones subdésertiques, les sels restent en surface.

2) Rôle de la nappe dans le processus de salinisation

Dans le cas d'une nappe salée, le processus d'accumulation des sels est d'autant plus marqué dans les sols des cas suivants :

- La nappe est proche de la surface,
- Elle est fortement minéralisée,
- Le bilan négatif (P-ETP) en faveur de l'évapotranspiration potentielle.

Si le terrain est très légèrement ondulé et la texture est fine, les sels s'accumulent dans les points hauts (**Franzén, 2005**). En revanche, dans les zones sableuses, les remontées capillaires sont limitées, et l'altitude au-dessus du niveau la nappe joue un rôle important dans ces remontées.

I.6. Relation entre la salinité, les sols et les plantes

I.6.1. Introduction

Les sols salés contiennent suffisamment des sels solubles dans leur solution (électrolytes) pour nuire à la croissance de la plupart des plantes. Ces sels solubles, sont principalement le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et de potassium (K^+) et aussi les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les carbonates (CO_3^{2-}).

Le développement d'une gestion efficace des pratiques de lutte contre la salinité nécessite une bonne compréhension des effets de la salinité sur les sols et sur les plantes.

I.6.2. Effets de la salinité sur les plantes

L'accumulation des sels dans les sols est un grave problème environnemental menaçant les processus physiologiques de la plante et la fertilité des sols. Les teneurs élevées en sels tendent à augmenter la pression osmotique de la solution du sol, ce qui diminue la capacité de la plante à utiliser l'eau dont elle a besoin, au risque de la soumettre à une sécheresse conditionnée (**Halitim, 1988**). Les sels constituent aussi un obstacle physique à l'enracinement à cause de la diminution de la disponibilité en eau et de l'instabilité structurale du sol. Ils sont aussi à l'origine des déséquilibres nutritionnels observés chez les plantes. Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, la salinité est tellement élevée que le sol devient stérile et dépourvu de toute végétation y compris de plantes halophytes. Dans ce cas, des problèmes de toxicité surviennent aussi ; outre le sodium et le chlore, d'autres éléments à l'état de traces tels que le bore peuvent aussi être toxiques pour les plantes (**Ayers et Westcot, 1988**).

I.6.3. Effets de la salinité sur les sols

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule la fraction argileuse, mais les maintient stable, alors que dans les sols alcalins, un excès en sodium échangeable favorise la dispersion de l'argile et rend la structure du sol instable. Ces sols sont ainsi sensibles aux encroûtements de surface qui favorisent le ruissellement de surface (**Hassan, 2005**). Une prise en masse du sol peut également réduire fortement l'infiltration de

l'eau dans le sol et conduire à une hydromorphie plus ou moins importante du sol selon sa texture et sa position topographique dans le paysage (Douaoui *et al*, 2004).

Un taux de sodium échangeable élevé a pour effet une dispersion des agrégats, ce qui conduit à une réduction de la perméabilité, de la porosité et un tassement des sols. Du point de vue agricole, cela se traduit d'une part par la prise en masse du sol qui devient très compact, dur, difficile à labourer, et d'autre part, par des difficultés de germination, et d'enracinement des plantes. Par ailleurs le sol devient totalement asphyxiant, ce qui s'accompagne d'une atrophie du système racinaire, de son développement de plus en plus superficiel, avec des conséquences défavorables sur la nutrition minérale des plantes, et la baisse considérable des rendements.

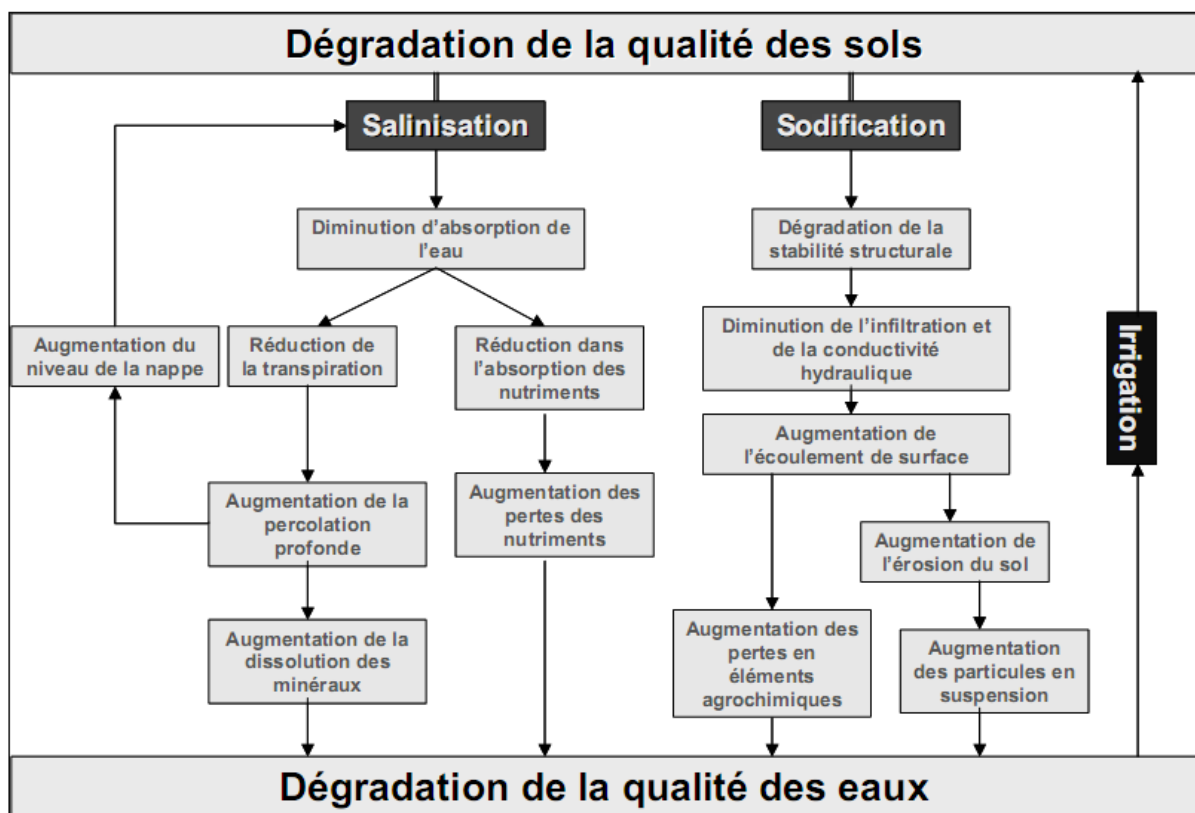


Figure 6. Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation (Lahlou *et al*, 2002).

I.7. Réhabilitation des sols salés

La gestion des sols salinisés exige une combinaison des pratiques agronomiques et des considérations socio-économiques. La réhabilitation des sols salins peut débuter par la mise en place d'un drainage efficace et l'utilisation d'une eau d'irrigation de bonne qualité pour abaisser les teneurs en sels solubles.

D'un point de vue strictement technique il est possible de régénérer des sols salins ou alcalins, mais ces méthodes sont généralement coûteuses (**Middleton *et al*, 1997**):

- **Certains sols salins** peuvent être récupérés par lessivage, c'est à dire par l'application de très fortes doses d'irrigation, accompagnées d'un drainage efficace. Le sel en excès est alors évacué avec les eaux de drainage. Pour que cette technique soit applicable il faut impérativement que les sols soient bien drainés; or c'est justement souvent la mauvaise capacité de drainage des sols qui est à l'origine de leur salinité. Il faut donc préalablement s'assurer qu'il existe un système efficace de drainage, de collecte et d'évacuation des eaux, ou mettre en place un tel système. Souvent, ceci impose une restructuration totale des périmètres irrigués ;
- **Certains sols alcalins** peuvent être récupérés grâce à l'application de gypse et d'autres amendements calcaires : le cation calcium s'adsorbe sur les particules argileuses, ce qui permet d'améliorer la structure des sols. L'apport en complément de matière organique augmente les chances de réussite. Afin d'être efficaces, les apports doivent être de l'ordre de la tonne par hectare. L'amélioration de la structure du sol est temporaire et l'application des amendements doit généralement être répétée à quelques années d'intervalle ;

Une autre option possible en milieu carbonaté est la phyto-remédiation. Son principe est d'utiliser le CO₂ de la respiration racinaire et l'excrétion de protons par les racines pour acidifier le milieu et produire la libération du calcium. Dans des essais conduits au Moyen Orient la phyto-remédiation a prouvé qu'elle était une option efficace et peu coûteuse, dont les résultats sont comparables à ceux obtenus avec du gypse (**Badraoui *et al*, 2005**).