



Réf :/UAMOB/F.SNV.ST/DEP.AGR/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOMEMASTER

Domaine : SNV Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences du Sol

Présenté par :

KEBIR Amal et BELMADI Louiza

Thème

*Quantification et cartographie de la salinité des sols à l'aide
de la télédétection et du SIG.*

Soutenu le : 29 / 06 / 2022

Devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
Mme CHEKROUNE Malika	MCB	FSNVST/Univ. de Bouira	Présidente
Mr LIBDIRI Farid	MAA	FSNVST/Univ. de Bouira	Examineur
Mr LAMINE Salim	MCA	FSNVST/Univ. de Bouira	Promoteur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude tout d'abord à dieu de nous avoir donné courage, volonté, santé et force pour réaliser ce travail.

Nous remercions vivement M. LAMINE Salim d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour tous ses conseils, son suivi et sa disponibilité.

Nos remerciements sont également adressés à Mme. CHEKROUNE Malika qui a généreusement accepté de présider le jury de notre soutenance et à M. LIBDIRI Farid d'avoir accepté l'examen de ce travail et sa mise en valeur.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont veillé à notre formation durant notre parcours universitaire.

Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Suivant la volonté du Dieu tout puissant, nous avons pu achever
ce travail que nous dédions :*

*A mes parents, qui m'ont soutenu pendant toute ma vie et mes
études, et surtout dans l'accomplissement de cette recherche, que
Dieu leur accorde sa grâce infinie et les garde pour nous.*

*A mon très cher mari Elromari pour son soutien aux moments
difficiles de mon travail et surtout pour sa patience.*

*A mes chères sœurs Melissa et Aya et mon frère Rabah qui m'a
beaucoup soutenu durant toutes mes études.*

BELMADI Louiza

Dédicace

Je dédie ce mémoire A mon idole, la personne la plus précieuse dans ce monde pour moi, ma chère maman « TOUILL Ouïza » qui a toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait, qui m'a soutenu et encouragé tout au long de mon parcours et qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

A l'homme qu'autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer la gratitude car, tout simplement, il est unique, mon merveilleux cher papa « KEBIR Mohamed ».

A ma chère sœur qui a toujours été là pour moi. Tous les jolis mots ne suffisent pas pour te remercier pour ce que tu as fait pour moi, A toi ma sœur d'amour « KEBIR Imane » et ses petits princes « Louay & Yazan ».

A mes très chères frères, « Abd'raouf » et « Amine » , et mes belles soeurs : «Meriem» , «Lyna» .

A mon mari « Islam » qui compte beaucoup pour moi et qui a de la valeur à mes yeux. Je tiens à te remercier, tu m'as toujours soutenu. Tu étais toujours à mes côtés. Tu m'as toujours donné la force de continuer. Je te confirme mon attachement et mon amour. Que Dieu te protège et te garde pour moi.

*A mes meilleures copines Rima, Ines, Nouha, Sara, Fatima , Imane .Il
me seraient difficiles devons citer tous, vous êtes dans mon cœur,
affectueusement.*

A toute ma promotion MII sciences des sols 2021/2022.

KEBIR Amal

LISTE DES FIGURES

Liste des tableaux

<u>Tableau (1) :</u>	Niveau de la salinité dans quelques périmètres dans l'Ouest de l'Algérie.	5
<u>Tableau (2) :</u>	Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique.	12
<u>Tableau (3) :</u>	Classes des sols affectés par les sels.	12
<u>Tableau (4) :</u>	Indices spectraux multi canaux pour l'étude de la salinité	29
<u>Tableau (5) :</u>	Principales caractéristiques des appareils FDEM.	36

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure (1)	Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde.	3
Figure (2)	Répartition des sols salins du Nord de l'Algérie.	4
Figure (3)	Mécanisme de la salinisation secondaire suite à l'irrigation.	8
Figure (4)	Effet de sodium sur le complexe adsorbant.	9
Figure (5)	Composantes d'un SIG.	15
Figure (6)	Structure d'un SIG	16
Figure (7)	Superposition sous un SIG	17
Figure (8)	Exemple de sélection	18
Figure (9)	Processus de télédétection	21
Figure (10)	Modèles de réponses spectrales	24
Figure (11)	La démarche méthodologique pour cartographier les différentes classes de salinité des sols.	40
Figure (12)	Organigramme d'évaluation des sols salins	41
Figure (13)	Variogramme modélisé : modélisation de la variation spatiale du phénomène	44

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
A	Albédo de surface
AEP	Alimentation en eau potable
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
BI	Indice de brillance des sols
BR	Base de règle
CE	Conductivité Electrique
CEa	Conductivité Electrique apparente
CEC	Capacité d'échange cationique
COSRI	Indice de Reponse Spectrale Combiné
CPCS	Commission de pédologie et de cartographie de sol
DT	Delta Time , Différence temporelle calculée pour les données sismiques (Sonic porosity).
ERT	Electrical Resistivity Tomography
ESP	Exchangeable Sodium Percentage ou Pourcentage de Sodium Echangeable
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FAO	Food Agriculture Organization
FDEM	Méthode Electromagnétique en Domaine Fréquentiel
HRV	High Resolution Visible
INSID	Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage
NDSI	Indice de Salinité Normalisé

LISTE DES ABRÉVIATIONS

NDVI	Indice de Végétation Normalisé
NDWI	Normalized difference water index
OLI	Operational Land Imager
PH	Potentiel hydrogène.
PIR	Proche infrarouge
PLSR	Partial Least Square Regression
RMSE	Root Mean Square Error
RPD	Ratio of performance to deviation
SI	Indice de salinité (Salinity Index)
SIG	Système d'Information Géographique
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SSI	Soil Salinity Index
SWSI	Salinity and Water Stress Index
TDS	Total Dissolved Solids ou Total des Sels Dissous
TIRS	Thermal InfraRed Sensor
TM	Thematic Mapper
USSL	united states salinity laboratory
WI	Indice d'humidité
WRB	World reference base for soil ressource

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

Résumé FR, ENG et AR.

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction Générale 1

Chapitre I : Salinité des sols

1.	Salinisation dans le monde	3
2.	La salinité des sols en Algérie	3
3.	Salinité et salinisation	6
3.1.	Salinité des sols	6
3.2.	Salinisation des sols	6
4.	l'origine de la salinité	7
4.1.	Salinisation primaire	7
4.2.	Salinisation secondaire	7
5.	Profil salin	8
5.1.	Le type A	8
5.2.	Le type B	8
5.3.	Le type D	9
5.4.	Le type C	9
6.	Impacts de la salinité sur le sol	9
6.1.	Effet de la salinité sur les propriétés chimiques des sols	9
6.2.	Effet de la salinité sur les propriétés physiques des sols	10
7.	La texture des sols et la mobilité des sels	10
8.	Les méthodes de mesure de la salinité du sol	11
8.1.	sur le terrain	11
8.2.	au laboratoire	11
9.	Classification des sols affectés par la salinité.	11
9.1.	La classification française CPCS	13
9.2.	La classification FAO	13
9.2.1.	Solonchaks	13
9.2.2.	Les Solonetz	13

Chapitre II : Cartographie de la salinité des sols

I.	Système d'information géographique	14
----	------------------------------------	----

TABLE DES MATIERES

1.	Concepts fondamentaux des systemes d'informations geographiques	14
2.	Definition	14
3.	Structure d'un SIG	15
4.	Fonctionnalites d'un SIG	16
5.	Domaines d'application des SIG	18
6.	Mise en place d'un SIG	19
II.	Intérêt de la télédétection dans le suivi de la salinisation des sols	19
1.	Définition	19
2.	Domaine d'application de télédétection.	20
3.	Processus de télédétection	20
4.	Principe de télédétection	22
5.	Réponses spectrales de quelques objets	23
6.	Type des capteurs	24
6.1.	Les appareils photographiques	24
6.2.	Les capteurs actifs	25
6.3.	Les radiomètres passifs ou imageurs	25
7.	La télédétection pour le suivi de la salinité	25

Chapitre III : Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection utilisées dans l'étude de la salinité du sol

1.	Techniques de télédétection passive et active	27
1.1.	Techniques de télédétection passive	27
1.1.1.	Techniques des indices spectraux	27
1.1.2.	Techniques des indices spectraux combinés	30
1.1.3.	Techniques de détection de la salinité par l'infrarouge thermique	31
1.1.4.	Techniques de détection de la salinité par classification spectrale	32
1.1.5.	Classification de codage binaire	32
1.1.5.1.	Classification de d'angle spectral SAM	33
1.1.5.2.	Classification à base de règle « BR »	33
1.2.	Techniques de télédétection active	34

TABLE DES MATIERES

1.2.1.	Techniques de fusion radar - télédétection radar de la salinité	34
1.2.2.	Techniques électromagnétiques en domaine fréquentiel	34
1.2.2.1.	Méthodes électromagnétiques	36
1.2.2.1.1.	Méthodes de l'induction électromagnétique	36
1.2.2.2.	Méthodes de tomographie de résistivité électrique (ERT)	37
1.2.2.2.1.	Méthode de la prospection géophysique électrique	38
1.2.2.2.2.	Méthodes électriques	39
2.	Cartographie de la distribution spatiale des sols salés	39
3.	Méthodes hydro-chimiques pour l'estimation de la salinité du sol	40
4.	Technique de cartographie intégration multi-sources	41
4.1.	Approche géostatistique et analyse variographique	42
4.1.1.	Anisotropie géométrique	42
4.1.2.	Anisotropie zonale	43
4.1.2.1.	Variance d'estimation (variance de krigeage)	43
4.1.2.2.	Analyse variographique	44
5.	Prédiction de la salinité des sols a partir des données multispectrales et hyperspectrales	44
	Conclusion générale	48
	Références bibliographiques	

INTRODUCTION

Le sol est une composante principale de l'écosystème ; il joue un rôle essentiel vis-à-vis de l'agriculture comme support des cultures et en leur fournissant l'eau, l'air et les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance, comme il constitue également une interface vis-à-vis de l'environnement qui va conditionner la qualité de l'eau et de l'air et le développement diversifié des êtres vivants (**Mokhtari, 2009**).

Dans les régions arides et semi aride les principaux problèmes associés au sol sont la salinisation et la désertification. La salinisation du sol est une forme majeure de dégradation des terres dans les zones agricoles ou des informations sur l'étendue et l'ampleur de la salinité des sols sont nécessaire pour une meilleure planification et mise en oeuvre de programme efficace de réhabilitation des sols affectés par la salinité (**Lefki. 2018**).

En Algérie la salinité constitue un problème majeur qui affecté les terres agricoles et qui concerne des grande étendue (**Aubert.1976.Halitim.1985.Lefki.2018**).Selon(**Hamdi 1995**.) les sols salés occupent 3.2 millions d'hectares des sols algériens.

La salinisation des sols qui s'est accélérée ces deux dernières décennies suite au recours accru à l'irrigation est incontestablement le plus grave problème qui touche une grande superficie des dans les zones arides (**Douaoui et al., 2007**). Cette salinisation qui ne cesse de s'étendre spatialement et d'augmenter temporellement (**Douaoui et al. 2006**) provoque une détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dont les conséquences sont d'ordres agricole et éco-environnemental (**Saidi et al., 2004 ; Douaoui et al., 2004**).

Dans ce contexte, les techniques de géomatique (télédétection et SIG) offre la possibilité de cartographier fréquemment l'ensemble d'une zone d'étude. Plus spécifiquement, les images issues des acquisitions satellitaires permettent de produire des cartes qui donnent une représentation graphique relative aux surfaces terrestres comme l'occupation des sols et la salinité (**Pelletier, 2017**).

INTRODUCTION

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est une synthèse bibliographique sur la salinité des sols en général, ainsi que une présentation des techniques de télédétection utilisées dans la quantification du problème de la salinité.

Pour réaliser cette étude, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Dans le premier chapitre nous allons donner présentation relative à la salinité des sols d'une façon générale.
- Le deuxième chapitre est porté sur l'aspect des SIG et télédétection dans la cartographie de la salinité des sols.
- Le troisième chapitre est consacré à synthèse et évaluation des méthodes et techniques de télédétection utilisées dans l'étude de la salinité du sol.
- Notre étude s'achèvera par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

*Généralités sur La salinité
des sols*

Dans ce premier chapitre nous présentons une synthèse bibliographique des connaissances actuelles sur les types et les causes de la salinité.

1. Salinisation dans le monde

Selon les estimations 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 situées 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**).

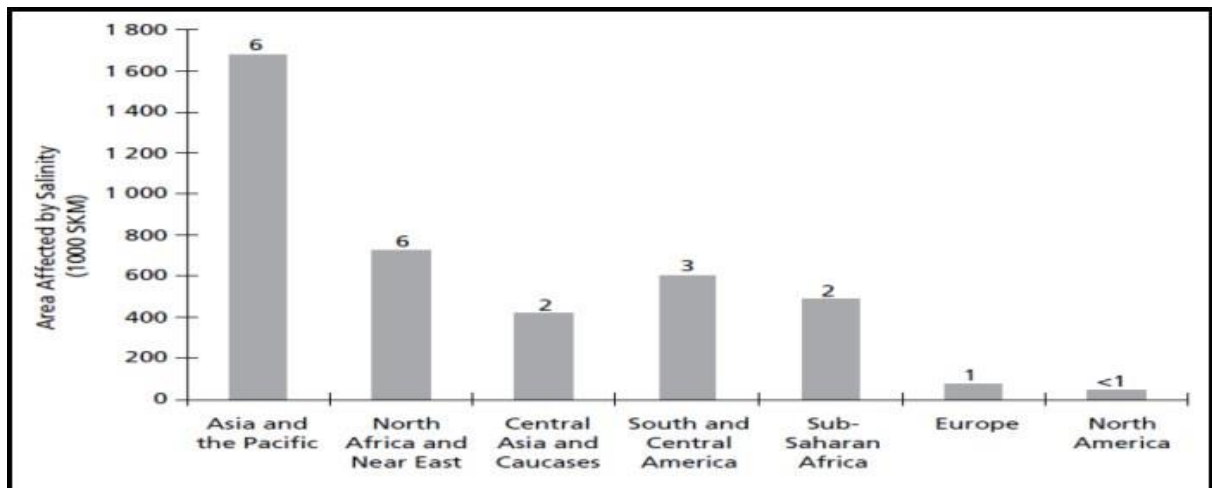


Figure 1. Superficie affectée par la salinité dans les différentes régions du monde

(**FAO, 2006**).

2. La salinité des sols en Algérie

D'après (**l'INSID 2008**), En Algérie, il n'est recensé aucune étude cartographique fiable et précise permettant de délimiter les zones touchées par la salinité des terres et la

Néanmoins il existe quelques données fragmentaires qui donnent une idée générale sur le phénomène de salinité et de la dégradation des terres.

Ce phénomène est observé (voir carte de la **figure 2**) dans les plaines et vallées de l'Ouest du pays (Mina, Chelif, Habra Sig, Maghnia) dans les hautes plaines de l'Est (Constantine, Sétif, Bordj Bou Arreridj, Oum El Bouagui), aux abords des Chotts et de Sbkhas (Chott Ech Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhah d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zazhrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc...).



CHAPITRE I

Dans le tableau suivant il est donné un aperçu sur les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays.

Tableau 1. Niveau de la salinité dans quelques périmètres dans l'Ouest de l'Algérie .

Source : (ANRH, 2003)

Périmètres irrigues	Superficies irrigables	Superficies affectées	%
Haut Cheliff	20200	6400	32
Moyen Cheliff	21800	8700	40
Bas Cheliff	22500	15000	67
Mina	9600	4190	44
Habra	19600	8100	41
Sig	8600	3200	37

Dans les régions arides, les eaux soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer et les sols à se saler. Une salinisation trop importante, accompagnée parfois d'une alcalinisation du complexe absorbant des sols, nuit à la mise en valeur agricole des zones cultivables.

L'étude effectuée par INSID en 2008 sur la salinité des sols dans les périmètres irrigués: Risques et Recommandations (Cas du périmètre irrigué du Bas Cheliff), montre que l'expansion du phénomène de salinisation des sols en Algérie, constituant un domaine d'investigation qu'il faut à tout prix privilégier car il représente une menace certaine et «sournoise » qui risque d'hypothéquer à terme l'avenir économique et social de certaines régions du pays.

Il est admis, par la communauté des scientifiques, que ce phénomène « naît » et se

développe grâce à la combinaison de plusieurs facteurs dont deux peuvent paraître comme principaux ; il s'agit à notre sens de :

L'aridité du climat et les données géomorphologiques qui font que les reliefs de plaines et de vallées, constituant l'ossature principale de cette région, sont alimentés de façon constante, en alluvions et colluvions, matériaux qui proviennent essentiellement de régions de montagne du fait de l'érosion « naturelle » et des phénomènes de dégradation liés à l'homme ;

L'endoréisme et l'exoréisme limité de certains bassins versants de la partie Nord Ouest et Nord Est de notre pays, jouent un rôle assez important, dans la salinisation des terres, salinisation accentuée par les problèmes posés par la géologie (salifère) et le climat (aride) de la région.

3. Salinité et salinisation des sols

3.1. Salinité des sols

La salinité des sols est définie comme étant une accumulation des sels solubles avec des teneurs élevées dans le sol. Les principaux ions qui forment ces sels sont les cations : Ca^{2+} , Na^{+} , Mg^{2+} , K^{+} et les anions : Cl^{-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} et HCO_3^{-} (**Hamdy, 2004**).

Cette salinité peut être mesurée par plusieurs techniques dont les principales sont : les mesures des teneurs des matières dissoutes totales (TDS) qui s'exprime en (mg/l) et les mesures de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à 25 °C et s'exprime en (dS/m).

3.2. Salinisation des sols

La salinisation des sols est un phénomène d'enrichissement des sols en sels solubles, ce qui mène à l'apparition d'un sol salin (**FAO, 2006**) . Cette description dégage la notion d'évolution de la salinité dans le temps, d'où la nécessité d'étudier cette évolution au sein d'un système intégral qui fait interagir les pratiques hydro agricoles avec les environnements biophysique (**Abdelhafid Y.2010**).

Facteurs intervenant dans le processus de la salinisation des sols peut être due à :

- la lixiviation des sels solubles et /ou à l'évaporation, qui déposent leur sels dans les sols
- En régime, non saturé, la remontée capillaire entraîne un transport des sels par flux de masse vers la surface du sol où ils s'accumulent après évaporation de l'eau, (WYNJONES & GUNSTON, 1991).

4. L'origine de la salinité

La salinisation géomorphologie et la topographie du terrain, la pédologie des sols, la qualité des eaux d'irrigation, les conditions climatiques ... peuvent intervenir ou interagir pour faire apparaître ou accentuer la salinisation des sols (**Lamsal et al., 1999**).

Selon l'origine de la salinisation, la salinité des sols peut être classée comme primaire ou secondaire :

4.1. Salinisation primaire :

Appelée encore salinisation d'origine naturelle ou encore endogène. Suite à l'altération des matériaux géologiques, il se libère les éléments chimiques qui forment les sels. Par exemple, l'altération des roches gypseuses conduit à un enrichissement du milieu en ions de calcium et des sulfates.

D'autre part, la nappe phréatique avec un aquifère salé peut être une source de salinisation primaire grâce à la remontée des eaux par capillarité (**IRD 2008**). En milieu côtier, les eaux de mer sont considérées comme des principales sources de sel et ceci soit par des phénomènes permanents liés aux marées soit par la présence de lentilles d'eau salées.

4.2. Salinisation secondaire :

Appelée aussi salinisation anthropique, car elle est causée par l'intervention humaine et des pratiques agricoles avec mauvaise gestion. A titre d'exemple, dans les zones arides caractérisées par de forte évaporation, l'irrigation par des eaux chargées en sels en quantités insuffisantes mène à l'incrustation des particules de sel dans le sol. En revanche, en grandes quantités, le sol sera saturé en eau et élève le niveau de la nappe phréatique (qui peut atteindre une profondeur de 1.5m seulement). Ainsi, le sol joue le rôle d'une éponge et

va aspirer l'eau dans la rhizosphère par capillarité. L'eau s'évapore et les sels s'accumulent autour des racines, ce qui inhibe l'absorption des eaux (**Figure 3**).

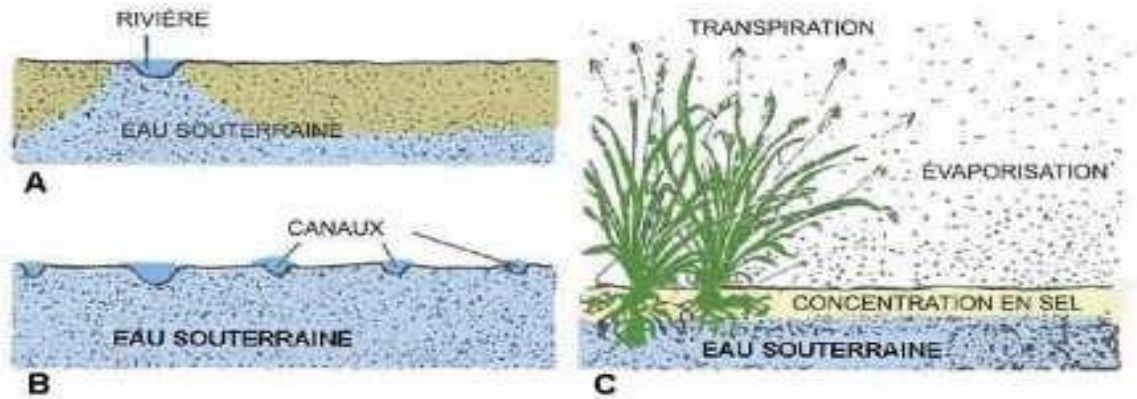


Figure 3. Mécanisme de la salinisation secondaire suite à l'irrigation(**Lamsal et al., 1999**).

5. Profil salin

Il constitue une image globale de la salinité dans la tranche de sol considéré. Sa lecture renseigne avec précision sur la distribution et sur la concentration des sels dans le profil. Son interprétation est agronomiquement immédiate (**IDDER, 2006**).

Le classement proposé par (**SERVANT, 1975**) distingue quatre formes principales désignées par les lettres A, B, C, et D.

5.1. Le type A

Il est caractérisé par une salinité ascendante, le maximum de salinité se situant dans les 10 ou 20 cm superficiels avec des valeurs très élevées par rapport aux horizons sous-jacents. Ce profil est typique pendant la saison sèche et parfois pendant la plus grande partie de l'année des sols nus ou à faible recouvrement végétal. Cette classe de sol est bien exprimée dans le cas des textures limoneuses ou limono - sableuses avec des efflorescences salines en surface.

5.2. Le type B

Le type B est caractérisé par l'existence d'un maximum de salinité bien différencié,

apparaissant dans la partie moyenne du profil, ordinairement à moins d'un mètre de profondeur. On peut le rencontrer dans des sols nus (en hiver) où il dérive d'une forme a d'été.

5.3. Le type D

Il est caractérisé par une salinité qui augmente avec la profondeur et présente un maximum de salinité pas toujours nette, situé ordinairement à plus de 1 mètre de profondeur.

5.4. Le type C

Il constitue une forme intermédiaire entre les types A et (D ou B) c-à-d une accumulation superficielle et en profondeur ou bien une accumulation superficielle et dans la zone médiane du profil.

6. Impacts de la salinité sur le sol

6.1. Effet de la salinité sur les propriétés chimiques des sols

La salinité agit sur le complexe adsorbant par les cations échangeable (Na^+ et Mg^{++}) ce qui provoque le lessivage des bases, la destruction des ponts calciques et comme conséquence une forte vitesse d'infiltration des eaux. Le complexe adsorbant devient saturée en Na^+ et qui provoque la dispersion d'argiles (fraction fine) diminuant ainsi la porosité (aération) et emmagasinement de l'eau (**Figure 3**) (Madjid N,Tair K,2012).

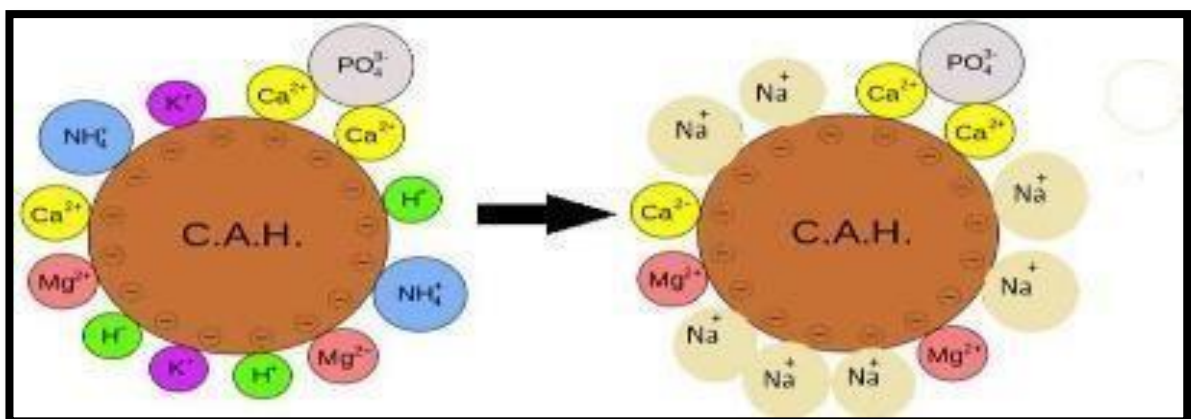


Figure 4. Effet de sodium sur le complexe adsorbant (Madjid N,TiarK.,2012).

6.2. Effet de la salinité sur les propriétés physiques des sols

Lorsque le sodium est présent en quantité importante sur le complexe d'échange, le sol devient instable et acquiert une capacité de gonflement. Ce dernier entraîne une diminution de la porosité et la dispersion conduit au colmatage des pores par les particules colloïdales (**Reguig et Larroussi., 2007**).

La formation de la croûte de battance entraîne une modification de la structure du sol susceptible de se répercuter sur les écoulements des eaux et par la suite elle influence sur le métabolisme et le développement des végétaux. L'humectation rapide du sol provoque la compression de l'air dans les pores fermés et l'éclatement des agrégats et par conséquent l'érosion et l'imperméabilisation des surfaces (**Mimoune., 1995**).

La perméabilité est liée à la texture, à l'état du complexe adsorbant et aussi au taux de matière organique et de calcaire (**Durand, 1954 in Mimoune., 1995**).

7. La texture des sols et la mobilité des sels

(**Ltifi 2008**) a montré que la texture et la structure du sol agissent bien évidemment sur le processus de la salinisation selon son pouvoir drainant. Ainsi, un sol à texture grossière, perméable et bien drainant est très peu affecté par la salinisation, on y rencontre les phénomènes de lixiviation et de migration des sels en profondeur. En revanche, les sols lourds, peu perméables et de texture fine présentent des problèmes d'hydromorphie et de salinisation.

Selon (**Van hoorn 1994**), les sols sableux montrent une vitesse élevée d'écoulement capillaire mais une hauteur limitée de remontée. Les sols argileux montrent une vitesse faible, théoriquement une hauteur considérable de remontée, mais pratiquement assez réduite à cause de fissures qui se forment lors du dessèchement et coupent le système capillaire. Au contraire les sols limoneux, qui ne montrent pas de fissures lors de dessèchement, sont les plus dangereux de point de vue salinisation, puisqu'ils combinent une vitesse capillaire moyenne avec une hauteur élevée.

8. Méthodes de détection et de mesure de la salinité des sols

Le choix d'une méthode d'évaluation de la salinité dépend de plusieurs facteurs tels que le but de la mesure, le nombre d'échantillons, le temps et les possibilités dont nous disposons pour effectuer notre travail. Il existe différentes méthodes pour la mesure de la salinité au niveau des périmètres irrigués :

8.1. La méthode de laboratoire

Elle consiste aux mesures de la conductivité électrique (ou électrochimique) de l'extrait de la pâte saturée ou des extraits aqueux (rapport sol/eau : 1/2, 1/5 et 1/10). C'est une méthode destructive (destruction des sols) lors d'un forage à tarière de plusieurs échantillons.

8.2. Méthodes In situ

Il s'agit de :

La méthode électrique à l'aide d'un capteur de salinité constitué d'une paire d'électrodes incrustées dans un élément de céramique poreux.

La méthode électromagnétique.

Le prélèvement de la solution du sol in situ, est largement répandu lorsqu'on souhaite suivre des évolutions temporelles. Cette méthode non destructrice présente l'avantage d'être proche des conditions réelles du milieu.

9. Classification des sols affectés par la salinité

La salinité du sol est décrite et caractérisée en termes de concentration et de type de sels solubles. Elle est reliée à la conductivité électrique du sol mesurée en decisiemens par mètre (dS.m-1). Selon (USSSL 1954), les sols affectés par les sels sont classés en fonction de la conductivité électrique de leur extrait de pâte saturée (CE dS.m-1) (**tableau 2**), et du pourcentage de sodium échangeable (ESP en %) et de leur pH (**tableau 3**).

Tableau 2. Classes de la salinité en fonction de la conductivité électrique (USSL 1954).

Classe de salinité	CE dS/m
Non salé	<2
Peu salé	2-4
Moyennement salé	4-8
Salé	8-16
Très salé	>16

Tableau 3 . Classes des sols affectés par les sels (USSL, 1954)

Classes	CE (dS.m-1)	ESP (%)	pH
Non salin	<4	<15	<8.5
Salin	>4	<15	<8.5
Sodique	<4	>15	>8.5
Salin-sodique	>4	>15	>8.5

CE = conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

PH = pH de l'extrait de pâte saturée

ESP = pourcentage de sodium échangeable

Cependant, les différents systèmes de classification des sols (CPCS, 1967 ; Soil Taxonomie, 2010 ; WRB, 2006 ; Référentiel Pédologique, 2008), n'accordent pas la même importance à la salinité des sols. Ainsi, selon le concept de base du système de la classification considérée et l'importance accordée à la salinité dans le diagnostic des unités taxonomiques, les sols affectés par les sels se situent à des niveaux hiérarchiques différents.

9.1. La classification française CPCS

La CPCS (1967) accorde une place de choix à la salinité et lui dédie une classe des sols à part entière qui se situe au sommet du niveau hiérarchique de cette classification. (La CPCS 1967) a proposé de les dénommer sols « sodiques ».

On peut y distinguer les sols sodiques à structure non dégradée, et (b) les sols sodiques à structure dégradée. Les sols sodiques inclus dans ce système de classification présentent un schéma d'évolution dominé soit par une richesse en sels solubles dont la CE de l'extrait de pâte saturée est supérieure à 7 mmhos/cm à 25°C dans l'ensemble du profil, soit par la présence de sodium échangeable (et/ou de magnésium) occupant plus de 10% de la CEC, avec l'apparition d'une structure massive, diffuse, et une compacité élevée.

9.2. la classification FAO

La classification de la FAO (WRB, 2006) cite deux groupes de sol affectés par la salinité, le groupe des Solonchaks et celui des Solonetz.

9.2.1. Solonchaks

Ce sont des sols ayant un horizon salic débutant dans les 50 premiers cm de la surface du sol et n'ayant pas d'horizon thionic dans la même profondeur.

9.2.2. Les Solonetz

Ce sont d'autres sols ayant un horizon natric débutant dans les 100 premiers cm de la surface du sol. L'horizon natric est un horizon de subsurface dense dont la teneur en argile est plus élevée que celle de l'horizon sus-jacent, et l'horizon salic est un horizon de surface ou de subsurface contenant un enrichissement secondaire en sels solubles.

Chapitre II

*cartographie de la salinité
des sols*

I. Système d'information géographique

1. Concepts fondamentaux des systèmes d'informations géographiques

Dans cette partie, il nous est apparu utile d'introduire quelques notions essentielles sur les systèmes d'information géographique. Le concept de système d'information géographique (SIG) est apparu dans les années 1960-1970. Depuis ce temps, des définitions plus ou moins similaires et cohérentes ont fait leur apparition. Afin de bien situer le rôle et l'usage d'un SIG, nous allons également en préciser sa définition. Signalons qu'il n'existe pas encore une définition claire et communément admise par l'ensemble de la communauté scientifique. La plupart des définitions citées sont plutôt d'ordre général et couvrent un large spectre de sujets et d'activités.

2. Définition

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace. (**Habert, 2000**)

Un système d'information géographique est aussi un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées.

C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Un système d'information géographique, comme le montre la **figure 5**, est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision. (**SCHOLL, 1996**).



Figure 5 . Composantes d'un SIG (Douaoui et al., 2006)

Un **SIG répond à 5 fonctionnalités** (les 5 A) :

- Abstraction: modélisation de l'information,
- Acquisition: récupérer l'information existante, alimenter le système en données,
- Archivage: stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement,
- Analyse: réponses aux requêtes, coeur même du SIG,
- Affichage: restitution graphique.

En d'autres termes, un SIG est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée.

3. Structure D'un SIG

La **figure 6** met en évidence quatre groupes de fonctionnalités au-dessous d'une couche d'applications: l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la gestion pour le stockage et la recherche des données, l'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation et enfin la présentation des résultats sous forme cartographique.

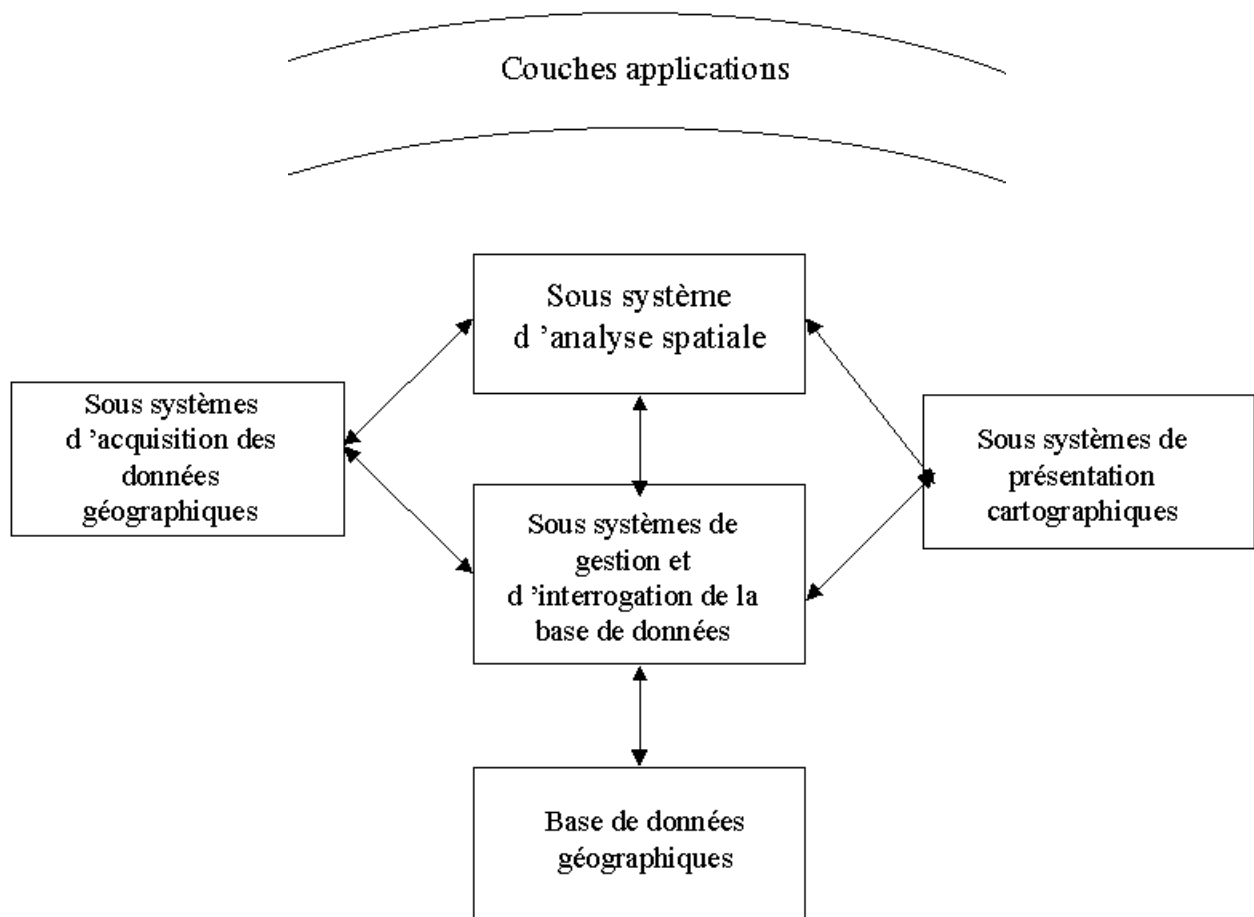


Figure 6. Structure d'un SIG (BENSAÏD, 2006.)

4. Fonctionnalités d'un SIG

Un SIG complet, permettra non seulement de dessiner puis tracer automatiquement le plan, mais en outre :

- De disposer les objets dans un système de référence géographique, de les convertir d'un système à un autre.
- De rapprocher entre elles deux cartes (deux plans) de sources différentes, de faciliter leur superposition comme c'est illustré dans la **figure 7**

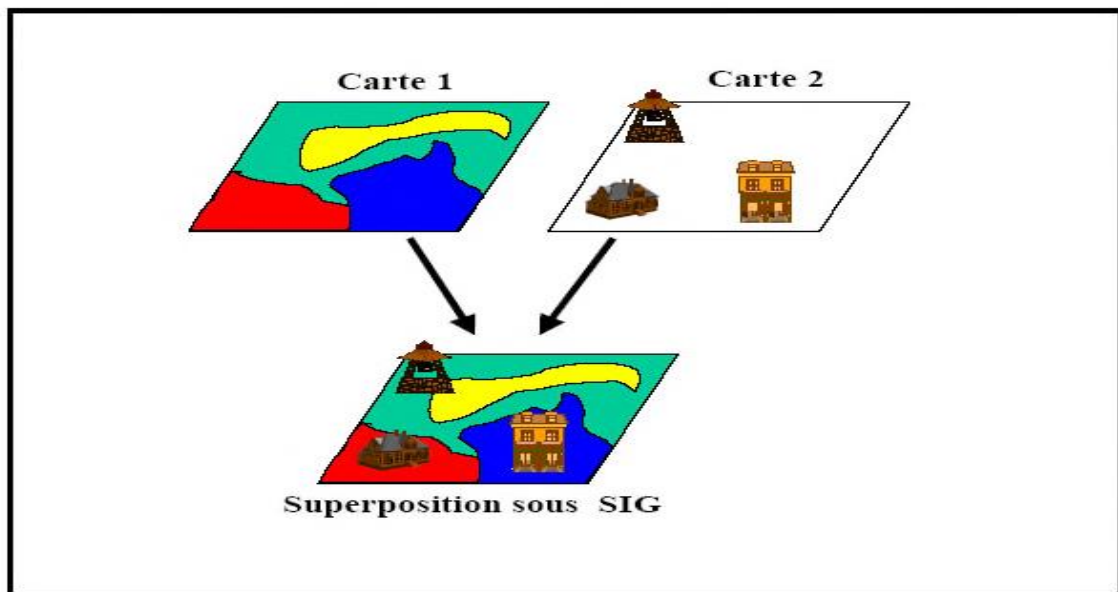


Figure 7. Superposition sous un SIG (HESSAS, 2005)

- De corriger certains contours de la moins fiable en reprenant les coordonnées correspondantes de la plus fiable.
- D'extraire tous les objets géographiques situés à une distance donnée, d'un carrefour, d'une route ou des rives d'un lac.
- D'extraire tous les objets situés dans un périmètre donné comme c'est présenté dans la **Figure 8**
- De fusionner tous les objets ayant une caractéristique commune, par exemple les parcelles adjacentes ayant la même densité de surface bâtie.
- De déterminer, sur un réseau, l'itinéraire le plus court pour aller d'un point à un autre.

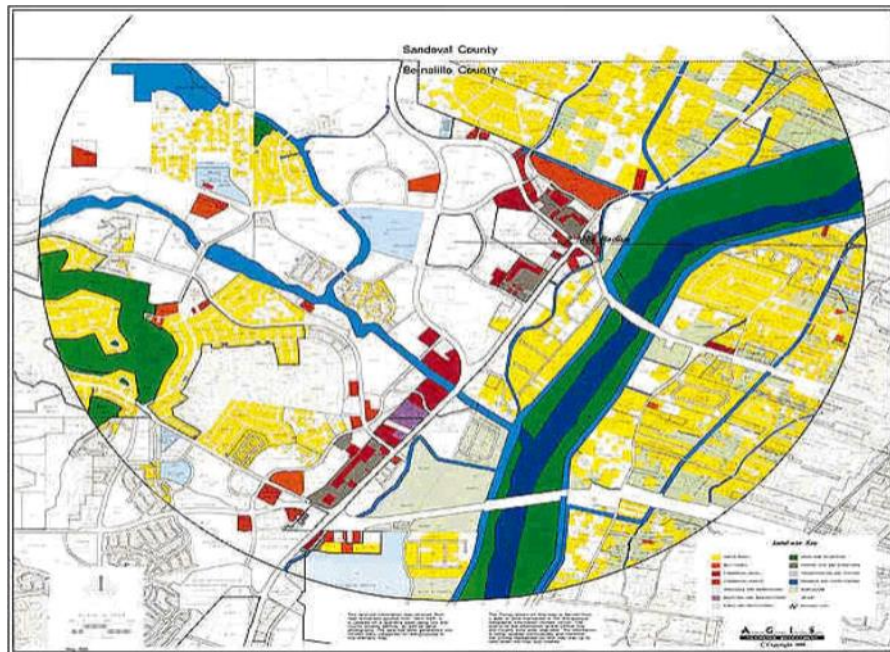


Figure 8 . Exemple de sélection

5. Domaines d'application des SIG

Les approches ont mis en évidence le fait qu'un système d'information géographique est un outil de gestion et d'aide à la décision. C'est un outil de gestion pour le technicien qui doit au quotidien assurer le fonctionnement d'une activité. **(Kergomard, 2004)**

Le SIG doit aussi être un outil d'aide à la décision pour le décideur (directeur, administrateur) qui doit bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions. C'est cette finalité qui permet d'employer le terme de système d'information et de donner aux SIG les domaines d'applications suivants :

Pour les grandes échelles

- La gestion foncière et cadastrale (recensement des propriétés, calcul de surfaces).
- La planification urbaine (plan d'occupation des sols et d'aménagement).
- La gestion des transports (voies de circulations, signalisation routière).
- La gestion des réseaux (assainissement, AEP, gaz, électricité, téléphone ...).
- La gestion du patrimoine (espaces verts, parcs, jardins ...).
- Les applications topographiques (travaux publics et génie civil).

Pour les échelles moyennes et petites

- Les études d'impact (implantation d'un centre commercial ou d'une école)
- Les études d'ingénierie routière (constructions de routes ou d'autoroutes)
- Les applications liées à la sécurité civile (prévention des risques naturels et technologiques).
- La gestion des ressources naturelles (protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques ou hydrographiques).

6. Mise en place d'un SIG

D'une manière générale, la mise en oeuvre d'un SIG peut être faite avec différents logiciels parmi lesquels les quatre suivants constituent les plus utilisés : Geoconcept, ArcView, ArcGis et MapInfo. Tous ces logiciels ont une même vocation : apporter des réponses à la problématique spatiale grâce à des analyses cartographiques ou des thématiques. Les fonctionnalités techniques sont très proches les unes des autres (**Ducrot, 2005**). Ces logiciels s'adaptent à des usages dans les divers domaines, mais leur choix devra être éclairé par :

- son coût dépendant évidemment du budget alloué au projet du SIG.
- l'ergonomie de son interface.
- la nécessité de former les chargés d'études pour sa prise en main.
- ses atouts en termes d'apport de solutions d'analyses.
- les possibilités d'échanges de données.
- la compatibilité de ses supports de données avec d'autres.

II. Intérêt de la télédétection dans le suivi de la salinisation des sols

1. Définition

La télédétection (Remote sensing) est définie comme l'ensemble des outils et de techniques qui assure l'étude à distance des objets grâce à des instruments de mesure. Le Centre Canadien de Télédétection explique: « La télédétection englobe tout le processus

qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.» (<http://www.ccrs.nrcan.qc.ca>). Les instruments de mesure correspondent généralement à des appareils photographiques, des capteurs radars, des capteurs infrarouges...

2. Domaine d'application de télédétection.

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (Météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une Couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière ; par contre la résolution Spatiale n'est pas primordiale pour les applications météorologiques ; En océanographie, la télédétection offre l'avantage de permettre une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Pour Certaines études a petite échelle, les données des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie (températures de surface de l'océan) ; Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées, et le champ des utilisations ne cesse de s'élargir : cartographie, géologie et prospection minière, mais aussi Surveillance des cultures ou du couvert forestier, urbanisme, aménagement, génie civil, etc....

Le traitement de l'imagerie satellitaire numérique est une discipline en constant développement, et la baisse du cout des matériels informatiques a entraine une augmentation rapide du nombre des utilisateurs. (Kergomard, 2004).

3. Processus de télédétection

Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes suivantes (figure 9.):

- Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
- . Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le
- rayonnement interagit avec l'atmosphère.
- Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci.

- Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la
- cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
- Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images.
- Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de
- l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème.

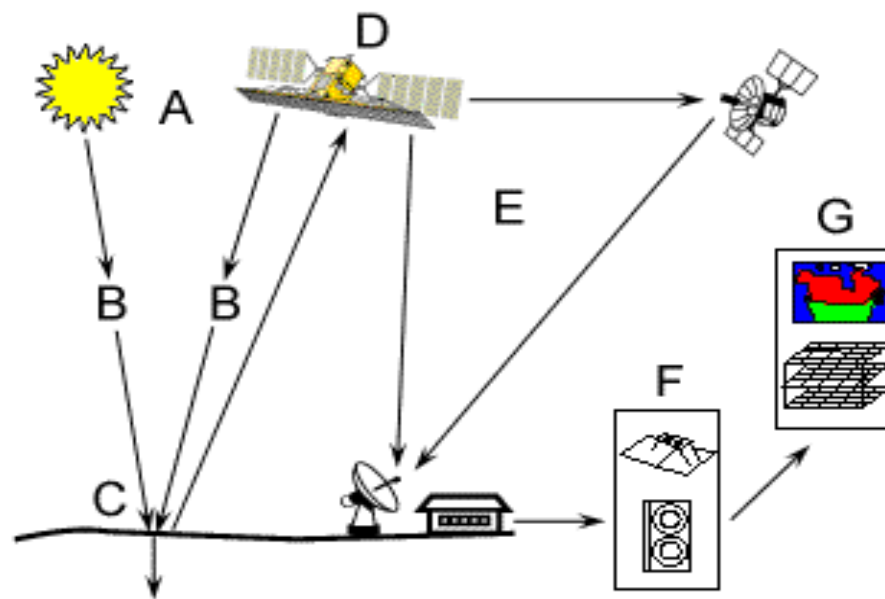


Figure 9. Processus de télédétection (C.C.T, 1999)

4. Principe de la télédétection

La télédétection satellitaire est un outil permettant d'obtenir des renseignements précis en presque tout point du monde , dans les plus brefs délais objectivement, périodiquement et cycliquement, pour être un guide des évènements environnementaux (pollution, brasier de forêts, tremblement de terre, crue, désertification, etc.). Elle est aussi conçue pour être appliquée dans plusieurs domaines comme l'agriculture, la forêt, l'hydrologie et les ressources en eau, les océans, la géologie, la topographie, l'urbanisme, le cadastre, ou même les renseignements stratégiques tel que les objectifs militaires.

Durant la Première Guerre mondiale, la télédétection été utilisée pour distinguer les positions de l'opposant, cette méthode s'est étendue hors du champs militaire devenant l'outil demandé de l'ensemble des aménageurs et de l'ensemble des cartographes du globe. Depuis 1960, les premiers satellites météorologiques sont apparus puis rendus nécessaires pour l'anticipation à court terme; ensuite en 1972 se sont développés les satellites d'observation de la terre de Landsat; par la suite la génération des satellites à haute résolution s'est lancée par le satellite français SPOT en 1986. Des programmes nationaux et internationaux d'observation de la Terre dont nous citons: Landsat, SPOT, RADARSAT, Envisat, SMOS, Sentinel, ont permis d'acquérir des archives importants et variés d'images. Plusieurs efforts ont été menés sur le plan international pour rendre ces archives accessibles aux utilisateurs. De nos jours, il y a une multitude de satellites et de capteurs à haute, moyenne et basse résolution pour observer l'environnement, observer les évolutions spatio-temporelles et pour la modélisation par l'itinéraire de logiciels. Cependant, la définition des unités distinctes de couverture terrestre à l'aide d'images satellitaires de moyenne résolution à l'aide des techniques conventionnelles de classification supervisée, reste un problème majeur.

La stratégie de traitement pour l'extraction de l'information à partir du plusieurs ensembles de données implique généralement la classification d'images.

Les techniques de classification sont basées sur la reconnaissance assistée par ordinateur des éléments de surface à partir de leurs propriétés spectrales caractéristiques dans différentes bandes de longueur d'onde. Pendant l'étude de l'imagerie et lors de la vérification sur le terrain, les zones connues pour représenter les sols salins sont choisies comme zones test. Pour chaque bande utilisée dans la classification, la gamme spectrale

pour chaque classe est estimée à partir des pixels en question. La combinaison de l'information pour diverses bandes donne un histogramme à N dimensions (l'espace caractéristique) dont toutes les classes peuvent être séparées en fonction de leur réponse spectrale. L'étape suivante consiste à donner à l'ordinateur un ensemble de règles pour classer tous les pixels d'une image en comparant leur réponse spectrale dans différentes bandes avec celle des pixels formés. La méthode la plus simple pour ce faire est la classification des boîtes par laquelle les espaces bidimensionnels sont divisés en boîtes rectangulaires. Les limites des cases représentent les plages spectrales des valeurs DN pour les deux bandes à l'intérieur de la zone connue des catégories de surface. La classification par case permet de comparer toutes les pixels inconnus avec les cases ; s'ils tombent dans une case, ils sont affectés à la classe correspondante, s'ils ne tombent dans aucune case, ils restent non classifiés.

La cartographie dans un sol salin à grande échelle est difficile à établir. Le recours à l'analyse d'un nombre important d'échantillons peut mener à une bonne estimation spatiale (Douaoui and Lépinard, 2010).

5. Réponses spectrales de quelques objets

Les différents objets qui existent à la surface réfléchissent et absorbent différentes quantités d'énergie à différentes longueurs d'onde. L'intensité de l'énergie qu'un objet réfléchit ou émet à travers un domaine de longueurs d'onde, désigne le modèle de réponse spectrale de cet objet.

La **figure 10** présente les profils de réponse spectrale de l'eau, de la végétation et des sols secs et humides entre environ 400 et 2500 nm. Le graphique montre que la végétation, par exemple, reflète peu d'énergie dans la bande visible verte (ce qui explique la couleur verte des végétaux). La chlorophylle présente dans les plantes absorbe l'énergie visible (en particulier dans les longueurs d'onde bleues et rouges) à utiliser lors de la photosynthèse. En revanche, le rayonnement proche infrarouge est réfléchi, ce qui caractérise une végétation saine et hydratée. Le sol reflète plus d'énergie, à des longueurs d'onde plus longues, que la végétation.

Les sols humides présentent une forte diminution de réflectance par rapport aux sols secs. L'eau absorbe la plupart des rayonnements entrants sur toute la gamme de longueurs d'onde.

Ainsi, il est possible d'identifier les couvertures des terres (forêts, cultures, sol nu...) tout en se basant sur les modèles des réponses spectrales typiques, dans des images télédétectées, et d'évaluer leur état.

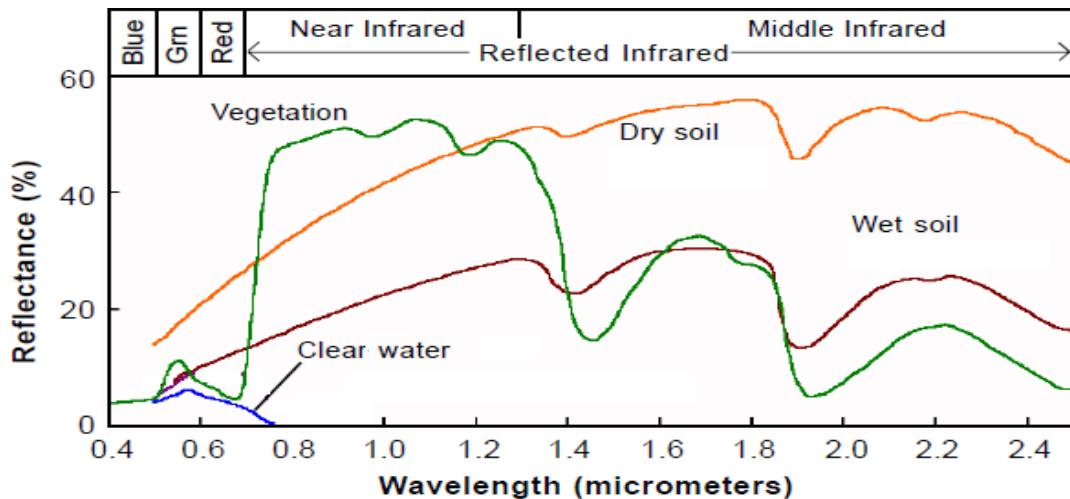


Figure 10. Modèles de réponses spectrales (d'après Daneshgar S. 2105, modifié)

6. Type des capteurs

En télédétection, les capteurs servent à mesurer ou enregistrer le flux d'énergie (appelé encore le signal radiatif) provenant de la surface de la Terre, soit qu'il est émis ou réfléchi par la scène. Ces capteurs sont groupés en trois classes : Les appareils photographiques, les radiomètres passifs ou imageurs et les radiomètres actifs.

6.1. Les appareils photographiques

Ils sont subdivisés en deux types de capteurs photographiques : d'une part, les appareils de production de photographies aériennes pour la cartographie. D'autre part, les caméras multi-bande qui sont formées par une série d'appareils solidaires avec des axes optiques parallèles.

Ce système est équipé de filtres qui permettent de sélectionner une bande étroite du spectre.

6.2. Les capteurs actifs

Ces capteurs sont constitués d'un émetteur (la source du rayonnement) et d'un détecteur qui mesure le rayonnement réfléchi de l'objet observé. Le radar imageur à visée latérale est parmi les capteurs actifs les plus utilisés. Ce dernier permet d'utiliser des longueurs très grandes, entre 0,8 cm et 1 m (pour lesquelles l'atmosphère et les nuages sont complètement transparents) ce qui est en valeur son grand potentiel dans l'acquisition des signaux spectraux.

Les radars sont des capteurs « tous temps », particulièrement intéressants dans les régions du monde où la nébulosité est très fréquente, et pour les applications qui nécessitent d'obtenir des images à des dates et heures bien déterminées.

6.3. Les radiomètres passifs ou imageurs

Ils permettent de mesurer quantitativement le rayonnement. L'image est obtenue par l'acquisition séquentielle des informations radiométriques provenant de la scène étudiée. La répétition de l'acquisition au cours du mouvement du vecteur (avion ou satellite) (balayage) permet la constitution d'une image : l'image est un ensemble de mesures radiométriques organisées en lignes et colonnes.

7. La télédétection pour le suivi de la salinité

La télédétection est le processus de collecte à distance de données relatives à la surface de la terre ou de l'atmosphère, généralement par des capteurs montés soit sur un équipement sol, soit sur un avion ou sur une plateforme de satellite. Selon la bande spectrale, les capteurs collectent l'énergie réfléchie (visible et infrarouge), l'énergie émise (bande thermique), ou bien l'énergie rétro diffusée (onde radar) par une surface de la terre ou de l'atmosphère (Metternicht et al., 2003) .

L'utilisation des données de télédétection est recommandée pour contourner les insuffisances des méthodes classiques. Les avantages apportés par les données de télédétection pour le suivi et la cartographie de la salinité sont résumées ci-dessous :

- Une rapide et large couverture du sol avec un passage (quelques jours généralement) régulier du satellite sur les terrains d'étude.

- Exploitation de données de télédétection dans les SIG (Système d'Information Géographique) pour d'autres analyses et comparaisons de données.
- Les capteurs utilisés en télédétection sont de plus en plus performants et la disponibilité d'une multitude de bandes permettent une meilleure discrimination spectrale des objets au sol.
- La salinité peut être cartographiée par deux méthodes : l'une directe exploitant la réflectance du sol nu ou de la croûte saline, l'autre exploitant les caractéristiques biophysiques du couvert végétal à travers des modèles.
- Les sols salins avec des efflorescences de sel en surface sont faciles à cartographier par télédétection et sont considérés des sols fortement salins.
- Le type de végétation et son état sont facilement reconnus par imagerie satellitaire. Ces deux caractéristiques peuvent être exploitées pour identifier l'ampleur de la salinité du sol. Ces surfaces sont généralement modérément ou faiblement salines.

Les données de télédétection exploitées pour la cartographie de la salinité du sol sont de plusieurs natures. Chaque type de données peut répondre plus ou moins aux résultats souhaités.

Plusieurs travaux de recherche font appel à la télédétection pour évaluer et superviser le phénomène de salinisation des sols.

Chapitre III

Synthèse et évaluation des
méthodes de télédétection
utilisées dans l'étude de la
salinité du sol

1. Techniques de télédétection passive et active

Il existe deux grands domaines dans la télédétection : la télédétection passive capte des rayonnements émis naturellement par le milieu ausculté, et la télédétection active émet le rayonnement à la source de la mesure.

1.1. Techniques de télédétection passive

La télédétection aérospatiale est dite passive lorsqu'on utilise une source de rayonnement externe au système d'observation (généralement le soleil), à l'opposé la télédétection active, dans laquelle on est maître de la source de rayonnement qui est générée par le système. La télédétection optique passive utilise les rayonnements réfléchis ou émis par les objets détectés. L'acquisition dans plusieurs bandes, ou intervalles de longueurs d'onde, permet d'identifier les objets par l'étude de leur signature spectrale. Pour plus d'informations sur les bases physiques de la télédétection, on se référera aux manuels de **(Bonn & al. 1993)**. Les techniques se résument en :

1.1.1. Techniques des indices spectraux

Le potentiel de la télédétection permet d'identifier la salinité du sol en utilisant la télédétection multi spectrale. La large résolution spectrale des données TM de Landsat et l'utilisation des techniques traditionnelles de classification a montré des sérieux limites pour la caractérisation de la salinité des sols (**Fraser & Josef , 1998**). Avec l'avènement du capteur Landsat ETM+, la résolution spatiale a été améliorée à 30 mètre (28.5 mètres rééchantillonnée à 30 mètres) par rapport à 90 mètres pour MSS. L'auteur **(Hashem, 1997)** a travaillé sur la salinité et la sodicité dans les régions agricoles en Égypte. A la suite d'une comparaison temporelle entre les capteurs HRV de SPOT et TM de Landsat, il remarque qu'une confusion spectrale peut survenir entre les régions désertifiées et les régions salines.

Les auteurs **(G. Metternicht, 1997)** ont réussi à obtenir une précision de discrimination entre les sols salins et non salins de 64%, mais ils ont conclu qu'une confusion spectrale peut être causée par la proximité des classes. Il est plus facile de

différencier les sols salins et sodiques des sols non affectés, mais des difficultés s'imposent quant à la discrimination des sols à différents niveaux de salinité (**G. I. Metternicht et J. A. Zinck, 2003**). Dans le même sens, (**K. Verma , 1994**) ont cartographié la salinité dans certaines régions de l'Inde avec le capteur TM, et il conclut que les terrains en jachère peuvent refléter de façon similaire aux sols salins. (**Mougenot B, 1993**) ont identifié la salinité par l'intermédiaire de la végétation, mais ils concluent que les estimés précis sont difficiles sans la thermique pour l'identification de la salinité.

La thermique semble pouvoir préciser les confusions spectrales quant à l'identification de la salinité, c'est la raison pour laquelle on a utilisé l'indice NDWI pour une meilleure discrimination des sols salins dans le chapitre application.

D'autres études ont été faites en utilisant le stress des plantes et les indices de végétation pour localiser les régions salines (**Zuluaga, 1990. ; Vidal A, 1996 ; Vincent B, 1996.**)

Il a été observé que l'infrarouge est la région du spectre électromagnétique qui produit des résultats pour différencier les sols les plus salins des sols non salins. (**Mougenot B, 1993**) ont confirmé que l'inclusion de l'infrarouge peut augmenter la précision de l'analyse et de la discrimination de la salinité et la sodicité. D'autres études ont analysées au laboratoire, les facteurs qui influencent les signatures spectrales de différents types de croutes salines (**Howari F, 2002**).

Différents indices spectraux en relation avec l'étude de salinisation des sols ont été utilisés dans les approches de cartographie numérique des sols affectés par la salinité. On pourra citer à titre d'exemple les indices spectraux multi canaux selon **le tableau 4** Les indices calculés en termes de réflectance au sol par les capteurs Landsat ETM+ Landsat 8 OLI/TIRS, EO-1 ALI et Hyperion ainsi que les capteurs ASTER ont été spatialisés et intégrés pour la classification dirigée et non dirigée, à la détermination des paramètres biophysiques (température de surface, chaleur latente, etc.)

Tableau 4. Indices spectraux multi canaux pour l'étude de la salinité

Indices/Paramètres	Abréviation	Formules	Références
Salinity Index = Indice de salinité	SI	$(B \cdot R)^{0.5} SI = (canal_Vert - canal_Rouge) / Bleu$	Khan , 2005.
Brightness Index = Indice de brillance des sols	BI	$\frac{\sqrt{B^2 + G^2 + R^2}}{3}$	Mathieu , 1998.
Wetness Index = Indice d'humidité	WI	$0.2626B + 0.2141G + 0.0926R + 0.0656IR - 0.763SWIR - 0.539SWIR$	Z. Huang, 2002.
Normalized Differential Salinity Index =Indice de Salinité Normalisé	NDSI	$(R - NIR) / (R + NIR)$	Khan , 2005.
Normalized Differential Vegetation Index =Indice de Végétation Normalisé	NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$	Rouse, 1973
Combined Spectral Response Index =Indice de Reponse Spectrale Combiné	COSRI	$[(B + G) / (R + NIR)] \cdot NDVI$	Fernandez-Buces, 2006.
Albedo = Albédo de surface	A	$\alpha_{short} = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018$	Tao He , 2013
Soil Salinity Index 2 pour EO-1 HyperSoil Salinity Index 1 pour EO-1 Hyper	SSI2 SSI1	$SSI2 = (Band\ 223 - Band\ 42) / (Band\ 223 + Band\ 42)$ $SSI1 = (Band\ 219 - Band\ 41) / (Band\ 219 + Band\ 41)$	Reza Sokouti Oskoe , 2017.
Salinity and Water Stress Index 1 Salinity and Water Stress Index 2 Salinity and Water Stress Index 3	SWSI1 SWSI2 SWSI3	$SWSI1 = (Bande_{0.803} - Bande_{0.681}) / \sqrt{(Bande_{0.905} + Bande_{0.972})}$ $SWSI2 = (Bande_{0.803} - Bande_{0.681}) / \sqrt{(Bande_{1.326} + Bande_{1.507})}$ $SWSI2 = (Bande_{0.803} - Bande_{0.681}) / \sqrt{(Bande_{0.972} + Bande_{1.174})}$	Reza Sokouti Oskoe , 2017.

1.1.2. Techniques des indices spectraux combinés

Ce sont des techniques très utilisées pour segmenter les zones affectées par la salinité. Elles se basent sur les produits de convolution entre les bandes spectrales, la substitution des canaux les plus de poids ou apportant une information nouvelle comme les transformations orthogonales des bandes spectrales (Transformation RGB vers IHS avec un canal radar).

(Csillag F., 1993) ont comparés deux types de sols pour voir l'effet de la sodicité et de la salinité sur les réflectances. Ils ont fait des analyses au laboratoire afin de trouver les bandes spectrales les plus propices à l'identification de la salinité.

En outre, (Chapman J.E., 1989. et Drake N, 1995) décrivent les dispositifs d'absorption spectrale de différents sels de sols agricoles.

(Crowley J.K, 1991) a montré que beaucoup de minerais salins montrent les bandes d'absorption notamment dans le proche infrarouge (PIR) et que cette région spectrale peut être exploitée pour détecter les hydrates dans les mélanges de minéraux dominés par le chlorure de sodium. (Hunt G.R., 1971) ont mis en évidence les bandes d'absorption du gypse à environ 1000, 1200, 1400, 1600, 1740, 1900 et 2200 nm.

Différents chlorures hydratés, sulfates du sodium, potassium, calcium et le magnésium montrent également ces bandes d'absorptions mais avec des petites variations des pics d'absorptions à cause de la concentration et de la manière dont l'eau est retenue dans les minéraux. En utilisant des données de réflectances mesurées au sol, (Bannari A., 2008) ont démontré que la région du SWIR (capteur ASTER) est la plus sensible que les autres longueurs d'ondes aux différents degrés de salinité et de sodicité, notamment faibles et moyennes.

Par ailleurs, dans la littérature, différents indices spectraux ont été proposés pour la détection et l'identification des sols salins. (Khan., 2005) ont proposés trois indices spectraux pour l'identification de la salinité au Pakistan en utilisant le capteur LISS-II sur la plateforme IRS- 1B, soient : le Brightness index (BI), le Normalized Difference Salinity

Index (NDSI) et le Salinity Index (SI). Parmi ces trois indices, ces chercheurs ont trouvé que le NDSI montre plus de succès dans l'extraction des différentes classes de la salinité. Selon (**Al-Khaier ., 2003**) , l'indice de salinité ASTER-SI qui utilise les bandes 4 et 5 du capteur ASTER, détecte avec précision le phénomène de la salinité des terres agricoles irriguées dans un environnement semi-aride en Syrie. Dans le cadre d'un projet de coopération entre l'Inde et la Norvège, une méthodologie a été proposée pour la cartographie de la salinité et de la sodicité des sols en utilisant le capteur TM de Landsat et les SIG. Après analyse de différentes techniques de la télédétection, ce projet recommandait trois différents indices de salinité (Salinity Index : SI) : SI-1, SI-2 et SI-3. En explorant la région spectrale du SWIR, Bannari a proposé deux indices : Soils Salinity and Sodicty Indices (SSSI-1 et SSSI-2). Il est très probable que ces indices peuvent augmenter la précision d'identification des zones à faibles et à moyennes salinité et sodicité en utilisant les données images acquises par le capteur ALI sur la plateforme satellitaire "(EO-1)".

Cette recherche vise à étudier le potentiel du capteur ALI-EO-1 pour l'identification et la cartographie de la salinité et la sodicité, faibles et modérées, du périmètre irrigué de la plaine du Tadla au Maroc. Dans cette région du bassin méditerranéen sud, le problème de la salinité, bien qu'étant moins contraignant qu'en milieu aride, est néanmoins notable. Par exemple, 10 à 15% des terres sont atteintes au Maroc (**Dehaan R.L & Taylor G.R , 2002**) . La grande variété des sels essentiellement les évaporites est due à la diversité et à l'instabilité des conditions climatiques ayant contribué à leur formation. D'autres facteurs interviennent telles que la chimie de surface et la chimie des eaux souterraines, l'acidité et la basicité du milieu (**A. Jankowski , 1997**) .

1.1.3. Techniques de détection de la salinité par l'infrarouge thermique

Il a été démontré que les signatures spectrales du sel subissent des confusions radiométriques entre les échantillons salins et non salins. Néanmoins, cette situation a été grandement améliorée en incorporant la bande thermique (10,40 - 12,50 μm) (ETM+6) comme suggéré par (**K. Verma, 1994**) . Depuis les sols étaient supposés être sec au

moment de la collecte, l'émittance dans la bande thermique et de réflexion dans l'infrarouge ont été censés être limitée par l'absorption d'énergie de la minéralogie de sel (sulfates, phosphates, chlorures), et moins par l'humidité du sol (**Metternicht et Zinck , 1997**). Bien que ce soit une représentation collective ou la moyenne des signatures utilisées, il est évident qu'il y'a un pic dans les bandes thermiques. Compte tenu de ces conditions, il a été pensé d'utiliser ce contraste, et d'effectuer la classification avec tout l'éventail des bandes, plutôt que juste l'aide des six bandes standards. En outre, la probabilité d'un pixel étant affecté à la classe saline a été obtenu pendant le processus de classification afin de l'utiliser comme un facteur de pondération dans la superposition de toutes les couches durant le processus de modélisation. L'image classifiée est superposée sur l'image de probabilité, et reclassés en catégories :

Saline niveau 1 : Entre 0% – 20%

Saline niveau 2 : Entre 21% – 40%

Saline niveau 3 : Entre 41% – 60%

Saline niveau 4 : Entre 61% – 80%

Saline niveau 5 : Entre 81% – 100%.

1.1.4. Techniques de détection de la salinité par classification spectrale

Elles ont été développées spécifiquement pour l'usage sur des données hyperspectrales, mais fournissent une méthode alternative pour classier des données multispectrales, souvent en résultats améliorés qui peuvent facilement être comparés aux propriétés spectrales des matériaux. Elles emploient la collection d'Endmember en utilisant l'image ou des spectres de la bibliothèque spectrale. Ces méthodes spectrales ont toujours besoin de définir les endmembers et cela se fait à partir de différents fichiers: ASCII, région d'intérêt (ROI), les bibliothèques spectrales ou bien des dossiers de statistiques. Les méthodes de classification spectrale sont résumées comme suit:

1.1.4.1. Classification de codage binaire

Ce type de classification code les données et les spectres d'endmember (0 ou 1) basés si une bande spectrale est identifiée au-dessus du moyen de spectre (continuum). Une fonction exclusivité « ou » est employée pour comparer chaque spectre codé de référence aux spectres codés de données (cible) et à une image de classification produit. Tous les Pixel sont classifiés à l'endmember avec le plus grand nombre de bandes qui s'assortissent à moins que l'utilisateur indique un seuil minimum de classification, dans ce cas quelques Pixel peuvent être non classifiés s'ils ne répondent pas aux critères.

1.1.4.2. Classification de d'angle spectral SAM

C'est une classification spectrale de base physique qui emploie l'angle de dimension N entre le spectre de pixel à identifier et celui de référence (cible, endmembers). C'est une méthode automatisée pour comparer des spectres d'image à différents spectres de la bibliothèque spectrale (**J. BOARDMAN, 1995**).

L'attribution d'un pixel à un thème donné se base sur la mesure de l'angle entre le vecteur du spectre de référence et celui de chaque vecteur dans l'image. Plus l'angle est petit, plus la similarité entre le spectre du pixel évalué et la référence est grande. Ainsi, le pixel sera affecté à la classe du pôle spectral avec lequel il a le plus petit écart angulaire. Cette mesure est peu sensible aux variations de l'éclairement dont l'augmentation ou la diminution n'affecte pas la direction du vecteur, mais plutôt son amplitude (**Hassani. M. I, 1987**). Un mauvais choix de l'angle (α) peut engendrer un nombre minimal de classes, soit des confusions non souhaitables et un nombre maximal de pixels non classés.

1.1.4.3. Classification à base de règle « BR »

C'est une classification spectrale de base physique qui emploie un automate de comparaison des profils spectraux des pixels cibles et les pixels inconnus suivant des bases de règles que doit respecter ces derniers afin d'être affectés à des classes données. C'est une méthode automatisée pour comparer des spectres d'image à différents spectres de la bibliothèque spectrale. Cette méthode est inspirée des travaux de recherche du laboratoire LAAR – USTO-MB, par l'exploitation du logiciel de développement PCSATWIN (**Laoufi F., 2011**).

1.2. Techniques de télédétection active

1.2.1. Techniques de fusion radar - télédétection radar de la salinité

Les techniques de fusion (Merging) des images satellitaires et radar offre la possibilité de mettre en en relief l'information complémentaire et utile en remplaçant par exemple le canal ACP3 du canal optique par celui du radar. En d'autres termes, on pourrait faire une transformation orthogonale des images Landsat ETM+ de type composition colorée RGB en IHS (Intensité, Hue (teinte), Saturation) en inversant le retour depuis un espace colorimétrique euclidien en espace colorimétrique sphérique (nouveaux axes avec les coefficients de régression exprimant l'angle de rotation des droites de régressions (droite des sols)).

1.2.2. Techniques électromagnétiques en domaine fréquentiel

Les techniques conventionnelles pour identifier et surveiller la salinité des terres sont basées sur la mesure des niveaux d'eau dans les forages, des mesures géophysiques, des mesures des propriétés électriques de sol et l'identification visuelle (**Ben Dor, 1995**).

La méthode Electromagnétique en Domaine Fréquentiel (FDEM) est largement utilisée pour cartographier et diagnostiquer les couvertures pédologiques très conductrices comme celles des sols salés (**Clark, 1997**).

La conductivité électrique apparente (CEa) mesurée correspond à un volume de sol donné qui dépend des caractéristiques de l'appareil de mesure (longueur, fréquence de l'onde électromagnétique émise), de son mode d'utilisation (dipôle émetteur-récepteur vertical ou horizontal, réponse non uniforme avec la profondeur) et des caractéristiques physico-chimiques du sol (teneurs en eau et en argile, minéralisation de la solution du sol, compacité...) (**McNeill J.D, 1980**). CEa

Généralement, utilisées en valeurs relatives, les mesures de CEa peuvent être calibrées par rapport à une méthode d'extraction de la solution du sol et de mesure de la CE au laboratoire (**Leblanc, 2000**). Cette calibration entraîne des biais dus à l'échantillonnage in situ et aux variations de teneur en eau et de texture dans le volume de sol exploré par la méthode électromagnétique (**Van der Lelij, 1989**).

Pour évaluer la représentativité spatiale des sols, une approche géophysique complémentaire serait intéressante dont l'objectif est de tester la méthode EM pour deux appareils en domaine fréquentiel et de caractériser la distribution spatiale des taches salines sur un terroir donné. L'appareil de mesure EM38 est utilisé pour cartographier un périmètre d'environ 1,5 ha. Les mesures sont faites, en mode vertical, l'espacement entre les mesures de CEa étant de 2 m. Le choix de la période de mensuration est lié aux conditions climatiques. Les mesures sont exprimées en Ms/m.

Par ailleurs, l'EM38, a le défaut d'être très sensible aux variations diurnes de la température de l'air et du sol, et nécessite donc, une calibration dans l'air fréquente pour limiter la dérive instrumentale des lectures. Par conséquent, l'appareil de mesure CS60 est utilisé en mode vertical et horizontal, pour cartographier deux parcelles et lever deux transects perpendiculaires (nord-sud, A-B et est-ouest, C-D), selon un espacement des mesures de 2 m. Les lectures sont organisées par une correspondance à la phase qui, multipliée par $4,77 \cdot 10^{-5}$, donnant la susceptibilité magnétique (en unités SI). L'autre correspond à la quadrature, qui donne une valeur de CEa au moyen d'une calibration théorique et expérimentale.

Cependant, des calibrations régulières sont réalisées pour contrôler d'éventuelle dérive instrumentale selon les caractéristiques des appareils (**Tableau 5**). Les deux appareils témoignent généralement une bonne sensibilité aux variations de la salinité du sol. Les mesures de CEa délimitent des taches salines qui correspondent bien à celles observées en surface par la précipitation de sels. C'est notamment le cas lorsque le sol est saturé en saison des pluies. On conclut que la méthode électromagnétique en mode fréquentiel (FDEM) est généralement bien adaptée aux couvertures de sols salés. On remarquera que les gammes de variations de la CEa sont différentes selon l'appareil utilisé, probablement à cause de leur calibration.

Tableau 5. Principales caractéristiques des appareils FDEM

Types d'appareils	EM38	CS60
Espacement inter-bobines (émetteur – récepteur)	1 mètre	0.6 mètres
Fréquences	14.6 khz	27.96 khz
Profondeur de sol explorée (Mode vertical/horizontal)	1 à 1.5 mètres	0.6 à 0.9 mètres

1.2.2.1. Méthodes électromagnétiques

Les méthodes électromagnétiques se résument en :

1.2.2.1.1. Méthodes de l'induction électromagnétique

Les méthodes d'induction électromagnétique permettent de caractériser la conductivité électrique des matériaux, dont les corps planétaires telluriques, depuis les couches superficielles de la croûte jusqu'aux zones les plus internes, dans le manteau inférieur. Pour une source de champ électromagnétique donnée, des courants sont induits dans les matériaux qui y sont soumis. La profondeur de pénétration des champs dans les matériaux dépend de la conductivité électrique du milieu et de la fréquence. De longues séries temporelles permettent de caractériser la conductivité électrique à de grandes profondeurs. À la surface de la Terre, les données satellites couvrent uniformément la planète, apportant une observation globale de la conductivité électrique de la planète à travers l'étude des champs magnétiques transitoires.

Des nouvelles méthodes sont utilisées par les données magnétiques satellitaires pour la détermination de la conductivité électrique, sans imposer de géométrie a priori de la source externe inductrice, afin de l'appliquer sur n'importe quel corps planétaire.

La présence de ces lacunes est le problème principal du traitement des données magnétiquestatellites pour l'induction électromagnétique. Ce problème est généralement

traité en interpolant les données manquantes, et parfois sur de longues périodes, menant à un échantillonnage temporel supérieur à 1 jour. La méthode d'induction électromagnétique globale à partir des données satellitaires apparaît comme un outil nouveau et efficace pour mener des études sur la structure interne électrique des planètes telluriques (**De Jong, 1979.**)

1.2.2.2. Méthodes de tomographie de résistivité électrique (ERT)

C'est une méthode de mesure indirecte de la salinité des sols. Elle se base sur deux techniques:

- Distribution 2D (section) de résistivité du sous-sol.
- Distribution 3D (volume) de résistivité du sous-sol.

La tomographie de résistivité électrique (ERT) est une méthode courante géophysique de terrain souvent utilisée pour détecter l'évolution de polluants en zone saturée, la détection des cavités (porosité des terrains), en archéologie et le domaine de la salinité des sols. L'ERT par la méthode des sondages électriques long (profondeur d'investigation jusqu'à 1000 m) est cependant une méthode intégratrice dont la fiabilité des modèles est confrontée aux problèmes de non unicité des solutions du problème inverse. Ces contraintes limitent l'interprétation des modèles à un aspect qualitatif de la distribution des contrastes de résistivité modélisés en 2D ou 3D, résultant du choix des paramètres d'inversion et de l'association de paramètres du milieu non identifiables à l'échelle du volume poreux. L'interprétation des résultats est délicate car elle est basée sur les cartes de résistivité inversées: les hypothèses d'inversion ne tiennent généralement compte que de la répartition 2D des matériaux alors que les mesures englobent le demi-volume sous la surface. Un jeu de test géophysique est réalisé sur l'aquifère de Mléta pour la cartographie tridimensionnelle des gisements salins (géovolume en sels).

Si le sol est hétérogène, on obtient une résistivité apparente, correspondant à la résistivité d'un terrain homogène équivalent. Cette méthode est souvent confrontée au problème de l'intercalation de couches parasites trop conductrices ou trop résistantes qui aura tendance à canaliser les filets de courants et ne pas donner d'information sur les formations sous-jacentes. C'est le concept de double couche diffuse qui fait appel aux

rapports de mélange des matériaux contenant l'électrolyte sous l'influence d'un champ électrique externe, ou les ions se polarisent et donnent une grande permittivité diélectrique ainsi que des pertes diélectriques jusqu'au Mega hertz. On note aussi, que la réponse diélectrique (permittivité) est très sensible à la teneur en eau des argiles puisqu'elle discrimine l'eau libre et l'eau liée adsorbée. Par exemple l'argile est un minéral complexe car pour une argile simple de type Kaolinite est dit non gonflant donc sa conductivité est désormais faible par contre une argile complexe (Montmorillonite) aura une conductivité élevée. Ces relations sont étudiées dans la littérature par divers auteurs dont la loi d'Archie des résistivités (relation entre la conductivité de la roche et celle du fluide). Un jeu de données pétrophysiques (test de diagraphie) a été réalisé sur un aquifère géothermique profond au niveau du Sud Algérien pour déceler le signal salin (loi d'Archie) .

1.2.2.2.1. Méthode de la prospection géophysique électrique

C'est une méthode sensible aux changements lithologiques et à la distribution 3D de la salinité. Elle présente l'inconvénient de non unicité des résultats (problèmes d'inversion). Par contre, elle est utilisée pour la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères et se base sur le développement des modèles numériques selon les étapes suivantes:

- Discrétisation: Définition du maillage 2D ou 3D ainsi que le pas de temps.
- Paramétrage :
- Extraction des paramètres du milieu aquifère (perméabilité, emmagasinement, débits),
- Conditions aux limites: Recharge (infiltration efficace), ETP, niveau et salinité des sols, prélèvement par puits, etc.).
- Simulation: Calculs couplés de pression et de vitesse de pores, ainsi que les concentrations en sel.
- Calibration/Validation: Comparaison avec les données piézométriques et de salinité.

Dans la méthode de prospection géophysique électrique, les problèmes d'effets densitaires sont liés au sel, qui peuvent opposer les écoulements aux gradients calculés en équivalent d'eau douce sachant que les données de salinité sont souvent insuffisantes et limitées aux mesures en forage et eaux de surface, surtout en zone de transition eau douce et eau salée (structure complexe) dont les forts gradients sont localisés sous forme de remontée conique.

1.2.2.2. Méthodes électriques

Les méthodes électriques ont une profondeur d'investigation qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Mais l'interprétation est délicate. Le choix des méthodes géophysiques à adopter s'appuie également, sur d'autres considérations liées aux informations et expériences acquises des zones avoisinantes ou banque de données (géologiques, géomorphologiques, forages, etc.).

Les méthodes électriques ne donnent pas de très bons résultats à proximité des lignes de haute tension, des canalisations métalliques. En effet la présence de conducteur dans le sol focalise le courant électrique et empêche par conséquent la progression des lignes de courant dans le milieu. A titre d'exemple, la salinité de surface sous forme de croûtes salines avec une épaisseur importante donne de fausses valeurs de résistivité lorsque le sol est à sec et la détection des cavités souterraines est impossible en présence de matériaux géologiques conducteurs tels que l'argile.

2. Cartographie de la distribution spatiale des sols salés

La détection de la dynamique spatio-temporelle de la salinité des sols à l'aide des données de la télédétection était d'un grand avantage dans l'établissement des cartes de la salinité des sols. Plusieurs approches et thématiques basées sur la géostatistique et les SIG ont été développées (**Khan et al, 2001 ; El-Khaier, 2003 ; Shrestha, 2006 ; Douaoui et Lépinard, 2010**) dont l'objectif est d'améliorer la surveillance de la salinisation sur des échelles régionales et locales. La cartographie de la salinité a été premièrement reconnue par les travaux de **Boulaine 1957**. L'approche fondée sur l'application de la géostatistique

avec les divers types de krigeage (Douaoui, 2005 ; Amokrane, 2010 ; Douaoui et Lépinard, 2010 ; Douaoui et Yahiaoui., 2015) a des améliorations dans la cartographie de la salinité en qualité et en superficie. L'interpolation par le krigeage d'indicateurs et la régression krigeage, respectivement par le calcul de l'espérance mathématique et le prise en compte d'une variable auxiliaire, a permis d'avoir des superficies plus importantes aux valeurs de CE élevée et réduire ainsi les sous estimations des superficies salées.

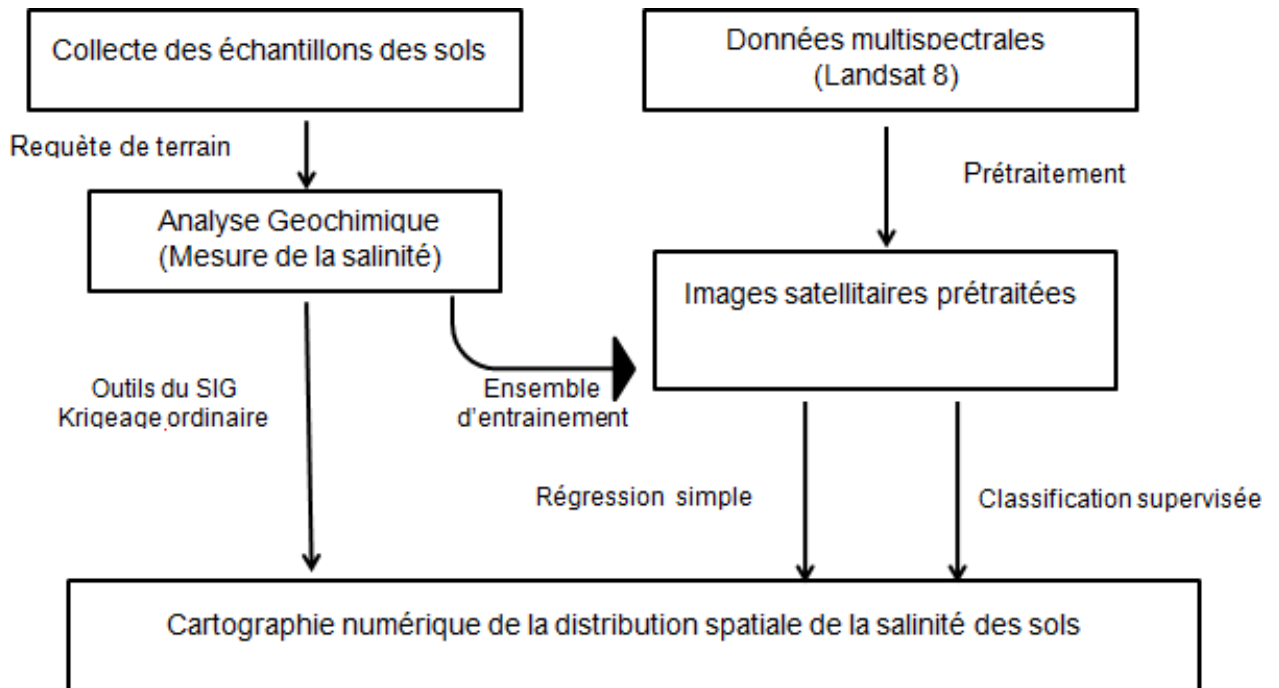


Figure 11 . La démarche méthodologique pour cartographier les différentes classes de salinité des sols.

3. Méthodes hydro-chimiques pour la l'estimation de la salinité du sol

L'hydrochimie réside en la connaissance des caractéristiques chimiques ou physico-chimiques des eaux souterraines, des processus de leur acquisition et des lois qui régissent les échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol. Par conséquent, la salinité est difficilement mesurée par analyse chimique directe (problème de séchage, passage aux résidus secs).

La salinité de l'eau d'irrigation est habituellement mesurée par le TDS ou CE (Conductivité Electrique). Cette dernière est fonction de la garniture ionique de l'extrait de

lapâte saturée. Plusieurs relations ont été proposées pour estimer la CE à partir des mesures de concentrations des éléments en solutions.

4. Technique de cartographie intégration multi-sources

Plusieurs méthodes de gestion des sols affectés par la salinité existent, on pourra à titre d'exemple en citer celles qui utilisent les techniques de pondération pour les variables qui influent sur la spatialisation des sols affectés par la salinité. La **figure 12** illustre les différentes étapes de la méthodologie d'évaluation des sols salins issus d'un travail de synthèse selon nos propres préoccupations ou seuils de perception. L'intégration des zones d'émergence et de convergence ou les sels s'accumulent en surface surtout lorsque le sol devient sec.

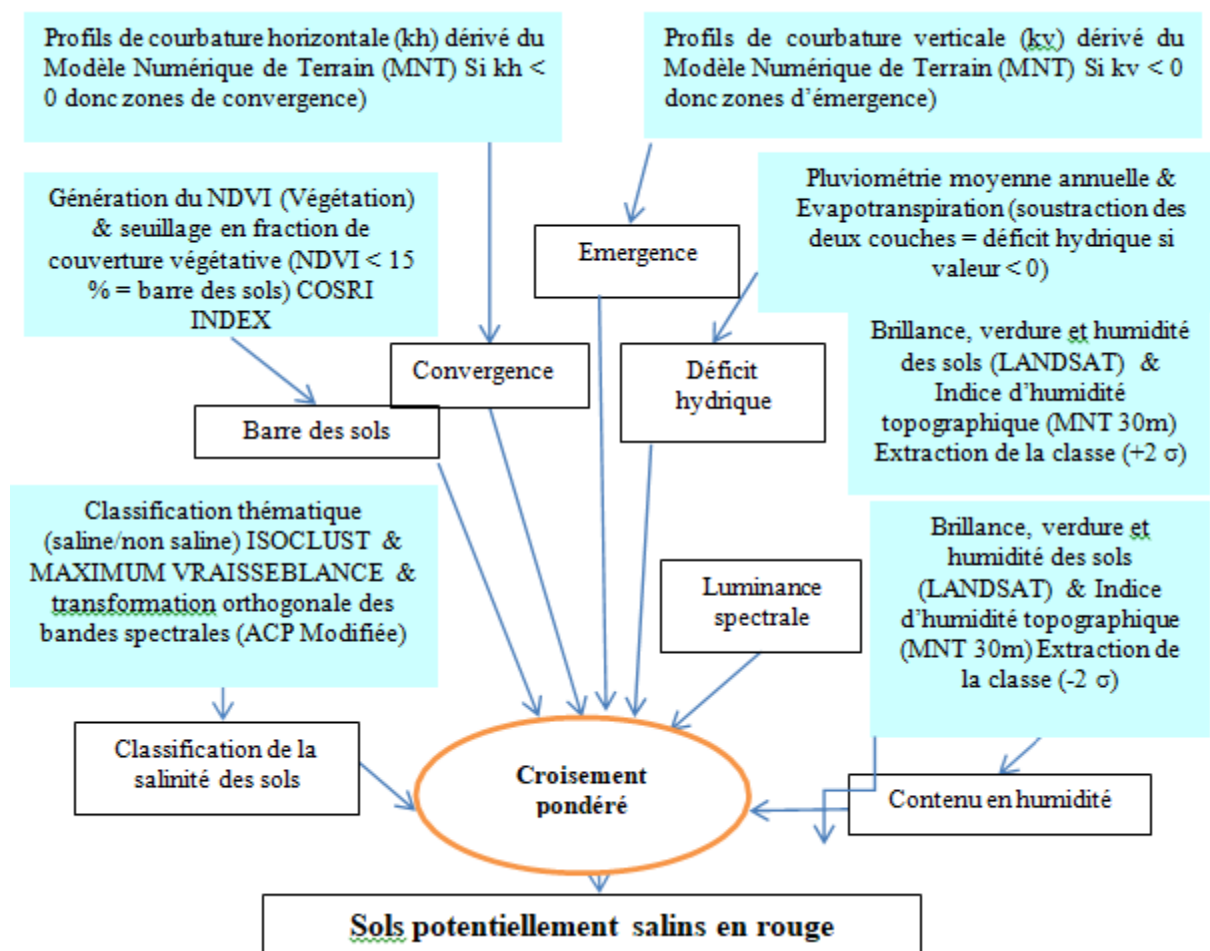


Figure 12. Organigramme d'évaluation des sols salins (Miller & al 1990)

4.1. Approche géostatistique et analyse variographique

Toute étude géostatistique doit obéir aux notions fondamentales du variogramme. Ce dernier est défini généralement comme étant un outil descriptif puissant utilisable dans une multitude de domaines de recherche tels que la cartographie de la salinité des sols en

particulier. Il est défini:

$$\gamma(\theta, h) = \frac{1}{2 \cdot N(\theta, h)} \sum_1^{N(\theta, h)} [(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2]$$

Avec : (θ, h) nombre de paires séparées de h dans la direction θ . La détermination de la covarianance entre deux points en distance par modélisation du variogramme expérimental.

L'adaptation de ce dernier décrit bien le degré d'irrégularité de surface par les expressions analytiques que l'on tente d'ajuster le mieux possible aux points de variogramme expérimentaux dont on se base sur les valeurs obtenues du modèle utilisé et non pas des valeurs d'origines. On note généralement deux types d'anisotropie à savoir :

4.1.1. Anisotropie géométrique

Elle sert à la détection des directions des portées maximales (a_g) et minimales (a_p) du variogramme et des composantes péritiques identiques mais à des paliers différents. Les portées décrivent une ellipse selon la formule mathématique suivante :

$$\frac{(a_\theta \cdot \cos(\theta))^2}{a_g^2} + \frac{(a_\theta \cdot \sin(\theta))^2}{a_p^2} = 1$$

Avec :: angle de mesure par rapport à la direction où est rencontrée a_g . Ainsi que :

$$a_\theta = \frac{a_g \cdot a_p}{\sqrt{\{a_p^2 \cdot \cos^2(\theta) + a_g^2 \cdot \sin^2(\theta)\}}}$$

On va corriger la distance h pour tenir compte de l'anisotropie : $(h_\theta, \theta) = (h_g)$

$$h_g = \sqrt{(h_\theta * \cos(\theta))^2 + \left(\frac{a_g}{a_p} * h_\theta * \sin(\theta)\right)^2}$$

C'est le modèle isotrope avec portée a_g . L'anisotropie géométrique est modélisée lorsque le phénomène étudié montre des états préférentiels selon les cas. On passe souvent à un modèle isotrope par une simple rotation - dilation. Un rapport d'anisotropie apparent peut facilement être sous estimé si on n'identifie pas correctement la direction de la plus grande portée.

Selon la fenêtre angulaire ou angle de tolérance que le rapport d'anisotropie est déterminé. Parfois une simple correction géométrique ne suffit pas à rendre les modèles isotropes si les paliers ne décrivent pas une ellipse.

4.1.2. Anisotropie zonale

On observe des paliers différents selon les directions. Il n'existe pas de modèle d'ajustement pratique pour traiter ce type d'anisotropie. Le comportement du variogramme à l'origine, reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Les différents mécanismes se résument de la manière suivante :

Un comportement de variogramme (h) à l'origine parabolique indique une grande régularité de la variable régionalisée (continue et différentiable).

Un comportement à l'origine linéaire montre que la variable régionalisée est moins régulière (elle est continue mais pas différentiable).

Une discontinuité à l'origine ou effet de pépite, signale une plus grande irrégularité de la variable régionalisée. Il faudra tenir compte des points suivants :

4.1.2.1. Variance d'estimation (variance de krigeage)

Elle est la plus élevée dans le cas du modèle exponentiel ; l'explication vient du fait que ce dernier croît plus rapidement que le modèle sphérique, ce qui traduit un phénomène qui se déstructure plus vite, d'où une moins grande précision dans l'estimation.

4.1.2.2. Analyse variographique

La recherche d'un modèle convenable est assez délicate et nécessite une certaine expérience ou de nombreux essais (**figure 13**). C'est une procédure qui ne peut être automatisée.

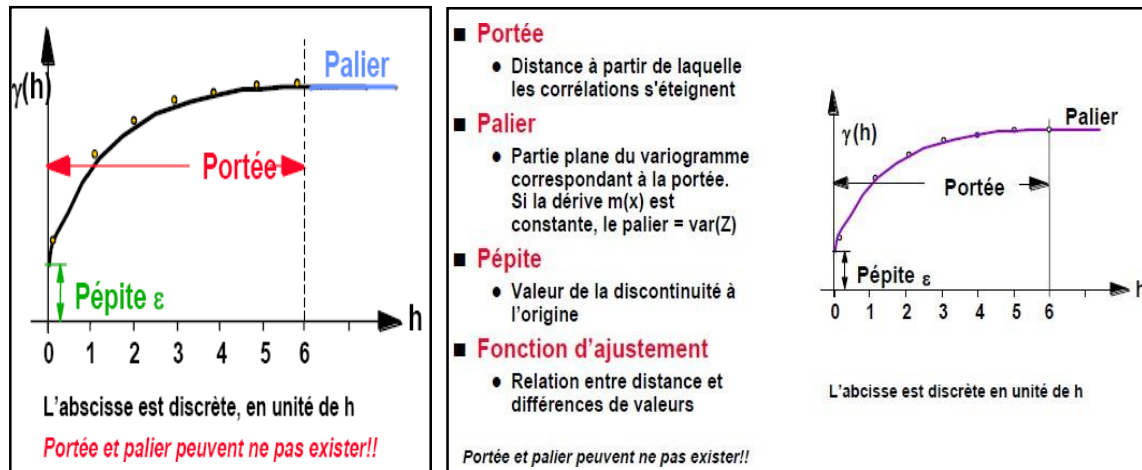


Figure 13. Variogramme modélisé : modélisation de la variation spatiale du phénomène

Pour connaître le comportement spatial on passe à l'étude de variographie pour étudier la dépendance spatiale d'une variable régionalisée. Le variogramme de dispersion (en nuage de points) est transformé en variogramme expérimental (appelé histogramme d'écarts). On constate que les variogrammes ont un comportement à l'origine linéaire. La salinité des sols est donc une variable aléatoire continue. Quel que soit le mode d'ajustement retenu, la modélisation du variogramme aux courtes distances est particulièrement importante. Le modèle sphérique est préférable, d'une part parce qu'il s'ajuste mieux sur les points de petite distance du variogramme expérimental et d'autre part parce qu'il donne des meilleurs résultats.

5. Prédiction de la salinité des sols a partir des données multispectrales et hyperspectrales

la prédiction de la conductivité électrique (CE) tout en se basant sur la combinaison des analyses chimiques au laboratoire et des données satellites.

Traditionnellement, la composition d'un mélange peut être déterminée par la

diffraction aux rayons X (Thorez 1975; Bish 1993; Bouchet 2000; Taubaso 2004). Récemment, de nouvelles approches qui se basent sur la spectrométrie ont reconnues un essor soit dans le domaine de la chimie, soit en biologie (Reeves et al. 2000).

Dans ce chapitre, nous envisageons de prédire la Conductivité électrique des échantillons des sols soit à partir des données satellitaires (longueurs d'onde) multi spectrales (Landsat 8), soit hyper spectrales (Hypérior).

Les données traitées sont fortement corrélées entre elles, de plus elles mettent en jeux un set très volumineux de variables (242 bandes spectrales dans le cas de l'image Hypérior). L'outil de prédiction statistique que nous avons utilisé est « la régression des moindres carrés partiels » (PLSR : Partial Least Square Regression).

Cette technique résout non seulement le problème de colinéarité entre les variables exogènes, mais aussi le petit nombre d'observation par rapport au nombre élevé de ces variables (Wold., et al. 2001). Le principe de la technique consiste à ajuster un modèle statistique linéaire (Eq) qui relie la réponse (appelée encore les variables à expliquer ou variables endogènes) à des variables explicatives ou exogènes ($x_1 \dots m$)

$$y = XB + E$$

Avec: Y est une matrice de n individus

X est une matrice de n individus par k variables prédictives, B est une matrice de coefficients de régression

E est le terme d'erreur du modèle .

La régression décompose simultanément les matrices X et y en une série de facteurs, variables latentes ou PLSR scoresT (qui expliquent la majorité des variance en X et y) et des chargesP et q selon les équations suivantes :

$$X = TP' + E$$

$$y = Tq + f$$

Roger (2005) explique que le nombre de facteur du modèle (qui ne peut jamais excéder le nombre de variables explicatives) influence sur la performance du modèle et désigne la dimension du sous-espace dans lequel s'établie la régression.

Le choix du nombre (k) de ces facteurs est déterminé grâce à l'étape de validation du modèle où on applique le modèle construit à un ensemble de données indépendantes de celui de l'étalonnage (calibration). Lorsque le nombre des observations est insuffisant pour

créer les deux ensembles : calibration et validation, la méthode de validation croisée s'avère intéressante.

Au cours de cette étape, on procède plusieurs fois à la validation sur un ensemble, chaque fois différent, de données extraites à partir de l'ensemble de calibration. Ainsi, on compare les valeurs de l'erreur résiduelle issue de la calibration par rapport à celle de la validation en fonction du nombre (k) des facteurs. Lorsque la valeur minimale de l'erreur est atteinte, on obtient la dimension idéale du modèle de régression.

Dans la présente étude, l'étape de validation du modèle de prédiction de la conductivité électrique, a été assurée par la validation croisée appelée encore Leave one out cross validation qui est recommandée dans le cas où le nombre d'individus est compris entre 40 et 120 (**Martens et Dardenne, 1998**). Il s'agit de diviser la collection de données en deux sous-ensembles : le sous-ensemble d'apprentissage composé de (n-1) individus et le sous-ensemble test comprenant uniquement un seul individu. (n) itérations ont été calculées dont on change à chaque fois l'individu test.

Les critères de validation du modèle de prédiction que nous avons tenu compte sont:

-l'erreur quadratique moyenne (RMSE : root mean square error) : le modèle dont la valeur de RMSE est minimale est choisit,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{y}_i - y_i]^2}$$

: nombre des points de validation

\hat{y}_i : la valeur estimée au point (x_i) y_i : la valeur mesurée au point (x_i).

-l'erreur résiduelle de prédiction (RPD) : ratio of performance to deviation. Selon les valeurs de RPD, Chang and Laird déterminent trois classes de modèles: pour $RPD > 2$ bonne performance de prédiction; $1.4 < RPD < 2$ des modèles à améliorer et $RPD < 1.4$ modélisation non satisfaisante,

$$RPD = \frac{SDY}{RMSE}$$

: l'écart type de la valeur mesurée

-le coefficient de détermination Q^2 (lorsqu'il s'agit de validation croisée).

CONCLUSION

Au cours de notre travail, nous avons comme objectif de faire une synthèse bibliographique sur l'application de la télédétection et système information géographique dans la connaissance de la salinité des sols.

D'après **Douaoui (2010)** la carte de la salinité obtenue par télédétection a finalement révélé une bonne corrélation par rapport aux traitements géostatistiques des données recueillies directement sur le terrain. La même réparation spatiale des différents niveaux de salinité a été confirmée ainsi qu'une équivalence très rapprochée des superficies par classe. Néanmoins, l'analyse ponctuelle n'a pas été satisfaisante. La télédétection satellitaire optique ne semble donc pas encore en mesure de percevoir les faibles variations de salinité.

Selon **Mokhtari (2009)** la cartographie de la salinité faite par les approches (géostatique et télédétection SIG) montre l'extension importante de la salinité. Du point de vue méthodologique, le lissage des estimations du au krigeage ordinaire au niveau des valeurs extrêmes a été corrigé par l'approche télédétection-SIG.

Selon **Amokrane(2010)** la confrontation des données de télédétection avec la salinité mesurée au laboratoire a montré une amélioration des corrélations entre les données de télédétection e les différents niveaux de salinité, ce qui a permis de définir un indice de salinité (I_s) permettant une meilleure estimation spatiale de la salinité. Néanmoins, la confrontation ponctuelle entre les données de salinité mesurée et celles de la télédétection n'as pas été fructueuse.

La télédétection par sa richesse en informations a haute résolution, pourrait être un outil précieux dans l'amélioration de la cartographie de la salinité, et par conséquent une meilleure prise en charge de ce problème.

Par ailleurs, il est important de remédier au problème de salinité, en suggérant les solutions suivantes :

1. **La lixiviation** : les agriculteurs doivent donner aux cultures la quantité d'eau dont elles ont réellement besoin sans exagérer en y ajoutant la juste dose permettent de garantir que le sol soit lessivé, on réduit ainsi la salinité dans la zone racinaire . les

CONCLUSION

sels sont transportés dans la couche aquifère qui les disperse, à condition que le drainage naturel soit suffisant ;

2. **Le drainage :** à l'aide des fossés ou des tuyaux souterrains, l'eau saline pourra être emportée. Dans ce contexte, on cite l'exemple de programme national de drainage égyptien qui est au cours des 30 dernières années, a affronté la saturation en eau et la salinité des sols en l'écoulement et de réutiliser les eaux de drainage ;
3. **Une meilleure utilisation de l'eau d'irrigation :** l'irrigation par aspersion est plus efficace que l'irrigation de surface, malgré qu'elle puisse aussi déposer des sels directement sur la plante si l'eau d'irrigation est saline. L'irrigation au goutte-à-goutte demeure la plus efficace dans ces situations puisqu'elle mesure la quantité d'eau distribuée à la surface autour de la plante ;
4. **Repenser les cultures pour lutter contre le phénomène :** certaines cultures tolèrent mieux le sel que d'autres, les agricultures peuvent ainsi semer une culture tolérant un certain degré de la salinité, tel que le riz. Cependant, il arrive parfois que les agriculteurs soient contraints de repenser leur système de cultures pour le rendre plus rentable. C'est le cas par exemple au Cap-Vert où les agricultures ont abandonné les cultures horticoles telles que les tomates, irriguées au goutte-à-goutte.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Références Bibliographique

- Abdelhafid Y., 2010.** *Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique Cas de la zone Est du périmètre irrigué de la Mina.* pp12-1.
- Al-Khaier F., 2003.** *Soil salinity detection using satellite remote sensing, geo-information science and earth observation.* International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 1-70p.
- Al-Khaier., 2003.** *Soil Salinity detection using satellite Remote Sensing.,* International Institute for GeoInformation Science and Earth Observation, Enschede , The Netherlands. 61 p.
- Amokrane A., 2010.** *Analyse de la variabilité spatiale de la salinité des couches de surface des sols de la plaine du Bas Cheliff, apport de la géostatistique et de la télédétection.* Thèse de Magister, F.S.B/ U.S.T.H.B, 85p.
- ANRH., 2003.** *Suivi et modélisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina.* 43 p.
- Aubert G., 1976.** *Les sols sodiques en Afrique du nord.* Annales de l'I.N.A. Alger, N° 6, 185-195p.
- Bannari A., 2008.** *Characterization of Slight and Moderate Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land Using Simulated Data of ALI (EO-1) Sensor.,* Journal of Soil Science and Plant Analysis (In press).
- Ben Dor., 1995.** *Surface mineral mapping of makhtesh Ramon, negec, Israel using ger 63 channel scanner data, USA:* vol. 16, pp. 3529-3253. International Journal of Remote Sensing.
- BENSAID., 2006.** *SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la Wilaya de Naâma (Algérie).* Thèse Doctorat, Université Joseph Fourier-Grenoble 1, France, 288p.
- BOARDMAN J., 1995.** *Mapping target signatures via partial unmixing of aviris data.,* Fifth JPL Airborne Earth Science, pp. 23-26p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Bonn., 1993.** *Précis de télédétection., volume 1, Principes et Méthodes*, Presses de l'Université du Québec, AUPELF, 485 p.
- Boulaine J., 1957.** *Etude des sols des plaines du Cheliff*. Thèse d'état de l'Université d'Alger, 582 p.
- CCT., 1999.** Cours de télédétection du Centre canadien de télédétection (C.C.T). Le site consulter le 22/03/2022 (version française), adresse électronique: <http://www.ess.nrcan.gc.ca> .
- Chapman J E., 1989.** *Remote sensing of vaporite mineral zonation in salt flats (salars).*, International Journal of Remote Sensing, 10, pp. 245 – 255p.
- Clark R N ., Swayze G A., 1995 .** *Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice, and snow, and other materials: the USGS Tricoder Algorithm, in Summaries of the fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication 95 (1), 39-40p.
- Clark., 1997.** *Vegetation species and stress indicator mapping in the san luis valley, colorado* using imaging spectrometer data, Remote Sensing of Environment.
- Crowley J K., 1991.** *Visible and near-infrared (0.4-2.5 μ m) reflectance spectra of playa evaporite minerals*, Journal of Geophysical Research, 96(16),. 231- 240p.
- Csillag F., 1993.** *Spectral band selection for the chracterization of salinity statues of soils.* Remote Sensing of the Environment, Vol. 43: 231-242p.
- Daneshgar S., 2015.** *Remote sensing observations for monitoring coastal zones, Vulturno River Mouth case study*. DOI: 10.13140/RG.2..1.3806.9209.
- Dehaan R L., Taylor G R., 2002.** *Field derived spectra of salinazed soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization.*, International Journal of Remote Sensing, 80, pp. 406 – 417.
- Djili K., Daoud Y., Touaf L., 2003.** *La salinisation et la sodisation des sols d'Algérie. Congrès scientifique sur l'apport de la recherche scientifique et des nouvelles technologies dans le développement et la mie en valeur des régions arides et semi-aride climat.* 2-3 octobre. El-Oued, 9 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Douaoui A., 2005.** *Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chéliff*. Apport de la géostatistique et de La télédétection, Thèse Doctorat d'état, INA d'Alger, 2005, 258p.
- Douaoui A., Hartani T.(2007) .** Troisième atelier régional scientifique et technique sur les systèmes irrigués dans les pays maghrébins. Nabeul, Tunisie, SIRMA 04-08 juin 2007.
- Douaoui A., Hervé N., Walter C., 2006.** *Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote sensing data*. Geoderma, 134(1-2): 217–230p.
- Douaoui A., Lépinard P., 2010.** *Télédétection et salinité des sols : Cartographie de la salinité dans la plaine algérienne du “Bas-Chéliff”*. Geomatiques Expert, 76: 36-41p.
- Douaoui A., Yahiaoui I., 2015.** *Using remote sensing, GIS and kriging to improve soil salinity mapping in the Hmadna plain (Algeria)*. Topraksu-Dergisi Soil-Water Journal, special issue: 1-5p.
- Drake N., 1995.** *Reflectance spectra of evaporite minerals (400-2500 nm): Applications for remote sensing*, International Journal of Remote Sensing, 16,. 2555 – 2571p.
- DUCROT., 2005.** *Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources, Extraction de caractéristiques du paysage*, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, INP Toulouse, 240 p.
- Durand., 1954 in Mimoune., 1995.** *Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (sud du chott El Hodna)*. Thèse de Doc. Univ. D'Aix Marseille É. 204p.
- FAO., 2006.** *Conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégies de réhabilitation. Organisée et coordonnée par Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage*, du 6 février au 6 Mars 2006. 12p.
- FAO., 2006.** *Extension de la salinisation et stratégies de prévention et réhabilitation. Conférence électronique sur la salinization_programme international pour la technologie et la recherche en irrigation et drainage*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Fernandez-Buces., 2006.** *Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico.*, Journal of Arid Environments 65 (2006) 644–667.DOI:10.1016/j.jaridenv.2005.08.005.
- Fraser., Josef., 1998.** *Mapping soil salinity in the Murray Valley (NSW) using satellite imagery.*, Proceedings of the 9th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Sydney, Australia., Sydney, Australia.
- Habert E., 2000.** *Qu'est-ce qu'un système d'information géographique?.* Laboratoire de cartographie appliquée. Institut de recherche pour le développement. France.,13p.
- 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.* Thèse Doct d'Etat, Université de Rennes, 383 p.
- Hamdy., 2004.** *Non-conventional salinity and saline irrigation practices and anagement.* IAMB, Italy, CIHEAM, 199p.
- Hashem., 1997.** *Desertification and land degradation using high resolution satellite data in the Nile Delta, Egypt.*, IEEE: 197-199p.
- Hassani M I., 1987.** *Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride, le Bassin versant de la Grande Sebkha d'Oran (Algérie),* Université de Grenoble – France.
- HESSAS., 2005.** *Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risqueincendie de forêt. Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes -Maritimes.* Thèse Doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier - GRENOBLE I,France, 378 p.
- Howari F., 2002.** *Spectral Properties of Salt Crusts Formed on Saline soils.*, Journal of Environmental Quality, Vol. 31:1453-1461p.
- Huang Z.,2002.** *Derivation of a Tasselled Cap Transformation Based on Landsat 7 At-Satellite Reflectance.*, International Journal of Remote Sensing 23 (8): 1741–1748p.
- Hunt G R., 1971.** *Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and Hydroxides.*, Modern Geology, 2, 193-205p.
- Idder M., 2006.** *Mode de fixation et de cristallisation des sels dans un sol nu non irrigué dans la région de Ouargla.* Mém. Mag. I.N.A. El Harrach, 100p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- INSID., 2008.** *Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina.*
- IRD., 2008.** Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. *Les sols sont fragiles : 1er partie Salinisation et sodisation des sols. 2ème partie La dégradation des sols par salinisation ou alcalisation.* <http://www.mpl.IRD2008.fr/suds-enligne/sols/fragile/dégradation1>.
- Jankowski., 1997.** *Impact of debris-flow deposits on hydrogeochemical process and the development of dryland salinity in the Yass river catchment, New south wales, Australia., Hydrogeol J, 5(4) : 71 – 88p.*
- Jong De., 1979.** *Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys, Soil Sci. Soc. Am. J., 43, 810-812p.*
- Kergomard C., 2004.** *la télédétection aéro-spatiale : une introduction.* Cours de l'Ecole Normale Supérieure Paris. 74p.
- Khan N M., Rastoskuev V V., Shalina E., Sato Y., 2001.** *Mapping salt-affected soil using remote sensing indicators. A simple approach with the use of Gis Idrissi. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November, Singapore.*
- Khan., 2005.** *Assessment of hydro saline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators, Agric. Water Manage., 96-109p.*
- Lamsal K., Gun N., Paudyal, Saeed M., 1999.** *Model for assessing impact of salinity on soil water availability and crop yield. Agriculture water management. 41, 57-70p.*
- Laoufi F., 2011.** *Une nouvelle méthode de cartographie de la région d'Oran (Algérie) à l'aide de la télédétection multispectrale, Comptes Rendus Geoscience, vol. 343, n° 110, pp. 653-663p.*
- Leblanc., 2002.** *Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density, USA: Remote Sensing of Environment, vol. 76p.*
- Lefki R., 2018.** *Utilisation de l'imagerie satellitaires Landsat et d'un système d'information géographique dans l'évaluation de l'état de salinité des sols du périmètre irrigué de la Mina(Relizane). Ecole Nationale supérieure Agronomique (ENSA).58p.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Legros J P., 2009.** *La salinisation des terres dans le monde.* Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 2009, <http://academie.biu-montpellier.fr/>, conférence n°4069, Bull. n°40, p. 257-269p.
- Legros. J.P., 2009.** *La salinisation des terres dans le monde.* Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 2009, <http://academie.biu-montpellier.fr/>, conférence n°4069, Bull. n°40, p. 257-269.
- LTIFI W., 2008.** *Bilan d'eau et des sels dans les périmètres irrigués KALAAT L'ANDALOUS, laboratoire du centre de gestion du ressource en eau, (CGRE) de L'INAT,* mémoire de master, 120p.
- Madjid N., Tiar K., 2012.** *Memoire online géographie impact de la salinité due au traitement de sol sur l'environnement. Cas d ENASEL EL-OUTAYA wilaya de Biskra* Université Mohamed khider Biskra, 41p.
- Mathieu C., Pieltain F., Jeanroy E., 2003.** *Analyse chimique des sols ; Méthodes choisies* Tee & doc, 275p.
- Mathieu I., 1998.** *Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil color of an arid environment.,* Remote Sensing of Environment 66, 17–28p.
- McNeill J D., 1980.** *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers,* Tech. Note TN-6. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada.
- Metternicht G I., Zinck J A., 2003.** Remote sensing of the soil salinity potential and constrains., Remote sensing of soil salinity : potentials and constraints: Remote Sens. Environ., 1: 58-62.
- Metternicht G I., Zinck J A., 2007.** *Remote sens ing of soil salinity: potentials and constraints.* Remote Sensing of Environment, 5812: 1-20, article in press.
- Metternicht G., 1997.** *Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces.*
- Metternicht G., Zinck J., 2003 .***Remote sensing of soil salinity : potentials and constraints.* Remote sensing of Environment,20p.
- Metternicht., Zinck., 1997.** *Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surface.,* Int J Remote Sensing18(12) 2571-2586.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Miller., Baccini A., 1990.** *Quantitative characterisation of vegetation red edge reflectance in aninverted-gaussian reflectance model*, International Journal of Remote Sensing, vol.11, pp. 1755-1773p.
- Mimoune., 1995.** *Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (sud du chott El Hodna)*. Thèse de Doc. Univ. D'Aix Marseille É. 204p.
- Mokhtari., 2009.** *Apport de la télédétection dans l'évaluation de la dégradation des états de surface en milieu salin (Le Bas-Chéliff)*. Thèse de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. 99p.
- Mougenot B., 1993.** *Effets des sels sur la réluctance et télédétection des sols salés*. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie,28, 45-54p.
- Mougenot B., 1993.** *Remote sensing of salt affected soils.*, Remote sensing review Vol. 7: 241-259p.
- Pelletier C.(2017),** Cartographie de l'occupation des sols a partir des séries temporelles d'images satellitaires a hautes résolutions, Thèse de Doctorat, UT3Paul Sablier.
- Reguig Hadj., Larroussi., 2007.** *Contribution à l'étude de la relation sol-végétation dans la region sud de la zone humide de chott et Honda*.
- Reza Sokouti Oskoe., 2017.** *Surface Soil Salinity Detection and Mapping, Using Hyperspectral Satellite Data of Hyperion EO-1.*, Journal of SAUSSUREA (ISSN: 0373-2525).
- Richards A., 1954 .** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*(Vol 78) : LWW,44p.
- Rouse., 1973.** *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.*, In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I,. 309–317p.
- Saidi D., Le Bissonnnais Y., Duval O., Daoud Y., Halitim A. (2004).** Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). Étude et Gestion des Sols, 137-148p.
- Scholl., 1996.** SGBD Géographique - Spécificités. International Thomson Publishing France, Paris. 166p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Servant J., 1975.** *Contribution à l'étude des sols halomorphe. L'exemple des sols salés du Sud et du Sud-Ouest de la France.* Thèse doct, Univ Montpellier, 2 tomes, 200p.
- Shrestha RP., 2006.** *Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand.* Land Degradation & Development, 17(6): 677–689p.
- Szabolcs I., 1994.** *Soils and salinisation.* In *Handbook of Plant and Crop Stress*. Ed. M Pessarakali. pp. 3–11. Marcel Dekker, New York.
- Tao He., 2013.** *Greenland surface albedo changes in July 1981–2012 from satellite observations.*, IOP Publishing Ltd. Environmental research letters.
- U.S. Salinity Laboratory Staff., 1954.** *Diagnostic and improvement of saline and alkali soils.* U.S.D.A Handbook, n°60, 160 p.
- Van der Lelij., 1989.** *EM-38 applications in irrigated areas of southern New South Wales.*, Proceedings and abstracts, Department of Agriculture and Rural Affairs, Institute for Irrigation and Salinity Research, Tatura, Victoria, Vol. 1, 13p.
- Van Hoorn J W., 1994.** *Salt movement leaching requirement.* Agric. Water Manag, 4, 409-428.
- Verma K., 1994.** *Remote sensing technique for mapping salt affected soil,* Int. J. Remote Sensing 1901-1914p.
- Vidal A., 1996.** *Remote sensing applied to irrigation system management : Example of Pakistan.*, EURISY Colloquium L Satellite Observation for Sustainable Development in the Mediterranean Area: 132-142p.
- Vincent B., 1996.** *Drainage performance assessment using remote sensing in the Gharb Plain, Morocco,* Use of remote sensing techniques in irrigation and drainage, Vidal, A. et Sagardoy, J.A. (Editors).
- Wynjones H., Gunston G., 1991.** *Complement a preyor conflicting approachaes to salinity.*
- Zuluaga., 1990.** *Remote Sensing applications in irrigated management in Mendoza, Argentina.* Remote sensing in evaluation and management of irrigation,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

(editor) Menenti, M., Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hidricas, Mendoza, Argentina.pp.37-58.

Résumé

Le sol est une composante principale de l'écosystème, il constitue également une interface vis-à-vis de l'environnement qui va conditionner la qualité de l'eau et de l'air et le développement diversifié des êtres vivants. La salinisation des sols qui s'est accélérée ces deux dernières décennies suite au recours accru à l'irrigation est incontestablement le plus grave problème qui touche une grande superficie des dans les zones arides. En Algérie, les sols salés occupent 3.2 millions d'hectares, ce problème constitue un problème majeur qui affecte les terres agricoles. Dans ce contexte, les techniques de géomatique (télédétection et SIG) offre la possibilité de quantifier et de cartographier. Plus spécifiquement, les images issues des acquisitions satellitaires permettent de produire des cartes qui donnent une représentation graphique relative aux surfaces terrestres comme l'occupation des sols et la salinité. Le travail que nous présentons dans ce mémoire est une synthèse bibliographique sur la salinité des sols en général, ainsi que une présentation des techniques de télédétection utilisées dans la quantification du problème de la salinité.

Mots clés : la salinité des sols, télédétection, SIG, cartographie, PLSR, Krigeage, Classification supervisée.

Abstract

The soil is the main component of the ecosystem, it is also an interface with the environment that will condition the quality of water and air and the diversified development of living beings. The salinization of soils, which has accelerated in the last two decades following the increased use of irrigation, is undoubtedly the most serious problem affecting a large area of drylands. In Algeria, saline soils occupy 3.2 million hectares, this problem is a major problem that affects agricultural land. In this context, geomatics techniques (remote sensing and GIS) offers the possibility to quantify and map. More specifically, images from satellite acquisitions allow the production of maps that provide a graphic representation of land surfaces such as land use and salinity. Herein, the work that we present is a bibliographic synthesis on soil salinity in general, as well as a presentation of remote sensing techniques used in the quantification of the salinity problem.

Key words: soil salinity, remote sensing, GIS, mapping, PLSR, Kriging, supervised classification.

الملخص

التربة هي المكون الرئيسي للنظام البيئي ، وهي أيضاً واجهة مع البيئة التي ستحدد جودة الماء والهواء والتطور المتنوع للكائنات الحية. إن ظاهرة ملوحة التربة ، التي تسارعت في العقدين الماضيين بعد زيادة استخدام الري ، هي بلا شك أخطر مشكلة تؤثر على مساحة كبيرة من الأراضي الجافة في الجزائر ، تشغل التربة المالحة 3,2 مليون هكتار ، وهذه المشكلة هي مشكلة كبيرة تؤثر على الأراضي الزراعية. في هذا السياق ، توفر تقنيات الجيوماتكس (الاستشعار عن بعد ونظام المعلومات الجغرافية) إمكانية التحديد الكمي والتخطيط بشكل أكثر دقة ، تسمح صور الأقمار الصناعية بإنتاج خرائط توفر تمثيلاً بيانياً لأسطح الأرض مثل استخدام الأراضي والملوحة. العمل الذي نقدمه عبارة عن طرح بيليوغرافي حول ملوحة التربة بشكل عام ، بالإضافة إلى عرض لتقنيات الاستشعار عن بعد المستخدمة في قياس مشكلة الملوحة.

الكلمات المفتاحية: ملوحة التربة ، الاستشعار عن بعد ، نظم المعلومات الجغرافية ، رسم الخرائط ، PLSR ، Kriging ، التصنيف الخاضع للإشراف.