



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور-الجلفة-

Université Ziane Achour –Djelfa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

دائرة العلوم الفلاحية و البيطرية

Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

الشعبة علوم الماء و البيئة

Spécialité : sciences de l'eau et de l'environnement

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

*Apport de l'utilisation des données de télédétection pour la cartographie de la salinité des sols. Cas de la région Zahrez Gharbi (Wilaya de Djelfa).*

Réalisé par :

Devant le jury composé de :

BOUAKKAZ Zakaria

GHITHI Khalil

Présidente : DEROUECHE H MCB

Promoteur : MOUISSA H MCB

Examineur : LAHRACH B MAA

Examineur : KHADER M MAA

Année universitaire 2016/2017

## *Dédicaces*

Je dédie ce travail à ma famille et mes amis et toute personne m'ayant aide à réaliser ce modeste travail.

**BOUAKKAZ Zakaria**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère et mon père, que j'aime beaucoup et que dieu  
les garde*

*A mes frères*

*A mon promoteur,*

*A tout la famille,*

*A tous mes amis*

*A tous ceux que j'aime.*

***Mr.khalil ghithi***

# REMECIMENT

*Avant tout, nous remercions Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemine de la science.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier grandement Monsieur **MOUISSA Habib (MCB)**, notre promoteur pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils.*

*Nos sincères gratitudes aux membres du jury, **DEROUECHE H (MCB)**, Présidente de jury, Monsieur **LAHRACH B., (MAA)** et **KHADER M (MAA).**, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.*

*Nous remercions aussi monsieur **GHAFOUL M., (MAA)** et madame **YOUNSSE D. M.**, chef service au niveau de l'**ANRH DEJELFA** pour leurs aides et assistance.*

*Nous n'oserions oublier de remercier tout le corps professoral de la faculté **SNV.**, pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.*

*Enfin, nous voudrions remercier monsieur **BEN HAMZA** qui nous a guidé dans le terrain, et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.*

## Liste des abréviations

ACP	Analyse des composantes principales.
ASTER	The Avaced Spacebome Thermal Emission and Reflection Radiometer.
BDG	Base de Données Géographiques.
CE	Conductivité Electrique
CEC	Capacité d'Echange Cationique.
Cm	Centimètre.
CEAE	Centre d'Expertise en Analyse Environnementale.
°C	Degré Celsius.
ENVI®	Enviroment for Visualizing Image.
ETM+	Capteur Enhanced Thematique Mapper plus.
FAO	Food and agriculture organization of the united nations.
Fig	Figure.
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes.
GPS	Global Positioning System.
h	Heure.
ha	Hectare.
Hr	Humidité résiduelle.
IC	Indice de Coloration.
IF	Indice de Forme.
INSID	Institut National DES Sols de l'Irrigation et du Drainage.
Kg	Kilogramme.
Km	kilomètre.
LANDSAT	Land Satellite.
M	Millions.

M ha	Millions d’Hectare.
MO	Matière Organique.
MapInfo	Mapper Information.
mm	Millimètre.
MSS	Multi Spectral Scanneur.
nm	Nano mètre.
nd	Non Datée.
OLI	Operational Land Imager.
PIR	Proches Infrarouge.
RI	Indice de Rougeur.
RMSE	Root-mean-square deviation.
RO	Régression ordinaire.
RVB	Système de la composition colorée.
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index.
SI	Salinity Index.
SIG	Système d’Informations Géographiques.
SNV	Sciences de la Nature et de la Vie.
SPOT	Système Probatoire pour l’Observation de Terre.
TC	Tasseled Cap.
TDVI	Transformed Difference Vegetation Index.
TM	Capteur Thematique Mapper.
Tab	Tableau.
WGS	World Geodetic System.
USSLS	United Soil Salinity Laboratory Staff.

## Liste des figures

		Page
Figure 01	Distribution globale de la salinité dans le monde .....	6
Figure 02	Distribution globale de la salinité dans Algérie .....	6
Figure 03	Signatures spectrales de quelques roches .....	9
Figure 04	Cycle d'évolution de la végétation verte en référence à la droite des sols .....	11
Figure 05	Emplacement de la zone d'étude .....	16
Figure 06	Emplacement des points de sondage prélevés sur la zone d'étude.....	21
Figure 07	Séchage des échantillons de sols à l'aire libre.....	21
Figure 08	Organigramme méthodologique .....	27
Figure 09	Résultat de l'application du module FLAASH sur l'image Landsat 8 ( <i>Path</i> = 96 / <i>Row</i> = 36).....	29
Figure 10	Valeurs CE obtenus pour l'ensemble des échantillons de sols.....	33
Figure 11	Création de la base de données géographique BDG relative aux 141 échantillons de sols .....	35
Figure 12	Représentation graphique de la CE et les variables indépendantes.....	36-37
Figure 13	Carte de la salinité de la zone d'étude exprimée en $\mu\text{S}/\text{Cm}$ .....	41

## Planche de photos

Planche de photos 01	A) Cheptels camelins ; B) point d'abreuvement (source d'eau) ; C) Cheptels ovins ; D) chott salin, E) Couvert végétal ; F) voile sableux.....	18
Planche de photos 02	A) <i>Limonium tunetanum</i> ; (Oudnet el hallouf ; B) <i>Halocnemum strobilaceum</i> ; C) <i>Atriplex halimus</i> ; D) vu d'ensemble de la végétation halophyte sous forme d'une ceinture.....	45

## Liste des tableaux

		Page
Tableau I	les indices de salinité .....	12
Tableau II	Couleurs des échantillons de sol selon la charte Munsell .....	30
Tableau III	Classification des résultats de CaCO <sub>3</sub> .....	32
Tableau IV	Représentation des résultats de pH .....	32
Tableau V	Classement des résultats CE.....	34
Tableau VI	Résultats de la modélisation obtenus par la régression ordinaire.....	39
Tableau VII	Répartition des superficies de la zone d'étude selon les différentes classes de salinité .....	40
Tableau VIII	caractéristiques de l'image utilisée.....	59-60

# Sommaire

	Page
Dédicace .....	I
Remerciements .....	III
Liste des abréviations .....	IV
Liste des figures .....	VI
Liste des tableaux .....	VII
Sommaire .....	VIII
<b><i>Introduction générale</i></b>	
Introduction générale .....	1
<b><i>Chapitre I : Salinisation et télédétection</i></b>	
<b>I.1 Salinisation</b> .....	4
I.1.1 Définition de la salinisation.....	4
I.1.2 Types de Salinisation .....	4
I.1.2.1 Salinisation primaire ou naturelle .....	5
I.1.2.2 Salinisation secondaire .....	5
I.1.3 Salinisation des terres dans le monde et en Algérie .....	5
I.1.4 Type de salinité de sol .....	7
I.4.1 Sodisation .....	7
I.4.2 L'alcalinisation .....	7
<b>I.2 Télédétection</b> .....	8
I.2.1 Définitions .....	8
I.2.2 Télédétection appliquée aux sols .....	8
I.2.3 Objectifs de la télédétection appliquée aux sols .....	8
I.2.4 Propriétés spectrales des sols.....	9
I.2.4.1 Domaine visible (VIS) et proche infrarouge (PIR).....	9
I.2.4.2 Couleur et forme des specters .....	10
I.2.4.3 Indices spectraux spécifique aux sols.....	10
I.2.5 Prétraitement des données d'image .....	12
I.2.5.1 Correction géométrique .....	12
I.2.5.2 Corrections atmosphériques .....	13
I.2.5.3 Corrections radiométrique .....	13
I.2.6 La cartographie des sols à laide des images satellitaires .....	13
<b><i>Chapitre II : Matériel et méthodes</i></b>	
<b>II.1 Choix de la zone d'étude</b> .....	16
<b>II Supports et moyenne de travail</b> .....	19
<b>II.1 Supports de travail</b> .....	19
II.1.1 Les données de télédétection .....	19
II.1.2 Echantillonnage et données de terrain .....	20
II.1.3 préparation des échantillons (préparation de la terre fine) .....	20
II.1.3.1 Séchage .....	20
II.1.3.2 Emottage des agrégats.....	22
II.1.3.3 Tamisage .....	22
II.2 Description des échantillons et analyses pédologiques .....	22
II.2.1 Couleur .....	22
II.2.2 Humidité résiduelle .....	22
II.2.3 Calcaire total .....	23

II.2.4	Conductivité électrique .....	24
II.2.5	Ph <sub>eau</sub> (Acidité réelle) .....	24
<b>II.3</b>	<b>Moyens de travail</b> .....	25
II.3.1	Matériel informatique et logiciels .....	25
II.3.2	MapInfo® Professional .....	25
II.3.3	ENVI® (Enviroment for Visualizing Images) .....	25
II.3.4	Weka .....	25
<b>II.4</b>	<b>La méthodologie du travail</b> .....	26
	<i>Chapitre III : Résultats et discussions</i>	
<b>III</b>	<b>Résultats et discussions</b> .....	29
III.1	<b>Résultats</b> .....	29
III.1.1	Prétraitements et traitements des données de télédétection .....	29
III.1.2	Résultats des analyses pédologiques .....	30
III.1.2.1	Couleur des échantillons .....	30
III.1.2.2	L'humidité résiduelle .....	31
III.1.2.3	Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ) .....	31
III.1.2.4	pH .....	32
III.1.2.5	Conductivité électrique .....	33
III.3.1.1	Création et validation des modèles estimatifs de la salinité .....	34
III.3.1.2	Validation .....	38
<b>III.4</b>	<b>Choix des variables et de modèle pertinent pour la cartographie de la salinité...</b>	38
<b>III.5</b>	<b>Cartographie de la salinité</b> .....	40
III.2.	<b>Discussions</b> .....	42
III.2.1	Couleur des échantillons .....	42
III.2.2	L'humidité résiduelle .....	42
III.2.3	Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ) .....	43
III.2.4	pH .....	43
III.2.5	CE .....	44
III.3	<b>Recommandations</b> .....	45
	<i>Conclusion générale</i>	
	Conclusion générale.....	48
	<i>Références bibliographiques</i>	
	Références bibliographiques.....	51
	<i>Annexe</i>	
	Annexe.....	59

# *Introduction générale*

La salinité des sols pourrait ne pas être aussi dramatique que les tremblements de terre ou les glissements de terrain à grande échelle, mais c'est certainement un grave danger pour l'environnement (Metternicht et Zinck, 2003). Ce problème mondial affecte les propriétés physiques et chimiques du sol, diminue la croissance des plants et dégrade la structure du sol (Metternicht et Zinck, 2003). Elle entraîne la perte de la productivité des cultures (Dehaan, 2002 ; Metternicht et Zinck, 2003 ; Lhissou *et al.*, 2014 ; Nawar *et al.*, 2014). Les statistiques relatives à l'étendue des zones touchées par la salinité varient selon les auteurs. Selon Ghassemi *et al.*, (1995), les estimations sont proches de un (1) milliard d'hectares (ha), ce qui représente environ 7% de l'étendue continentale de la Terre soit environ 10 fois la taille d'un pays comme le Venezuela ou 20 fois la taille de la France. En plus de ces zones naturellement affectées par le sel, environ 77 M ha ont été salinisés suite à l'activité humaine, dont 58% concentrés dans les zones irriguées (Metternicht et Zinck, 2002). Par contre, Matinfar *et al.* (1995) *in* Hamid *et al.* (2016) l'estimation de la superficie des sols affectés par le sel peut aller jusqu'à 20 % à l'échelle mondiale. Alors, 50 % de la Terre est le chiffre donné par Nawar *et al.* (2014). A l'échelle des pays, la salinité du sol est de 20% pour l'Australie, 27% pour l'Inde, 30% pour l'Egypte, 28% pour le Pakistan et 50% pour l'Irak (Stockle, 2013 *in* Nawar *et al.*, 2014). D'une façon générale, ce problème est plus répandu dans les régions arides et semi-arides du monde (Hamzeh, 2013 ; Fourati *et al.*, 2017).

Seulement, l'impact économique causé par la salinité secondaire a été estimée à 750 milliards dollars US par année pour le bassin de la rivière Colorado aux États-Unis, 300 millions US /ans pour les provinces du Pendjab et de la Frontière de Norvège en Pakistan et 20 millions de dollars US/ans pour le bassin Murray Darlin en Australie (Ghassemi *et al.*, 1995).

L'Algérie, n'est pas épargnée par ce fléau avec 3,2 millions ha affectés par la salinité (Szablocs, 1989 *in* INSID, 2008). Ce problème est plus remarquable dans les régions steppiques (Zones arides et semi-arides) (Belkhodja et Bidai, 2004). Parmi les zones les plus touchées par la salinité on cite : Mina, Cheliff, Habra Sig, Maghnia, Chott El Hodna et les Zahrez Gharbi et Chergui de la wilaya de Djelfa.

Les méthodes traditionnelles de suivi, d'évaluation et de la surveillance de la salinité des sols sont trop coûteuses et nécessitent beaucoup de temps (Farifteh *et al.*, 2007 ; Fourati *et al.*, 2017). Souvent ces méthodes sont très limitées à une échelle régionale très restreinte (Lhissou *et al.*, 2014). Actuellement, les nouvelles technologies telles que la télédétection offre plusieurs avantages (efficacité, rapidité, avec des coûts faibles) par rapport aux méthodes conventionnelles dans les études et la cartographie des sols salés grâce à la sensibilité des capteurs radiométriques

des satellites aux sols salés (Metternicht et Zinck, 2003 ; Mougenot *et al.*, 2009 ; Moncef *et al.*, 2011; Abbas *et al.*, 2013; Allbed et Kumar, 2013). Dwivedi (1996) *in* El hag (2016) a utilisé les données multispectrales du capteur MSS (*Multi Spectral Scanneur*) pour l'identification des sols salés. Cependant Menenti *et al.* (1986) *in* El hag (2016) ont utilisé les trois bandes (TM1, TM5 et TM7) du capteur TM (*Capteur Thematique Mapper*) pour détecter les minéraux salés. Rao *et al.* (1991) *in* El hag (2016), ont utilisé la fausse composition colorée des bandes TM (2, 3 et 4) pour discrimination de la concentration de la salinité des sols (concentration modérée vs élevés).

Zhang *et al.* (2015) ont utilisés les différentes bandes du capteur Operational Land Imager 8 (OLI-8) pour développer un algorithme de détection de la salinité des sols basé sur l'exploration de la signature spectrale des sols salés. En revanche l'exploitation des indices spectraux de salinité conçus spécialement pour l'évaluation et la cartographie de la salinité superficielle du sol ont montré leurs efficacités (Khan *et al.*, 2001 ; Hamzeh *et al.*, 2013; Lhissou *et al.*, 2014) des indices de salinité).

À l'échelle nationale, l'INSID (2008) signale un manque flagrant des données cartographiques fiables et précises pour la délimitation des zones touchées par la salinité. Ce manque nous a motivés à l'exploration des données de télédétection récente (Landsat 8) pour la cartographie de la salinité dans une région située au Zahrez Gharbi de la wilaya de Djelfa.

L'objectif spécifique du présent travail est de cartographier la salinité superficielle du sol au niveau d'une zone située au Zahrez Gharbi. Ceci est possible grâce à l'étude des relations existantes entre le signal radiométrique du capteur OLI du satellite Landsat 8 et les variables physiques du sol prélevées par un réseau de placettes d'échantillonnage. Le modèle estimatif de la salinité doit être conçu uniquement des variables pertinentes avec la réalité du terrain.

Ce document est composé de trois chapitres :

Le chapitre I : représente des notions fondamentales sur la salinité et la télédétection ;

Le chapitre II : expose l'approche méthodologique adoptée pour la réalisation de l'étude ;

Le chapitre III : résume les principaux résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

# *Chapitre I :*

## *Salinisation et télédétection*

## I.1 Salinisation

### I.1.1 Définition de la salinisation

La salinisation dans les zones arides et semi-arides, est l'accumulation des sels solubles à la surface du sol (Jafari, 1990; Abarsaji *et al.*, 2012) *in* (Hamid et Vahid 2016). Elle a pour principales conséquences une augmentation de la pression osmotique, une toxicité pour les végétaux due à l'accumulation de certains ions, dont Na<sup>+</sup>, et une dégradation du sol. C'est une cause de dégradation des terres agricoles de 1 à 2% par an et continue à augmenter (FAO, 2002 *in* Lhissou *et al.*, 2014). Pour Bouttelli (2012), Forges(1972) et Mermoud (2006) la salinisation est un processus d'accumulation de sels à la surface du sol et dans la zone racinaire qui provoque des risques pour le sol et la croissance des végétaux et entraînent une diminution des rendements agricoles. La liste des sels en cause varie selon le cas de salinité, le plus fréquent en zone semi-aride sont les chlorures, les sulfates ; le Sodium et le Magnesium.

Généralement, on estime la salinité d'un sol à partir de mesures effectuées sur la conductivité électrique (CE) de celui-ci puisque c'est une méthode simple, directe et facile à réaliser (Corwin et Lesch, 2005 ; Allen *et al.*, 2006 ; Bouhata *et al.*, 2015). Nombreuses sont les méthodes de mesures de la conductivité électrique (CE). La méthode de l'extrait dilué 1/5 proposée par USSLS (1954) a été considérée comme la méthode la plus efficace pour la quantification de la salinité des sols (Shaw, 1994 ; Montoroi ,1997 ; Meriem, 2013)

Selon Richards (1954) et Calvet (2003) le classement des valeurs de la CE donne une idée claire sur le degré de la salinité des sols. Les sols salins ont une CE supérieure à 2 ds / m à 25°C (Hamid *et al.*, 2016 *in* Lhissou *et al.*, 2014).

### I.1.2 Types de Salinisation

Il existe deux types de salinisations, salinisation naturelle ou primaire liée au substratum qui forme le sol et la salinisation secondaire ou anthropique, correspond aux activités humaines telles que l'irrigation et utilisation des engrais.

### ***I.1.2.1 Salinisation primaire ou naturelle***

Ce type de salinisation est dû aux sels formés lors de l'altération des roches ou des apports naturels extrêmes :

1. Dans les régions côtières, intrusion d'eau salée ou submersion des terres basses.
2. Inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité.

La salinité naturelle ou primaire est considérée comme un risque majeur pour l'environnement. Elle atteint une superficie globale estimée à un milliard d'hectares (Ghassemi *et al.*, 1995).

### ***I.1.2.2 Salinisation secondaire***

Cette salinisation d'origine anthropique (secondaire) est provoquée par l'activité agricole. Elle est due à :

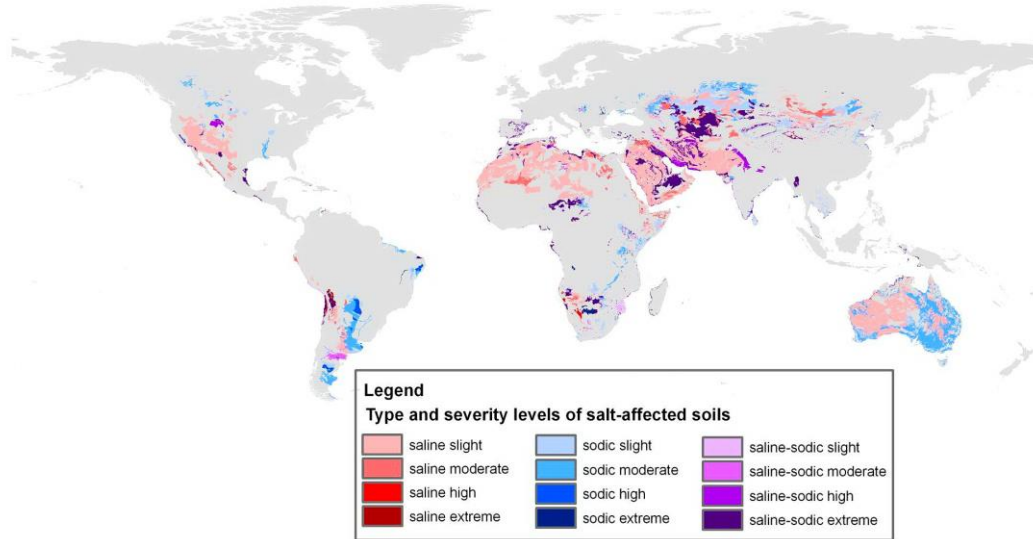
1. L'eau d'irrigation de qualité médiocre et lessivage naturel insuffisant ;
2. La remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et le transport de sels par remontées capillaires (Bouttelli, 2012 *in* Marc, 2001).

Il faut noter que 58% des Terres irriguées sont menacée par la salinisation secondaire (Metternicht et Zinck, 2003).

### **I.1.3 Salinisation des terres dans le monde et en Algérie**

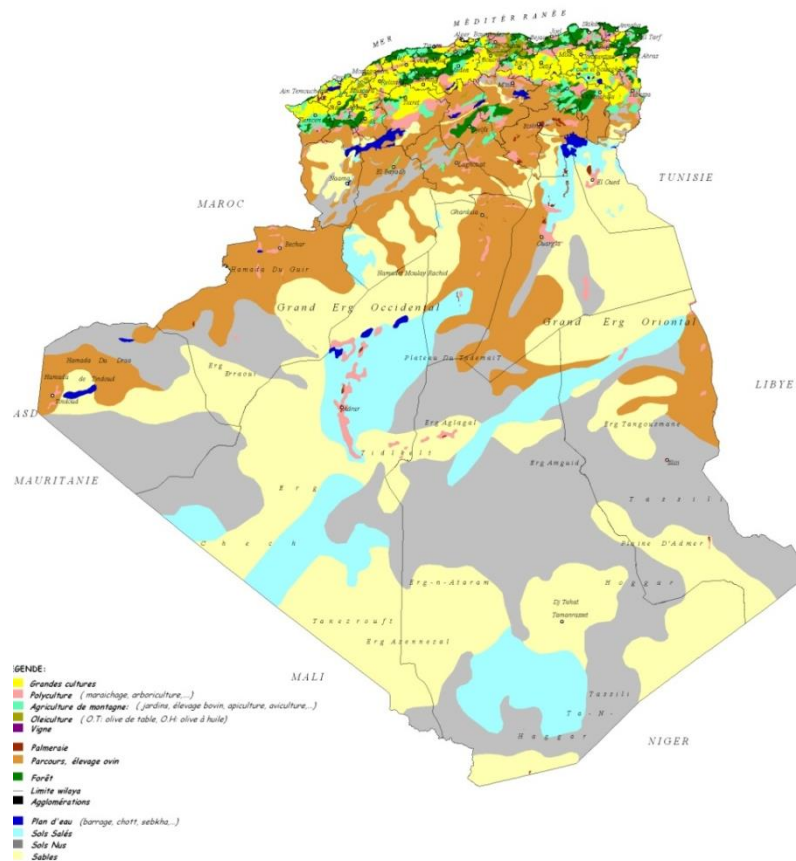
Près de 33% des terres arables dans le monde sont affectées par la salinité (Gupta et Abrol, 1990 *in* Bouhata *et al.*, 2015). Selon Lhissou *et al.*, (2014), la salinité du sol menace la plus part des pays (voir figure 1). Elle représente 20% pour l'Australie, 27% pour l'Inde, 30% pour l'Égypte, 28% pour le Pakistan et 50% pour l'Irak (Stockle, 2013 *in* Nawar *et al.*, 2014).

L'Algérie, n'est pas épargnée par ce phénomène. Les zones arides et semi-arides constituent les espaces géographiques privilégiés de ce phénomène (Halitim et Robert, 1987 ; Halitim, 1988). La plupart des sols agricoles sont affectés par la salinité ou susceptibles de l'être (Botelli et Durant, 1958). Les sols salins sont très répandus dans les basses plaines de l'Oranie, dans la vallée de la Mina près de Relizane, sur les hautes plaines au sud de Sétif de Constantine, aux bords de certains chotts. Aussi, elle a une grande extension dans les régions sahariennes au sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Botelli et Durand, 1958) (voir figure 02).



**Fig. 01 :** Distribution globale de la salinité dans le monde Source :

<https://globusgreen.files.wordpress.com/2014/12/biosaline-agroforestry-and-forestry-world.jpg>  
consulté le 8/11/2017.



**Fig. 02 :** Distribution de la salinité dans l'Algérie Source :

([http://insid.dz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64&Itemid=1](http://insid.dz/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=1)) consulté le  
25/09/2017.

Les analyses de la conductivité électrique du sol montre qu'il y a une salinisation évidente et que cette dernière est liée à la qualité des eaux d'irrigation diversement minéralisée de la nappe phréatique du mio-pliocène de la région de Biskra (Dekhinatet *et al.*, 2010).

Selon Dekhinatet *et al.*, (2010), la lecture des cartes interpolées de la conductivité électrique du sol, obtenues avec un système d'information géographique (SIG), montre que la zone Sud plus affectée que la partie Nord. Cette répartition spatiale est liée à plusieurs facteurs tels que les propriétés physiques du sol, la pente et le mauvais drainage (Dekhinatet *et al.*, 2010).

Les sols de la plaine de Gadaine au Nord-Est Algérien, sont formés par des alluvions quaternaires dont une bonne partie est touchée par la salinité (Rabah *et al.*, 2014). Cette salinisation généralisée des sols est liée aux caractéristiques morpho-climatiques de cette zone mais aggravée par une socialisation rapide de ces espaces endoréiques (Rabah *et al.*, 2014). En Algérie, les zones arides et semi-arides constituent les espaces géographiques les plus touchées par ce phénomène (Halitim *et al.*, 1987; Halitim, 1988).

La mise en valeur des terres agricoles par l'instauration de systèmes de drainage adéquats dans les régions à caractère climatique aride et semi-aride, permet une nette amélioration des rendements agricoles (Dakak *et al.*, 2011). En général, les sols salés sont caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 7 dS/m et un pourcentage de sodium échangeable qui varie de 5 à 60% de la CEC (Botelli et Aubret, 1975).

#### **I.1.4 Type de salinité de sol**

La salinisation regroupe plusieurs mécanismes de dégradation : la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation qui sont trois phénomènes différents.

##### ***I.1.4.1 Sodisation***

La sodisation est l'échange de sodium sur le complexe absorbant des argiles, cette capacité est appelée capacité d'échange cationique (CEC). La sodisation est mesurée en pourcentage de la CEC occupée par le sodium. (Bouttelli, 2012 *in* Marc, 2001).

##### ***I.1.4.2 L'alcalinisation***

Littéralement, il s'agit d'une élévation du pH du sol sous l'effet de l'accumulation de bases. En milieu aride, la forte évaporation conduit à concentrer les sels de surface du sol (Bouttelli, 2012 *in* Marc, 2001).

## **I.2 Télédétection**

### ***I.2.1 Définition***

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci (Bonn, 1994).

### ***I.2.2 Télédétection appliquée aux sols***

L'application de la télédétection à l'étude des sols à trois buts principaux :

- 1) l'identification des types de sols en vue de leur cartographie ;
- 2) La connaissance de la dynamique des facteurs à variation rapide comme l'humidité ;
- 3) L'étude de l'évaluation de la dégradation des sols en dans un objectif de conservation (Bonn, 1996).

Les techniques informatiques, par leur rapidité et leur fiabilité, sont capables d'automatiser une partie du travail cartographique. L'emploi des images de télédétection pour la cartographie de l'occupation du sol demeure encore une affaire de spécialistes.

La télédétection appliquée au sol doit tenir compte de toutes ces composantes et de leur interaction avec les rayonnements électromagnétiques qui servent de support à l'information télédéteectée. Il existe des relations entre la géologie, la géomorphologie et la pédologie, ces relations sont prouvées par l'utilisation de la télédétection comme moyen efficace (Bonn, 1996).

### ***I.2.3 Objectifs de la télédétection appliquée aux sols***

Selon Bonn (1996), l'application de la télédétection à l'étude des sols doit prendre en considération : L'identification des types de sols et la connaissance de la dynamique des facteurs (variables physiques) à variation rapide (Humidité) et les facteurs relativement stables (pseudo-invariant) dans le temps tels que la couleur, la texture, la composition minéralogique et chimique.

Ces facteurs affectent la réflexion du rayonnement électromagnétique dans le visible, le proche et le moyen infrarouge. L'étude de la signature spectrale est la base de l'identification des sols, qui sont plus variés que celles des végétaux, en particulier elle est comprise entre 0,5 et 2,5um (Bonn, 1996).

L'étude de l'interaction entre ces variables physiques du sol (hydriques, thermique...etc.) et les ondes électromagnétiques permettra de détecter et de cartographier les changements au niveau

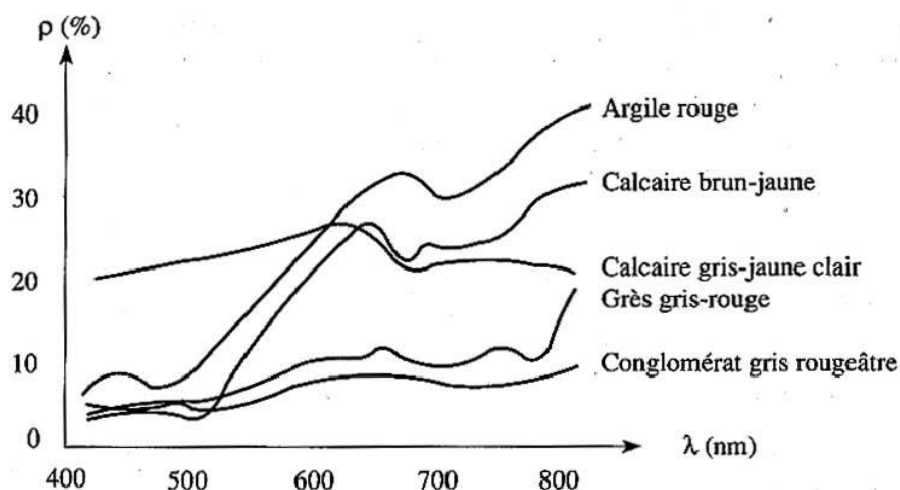
du sol. Si l'objectif de l'étude spatiale est de faire un diagnostic de l'état des sols, le recours à l'approche spectrale se justifie. Cependant, si l'objectif est une prévention d'évolution future de la dégradation des sols, on utilise une approche géométrique en spatialisant des modèles empiriques de perte de sol comme le modèle universel de pertes de sols (Wischmeier, 1958).

## I.2.4 Propriétés spectrales des sols

### I.2.4.1 Domaine visible (VIS) et proche infrarouge (PIR) :

D'après Bonn (1996), les débuts de la télédétection quantitative et en 1970, les spectres de sols ont été étudiés, des mesures en laboratoire sur une série d'échantillons de sols variés ont été utilisés pour bien décrire la forme générale du comportement spectral de sol (Bonn, 1996) (voir figure 03). Les travaux qui ont suivi ont confirmé ces observations (Bonn, 1996). Globalement, la réflectance des sols diffère beaucoup selon l'amplitude moyenne (Bonn, 1996). En effet, il existe toute la gamme de situations entre les sols très clairs (très sableux, très calcaires, ou encore gypseux...) qui réfléchissent fortement le rayonnement solaire (voir la figure 03) ; et les sols très foncés qui absorbent la majorité du rayonnement (très argileux, riches en matières organiques) (Bonn et Rochon, 1992).

L'albédo du sol (l'ensemble de bruits réfléchis par le sol) est un critère très important puisqu'il est pris en considération dans la modélisation physique du fonctionnement de l'atmosphère (Bonn *et al.*, 1985).



**Fig. 03** : Signatures spectrales de quelques roches Source : (Bonn *et Rochon*, 1992).

### ***1.2.4.2 Couleur et forme des spectres***

Malgré que la notion de couleur peut paraître un peu « artistique » dans le contexte d'une approche scientifique (Bonn ,1996), elle reste un élément essentiel pour l'étude des sols. La couleur est un effet de la sensation visuelle d'une absorption, c'est-à-dire une réflexion inégale de la lumière selon la longueur d'onde (Bonn ,1996). L'atlas *Munsell* des couleurs est largement utilisé dans l'étude des sols, tant sur le plan de la caractérisation sur le terrain et de la cartographie que dans l'étude de la pédogenèse et la classification des sols (Munsell colour company, 1971). En effet, la couleur d'un objet opaque peut être calculée en utilisant les lois de la colorimétrie dans des conditions standards, et cela à partir de son spectre de réflectance dans le visible [370 -770 nm]. Elle est exprimée dans les systèmes de mise au point par la commission internationale de l'éclairage.

La couleur est une donnée tridimensionnelle, basée sur les trois primaires, rouge (R), vert (V) et bleu (B) soit le système de la composition colorée RVB (Bonn, 1996). Ce système est capable d'inverser la démarche précédente et d'estimer les valeurs de réflectance à partir de la couleur des sols mesurés sur le terrain et de comprendre comment la couleur influe sur les mesures obtenues par le satellite. Des relations simples ont été établies entre la couleur et les valeurs de réflectance dans les bandes visibles des satellites de télédétection optique (Bonn *et al.*, 1993).

### ***1.2.4.3 Indices spectraux spécifiques aux sols***

Selon Caloz (1994) un indice spectral se définit comme une variable synthétique, numérique qui caractérise l'intensité ou l'extension d'un phénomène trop complexe pour être décomposé en un nombre maîtrisable de paramètres.

Si on s'intéresse aux thèmes sol et végétation, les changements subtils de la couleur et de la répartition spatiale de la végétation peuvent être considérés comme un indicateur de changements et de dégradations des milieux naturels (Chikhaoui *et al.*, 2006). Dans ce sens, plusieurs travaux ont montré l'intérêt d'utiliser les indices spectraux basés sur la courbe de réflectances des sols (NDVI, SAVI, TSARVI, LDI, IB, RI, IC, IF...etc.) pour caractériser l'état

de surface des sols particulièrement dans les régions arides et semi-arides, tels que :

Indice de brillance (**IB**)  $IB = \sqrt{(C_b^2 + C_v^2 + C_r^2)}$  (Bonn, 1996).

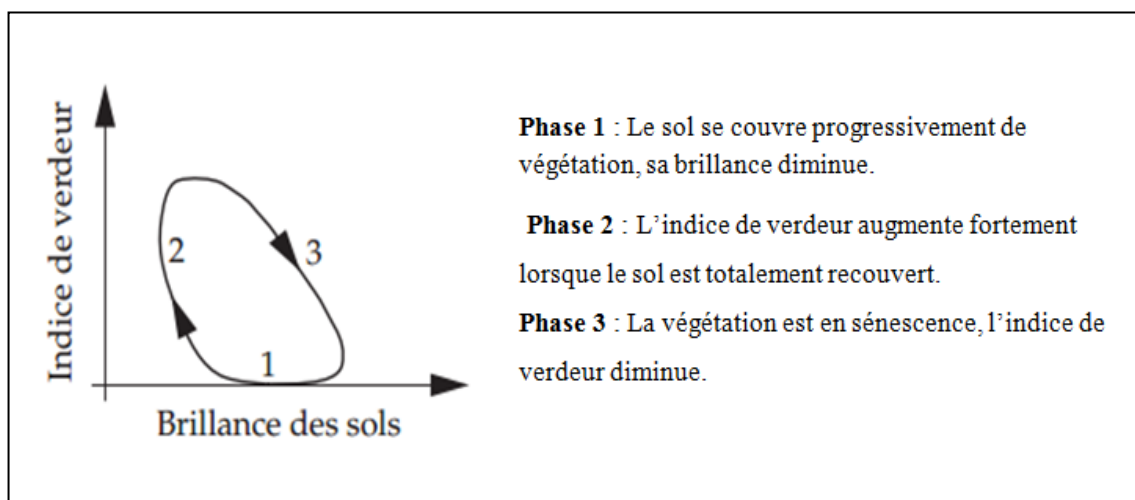
Indice de rougeur (**RI**)  $RI = \frac{C_r - C_v}{C_r + C_v}$  (Bonn *et al.*, 1987).

Indice de coloration (**IC**)  $IC = \frac{C_r - C_b}{C_r}$  (Bonn *et al.*, 1987).

Indice de forme (**IF**)  $IF_{VIS} = \frac{2 * C_r - C_v - C_b}{C_v - C_b}$  (Bonn *et al.*, 1994).

Dont : Cr, Cv, Cb représentent les valeurs de la réflectance dans le domaine spectral visible mesurées par le capteur *thematic mapper* (TM) du satellite Landsat et qui sont respectivement TM3 (Rouge), TM2 (Vert) et TM1 (Bleu).

En plus de ces trois indicateurs, les sols peuvent aussi être caractérisés par l'intensité (**I**), la teinte (**T**) et la saturation (**S**) qui correspondent, respectivement, à la brillance de la couleur, à la dominance spectrale de la couleur, ainsi qu'à la pureté de la couleur. Sachant que la végétation protège les sols contre la dégradation, les indices de végétation comme le **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*) et le **TDVI** (*Transformed Difference Vegetation Index*) ont été aussi utilisés pour la caractérisation du sol. En outre, la transformation Tasseled Cap (TC) proposée par Kauth et Thomas (1976), peut être considérée comme un bon indicateur de l'état des sols et dont l'approche repose sur une procédure empirique. La transformation TC est capable de produire de nouveaux système d'axes choisi de manière que chacun d'eux puissent s'interpréter dans un sens thématique, c'est-à-dire représenter une variable biophysique de la végétation et des sols (voir figure 4).



**Fig.4** : Cycle d'évolution de la végétation verte en référence à la droite des sols Source Caloz et Collet, 2001).

La littérature scientifique révèle plusieurs indices spectraux spécifiques à la cartographie de la salinité. Le tableau suivant représente une petite synthèse bibliographique sur les indices spectraux de salinité les plus utilisés (voir le tableau I).

**Tab. I :** Les indices de salinité (Allbed et Kumar, 2013)

<b>Indice</b>	<b>Equation</b>	<b>Auteur</b>
SI-1(2)	$\sqrt{B * R}$	Douaoui <i>et al.</i> , 2006
SI-2(2)	$\sqrt{B^2 + R^2 + NIR^2}$	Douaoui <i>et al.</i> , 2006
SI-3(2)	$\sqrt{B^2 + R^2}$	Douaoui <i>et al.</i> , 2006
SI	$\sqrt{B * R}$	Khan <i>et al.</i> , 2005
<b>SI-1</b>	ALI 9/ALI 10	Douaoui <i>et al.</i> , 2006
<b>SI-2</b>	(ALI6-ALI9) / (ALI6+ALI10)	Douaoui <i>et al.</i> , 2006
<b>SI-3</b>	(ALI9-ALI10) /(ALI9+ALI10)	Bannari <i>et al.</i> , 2008
<b>S1</b>	B/R	Bannari <i>et al.</i> , 2008
<b>S2</b>	(B-R)/(B+R)	Bannari <i>et al.</i> , 2008
<b>S3</b>	(B*R)/B	Abbas et Khan, 2007
<b>S6</b>	(R*NIR)/GB	Abbas et Khan, 2007

### I.2.5 Prétraitement des données de télédétection

Il existe trois types de corrections de données satellitaires indispensables. La correction géométrique, la correction atmosphérique et la correction radiométrique (Coulibaly, 2013).

En ce qui concerne les effets atmosphériques, elle est dominée par l'absorption causée par les gaz (Lhissou *et al.*, 2014). On appelle fonctions de prétraitement les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information spatiale (Rekis, 2012).

#### I.2.5.1 Correction géométrique

Le but est de corriger les distorsions géométriques de l'image dont les sources sont diverses tels que le roulis, le lacet et le tangage des capteurs satellites (Coulibaly, 2013). Une bonne géométrie signifie que l'ensemble des données spatiales et des documents cartographiques

sont parfaitement superposables selon un système de projection (Caloz *et al.*, 1991, Caloz et Collet, 2001). L'utilisation des méthodes de correction géométrique permettent de passer d'une projection à une autre et de rendre les séries temporelles exploitables (Bonn, 1994).

### ***1.2.5.2 Corrections atmosphériques***

Les corrections atmosphériques agissent principalement comme un facteur additif puisque les courbes spectrales évoluent de manière sensiblement parallèle (Caloz et Collet, 2001). L'objectif de ces corrections est de corriger les effets atmosphériques pour en extraire la véritable information qui nous intéresse (La réflectance de la surface terrestre) (Lavorini, 2010).

### ***1.2.5.3 Correction radiométrique***

La correction radiométrique est une étape critique qui consiste à corriger la dérive du capteur radiométrique pour extraire des informations fiables et précises de l'image. Cette correction est plus importante pour le calcul des indices de végétation, afin de les rendre indépendants vis-à-vis les variations des conditions d'éclairage lors de l'acquisition des données (Bonn *et al.*, 1994).

Le calibrage radiométrique relatif à l'égalisation des comptes numériques des données multispectrales a pour objet de réduire le lignage subsistant par les différentes procédures d'équation d'histogramme de la scène (Bonn, 1994).

## **1.2.6 Cartographie des sols à l'aide des images satellitaires**

Pour faire face à des difficultés de :

- 1) Choix de l'emplacement des sites d'observation (profils, trous de tarières, etc.) ;
- 2) Traçage rapide et précis des limites des unités pédologiques ;
- 3) la compréhension des règles de distribution des sols dans le paysage ; le pédologue s'est armé progressivement, depuis le début de ce siècle, de centaines de règles que l'on appelle les techniques annexes de la cartographie pédologique (Boulaine, 1980 *in* Merzouk, 1994).

Parmi ces techniques, la carte topographique puis la photographie aérienne qui ont été d'un apport non négligeable au pédologue de gagner du temps et de la précision dans la réalisation des cartes des sols. Depuis les années 1930, la photographie aérienne est devenue une technique de pointe bien établie en cartographie des sols. Les photographies aériennes ont été utilisées comme support par les pédologues pour les aider dans leurs opérations de cartographie

des sols (Merzouk, 1994). Cela leur permet d'interpoler les limites des classes pédologiques grâce aux points d'observation comme les profils ou les trous de tarière établis dans un protocole d'échantillonnage sur le terrain.

Les pédologues ont obtenu grâce à l'application des images satellitaires deux catégories d'informations additionnelles : Une plus grande couverture spatiale et la possibilité de découper spectralement l'information, c'est-à-dire de relier la tonalité de l'image à la couleur du sol, cette dernière est interprétée dans la partie visible du spectre (Bonn, 1996).

Dans la première génération de données satellitaire (MSS de Landsat dès années 70), les images classées selon la couleur des surfaces se sont révélées très utiles à la cartographie pédologique de reconnaissance. Par exemple en Tunisie et dans le cas des régions arides qui sont particulièrement favorables à cette approche (Bonn *et al.*, 1987). Une séparation des classes de sols compatible avec les exigences de la cartographie aux échelles du 1/200 000 au 1/100 000 est permise grâce à la richesse spectrale du capteur TM de Landsat, ces dernières échelles constituent les échelles de reconnaissances dans plusieurs pays « Maroc, Tunisie » (Bonn *et al.*, 1987). Depuis le début des années 1970, et avec l'émergence du potentiel que pouvaient représenter les données satellitaires, les pédologues ont envisagé la possibilité d'utiliser ce type de données dans les études de reconnaissance et de cartographie des sols (Merzouk, 1994). Kristof et Zachary (1971) *in* Merzouk, (1994) ils ont démontré, par une analyse numérique de reconnaissance des formes, que les données MSS aéroportées pouvaient servir à la cartographie des sols de petites régions avec un degré satisfaisant de précision. Weismiller et Kamonsky (1978) *in* Merzouk, (1994), rapportent que les résultats d'analyse de données satellitaires peuvent aider grandement les spécialistes en sciences du sol dans la préparation des différentes classes de sols, la délimitation du matériau parental, le raffinement des limites entre les unités de sols ainsi que dans la préparation des cartes de drainage et de teneur en matière organique.

Horvath *et al.* (1984), dans une étude sur les relations entre des données numériques Landsat et les propriétés de certains sols en Arizona, concluent que les données de réflectance du satellite apportent une information très riche en ce qui concerne la définition et la distribution des unités de sol.

***Chapitre II :***  
***Matériels et méthodes***

Dans ce chapitre on va présenter l'approche méthodologique adoptée pour l'étude des relations existantes entre le signal radiométrique du capteur (OLI) de Landsat 8 et la salinité mesurée au niveau des placettes de terrain dans la région d'El Khacha du Zahrez Gharbi (Wilaya de Djelfa).

Cette étude permettra de déterminer le pouvoir estimatif de la salinité du sol par l'utilisation des données de télédétection et de cartographier ce phénomène à une échelle régionale.

## II.1 Choix de la zone d'étude

La zone d'étude (El khacha) se localise dans la partie Nord-Ouest de Zahrez Gharbi. Elle est située à 33 Km au Sud- Ouest de la commune Hassi Bahbah et à 14km au Nord-Ouest de la commune de Zaafrane (voir figure 05).



**Fig. 5** : Localisation de la zone d'étude (modifier). Source : Google Earth (2017).

La planimétrie sous MapInfo® nous a permis d'estimer sa superficie à 2111 ha. La zone d'étude est considérée comme une enclave à l'intérieur de la sabkha d'où le nom el Khacha est attribué à cette zone. L'emplacement particulier de la zone d'étude l'a prescrit dans une catégorie extrême sous l'influence de la salinité et des conditions de milieu. Malgré ça, notre zone d'étude est considérée comme un refuge aux éleveurs de la région comme une zone de transhumance par excellence durant toute la période hivernale par sa diversité floristique remarquable (voir planche 01).

Du point de vu morphologique, la zone d'étude présente une diversité de paysages allant des dépôts de sable (photos F, planche 1) (dune de sable dans la partie centrale de la zone d'étude) à des terrains plats dont le couvert végétal est très abondant composé par des espèces halophytes très résistantes à la salinité (voir photos E planche 1). L'absence d'informations sur cette zone nous a motivés d'avantage pour faire une description physique selon quelques paramètres fixée par l'étude et de faire une tentative de cartographie de la salinité superficielle du sol par l'utilisation des données de télédétection.



**Planche de photos 01** : A) Cheptels camelins, B) point d'abreuvement (source d'eau) C) Cheptels ovins, D) chott salin, E) Couvert végétal, F) voile sableux.

## II Supports et moyen de travail

### II.1 Supports de travail

#### II.1.1. Les données de télédétection

Aujourd'hui, le développement scientifique et les progrès technologiques, jouent un rôle important dans les études des problèmes environnementaux (Daem *et al.*, 2011 in Hamid *et al.*, 2016). L'exploitation des données satellitaires est devenue un outil efficace pour la cartographie des sols affectés par le sel (Mougenot *et al.*, 2009 ; Khan *et al.*, 2001 ; Abbas *et al.*, 2013 ; Lhissou *et al.*, 2014). La réponse spectrale du sol enregistrée au niveau des capteurs satellitaires est une indication forte utile pour la caractérisation du milieu, les niveaux de changements et la dégradation du milieu naturel (Maimouni *et al.*, 2011). Le capteur OLI du Landsat 8 offre des données dans le domaine multispectrale en six bandes indiquent les valeurs de la réflectance du sol sur les pixels de l'image (Scudiero *et al.*, 2015). Les données Landsat ont été largement utilisées pour la détection du sel et la cartographie de la salinité des sols, (Abbas *et al.*, 2013 ; Scudiero *et al.*, 2015 in Hamzeh *et al.*, 2013). Dans notre cas nous avons utilisé une image acquise le 04/04/2017 identifiée sous le code LC81960362017094LGN00 dont le *Path* = 96 et le *Row* = 36. Cette dernière est également caractérisée par 54,74 ; 139,62 respectivement pour l'élévation du soleil et l'azimut. La couverture nuages est de 0,06% seulement. Il faut noter que l'image est géoréférencée selon le *World Geodetic System* WGS 84 zone 31 Nord avec une résolution spatiale de 30 m (voir annexe 1 représentant les caractéristiques de l'image utilisée). Les données multispectrales Landsat, la transformation Tasseled Cap (TCB (Brightness), TCG (Greenness) et TCW (Wetness) proposée par Kauth et Thomas (1976), l'indice de végétation NDVI proposé par Rouse *et al.*, (1974), l'indice d'humidité NDMI proposé par Mobasheria et Bidkhani, (2013) et les indices de salinité : SI<sub>1</sub> (Formule I) et SI<sub>2</sub> (Formule II) proposé par Khan *et al.*, (2001) , ont été tous utilisées comme variables indépendantes de la salinité du sol. Les formules de ces indices de salinité sont :

$$SI_1 = \sqrt{TM1 * TM3} \dots\dots\dots \text{Formule (I)}$$

$$SI_2 = \sqrt{TM2 * TM3} \dots\dots\dots \text{Formule (II)}$$

Le choix de ces indices de salinité ( $SI_1$  et  $SI_2$ ) a été basé exclusivement sur les valeurs des RMSE (*Root-mean-square deviation*) les plus faibles obtenus dans plusieurs travaux de cartographie de la salinité. A titre d'exemple (Lhissou *et al.*, 2014) ont obtenu un coefficient de corrélation de 0,68 et un RMSE de validation de 0,24 pour l'indice  $SI_1$ .

### **II.1.2. Echantillonnage et données de terrain**

Les données de terrain relative à cette étude est de l'ordre de 141 échantillons de sol repartis sur la totalité de la zone d'étude (voir figure 06). Les échantillons ont été sélectionnés de façon aléatoire selon l'accessibilité et la disponibilité des voix d'accès. Chaque échantillon est d'une profondeur maximal de deux (02) Cm et un rayon de 30 Cm. La quantité de sol prélevé au niveau de chaque échantillon était de 1Kg. Les échantillons du sol ont été mis dans des sachets en plastique est codifié selon leurs emplacements par l'utilisation de GPS. Il faut noter que la campagne de terrain a été réalisée en trois jours ce qui coïncide avec un décalage de 04 jours par rapport à la date d'acquisition de l'image Landsat. Les 141 échantillons du sol ont fait l'objet d'analyse au laboratoire pédologique de la faculté SNV de l'université Ziane Achour (Djelfa). La description de la couleur des échantillons du sol, l'humidité résiduelle, le calcaire total, le pH et la conductivité électrique, sont les paramètres étudiés et analysés au laboratoire. La préparation des échantillons pour les analyses pédologiques est représenté dans les sections suivantes.

### **II.1.3 préparation des échantillons (préparation de la terre fine)**

Selon Baize (2000), la préparation de la terre fine est un passage obligatoire dans la réalisation des analyses pédologiques. La terre fine est un mélange statique considéré comme l'unité fondamentale de ces analyses permet d'émettre considérablement les agrégats et d'obtenir une poudre homogène (soit des particules  $< 2$  mm) (Baize, 2000). Cette préparation est passée par les trois phases à savoir : le séchage, émottage et le tamisage.

#### **II.1.3.1 Séchage**

Les échantillons sont brassés manuellement et aplatés sur du papier à l'air libre pendant 72h dans une grande salle à l'ombre (voir figure 07).

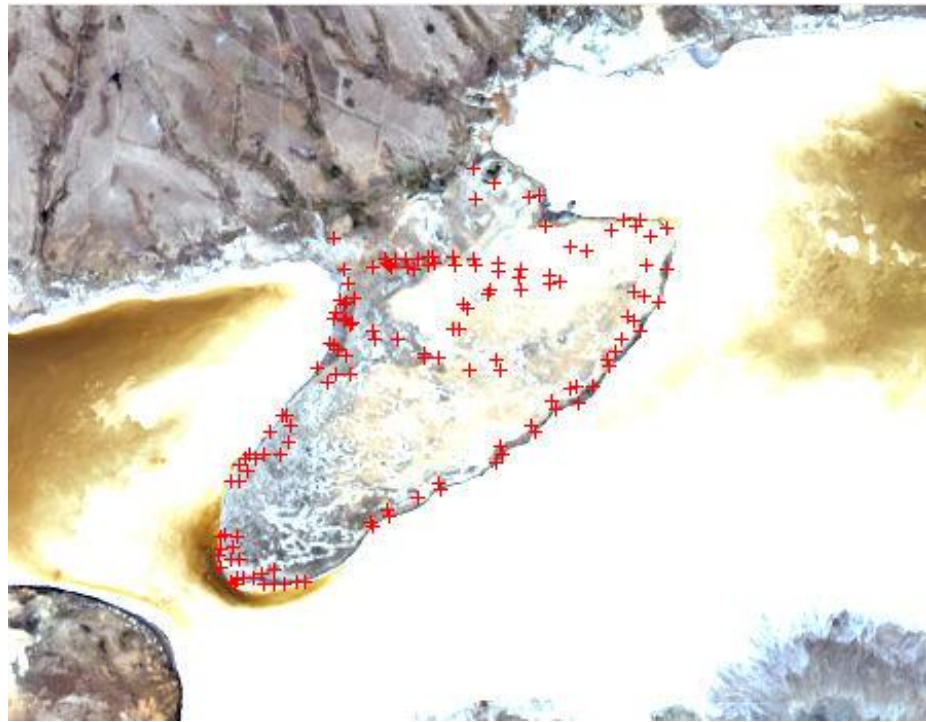


Fig. 6 : Emplacement des échantillons prélevés sur la zone d'étude.



Fig. 07 : Séchage des échantillons de sols à l'aire libre.

### **II.1.3.2.Emottage des agrégats**

L'objectif de cette opération est l'élimination des éléments grossiers et de réduire les agrégats en fragments < à 2 mm.

### **II.1.3.3.Tamisage**

Cette phase consiste à tamiser les échantillons de sols à travers une passoire à toile métallique de maille de 2 mm de diamètre pour l'obtention de la terre fine.

## **II.2 Description des échantillons et analyses pédologiques**

### **II.2.1 Couleur**

La couleur est un critère descriptif important dans les travaux pédologiques (Maignien, 1980), Elle indique plusieurs constituants dans la composition du sol et les niveaux de leurs changements (Escadafal, 1989 ; Baize et Jabiol, 1995). La charte Munsell est un code universel le plus utilisé pour la détermination de la couleur (Baize et Jabiol, 1995). Elle se compose de planches de teintes différentes. C'est une représentation dont l'axe vertical porte une valeur allant du noir au blanc. Les deux autres axes représentant un graduant des couleurs symbolisées par un chiffre et 1 ou 2 lettres (c'est la teinte) et l'intensité qui indique la saturation de la couleur variant de 0 à 8 (Ardouin, 2014).

D'après Delaunois (2006), l'utilisation de la terre fine dans la détermination de la couleur est préférable pour éviter certaines difficultés (la présence des éléments grossiers dans l'échantillon). Dans notre cas on a étalé une petite quantité des échantillons de sol (terre fine) sur les planches de la charte de Munsell dans une salle à une lumière artificielle constante pour minimiser les erreurs d'estimation de la couleur ce qui est en accord avec Escadafal *et al.*, (1988).

### **II.2.2 Humidité résiduelle**

L'humidité résiduelle (Hr) est définie par le pourcentage (%) de la teneur en eau dans un échantillon du sol séché à l'air libre, cette quantité est exprimée au laboratoire par la perte de poids soit la différence de poids avant et après séchage à 105 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (Baize, 2000 ; Boutelli, 2012).

L'humidité résiduelle (Hr) est calculée par l'équation suivante :

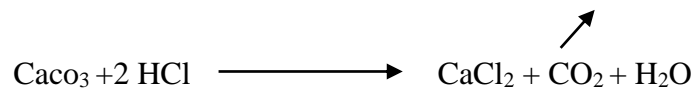
$$Hr = \frac{Pair - P_{105^{\circ}C}}{Pair} \times 100$$

Avec :

Hr : Humidité Résiduelle ; Pair : poids de sol séché à l'air libre et P<sub>105°C</sub> : poids de sol séché à une température de 105°C.

### II.2.3 Calcaire total

Le calcaire est défini par la présence de carbonate dans les différentes fractions de sol (fraction fine et grossière) (Ruellan, nd), c'est le résultat de l'altération des roches sédimentaires principalement organogènes qui peuvent être d'origine détritique ou chimique (Vatan, 1967 ; Lazot et Mathieu, 1990 in Djili et al., 1999). D'après Mathieu et Lozet, (2002) et Legros (2007) in Gadjia (2010) la détection du calcaire dans les sols est basée sur un test simple avec l'acide chlorhydrique, l'ajout de ce dernier sur un sol qui contient du calcaire provoque un dégagement de CO<sub>2</sub> sous forme des bulles d'air, le volume de ce gaz varie en fonction de la quantité du calcaire dans l'échantillon (voir réaction chimique).



Dans notre cas la méthode gazométrique par l'utilisation du calcimètre de Bernard a été utilisée puisque c'est la méthode la plus utilisée dans la détermination du pourcentage du calcaire dans le sol à travers la mesure direct du volume CO<sub>2</sub> dégagé (Baize et Girard, 2008 ; Bouhanna, 2011 ; Touhtouh et al., 2014).

Le % CaCO<sub>3</sub> est estimé par l'utilisation de la formule suivante :

$$\% \text{CaCO}_3 = V_{\text{CO}_2_{\text{eh}}} * 100 / V_{\text{CO}_2_{\text{CaCO}_3 \text{ pur}}}$$

Avec :

% CaCO<sub>3</sub> : pourcentage du calcaire dans l'échantillon ;

V<sub>CO<sub>2</sub>\_eh</sub> : volume du CO<sub>2</sub> dégagée par l'échantillon ;

V<sub>CO<sub>2</sub>\_caco3pur</sub> : volume du CO<sub>2</sub> dégagée par l'échantillon du calcaire pur.

### II.2.4 Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) d'un sol est un paramètre qui permet de déterminer la capacité de transmettre le courant électrique à travers la mesure de la quantité d'ions en solution aqueuse (CEAE, 2015). Elle indique également la concentration des sels dans un l'échantillon du sol (CEAE, 2015).

Dans notre cas les mesures de la CE ont été réalisées par l'utilisation de la méthode électrométrique (Pansu et Gautheyrou, 2006), La mesure de la conductivité électrique d'un sol par la méthode électrométrique, est basée sur la préparation d'une solution du sol de rapport 1/5 et agiter le mélange pendant une heure. Après un repos de 1/2 h, les électrodes du conductivimètre sont plongés dans la solution ce qui permettra d'obtenir la valeur de la conductivité électrique après la stabilisation de l'appareil.

### II.2.5 pH *eau* (Acidité réelle)

Le pH est un critère physico-chimique qui indique l'acidité du sol (Gobat *et al*, 2003). Il exprime la concentration des protons dans une solution du sol (Calvet, 2003 ; Mathieu et Lozet, 2011 ; CEAE, 2011).

La méthode décrite par Duchaufour (1997) et Gri (1999) a été utilisée pour les mesures de pH de nos échantillons du sol. Cette méthode consiste à mélanger une quantité d'échantillon de sol dans de l'eau distillée, avec un rapport de 1 / 2,5 (Baize et Jabiol, 1995 ; Baize, 2000). Après 2 heures d'agitation et 30 minutes de repos les électrodes de pH-mètre trompés permet d'avoir la valeur direct du pH.

#### **Remarque :**

- Dans nos analyses pédologiques trois à cinq répétitions pour chaque échantillon ont été réalisées pour l'obtention des mesures moyennes pour chaque paramètre étudié.
- Le choix des méthodes d'analyse a été dicté par la disponibilité des produits chimiques et de disponibilité du matériel au laboratoire.

## **II.3 Moyens de travail**

### **II.3.1 Matériel informatique et logiciels**

En plus d'un appareil de GPS de marque Garmin qui a servi à la localisation géographique des échantillons, un micro-ordinateur puissant a été utilisé pour fonctionner plusieurs logiciels fort utile pour la réalisation de ce travail.

### **II.3.2 MapInfo® Professional**

MapInfo® Professional est un logiciel développé par la société américaine de MapInfo corporation, Troy, New York (USA) à été utilisé dans le but d'améliorer et faciliter la cartographie numérique (Nesrine, 2006 *in* Guettou et Othmane, 2016), permettant l'insertion d'objets et de traiter plusieurs données géographiques multisources en même temps, avec des fonctions puissantes (Ken *et al.*, 2013 ; Ken *et al.*, 2014). Ce logiciel est un outil informatique complet dans le domaine de la cartographie informatisée, car il présente plusieurs avantages pour l'utilisateur tels que : la connexion à des bases de données existantes, la possibilité de transporter des objets en cours de l'application et la réalisation des cartes thématiques (Anonyme, 2002). Ce logiciel a été utilisé pour l'établissement des couches d'informations vecteurs (délimitation, carte thématique ...etc.).

### **II.3.3 ENVI® (Enviroment for Visualizing Images)**

ENVI® est un logiciel de traitement des données de télédétection, pour tous les types et les tailles d'images satellitaires (données multispectrales, données radar) (Nesrine, 2006 *in* Guettou et Othmane, 2016). L'interface graphique de ENVI est composée par des fonctions permettant à l'opérateur de gérer, classer et d'analyser les données avec les différentes méthodes de traitements d'images (Midekor et Wellens, 2013).

### **II.3.4 Weka**

Le logiciel Weka a été développé par l'université Wakaito en Nouvelles Zélande, comme un logiciel open source. Il contient plusieurs algorithmes permettant la visualisation, l'apprentissage, le traitement et l'extraction des données (Remco *et al.*, 2010 ; Ange, 2015).

## II.4 Méthodologie du travail

La démarche méthodologique consiste à cartographier la salinité du sol au niveau d'une zone de Zahrez Gharbi par l'utilisation de la télédétection. Ceci permettra de connaître le potentiel des données multispectrales, transformation NDVI - Tasseled Cap - NDMI et les indices spectraux de salinité ( $SI_1$  et  $SI_2$ ). La combinaison des données de terrain et les données de télédétection par l'utilisation de la régression ordinaire (RO) permettra de ressortir les modèles estimatifs les plus cohérents pour l'estimation de la salinité. Ceci permettra également la détermination au niveau des modèles estimatifs de salinité, les meilleures variables indépendantes explicatives de la salinité. La démarche méthodologique pour la réalisation de ce travail se résume dans la figure 7. Nous avons utilisés une image Landsat 8. Cette dernière a fait l'objet d'une correction atmosphérique pour minimiser au maximum les effets et les erreurs liés à l'atmosphère. La correction géométrique n'a pas été nécessaire puisque l'image utilisée est de type (level one) et ne présente aucune déformation géométrique ceci a été confirmé par la confrontation des coordonnées des points de contrôles (intersection de routes) à celle de l'image. Après la correction radiométrique (qui a permis l'obtention de la réflectance au niveau des pixels de l'image) nous avons réalisé les transformations nécessaires pour l'obtention des variables candidates à l'estimation et à la cartographie de la salinité (Tasseled Cap, NDVI, NDMI) et les deux indices de salinité à savoir le  $SI_1$  et  $SI_2$ . Les résultats des ces traitements ont été enregistrés dans des fichiers d'images dépendante.

Les coordonnées géographiques des échantillons ont servi à la localisation de ces derniers sur l'ensemble des données de télédétection (données multispectrales et indices spectraux) ce la qui nous a permis l'extraction des données relatives à chaque échantillon de sol. Les données de télédétection obtenus et ceux obtenus par les analyses pédologiques ont été placés dans une seule base de données géographique (BDG). Cette dernière a été divisée aléatoirement en deux groupes de données. Le premier groupe englobe les données d'apprentissage et représente 70% de la BDG. Ce groupe servira à la création des modèles estimatifs de la salinité. Le deuxième groupe (30% de BDG) regroupe les données qui vont servir à la validation de ces modèles estimatifs créés. Enfin le meilleur modèle estimatif sera retenu pour l'élaboration d'une carte thématique représentant la salinité du sol dans la zone d'étude. L'organigramme de la figure 08 résume les démarches méthodologiques de ce travail.

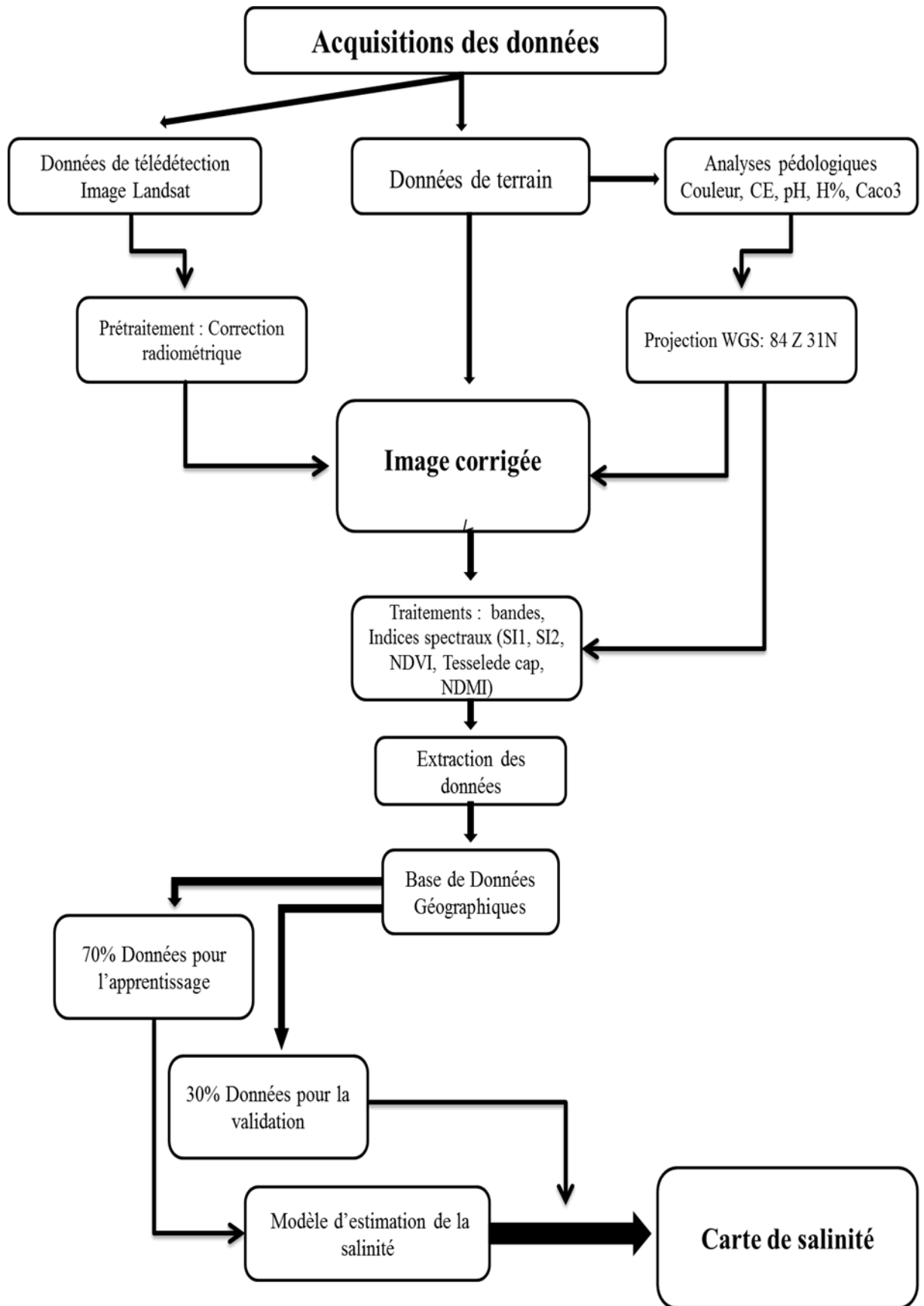


Fig.08 : Organigramme méthodologique.

***Chapitre III :***  
***Résultats et discussion***

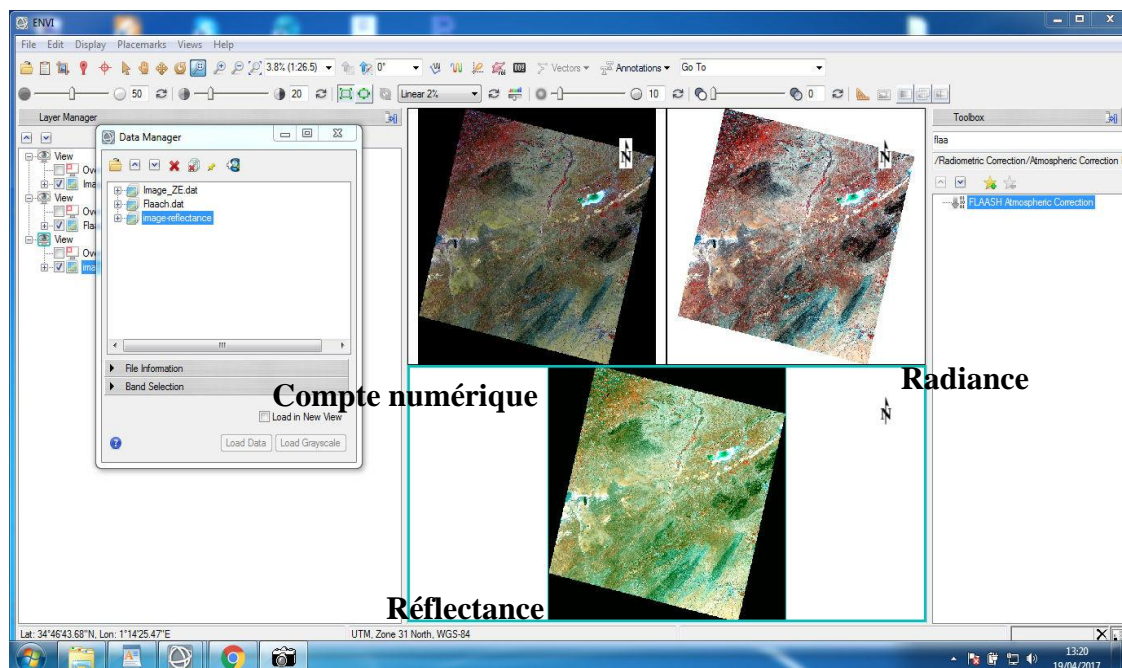
### III Résultats et discussions

Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans ce chapitre.

#### III.1 Résultats

##### III.1.1 Prétraitements et traitements des données de télédétection

L'image utilisée dans cette étude est caractérisée par un niveau (level 1) ce qui la rend dans une catégorie exploitable sans la correction géométrique (voir annexe). Les points de contrôle ont confirmés une bonne géométrie au niveau de l'image Landsat 8. En revanche la correction atmosphérique a été réalisée pour la conversion des comptes numériques des données multispectrales en valeurs de réflectance pour l'ensemble des pixels. Le module de la correction atmosphérique *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) proposé par Matthew *et al.*, (2000) a été réalisé sous le logiciel ENVI®. La figure 09 représente le résultat de l'application du FLAASH sur l'image Landsat 8 et l'obtention de nouvelles images (radiance et réflectance). Seulement les données de la réflectance ont fait l'objet d'intérêt pour cette étude.



**Fig. 09** : Résultat de l'application du module FLAASH sur l'image Landsat 8 (*Path* = 96 / *Row* = 36).

### III.1.2 Résultats des analyses pédologiques

#### III.1.2.1 Couleur des échantillons

Pour la caractérisation de la couleur des échantillons des sols prélevés durant la campagne de terrain nous avons utilisé la charte Munsell sous une lumière constante et fixe (Lamps de salle). La classification et la détermination des sols n'a pas fait l'objet d'étude dans notre travail mais nous sommes focalisés sur la couleur comme un critère influent la réflectance. Une grande variabilité de couleur a été constatée dans nos échantillons de sols. Treize (13) niveaux de couleurs ont été recensés pour les 141 échantillons. Le tableau II résume les résultats de l'application de la charte Munsell sur les échantillons des sols.

**Tab. II :** Couleurs des échantillons de sols selon la charte Munsell.

Couleur	Nombre d'échantillons	%
Brown / Marron	22	15,60
Dark brown / Marron foncé	1	0,70
Light Brown / Marron clair	30	21,26
Light brwnish gray / Gris léger clair	2	1,41
Light gray / Gris clair	1	0,70
Light yellowish brown/ Marron jaunâtre clair	2	1,41
Pink / Rose	26	18,44
Pinkish gray/Gris rose	3	2,12
Pinkish white / Blanc rosé	7	4,96
Reddish yellow / Jaune rougeâtre	16	11,34
Strong brown / Marron fort	14	9,92
Very pale brown / Marron très pale	10	7,09
White / Blanc	7	4,96
Total	141	100%

Ce tableau présente la variabilité de la couleur au niveau des échantillons de sol prélevés dans la zone d'étude. Il est clair pour les couleurs Light Brown (Marron clair), Pink (Rose) et le Brown (Marron), sont les plus dominantes avec 21.26% ; 18,44% et 15,60 respectivement. Cependant les pourcentages faibles (0,70%) ont été constatés pour les couleurs : Dark brown (Marron foncé) ; Light gray (Gris clair), autrement dit ces couleurs ont été présentes seulement dans un seul et unique échantillon de sol.

Le regroupement des 141 échantillons de sol, selon la couleur claire et la couleur foncée ont donné les pourcentages 50,99 et 10,63%.

Les échantillons de sols de couleur gris [Light brwnish gray Gris léger clair (1,418%) + Light gray Gris clair (0,709%) + Pinkish gray Gris rose (2,128%)] représentent un pourcentage cumulé de 4,255%. Il faut noter que 7 échantillons /141 (4,96%) représentent une couleur blanche.

### **III.1.2.2 L'humidité résiduelle**

Les valeurs de l'humidité résiduelle (Hr%) mesurées au niveau de nos échantillons varient entre un minimum de 0,186 %, et un maximum de 19 %. La moyenne de l'Hr est de 5,55%.

L'humidité résiduelle donne une appréciation subjective de la teneur en eau dans le sol. Le % de l'Hr est un paramètre intéressant puisqu'il peut influencer les autres caractéristiques tels que le pH, CE, couleur et...etc. (Maignien, 1980). Dans notre cas, on a distingué une grande différence spatiale de l'Hr entre la partie centrale de notre zone et le chott. Les échantillons secs sont rencontrés au niveau des dépôts de sable, par contre les échantillons humides sont localisés à l'extrémité du chott. Quelques échantillons de sol étaient très humides ou carrément un sol noyé.

### **III.1.2.3 Calcaire total (CaCO<sub>3</sub>)**

Les résultats obtenus de l'analyse du calcaire total (CaCO<sub>3</sub>) par la méthode gazométrique (calcimètre de Bernard) de l'ensemble des échantillons prélevés dans notre zone d'étude montre une variabilité (écart-type) de 4,319%. Les valeurs : 0,473 % ; 7,368% ; 27,719% sont respectivement celles du minimum, la moyenne et le maximum. Le classement des résultats d'analyse de calcaire total relatif à l'ensemble des échantillons selon la nomenclature proposée par Baize (2000) est représenté dans le tableau III. L'analyse de ce tableau montre que la quasi totalité de nos échantillons (soit presque 66%) présentent une valeur comprise entre 20 et 25 % de calcaire total ce qui les rend dans la catégorie des sols modérément calcaire. Aussi, il est bien de souligner que 31,20% (44 échantillons) des échantillons sont des sols peu calcaires (1 à 5% de CaCO<sub>3</sub>). 2,12% (3 échantillons) et 0,70% (1 échantillon) c'est les pourcentages des échantillons des sols appartenant respectivement à la catégorie des sols non calcaires et fortement calcaires.

**Tab. III** : Classification des résultats de CaCO<sub>3</sub> selon Baize (2000).

<b>Caco<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Horizon de Caco<sub>3</sub></b>	<b>Nombre échantillons</b>	<b>%</b>
< 1%	non calcaire	3	2,127
1 à 5	peu calcaire	44	31,205
5 à 25	modérément calcaire	93	65,957
25 à 50	fortement calcaire	1	0,709
Total		141	100

#### III.1.2.4 pH

L'analyse de l'acidité des échantillons de sols réalisée au laboratoire a fourni les valeurs de : 6,02 ; 7,816 et 8,827 respectivement pour le pH minimal, moyen et maximal. La variabilité au niveau du pH dans les 141 échantillons a été estimée à 0,4991. Le tableau IV, représente les résultats du pH selon le graduant et la qualification proposée par Baize (2000).

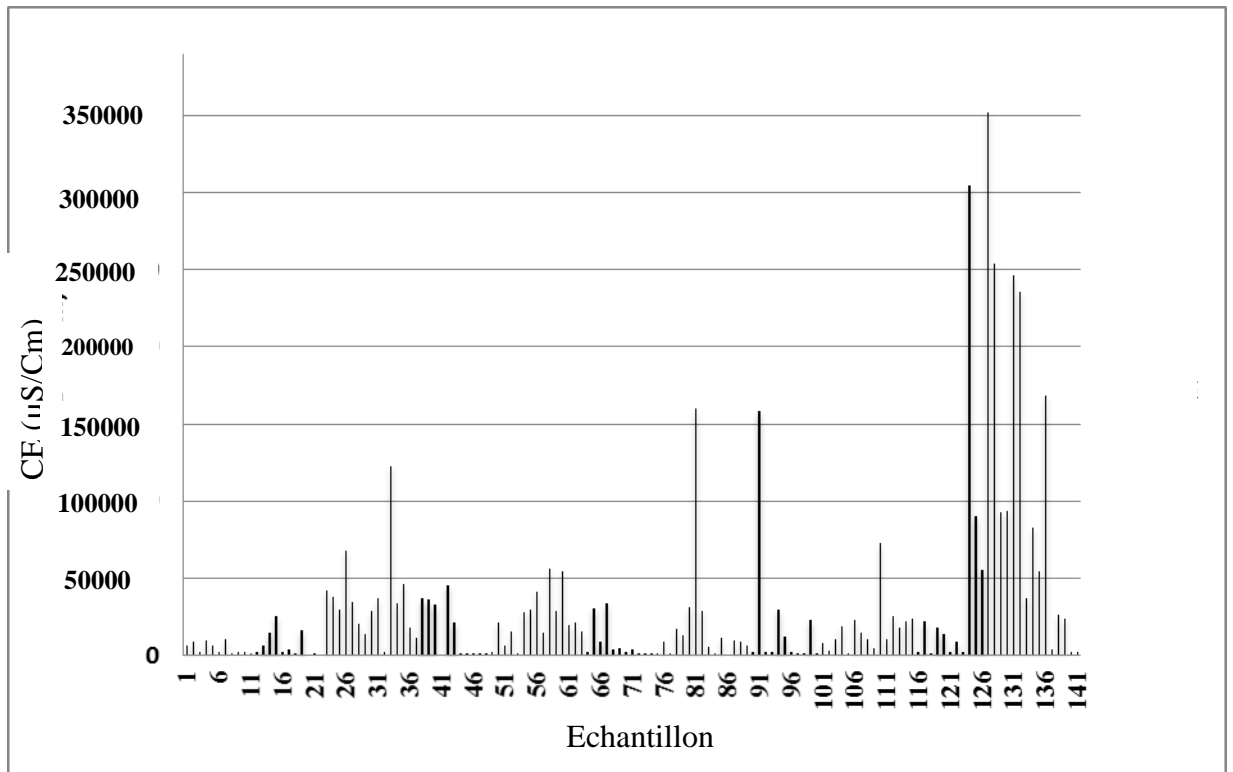
Le tableau IV est une représentation de valeurs obtenues de pH selon des classes d'acidité préétabli par Baize (2000). Ce classement nous indique que les deux classes importantes sont celles du pH neutre et basique respectivement avec 19,15% (27/141 échantillons) et 71,63% (101/141 échantillons). Seulement 2,12 % et 7,09% de nos échantillons sont qualifiés respectivement d'un pH peu acide et très basique.

**Tab. IV** : Représentation des résultats de pH selon Baize (2000).

<b>Classes</b>	<b>pH</b>	<b>Nombre échantillons</b>	<b>%</b>
[5 - 6,5]	Peu acide	3	2,128
] 6,5 - 7,5]	Neutre	27	19,149
] 7,5 - 8,7]	Basique	101	71,631
> 8,7	Très basique	10	7,092
Total		141	100

#### III.1.2.5 Conductivité électrique

La méthode électrométrique nous a permis de mesurer la salinité du sol. La méthode Pansu et Gautheyrou, (2006) a donné les valeurs de la CE du 1/5 de la solution du sol exprimées en ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) pour chaque échantillon. La figure 10, représente la variation des valeurs de la CE dans nos échantillons de sols.



**Fig. 10 :** Valeurs CE obtenues pour l'ensemble des échantillons de sols.

A la base d'analyse des résultats, on constate un vaste intervalle des mesures allant de 300 à 351900 ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) avec une variabilité estimée à 56957 ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ). La moyenne de la CE dans l'ensemble des échantillons est de 30751 ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ). L'organisation des valeurs CE selon le classement proposé par Durant (1983) nous a permis d'explorer ces résultats selon des classes de salinités figurant dans le tableau V.

**Tab. V** : Classement des résultats CE obtenus selon Durant (1983)

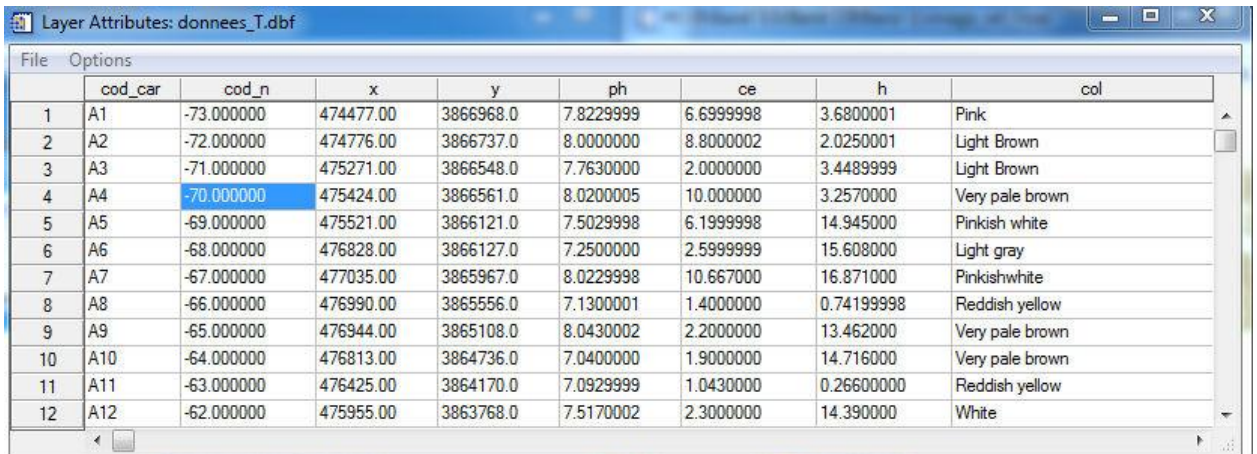
CE ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) à 25°C	Qualité des sols	Nombre des échantillons	%
[0 – 500]	Non salé	1	0,709
] 500 - 1000]	Légèrement salé	4	2,837
] 1000 - 2000]	Salé	23	16,312
] 2000 - 4000]	Très salé	22	15,603
plus de 4000	Extrêmement salé	92	65,248
Total		141	100

Les valeurs de la CE élevées « CE plus de 4000 ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) » représentent la totalité de nos échantillons de sols 65,25% des échantillons sont classés dans la classe « Extrêmement salé ». On peut constater dans le tableau V deux classes importantes ou les pourcentages de représentation sont pratiquement identiques (16,31% vs 15,60%). Ces classes sont celles qualifiées de sols salés et très salés et dont la CE est comprise respectivement entre]1000 - 2000] et] 2000 - 4000]  $\mu\text{S}/\text{Cm}$ . Seulement 0,70 % et 2,83% de nos échantillons sont qualifiés respectivement de sol non salé et légèrement salé.

### III.3.1.1 Création et validation des modèles estimatifs de la salinité

Dans cette section nous allons présenter l'application de la démarche méthodologique adoptée pour la réalisation de ce travail (chapitre II). Après l'obtention des résultats d'analyses (Hr, pH, CE,  $\text{CaCO}_3$ ) au laboratoire, nous avons procédé à la création des indices spectraux (NDVI, NDMI, Tasseled cap (TCB (Brightness) et TCW (Wetness),  $\text{SI}_1$ ,  $\text{SI}_2$ ). Ces indices ont été placés dans des fichiers d'images séparées. Les données multispectrales de l'image Landsat 8 et l'ensemble des indices spectraux ont fait l'objet d'une extraction des données numériques relative à chaque échantillon de sol. Ceci a été possible grâce à la projection des emplacements des échantillons des sols sur les données de télédétection y compris les données multispectrale de l'image utilisée. L'extraction des données a permis l'établissement d'une base de données géographique (BDG) spécifique aux données de télédétection. Cette base de données a été complétée par les résultats des analyses pédologiques spécifiques à chaque échantillon. La nouvelle BDG regroupe à la fois les données de télédétection (les données multispectrales soit bandes de 1 à 5 et la bande 7, les indices NDVI, NDMI, TCB, TCW,  $\text{SI}_1$  et le  $\text{SI}_2$ ) et les résultats de l'Hr, pH, CE et le  $\text{CaCO}_3$ .

Ces données sont toutes relatives aux 141 échantillons sélectionnés pour la réalisation de ce travail (voir figure 11).



	cod_car	cod_n	x	y	ph	ce	h	col
1	A1	-73.000000	474477.00	3866968.0	7.8229999	6.6999998	3.6800001	Pink
2	A2	-72.000000	474776.00	3866737.0	8.0000000	8.8000002	2.0250001	Light Brown
3	A3	-71.000000	475271.00	3866548.0	7.7630000	2.0000000	3.4489999	Light Brown
4	A4	-70.000000	475424.00	3866561.0	8.0200005	10.000000	3.2570000	Very pale brown
5	A5	-69.000000	475521.00	3866121.0	7.5029998	6.1999998	14.945000	Pinkish white
6	A6	-68.000000	476828.00	3866127.0	7.2500000	2.5999999	15.608000	Light gray
7	A7	-67.000000	477035.00	3865967.0	8.0229998	10.667000	16.871000	Pinkishwhite
8	A8	-66.000000	476990.00	3865556.0	7.1300001	1.4000000	0.74199998	Reddish yellow
9	A9	-65.000000	476944.00	3865108.0	8.0430002	2.2000000	13.462000	Very pale brown
10	A10	-64.000000	476813.00	3864736.0	7.0400000	1.9000000	14.716000	Very pale brown
11	A11	-63.000000	476425.00	3864170.0	7.0929999	1.0430000	0.26600000	Reddish yellow
12	A12	-62.000000	475955.00	3863768.0	7.5170002	2.3000000	14.390000	White

**Fig.11** : Création de la base de données géographiques BDG relative aux 141 échantillons de sols.

Dans notre cas nous avons considéré ces données comme des variables indépendantes de la salinité, contrairement à la CE ou elle a été considérée comme la seule variable dépendante. La représentation graphique de la CE avec le reste des variables indépendantes (figure 12) pourrait expliquer le type de relation.

Il est clair que dans la figure 12, la relation entre la CE et le reste des variables n'est pas une relation linéaire simple. Cette lecture a motivé à la sélection de la régression ordinaire multiple comme une méthode statistique pour la création des modèles estimatifs de la salinité.

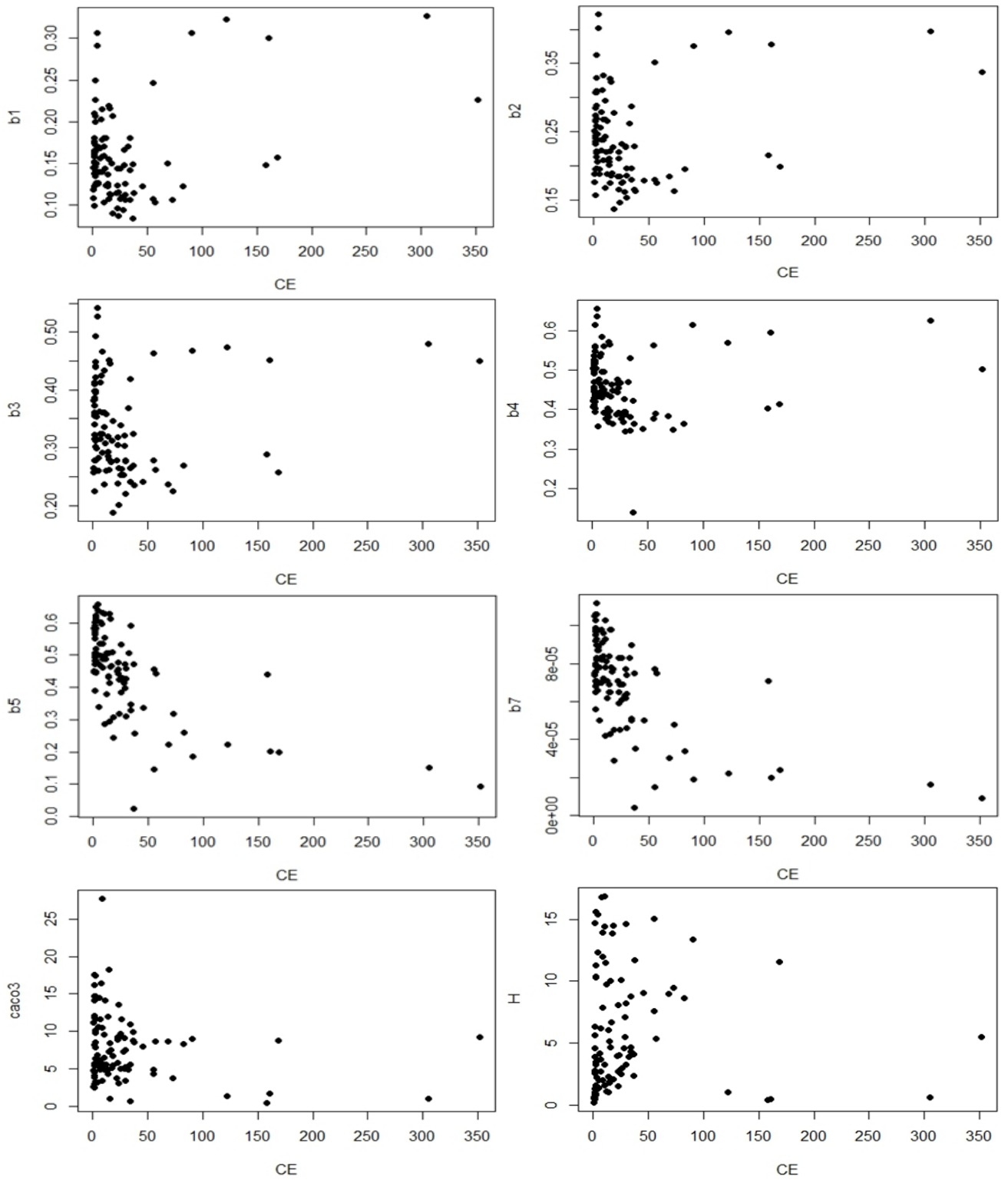


Fig. 12 : Représentation graphique de la CE et les variables indépendantes.

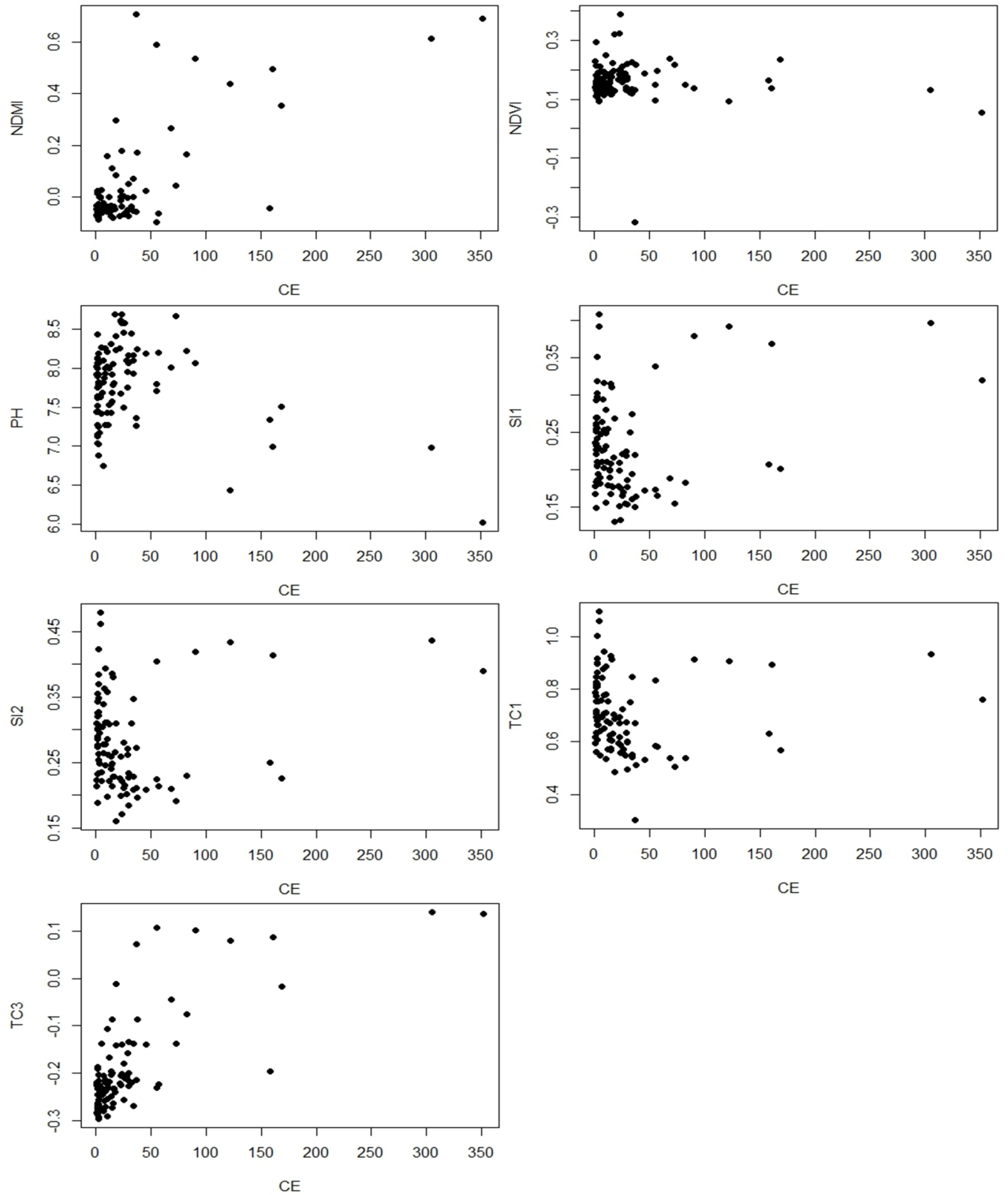


Fig. 12 : Représentation graphique de la CE et les variables indépendantes (Suite).

### III.3.1.2 Validation

Il faut noter que la division aléatoire de la BDG en deux groupes (*groupe d'apprentissage* qui représente 70 % de la BDG (soit 99 échantillons) et le *groupe de validation* (30% de la BDG soit 42 échantillons) ont servi à la création des modèles estimatifs par l'application de la régression ordinaire multiple d'une part, et la validation de ces modèles d'une autre part, par l'application de la formule suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CE_{iO} - CE_{iE})^2}{n}} \dots\dots\dots \text{Formule (III)}$$

**RMSE** : erreur quadratique moyenne (Root Mean Squared Error) ; **CE<sub>iO</sub>** : CE observée ; **CE<sub>iE</sub>** : CE estimée ; **n** : Nombre d'échantillons du groupe de validation (42 échantillons de sols).

**NB** : La partie modélisation a été réalisée sous le logiciel Weka® avec l'application de la méthode M 5` qui intègre le critère d'information Akaike pour la sélection des variables indépendantes les plus pertinentes. Ce critère Akaike permet uniquement la sélection des variables (dans les modèles estimatifs) qui réduisent les RMSE. Les variables qui ne contribuent pas à la réduction des RMSE seront écartées (Witten et Frank, 2005).

## III.4 Choix des variables et du modèle pertinent pour la cartographie de la salinité

Dans le but de choisir le modèle final pour la cartographie de la salinité nous avons préféré étudier le potentiel de l'ensemble des variables candidates à la cartographie de la salinité. Ceci a été possible grâce à la proposition de plusieurs combinaisons en faisant appel à un groupe de variables indépendantes (voir tableau VI). Dans notre cas, nous avons combiné nos variables en cinq (5) variantes (colonnes 1 et 2 du tableau VI). La première (1) variante utilise uniquement les données multispectrales de télédétection (6 variables) cependant la variante 5 utilise les 15 variables indépendantes. Les variantes 2, 3 et 4 ont permis de voir le pouvoir estimatif des indices spectraux générés spécialement pour cette étude. Le résumé des résultats de la modélisation ( $R^2$ , RMSE<sub>vc</sub> de la validation croisée obtenus des données d'apprentissage et l'RMSE<sub>v</sub> de la validation obtenus des données de validation) obtenus par la régression ordinaire et l'application du critère d'information Akaike sont tous représentés dans le tableau VI.

Il est bien de souligner que la variante 1 le modèle estimatif de la CE est formé de l'ensemble des données multispectrales avec 0,54, 46,63 et 40,39 respectivement pour  $R^2$ , RMSEvc et RMSEv. En revanche les variantes 2, 3 et 4 ont procurées le même modèle estimatif mais avec le TCB et le TCW comme variables pertinentes.  $R^2$  et le RMSEv sont de 0,53 et 39,84 respectivement. Cependant, le RMSEvc présente une différence entre la variante 2 (47,47) et les variantes 3 et 4 (44,91). Dans la variante 5 nous avons utilisé 15 variables indépendantes (pH, H, CaCo<sub>3</sub>, B1, B2, B3, B4, B5, B7, NDVI, NDMI, SI<sub>1</sub>, SI<sub>2</sub>, TCB, TCW) mais le modèle estimatif final est composé seulement de six variables (pH, B1, B2, B5, B7 et le NDVI) suit à l'application du critère d'informations Akaike. Les valeurs obtenues par ce modèle sont 0,539, 47,359 et 42,651 respectivement pour  $R^2$ , RMSEvc et RMSEv. Il est fort intéressant de signaler que les indices NDMI, SI<sub>1</sub>, SI<sub>2</sub> n'ont pas été sélectionnés comme des variables pertinentes pour l'estimation de la salinité. Enfin nous avons pris la valeur la plus faible des RMSEv (soit 39,84 contre 40,397 et 42,651 mS/Cm) obtenue de la validation comme un critère de succès pour le choix final du modèle estimatif de la salinité. A cet effet nous avons pris le modèle identique des variantes 2, 3 et 4 pour la cartographie de salinité du sol dans notre zone d'étude. Ce modèle utilise les données tasseled Cap TCB et TCW comme les seules variables explicatives de la salinité du sol.

**Tab. VI** : Résultats de la modélisation obtenus par la régression ordinaire.

Variante	Variables indépendantes	Modèle	$R^2$	RMSEvc	RMSEv
1	Données multispectrales de l'image L8 soit la bande 1, 2, 3, 4, 5 et 7	$CEe = 448,54 * B + 1483,3 * B2 + 269,32 * B3 + 209,95 * B4 - 582,36 * B5^{***} + 1,47 E+6 * B7 + 46,99$	0,54	46,63	40,39
2	NDMI, TCB, TCW			47,47	
3	NDMI, TCB, TCW, NDVI	$CEe = 62,38 * TCB^{**} + 409,88 * TCW^{***} + 63,105$	0,53		39,84
4	NDMI, TCB, TCW, NDVI SI <sub>1</sub> , SI <sub>2</sub>			44,91	
5	pH, H, CaCo <sub>3</sub> , B1, B2, B3, B4, B5, B7, NDVI, NDMI, SI <sub>1</sub> , SI <sub>2</sub> , TCB, TCW	$CEe = -23,07 * pH^{**} - 221,746 * B1 + 637,56 * B2 - 613,99 * B5 + 1,72 E+6 * B7 + 182,76 * NDVI^{**} + 218,14$	0,53	47,35	42,65

Niveau de signification : 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

### III.5 Cartographie de la salinité

Après la sélection du meilleur modèle estimatif de la conductivité électrique (salinité), nous avons appliqué ce modèle ( $CE_e = 62,38 * TCB^{**} + 409,88 * TCW^{***} + 63,105$ ) sur les données Tasseled Cap (TCB et TCW) ce qui nous a permis l'obtention d'une nouvelle image représentant les valeurs de la CE sur la totalité des pixels de l'image de la zone d'étude. L'analyse thématique de ce produit selon les classes de salinités proposées dans le tableau VII nous a permis l'obtention de la carte de la salinité au niveau de la zone d'étude (voir figure 13)

**Tab.VII** : Répartition des superficies de la zone d'étude selon les différentes classes de salinité.

CE ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) à 25°C	Qualité des sols	Superficie (ha)	%
[0 – 500]	Non salé	623,97	29,52
] 500 - 1000]	Légèrement salé	31,41	1,49
] 1000 - 2000]	Salé	64,53	3,05
] 2000 - 4000]	Très salé	127,8	6,05
plus de 4000	Extrêmement salé	1266,3	59,90
Total		2114.01	100

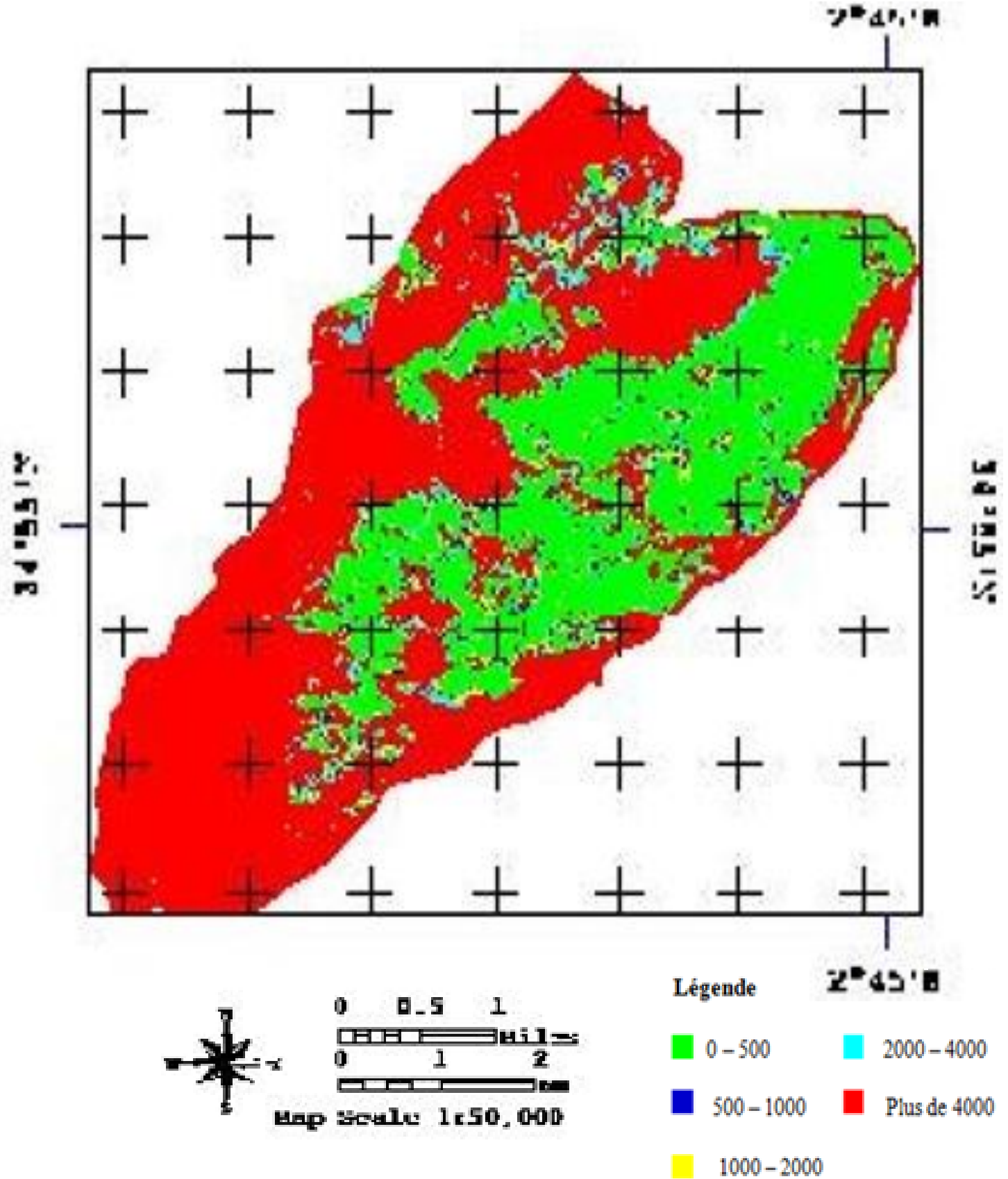


Fig. 13 : Carte de la salinité de la zone d'étude exprimée en  $\mu\text{S}/\text{Cm}$ .

## III.2 Discussions

### III.2.1 Couleur des échantillons

Il est bien évident, que la couleur est un paramètre descriptif dans la classification du sol (Escadafal *et al.*, 1988) ; permettant d'estimer leur propriétés (Escadafal, 1993 ; Ardouin, 2014 ) et sa pédogenèse (Maignien, 1980).

La couleur dominante dans notre cas est le marron avec 51.02% à différents niveaux d'évolution dans la gamme du marron très pale (*Very pale brown*) et le marron (*brown*). Cette graduation dans la couleur est associée généralement à l'oxydation du fer et /où à la teneur en hydroxyde de fer teinté le sol avec le marron (phénomène de brunification) (Delaunoy, 2006). Selon les résultats obtenus, on a 4,23% des échantillons de couleur grise et 10,638% des couleurs foncées, cette coloration est liée à la matière organique (MO) en différents stades de décomposition. Les couleurs de teintes grises indiquent une faible décomposition de MO, par contre la coloration foncée indique une haute teneur en MO stable. La couleur blanche (4,965%) est due à la présence d'un taux élevé de calcaire (Delaunoy, 2006), et à la présence d'un plancher peu perméable (Baize et Jabiol, 1995). En télédétection l'exploitation de la charte de Munsell basée sur les valeurs de la réponse radiométrique (signature spectrale) du sol a été utilisée pour établir des relations empiriques entre les caractéristiques spectrales (bandes visibles) et les données de terrain (Girard et Courault, 1988 ; Escadafal, 1993). Ces relations peuvent estimer les comportements radiométriques du sol nu par rapport aux données cartographiques de la couleur (Toulios *et al.*, 1998).

### III.2.2 L'humidité résiduelle

Nous avons constaté au niveau de la zone intermédiaire entre le chott et les accumulations de sable (Nebka) un taux d'humidité plus ou moins élevé. Par contre nos échantillons de sols sableux sont caractérisés par une teneur en eau très faible (sol sec). La répartition de l'humidité du sol varie en fonction de la teneur des sels dans le sol (Hiouani et Bensaid, 2009).

De point de vue « texture des sols » généralement, les sols caractérisés par une humidité élevée (19%) présentent une texture fine avec une composition formée généralement d'argile, de limon et une faible quantité de sable (Hiouani et Bensaid, 2009).

### III.2.3 Calcaire total ( $\text{CaCO}_3$ )

La teneur élevée en  $\text{CaCO}_3$  enregistrée dans la zone sableuse entre les dépôts de sable et le chott se caractérise par des taches blanches sur le sol nu. Nous avons constaté au niveau de notre zone d'étude, que le sable présente un pourcentage moyen de calcaire par rapport aux échantillons de sols localisés à la périphérie du chott. Il est bien évident de mentionner que le processus de la formation et de l'accumulation du calcaire est influencé par la nature géologique, la topographie et les conditions climatiques (Pouget, 1971).

Selon Pouget (1971), l'encroûtement gypseux est la cause principale d'accumulation du calcaire dans le sol. Dans notre zone d'étude, cet encroûtement est plus proche à la surface du sol (entre 30 et 70 cm) avec un degré de salinité peu salé à salé recouvert par des dépôts de sable éolien (Pouget, 1971). Les processus d'altération et le contact avec la nappe phréatique provoquera la fragmentation de l'encroûtement gypseux sous forme de plaques. La présence de ces derniers dans le sol favorise la formation de  $\text{CaCO}_3$  (Pouget, 1971); surtout dans les étendus plates (Segalen, 1970).

### III.2.4 pH

L'interprétation des résultats du pH révèlent que presque la totalité des échantillons ont des valeurs  $< 8,5$  soit un sol affecté par une salure neutre (Loyer, 1991 ; Baize *et al.*, 2008). Il est caractérisé par la présence des sels solubles neutres comme les chlorures, sulfates de sodium, le calcium et magnésium (Maillard, 2001 *in* Lahouel, 2014). Dans notre cas la plus part des échantillons le pH est compris entre 6,0 et 8,3 ce qui pourra indiquer une concentration élevée en sels solubles avec une dominance de  $\text{Ca}^{2+}$  et/ou  $\text{Mg}^{2+}$  à partir de la dilution du calcaire (Baize *et al.*, 2008); et l'altération d'encroûtement gypseux localisé à la proximité de la nappe phréatique (Pouget, 1971). Selon Baize *et al.*, (2008), L'analyse granulométrique de la terre fine du sol a un pH  $\geq 5,0$  est caractérisé par une texture limoneuse riche en particules d'oxydo-réduction ou de redistribution de fer ou d'argile avec une teinte comprise entre 7,5 YR et 2,5 Y.

### III.2.5 CE

Durant la réalisation des analyses, nous avons constaté une hétérogénéité dans les mesures des répétitions du même échantillon, ce qui a conduit l'utilisation de cinq répétitions. La valeur moyenne a été calculée sur les trois valeurs les plus proches. Les valeurs hors gamme de certains échantillons a nécessité de faire la dilution jusqu'à deux fois.

La répartition spatiale des points de prélèvements dont la concentration des sels est faible ( $CE < 2000 \mu\text{S}/\text{Cm}$ ) ont été localisés au niveau des formations sableuses (sols non salés) dans la partie centrale de la zone d'étude.

Cependant l'augmentation progressive de la salinité du sol a été enregistrée au fur et à mesure de l'avancement vers le chott où le sol est qualifié de salé et très salé. Les sols extrêmement salés ont été observés au niveau de la bordure du chott ( $CE > 4000 \mu\text{S}/\text{Cm}$ ). La forte concentration des sels et l'ampleur de ce phénomène dans notre zone d'étude a été mentionnée par Pouget (1971). D'après ce dernier, plusieurs facteurs contrôlent le processus de la salinisation dans les zones où la formation géologique est d'origine salée. Aussi, la faible profondeur de la nappe phréatique (1 à 6 m) constitue un élément fondamental de la pédogenèse des sols halomorphe dans ces régions (Pouget, 1971). La contamination du sol due à l'augmentation de niveau piézométrique après les précipitations. Il est clair aussi, que le réseau hydrographique (Oueds : Faid el Djemel, Guerbous, Bou Adria ...etc.) contribue dans la salinisation des sols à travers les apports des eaux de ruissellement saturées en sels (Pouget, 1971).

Malgré la forte concentration des sels une présence de la couverture végétale dense est observée au niveau de la bordure du chott dont la CE est supérieure à  $4000 \mu\text{S}/\text{Cm}$ . (photos 2). Cette végétations est composée d'espèces halophytes les plus résistantes à la salinité exemple : *Limonium tunetanum*, (Oudnet el hallouf, Famille des Plumbaginaceae photos A) *Halocnemum strobilaceum* et *Atriplex halimus* (Famille des Amaranthaceae, photos B et C de la planche 2).

La végétation halophyte dispersée sur le sol peut servir comme un indicateur de salinité, ce qui permet de détecter et cartographier indirectement les zones qui sont affectées par la salinité du sol (El hag, 2016).



**Planche de photos 02 :** A) *Limonium tunetanum*, (Oudnet el hallouf ; B) *Halocnemum strobilaceum* ; C) *Atriplex halimus* ; D) vu d'ensemble de la végétation halophyte sous forme d'une ceinture.

### III.3 Recommandations

Ce travail peut être amélioré et enrichi suivant certaines propositions que nous recommandons ci-après :

1) L'utilisation des méthodes de classification. A titre d'exemple, Naseri (1998) in Elhag (2016), a utilisé à la fois des algorithmes de classification non supervisée et supervisée pour délimiter la salinité du sol à l'échelle régionale en utilisant les données MSS et les données TM. La classification par l'algorithme de maximum de vraisemblance, la classification floue pourra l'amélioration de l'identification et l'estimation de la salinité (Metternicht et Zinck, 2002). Elnaggar et Noller (2009) in Allbed et Kumar (2013) confirmons l'efficacité de la combinaison des données multispectrales Landsat et l'analyse des arbres de décision dont la précision générale était de 97% pour la cartographie de la salinité du sol ;

2) L'utilisation des transformations en composantes principales pourra améliorer l'estimation de la salinité du sol. Darvishsefat et al. (2000) in Elhag (2016) a utilisé l'analyse des composantes principales pour cartographier la salinité du sol en utilisant quatre bandes de ETM + (3, 4, 5 et 7) ;

3) Tester le potentiel estimatif du reste des indices spectraux de salinité (Abbas et Khan, 2007 ; Elhag, 2016). L'indice de salinité ( $SI = (NIR \times R) / G$ ) ; proposé par Abbas et Khan (2007) a donné les meilleurs résultats avec une corrélation entre les valeurs estimées et les valeurs observées égale à 0,98 ;

4) Un autre aspect lié au choix des satellites. Le choix du capteur spatial pourra également améliorer nos résultats mais on doit s'assurer que la chaîne méthodologique soit respectée. Les données multispectrales des satellites : SPOT, IKONOS, QuickBird, satellites de télédétection indienne (IRS), et même les données hyperspectrales (EO-1 Hyperion et HyMap) ont été utile pour la détection et la cartographie de la salinité du sol (Farifteh, 2007 ; Dwivedi et *al.* 2008 *in* Allbed et Kumar, 2013). Ceci est possible mais avec une attention particulière vis-à-vis de la résolution spectrale où la gestion de la variabilité spectrale doit être prise en considération par l'utilisation des algorithmes avancés tels que l'orientée objets. La disponibilité des données gratuitement et/ ou avec des coûts acceptables est une chose évidente. L'exploration des données du satellite Algérien Alsat-2 qui offre une résolution spatiale fine (2m) avec une résolution radiométrique limitée à trois bandes multispectrales (G, R, PIR).

Enfin, ce travail présente la modélisation et la cartographie de la salinité du sol spécifique à une date unique. Par contre les changements temporels et spatiaux de la salinité pourront se faire par l'utilisation des séries temporelles d'images spatiales.

# *Conclusion générale*

La salinité des sols est l'un des risques environnementaux répandus partout dans le monde, en particulier dans les régions arides et semi-arides (Dehni *et al.*, 2012; Khan *et al.*, 2001 ; Jafari, 1990; Abarsaji *et al.*, 2012). La salinisation du sol est l'ensemble des processus d'accumulation des sels solubles sur la surface du sol (Al-khaier, 2003). Ce phénomène est causé par des processus naturels (salinité primaire) ou anthropique (salinité secondaire) (Metternicht et Zinck, 2003). En Algérie, la sécheresse provoque une remontée des sels vers la rhizosphère rencontrée particulièrement dans les sols des zones semi-arides et arides (Belkhodja et Bidai, 2004).

Les méthodes traditionnelles de suivi de ce phénomène sont très coûteuses et nécessitent beaucoup de temps (Farifteh *et al.*, 2007 ; Fourati *et al.*, 2017). Alors que le développement récent de l'outil informatique et la technologie d'acquisitions des données comme la télédétection propose des solutions efficaces, rapides et avec des coûts modestes pour étudier et cartographier des sols salés. Le manque d'information spatiale sur la salinité du sol au niveau de notre zone d'étude, nous a bien motivés pour la proposition d'une approche méthodologique pour l'étude des relations existantes entre le signal radiométrique du capteur Landsat 8 et les variables physiques du sol.

L'image choisie pour la réalisation de ce travail a fait l'objet de plusieurs prétraitements et traitements nécessaires pour la création des variables candidates à l'estimation de la salinité du sol. Les variables indépendantes utilisées dans cette approche sont les données multispectrales (B1, B2, B3, B4, B5, B7), NDVI, NDMI, le TCB et TCW de la transformation Tasseled Cap et les indices spectraux de salinité  $SI_1$  et  $SI_2$  pH, Hr et  $CaCO_3$ ). En revanche nous avons choisi la CE comme une variable explicative de la salinité des sols.

La régression ordinaire nous a permis la création des modèles estimatifs de la salinité par l'utilisation des valeurs relatives aux échantillons présélectionnés pour l'apprentissage. La performance des modèles estimatifs créés a été jugée par le calcul des RMSE obtenue de l'utilisation des données de validation. Pour la réalisation de la carte de la salinité au niveau de notre zone d'étude nous avons choisi le modèle dont l'RMSE de validation est de 39,84 ms/Cm. Ce modèle utilise uniquement les variables TCB et le TCW de la transformation Tasseled Cap comme variables les plus pertinentes avec terrain.

La carte de la salinité estimée représente cinq classes de salinité mais on distingue uniquement deux classes importantes ; celles des sols extrêmement salés ( $CE > 4000 \mu S/Cm$ ) avec une superficie de 12663 ha soit 60% de la superficie totale de la zone d'étude. La deuxième classe importante, est qualifiée de sols non salés avec des valeurs de CE comprises entre [0 – 500]. Cette classe est estimée à 6239,7 ha soit 29,52% de la superficie totale de la zone d'étude.

Une série de recommandations a été proposée à la fin du chapitre résultats et discussions pourra certainement améliorer ce travail. Il serait judicieux de continuer ce travail mais en abordant les aspects de la variabilité saisonnière et interannuelle de la salinité des sols.

# *Liste bibliographiques*

- Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M., Akbar M., 2013 - Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, pp: 43–52.
- Allbed A., Kumar L., 2013- Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review *Advances in Remote Sensing* . N° 2, pp: 373-385.
- Allen C., 2006 - Isolation of quiescent and nonquiescent ceels from yeast stationry-phase cultures. *I cell boil*. N° 174 pp : 89-100.
- Ange A., 2015 - Data Mining avec Weka. *Projet de Maitrise Génie Informatique, Polytechnique Montréal, Montréal*, 28 p.
- Anonyme., 2002 - *MapInfo Professional® Guide de l'utilisateur*, Ed CLARITAS, France, 435p.
- Ardouin A., 2014 - *Guide pratique pour la description des sols de France*. Ed CEN Bourgogne, France, 24 p.
- Baize D ., Jabiol B., 1995 - *Guide pour la description des sols*. Ed INRA, paris, 375.
- Baize D., 2000-*Guide des analyses en pédologie*. Ed INRA, paris, 257p.
- Baize D., Girard M C., 2008 - *Référentiel pédologique*. Ed Quæ , France, 407p.
- Belkhodja M et Bidai Y, 2004-*La réponse des graines d’Atriplex halimus L. à la salinité au stade de la germination*. *Laboratoire de physiologie végétale* pp : 331-5, *Faculté des sciences, Université Senia, 31 Oran, Algérie*.
- Bonn F., 1994-*Téledétection de l’environnement dans l’espace francophone* presses de l’université du Québec. Ed AUPELF, Canada, 527p.
- Bonn F., 1996 - *Précis de télédétection. Applications thématiques, Volume 02* Canada. Ed. Marquis, 670p.
- Bonn F., Rochon G., 1992 - *Précis de télédétection. Principes et méthodes, Volume 01* Canada. Ed. Marquis, 670p.
- Boutelli H., 2012-*salinité des eaux et des sols au niveau de la sebkha de benmendil, caractérisation et conséquences sur l’environnement* .Thèse de magister, université kasdi Mebah, Ourgla, 90p.

- Bouhanna A., 2011- Effet de la mise en culture d'une fabaceae fourragère : la luzerne (*Medicago Sativa* L.) sur quelques paramètres physico-chimiques du sol cas de HASSI BEN ABDALLAH /OUARGLA. Memoire d'ingénieur d'État en Agronomie Saharienne. Université Kasdi Merbah, Ouargla, 67p.
- Caloz R., 1994 - Télédétection satellitaire. Cours photocopiés EPFL, Lausanne, EPFL, 131 p.
- Caloz R., Collet C., 2001- Précis de télédétection, Volume 03 : traitement de l'image de télédétection. Presses de l'université du Québec. Ed. AUPELF, Canada, 386p.
- Calvet R., 2003 - Le sol propriétés et fonction : Tome 2 phénomènes physiques et chimiques Application agronomiques et environnementales. Ed France Agricole, Paris-Grignon, 511p.
- CEAE., 2011- Détermination du pH : méthode électrométrique .Ed Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Québec, 11 p.
- CEAE., 2015-Détermination de la conductivité : méthode électrométrique. Ed Ministère du Développement durable, de l'Environnement Québec, 9 p.
- Chikhaoui M., Bonn A.I., Merzouk A., 2006 - Comparaison des capteurs ASTER et ETM+ pour la cartographie de la dégradation de la dégradation des sols à l'aide de l'indice LDI. *Can. J. Remote sensing*. N° 2, pp : 74-83.
- Corwin D.L., Lesch S.M., 2005- Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity Part II. Case study. *Computers and electronics in Agriculture* N 46 pp : 135–152.
- Coulibaly I., 2013-Détection du réseau routier à partir des images satellitaires à la suite d'une catastrophe majeure. Mémoire d'Ingénieria, Ecole de technologies superior université du Québec, Montréal, 222 p.
- Dakak H., 2012 - Mapping the Risk of soil salinization Using Elctromagnetic Induction and Non-parametric geostatistics,developments in soil salinity Assessment and reclamation pp155-166.
- Dehaan R.L., 2002- Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment* N 80, pp : 406-417.

- Delaunois., 2006-Guide simplifié pour la description des sols. Ed chambre d'agriculteur, TARN, 37p.
- Djili K ; Daoud Y ; Ayache N., 1999 - Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etude et Gestion des sols. N° 63 : 201-213p.
- Douaoui A., 2006 - Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote sensing data. Geodema. N° 134, pp : 217-230.
- Duchaufour P., 1997 - Abrégé de Pédologie : sol, végétation, environnement, MASSON 5è Ed, France, p291.
- Elhag M., 2016-Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia. Journal of Sensors, pp : 1-10.
- Escadafal R., 1989 - Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Thèse de Doctorat d'Etat en pédologie Applications : exemple de la région de Tataouine TUNISI, Université de Paris VI, France, 317p.
- Escadafal R., 1993 - Remote sensing of soil color: Principles and applications. Remote Sensing Reviews. N° 7, pp : 261-279.
- Escadafal R., Girard M C., Courault D., 1988 - La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. Agronomie, N° (2): 147-154.
- Farifteh J., Van der Meer F., Atzberger C ET., Carranza E.J.M., 2007-Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra : A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). Remote Sensing of Environment ,N110, pp : 59-78.
- Fourati H., Bouaziz M., Benzina M., Bouaziz S., 2017- Detection of terrain indices related to soil salinity and mapping salt-affected soils using remote sensing and geostatistical techniques. Environmental monitoring and assessment.
- Gadja H., 2010- Etude de quelques formes d'accumulation du calcaire dans les sols de la région d'Ouargla. Mémoire d'ingénieur d'état, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 71p.
- Ghassemi F., A.J jakeman ., H.A.Nix.,1995 - Salinisation of land and water resources: human Causes, extent, management and case studies. Canberra, Australia: the Australian National university, Wallingford, Oxon, UK: CAB International.
- Gobat JM ; Argno M ; Matthey W., 2003-Le sol vivant. Ed France, 568p.

- Gri N., 1999- Etude du comportement du  $^{137}\text{Cs}$  et du  $^{90}\text{Sr}$  dans les sols contaminés de la région de Tchernobyl, Thèse de Doctorat, CEA, France.
- Guettou M., Othmane B., 2016 - Contribution à la cartographie des peuplements d'arganier par télédétection. Cas de la région Sud-Ouest de l'Algérie. Mémoire de master, Université Ziane Achour, Djelfa, 79 p.
- Halitim A., 1988- Sols des régions arides d'Algérie, OPU, Alger, 384 p
- Halitim, A, Robert, M. 1987 - Interaction du gypse avec les autres constituants du sol, analyse microscopique de solsgypseux en zone aride (Algérie) et études expérimentations. soil micro morphology. Afes, pp: 179 –186.
- Hamid R et Vahid Z., 2016- Efficiency of Spectral Indices Derived from Landsat-8 Images of
- Hamzeh S et Naseri A.A et S.K AlaviPanah et Mojaradi B et Bartholomeus H.M. Clevers J.G.P.W Behzad M., 2013- Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21: 282–290.
- Hiouani F., Bensaid R., 2009 - Effet de la salinite sur la retention en eau des sols gypseux de la region d'Ain benoui (BISKRA). Courrier du Savoir vol 09, pp85-89.
- INSID., 2008- Les sols salins en Algérie, 8p.
- Kauth j R., 1976 -The tasseled cap de-mystified,environmental Research institute of michigan,ann arboor, mi 48107,6p.
- Ken M et Will S et Bill L., 2013 - MapInfo Professional® 12.0 Guide de l'utilisateur. Ed Pitney Bowes Software, USA, 633 p.
- Ken M., Will S., Bill l., 2014 - MapInfo Professional® 12.5 User Guide. Ed Pitney Bowes Software, USA, 540 p.
- Khan M., Rastoskuev V., Shalina V., Sato Y., 2001 - Mapping Salt-affected soils Using Remote Sanaing Indicators A-Simple Approch with the USE of GIS IDRISI. Ed Graduate School lf Agricultural and life Scinces, university of Tokyo.
- Lahouel H., 2014 - Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur le rendement des céréales (cas de l'orge) dans la région de hemadna à relizane. Mémoire de master, Abou-bekrbelkaid Tlemcen, 104 p.

- Lavorini D., 2010- Analyse rétrospective par télédétection de l'évolution du dépérissement des Sapins pectinés (*abies alba*) sur le Mont Ventoux. Mémoire d'Ingénieria, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 53p.
- Lhissou R., El Harti A., Chokmani K., 2014 -Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data. *Eurasian Journal of Soil Science*, N° (3), pp: 82 – 88.
- Loyer J Y., 1991- Classification des sols salés. ORSTOM, sér. Pédnl., vol. XXVI, pp 51-61.
- Maharloo Lake and Its Surrounding Rangelands *Journal of Rangeland Science*, Vol. 6, No. 4, 334-343.
- Maignien R., 1980-Manuel pour la description des sols sur le terrain. Ed ORSTOM, Paris, 145p.
- Maimouni S., BannarI, A., El-harti A., El-ghmari A., 2011- *Journal canadien de télédétection.*, N° 37, pp : 285-301.
- Mathieu C., Lozet J., 2011-Dictionnaire encyclopédique de science du sol. Ed TEC et DOC, Paris, 629 p.
- Matthew, M. W., Adler-Golden S. M., Berk A., Richtsmeier S. C., Levine R. Y., Bernstein L. S., Acharya P. K., Anderson G. P., Felde G. W., Hoke M. P., Ratkowski A., Burke H.-H., Kaiser R. D., Miller D. P., 2000- Status of Atmospheric Correction Using a based Algorithm. *SPIE Proceedings, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*. Vol. 4049, pp : 199MODTRAN4- -207.
- Meriem B., 2013- caractérisation de la salinité des sols à l'aide de l'imagerie radar satellitaire : cas de la tunisie et du maroc. (inrs-ete) n(1480) : 26-27.
- Mermoud A., 2006 - Cours physiques du sol, maitrise de la salinité des sols pp1-44.
- Merzouk A., 1994 - Utilisation de la télédétection spatiale dans l'étude et l'inventaire des sols en zone semi-aride. *Télédétection de l'environnement dans l'espace de la francophonie*, Ed : presses de l'université du Québec. pp: 22-30.
- Metternicht G.I., Zinck J.A., 2003-Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of environment*, N° 85, pp: 1-20.
- Midekor A., Wellens J., 2013- Initiation à ENVI .Ed GEeau, Ouagadougou, 85 p.
- Moncef B., Jörg M., Richard G., 2011 - Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil Vers une meilleure télédétection de sols salés

- en climat semi-aride au Nord-Est du Brésil. *Comptes Rendus Geoscience*, N° 343, pp : 795–803.
- Moncef B., Jörg M., Richard G., 2011- Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil Vers une meilleure télédétection de sols salés en climat semi-aride au Nord-Est du Brésil. *Comptes Rendus Geoscience*, N 343 , pp : 795–803.
- Montoroi J P., 1997- Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol. *centre orstom de France*, N° 32, pp : 279-298.
- Mougenot B., Pouget M., Epema G F., 2009 - Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*. N°7, pp: 241-259.
- Nawar S., Buddenbaum H., Hill J., Kozak J., 2014 - Modeling and Mapping of Soil Salinity with Reflectance Spectroscopy and Landsat Data Using Two Quantitative Methods (PLSR and MARS). *Remote Sens*. N° 6, pp: 10813-10834.
- Pansu M., Gautheyrou J., 2006 - Handbook of soil analysis mineralogical, organic and Inorganic methods, springer, netherlands, 604p.
- Pouget M., 1971- Etude agro-pédologique du bassin du zahrez gharbi (Feuille Rocher de sel)
- Rekis A., 2012 - Etude spatio-temporelle du changement de la végétation de la région ouest de Biskra. Approche cartographique par télédétection. Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 110p.
- Remco R., Eibe F., Mark A., Geoffrey H., Bernhard P., Peter R., Ian H., 2010 - WEKA Experiences with a Java Open-Source Project. *Journal of Machine Learning Research* 11: 2533-2541p.
- Richards L A., 1954 - Dignosis and improvements of saline and alkali soils. *u.s. salinity laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk60*, 160p.
- Ruellan., nd- Les sols calcaires : les principaux travaux des pédologues français. Ed Association française pour l'étude du sol, Franc, 121p.
- Scudiero E., Todd H., Dennis., 2015 - Corwin Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance. *Remote sensing of environment*, N° 169, pp: 335–343.
- Segalen., 1970-Techniques rurales en Afrique pédologie est développement. O. R. S. T. O. M. et B. D. P.A.

Shaw R., 1994 - Estimation of the electrical conductivity of saturation extracts from the electrical conductivity of 1:5 soil: water suspensions and various soil properties,” Proj Report Series QO94025, Department of Primary Industries, Queensland, Australia.

Touhtouh D., Moujahid Y, El faleh1 E ; El halimi E., 2014-Caractérisations physicochimiques de trios types de sols du Sais, Maroc. J. Mater. Environ. Sci. 5 (5) :1524-1534.

Toulios L.G., Toulios M.G., Lipimenou E., 1998 - Soil color relationships with reflectance spectra. Geocarto International, N°13, pp : vegetation indices. International Journal of Applied Earth Observation.

USSLS., 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agriculture Handbook 60, USDA, Washington, D.C. USA. 160 pp.

Witten I H., Frank E., 2005-Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques. Ed Morgan kaufmann publishers, 525p.

<https://earthexplorer.usgs.gov/> consulté le 04/04/2017.

[http://insid.dz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=64&Itemid=](http://insid.dz/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=)consulté le 25/09/2017.

<https://globusgreen.files.wordpress.com/2014/12/biosaline-agroforestry-and-forestry-world.jpg> consulté le 8/11/2017.

# *Annexe*

**Tab. VIII** : caractéristiques de l'image utilisée. Source : (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Consulté le 04/04/2017.

<b>Data Set Attribute</b>	<b>Attribute Value</b>
Landsat Product Identifier	LC08_L1TP_196036_20170319_20170328_01_T1
Landsat Scene Identifier	LC81960362017078LGN00
Acquisition Date	3/19/2017
Collection Category	T1
Collection Number	1
WRS Path	196
WRS Row	36
Target WRS Path	196
Target WRS Row	36
Nadir/Off Nadir	NADIR
Roll Angle	-0.001
Date L-1 Generated	3/28/2017
Start Time	2017 :078:10:25:41.0281150
Stop Time	2017 :078:10:26:12.7981120
Station Identifier	LGN
Day/Night Indicator	DAY
Land Cloud Cover	5.66
Scene Cloud Cover	5.66
Ground Control Points Model	353
Ground Control Points Version	4
Geometric RMSE Model (meters)	7.972
Geometric RMSE Model X	6.337
Geometric RMSE Model Y	4.836
Image Quality	9
Processing Software Version	LPGS_2.7.0
Sun Elevation	48.79310452
Sun Azimuth	143.2199726
TIRS SSM Model	FINAL
Data Type Level-1	L1TP
Sensor Identifier	OLI_TIRS
Output Format	GEOTIFF
Corner UL Latitude Product	35.66053 (35°39'37.91"N)
Corner UL Longitude Product	1.42413 (1°25'26.87"E)
Corner UR Latitude Product	35.26944 (35°16'09.98"N)
Corner UR Longitude Product	3.47146 (3°28'17.26"E)
Corner LR Latitude Product	33.54724 (33°32'50.06"N)
Corner LR Longitude Product	0.95974 (0°57'35.06"E)
Corner LL Latitude Product	33.54724 (33°32'50.06"N)
Corner LL Longitude Product	2.96500 (2°57'54.00"E)
Panchromatic Lines	15721
Panchromatic Samples	15441
Reflective Lines	7861
Reflective Samples	7721
Thermal Lines	7861
Thermal Samples	7721
Map Projection L-1	UTM
UTM Zone	31

Datum	WGS84	
Ellipsoid	WGS84	
Grid Cell Size Panchromatic		15
Grid Cell Size Reflective		30
Grid Cell Size Thermal		30
Orientation	NORTH_UP	
Resampling Option	CUBIC_CONVOLUTION	
Bias Parameter File Name OLI	LO8BPF20170319101059_20170319105824.02	
Bias Parameter File Name TIRS	LT8BPF20170313072704_20170327084418.02	
Calibration Parameter File	LC08CPF_20170101_20170331_01.02	
RLUT File Name	LC08RLUT_20150303_20431231_01_12.h5	
Center Latitude	34°36'39.13"N	
Center Longitude	2°12'23.22"E	
NW Corner Lat	35°39'37.91"N	
NW Corner Long	1°25'26.87"E	
NE Corner Lat	35°16'09.98"N	
NE Corner Long	3°28'17.26"E	
SE Corner Lat	35°16'09.98"N	
SE Corner Long	0°57'35.06"E	
SW Corner Lat	33°56'16.12"N	
SW Corner Long	0°57'35.06"E	
Center Latitude dec		34.61087
Center Longitude dec		2.20645
NW Corner Lat dec		35.66053
NW Corner Long dec		1.42413
NE Corner Lat dec		35.26944
NE Corner Long dec		3.47146
SE Corner Lat dec		33.54724
SE Corner Long dec		2.965
SW Corner Lat dec		33.93781
SW Corner Long dec		0.95974

## المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو إنشاء خريطة لملوحة التربة باستعمال بيانات الاستشعار عن بعد للقاط (OLI 8 (Landsat 8). المقاربة المعتمدة تقوم على المزاوجة بين معطيات الاستشعار عن بعد (الشرائح الطيفية, NDVI, NDMI, TCB وTCW الخاصة بالتحويل Tasseled Cap والمؤشرات الطيفية للملوحة  $SI_1$  و  $SI_2$ ). مع النتائج التحليلية ( $CE$ ,  $pH$ ,  $Hr$  et  $Caco_3$ ) المتحصل عليها من 141 عينة تربة باستخدام الارتباط الخطي.

أعطى النموذج الأقل أخطاء مع المعطيات الميدانية قيمة  $RMSE$  تقارب  $39,84$   $mS/Cm$  ومعامل تحديد يساوي  $0,53$ . هذا النموذج مكون من متغيرين مستقلين هما  $TCW$  و  $TCB$  من التحويل Tasseled Cap. الخريطة التي تم إنشاؤها بواسطة هذا النموذج تسمح بوصف ملوحة التربة في المنطقة المدروسة. تمثل التربة غير المالحة  $29,52\%$  من أراضي منطقة الدراسة في حين التربة المالحة للغاية تمثل  $60\%$ .

**الكلمات المفتاحية:** إنشاء خريطة، الملوحة، التربة، الاستشعار عن بعد، النمذجة، الارتباط الخطي.

## Résumé

L'objectif de ce travail est de cartographier la salinité du sol par l'utilisation des données de télédétection issue du capteur OLI 8 (Landsat 8). L'approche adoptée dans cette étude est basée sur la combinaison des données de télédétection (Bandes multispectrales, NDVI, NDMI, le TCB et TCW de la transformation Tasseled Cap et les indices spectraux de salinité  $SI_1$  et  $SI_2$ ) avec les résultats des analyses ( $CE$ ,  $pH$ ,  $Hr$  et  $Caco_3$ ) obtenus de 141 échantillons de sol par l'utilisation de la régression ordinaire. Le modèle le plus pertinent avec la réalité de terrain a donné des  $RMSE$  de validation de l'ordre de  $39,84$   $mS/Cm$  et un  $R^2$  égale à  $0,53$ . Ce modèle est composé seulement de deux variables indépendantes qui sont le TCB et TCW de la transformation Tasseled Cap. Le produit cartographique généré par ce modèle a permis de caractériser la salinité des sols dans la zone d'étude. Seulement  $29,52\%$  du territoire de la zone d'étude est considéré comme des sols non salés. En contre partie  $60\%$  des terres de la zone d'étude sont qualifiées de sols extrêmement salés.

**Mots clés :** Cartographie, Salinité, Sol, Télédétection, Modélisation, Régression ordinaire.

## Abstract

The objective of this work is to map the salinity of the soil by using remote sensing data from the OLI 8 sensor (Landsat 8). The approach adopted in this study is based on the combination of remote sensing data (Multispectral bands, NDVI, NDMI, TCB and TCW of the Tasseled Cap transformation and the  $SI_1$  and  $SI_2$  salinity spectral indices) with the results of the analyzes,  $pH$ ,  $Hr$  and  $Caco_3$ ) obtained from 141 soil samples by the use of ordinary regression. The most relevant model with field reality gave validation  $RMSEs$  of the order of  $39.84$   $mS / Cm$  and an  $R^2$  equal to  $0.53$ . This model is composed only of two independent variables which are the TCB and TCW of the transformation Tasseled Cap. The cartographic product generated by this model allowed to characterize the salinity of the soils in the study area. Only  $29.52\%$  of the territory of the study area is considered to be salt soils. In contrast,  $60\%$  of the land in the study area is considered to be extremely saline soils.

**Key words:** Cartography, Salinity, Soil, Remote sensing, Modeling, Ordinary regression.