

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
جامعة هواري بومدين للعلوم والتكنولوجيا

FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES « F. S. B »
كلية العلوم البيولوجية



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En : **SCIENCE DE LA NATURE**

Spécialité : **Ecologie et environnement**

Par : **Mokhtari Djamel Eddine**

Thème :

Apport de la télédétection dans l'évaluation de la dégradation des états de surface en milieu salin (Le Bas-Chélif).

Soutenu le 13/01/2009 devant le jury composé de :

Mme NEDJERAOUI D.	Professeur, USTHB (Alger)	Présidente
Mr DOUAOUI A.	Maître de conférences, UHBC (Chleff)	Directeur de thèse
Mme KADI-HANIFI H.	Professeur, USTHB (Alger)	Examinatrice
Mr BACHARI N.I.	Professeur, USTHB (Alger)	Examinateur
Mr GETTOUCHE M.S.	Maître de conférences, USTHB (Alger)	Examinateur

الحمد لله رب العالمين

Remerciements

Tout d'abord, je remercie **notre Dieu tout puissant** qui m'a donné la foi, qui m'a guidé durant toute ma vie et qui m'a donné la volonté de continuer mes études.

Je tiens à remercier **Monsieur Abdelkader DOUAOUI** Maître de conférence à l'université de Chleff, qui a été l'un de mes meilleurs enseignants, et qui m'a fait l'honneur de diriger mon premier projet de fin d'étude ainsi que ce travail. Il a mis à ma disposition tous le matériel nécessaire, au sein de son laboratoire, qui a servi énormément dans la réalisation de ce mémoire. Je tiens à le remercier aussi de m'avoir initié à la télédétection, ses connaissances enrichissantes en télédétection m'ont été d'un grand apport. Sans oublier son suivi régulier, sa disponibilité permanente et pour ses précieux conseils et remarques.

Je tien également a exprimer toutes mes reconnaissances et gratitudes envers tous les responsables de «**Laboratoire d'écologie et Environnement de l'U.S.T.H.B** » de m'avoir donné cette chance d'apprentissage et de m'avoir intégré dans cette formation doctorale.

Je remercie sincèrement:

Madame **NEDJRAOUI Dalila**, Professeur à l'Université de l'U.S.T.H.B, responsable de l'école doctorale d'écologie et environnement, qui malgré ses responsabilités et ses nombreuses occupations a bien voulu prendre un peu de son temps et m'honorer à présider mon jury.

Madame **KADI-HANIFI Yasmina**, Professeur à l'Université de l'U.S.T.H.B. Un remerciement spécial d'avoir accepter d'examiner ce travail, en plus de **son aide précieuse** et ses qualités humaines, pour lesquelles je lui exprime toute ma gratitude.

Monsieur **GETTOUCHE Mohamed Saïd**, Maître de conférence à l'université de l'U.S.T.H.B. d'avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner ce travail.

Monsieur **BACHARI Nour El Islam** (Professeur à l'USTHB) d'avoir accepter d'examiner ce travail, de m'avoir accueilli dans son laboratoire durant tout le mois de Décembre, de ces remarques enrichissantes en télédétection ainsi que sa simplicité.

A la mémoire des Professeurs **MEDIOUNI kouider** et **DJEBAILI Salah**. Et **tous les enseignants** qui ont passé plus de notre age dans l'enseignement et la recherche scientifique.

A Madame **DAHMANI Malika** Professeur à l'Université de l'U.S.T.H.B qui nous a appris les éléments de biodiversité, sans oublier les grands efforts qu'elle fournit dans les cours qu'elle enseigne aux étudiants.

A Monsieur **BOUZENOUNE Amar** (Professeur à l'USTHB) et Mademoiselle **BENHOUHOU Salima** Professeur à l'I.N.A, qui nous ont beaucoup aider dans la connaissance de la flore et les clés de sa détermination, ainsi que leurs efforts et leurs directifs sur le terrain.

A Messieurs **HIRCHE Azziz** et **SALAMANI Mostapha** (Professeurs à l'USTHB), je leur dédie ce travail. Et je tiens à leur présenter vivement mes reconnaissances de leur compétence et leurs sacrifices dans le domaine d'écologie, ainsi que leur aide aux étudiants.

A Monsieur **Sid Ali GUERINA** qui m'a beaucoup aidé pour la réalisation de ce travail. Et aussi, aux étudiants de PFE de l'option Ecologie et environnement de Chleff qui m'on aider et soutenus dans ce modeste travail.

Madame **ABROUSSE** (Professeur à l'USTHB), responsable de la poste graduation de biologie au qu'elle je dédie ce modeste travail.

Monsieur **Abd ennour BOUAAKACHE** de laboratoire d'électronique de l'USTHB, qui a ma consacré un peut de son temps pour l'apprentissage de L'ENVI.

Monsieur **ACHIT Mohamed** Maître de conférence à l'université de Sénia à Oran. A Monsieur **BARADAI hamid**, Monsieur **BENBOUALI Elhadj**, Monsieur **ZEMOURI Azziz**, Maîtres assistant à l'université de Chleff, pour leurs encouragements durant mes années universitaires.

Monsieur **AIT OUYAHIA Omar** qui m'a insisté de suivre mes études, sans oublier sa mère **Khalti Feta** l'exemple de sagesse.

Mesdemoiselles **HOURIZI Ratiba**, **OMARI Linda** et **KHOUDIR Samia** de laboratoire d'écologie végétale à l'USTHB aux qu'elles je dédie ce modeste travail.

Monsieur **Moussa MENAD** et Mademoiselle **MEZIANI Houria**, de m'avoir accueilli dans leur laboratoire d'Océanographie (à l'USTHB).

Mes enseignants du **LYCEE DJILLALI BOUNAAMA**, spécialement à Monsieur **BOURAADA**, Monsieur **KICHICHI**, Monsieur **MEDJAHED**, Monsieur **MOKHTARI** Monsieur **ABBED**, Madame **MOKHTARI**, Madame **BENSEDDIK**, et Mademoiselle **MADANI**.

Mes **amis** qui ont été toujours à mes côtés dans les moments les plus difficiles et spécialement **Docteur Samir BENNAMEN** et sa famille, **SAHAR Sofiane** et sa famille, **GRIBI Mhamed**, **BACHA Ramadan** et toute sa famille, **HADJ CHERIF Abdelhadi** et sa famille, **RATA Mohamed**, **TAIBAOUI Brahim**, **ZOURGUI Mohamed**, **ATALLAH Samir**, ... et tous ceux que j'oublie aujourd'hui.

Je ne pourrais oublier de dédier ce travail à mes amis de:

- **Toute ma classe de troisième année secondaire (3AS).**

- **Toute ma promotion sortie en (2001/2002) d'écologie et environnement a Chleff.**

- **L'école doctorale "écologie et environnement de l' U.S.T.H.B".**

- Et toute la promotion du post graduation de l'option "**Eau-Environnement**" à Chleff notamment **Djamel BELLAGUE**, **Rachid AMRAINI**, **Djahida**, **Hassiba**, **Amina**, **Ahmed BACHA**, **BELOUAZNI Ahmed** et Monsieur **HOUARI**.

Enfin, mes remerciements à ma famille : A mes frères et ma petite sœur, a ma mère, à mon père qui m'ont toujours encouragé, soutenus, et sans leurs aide ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Djamel

Table des matières

Résumé

Introduction	01
---------------------------	----

CHAP. I. Milieu physique

1. 1 Localisation de la zone d'étude	03
1. 2 Le climat	03
1. 2.1. Les températures.....	03
1. 2.2. Les précipitations.....	04
1. 2.2.1. Les précipitations mensuelles.....	04
1. 2.2.2. Les précipitations annuelles.....	04
1. 2.3. Le quotient pluviothermétrique d'Emberger.....	05
1. 2.4. L'indice d'aridité annuelle (Ia) de De Martonne.....	06
1. 2.5. L'évapotranspiration (ETP)	07
1. 2.6. L'humidité.....	07
1. 2.7. Le vent	07
1. 2.8. Autres paramètres climatiques.....	07
1. 3. Pédologie.....	07
1. 3.1. Les sols des bordures des plaines.....	07
1. 3.2. Les sols de la plaine proprement dite.....	08
1. 3.2.1. Les sols peu évolués	08
1. 3.2.2. Les vertisols.....	08
1. 3.2.3. Les sols calcimagnésiques	08
1. 3.2.4. Les sols isohumiques.....	08
1. 3.2.5. Les sols hydromorphes.....	08
1. 3.2.6. Les sols salsodiques.....	09
1. 4. Géologie et géomorphologie.....	11
1. 4.1. Les glacis colluvionnaires	11
1. 4.2. La plaine alluviale	11
1. 4.3. Les lits des oueds actuels.....	11
1. 4.4. La Sebkha de Benziane	11
1. 4.5. La Gaa	12
1. 4.6. La colline de partage.....	12
1. 5. Ecologie et occupation du sol	12
1. 6. Phytogéographie	13
1. 7. La topographie de la plaine	13
1. 8. Ressources en eau.....	13
1. 8.1. Les ressources en eaux superficielles.....	14
1. 8.2. Les ressources en eaux souterraines.....	14
1. 9. L'irrigation.....	14
1. 10. Etudes précédentes sur la plaine du Bas-Chélif	15

CHAP. II. Aperçu bibliographique

2.1. Télédétection	16
2.1.1. Définition de la télédétection.....	16
2.1.2. Processus de télédétection.....	16

2.1.3. Le rayonnement électromagnétique.....	17
2.1.4. Interaction rayonnement matière et rayonnement atmosphère.....	17
2.1.5. Systèmes Vecteurs-capteurs.....	18
2.1.5.1. Les vecteurs.....	18
2.1.5.2. Les capteurs.....	18
2.1.5.2.1 Les Caractéristiques d'un capteur.....	18
2.1.5.1. 2.1. Résolution Spectrale	18
2.1.5.1. 2.2. Résolution Spatiale	18
2.1.5.1. 2.3. Résolution radiométrique.....	18
2.1.5.1. 2.4. Résolution temporelle ou répétitivité.....	20
2.2. Les traitements des données de télédétection	20
2.2.1. L'analyse et l'interprétation visuelle de l'image.....	20
2.2.2. Notion de classe.....	20
2.2.3. Méthodes de classification.....	21
2.2.3.1. Classification non supervisée.....	21
2.2.3.2. Classification supervisée.....	22
2.2.3.1.1. Détermination d'algorithmes de classification	22
2.2.3.1.1.1. L'algorithme de maximum de vraisemblance.....	22
2.2.3.1.1.2. L'algorithme de distance minimale aux moyens.	23
2.2.4. L'histogramme bidimensionnel	23
2.2.5. Evaluation des résultats de la classification.....	23
2.2.5.1. La matrice de confusion.....	23
2.2.5.2. Le test de Kappa.....	24
2.3. Les états de surface.....	24
2.3.1. Définition des EDS.....	24
2.3.2. Historique de la télédétection des EDS.....	24
2.3.3. Télédétection des composantes des EDS.....	25
2.3.3.1. Notion de signature spectrale en télédétection.....	25
2.3.3.2. Comportement spectral des composantes des EDS.....	25
2.3.3.2.1. Le sol.....	25
2.3.3.2.1.1. La couleur.....	26
2.3.3.2.1.2. L'humidité.....	26
2.3.3.2.1.3. La matière organique	26
2.3.3.2.1.4. La matière minérale.....	26
2.3.3.2.1.5. La rugosité.....	26
2.3.3.2.2. L'eau.....	26
2.3.3.2.3. Géologie et géomorphologie.....	27
2.3.3.2.4. La végétation.....	27
2.3.3.2.4.1. Les indices de végétation.....	28
2.3.3.2.5. La salinité.....	28
2.3.4. Synthèse sur la télédétection des élément de surface.....	29

CHAP. III. Matériels et méthodes

3.1. Démarche générale	30
3.2. Protocole d'observation des éléments de surface au sol	31
3.3. Le choix des points d'échantillonnage	31
3.4. L'échantillonnage.....	31
3.5. Données utilisées.....	32
3.5.1. Données cartographiques.....	32

3.5.2. Données de l'image satellitaire.....	33
3.5.2.1. Une image de type Aster	33
3.5.2.2. Une série d'images Spot	34
3.5.2.3. Le choix de la meilleure trichromie.....	34
3.5.2.4. Modèles numériques du comportement spectral de l'image.....	35
3.5.2.5. Le choix des zones-tests.....	35
3.5.2.6. La classification d'image	35
3.5.2.7. Comportements spectraux des classes.....	35
3.5.2.8 L'extraction des comptes numériques de l'image.....	35
3.5.2.9. Calcul des indices	35
3.5.2.9.1. Les indices de végétation	35
3.5.2.9.2. Les indices caractérisant les sols.....	36
3.5.3. Les données de terrain.....	37
3.5.3.1. Description des états de surface.....	37
3.5.3.2. Description in situ.....	37
3.5.3.3. Les analyses au laboratoire.....	37
3.5.3.4. Les éléments de surface retenus dans l'analyse des données de terrain....	37
3.5.3.4.1. L'occupation du sol.....	38
3.5.3.4.2. Le recouvrement de la végétation.....	38
3.5.3.4.3. Les croûtes de surface.....	39
3.5.3.4.4. La rugosité du sol.....	39
3.5.3.4.5. L'humidité.....	39
3.5.3.4.6. Les fentes de retrait.....	39
3.5.3.4.7. La couleur.....	39
3.5.3.4.7.1. La teinte ou "hue"	39
3.5.3.4.7.2. La clarté ou "value"	39
3.5.3.4.7.3. La pureté ou "chroma"	39
3.5.3.4.8. La structure.....	39
3.5.3.4.9. Les efflorescences salines.....	40
3.5.3.4.10. La CE 1/5.....	40
3.6. Echelle d'observation des éléments de surface	40
3.7. La confrontation des données de terrain aux données de télédétection.....	42
3.7. 1. Entre les données des éléments de surface et celles de la télédétection	42
3.7. 2. Entre les données de la salinité et celles de la télédétection	42
3. 8. La géostatistique en tant que méthode de cartographie de la salinité.....	43
3. 8. 1. La variographie.....	43
3. 8. 2. Le krigeage	43
3.9. Logiciels utilisés	43

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAP. IV. Analyse de l'image satellitale et identification des états de surface

4. 1. Combinaisons de canaux.....	45
4. 2. Interprétation visuelle (Les grandes unités agropaysagiques)	45
4. 3. Caractérisation des principales unités paysagiques de la plaine.....	46
4. 3.1. Caractéristiques des canaux.....	47
4. 3.2. Corrélations entre les canaux.....	47
4. 3.3. Modèles de comportement spectral pour l'interprétation des comptes numériques.....	48

4. 3.3. 1. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Ouarizane.....	48
4. 3.3. 2. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Djidiouia.....	49
4. 3.3. 3. Diagrammes bidimensionnels du plateau Benziane et de la Gaa	49
4.3.3. 4. Interprétation numérique de la plaine du Bas-Chélif	50
4. 3.4. Calcul des indices de végétation des régions retenues.....	51
4. 3.5. Evolution de l'indice de végétation NDVI durant l'année 2005 pour les différentes zones.....	52
4. 4. Cartographie des classes homogènes correspondant aux différents états de surface.....	55
4. 4.1. Détermination des classes de télédétection	55
4. 4.2. Classification de l'image.....	58
4. 4.3. Le choix de couleurs	58
4. 4.4. Superficie des classes	60
4. 4.5. Pertinence de la classification.....	61
4. 4.6. Caractérisation numérique des classes.....	62
4. 4.6.1. Comportements spectraux des classes.....	62
4. 4.6.2. Evolution des indices en fonction des aires d'entraînement	63
4. 4.6.2.1. Les indices caractérisant le sol	63
4. 4.6.2.2. Les indices de végétation	64

**CHAP. V. Caractérisation des états de surface et leur confrontation avec les données
de la télédétection**

5. 1. Caractérisation des états de surface de la plaine	66
5. 1. 1. L'occupation du sol.....	67
5. 1. 2. Le recouvrement de la végétation.....	69
5. 1. 3. Croûtes de surface.....	70
5. 1. 4. La rugosité du sol	71
5. 1. 5. L'humidité.....	71
5. 1. 6. Les fentes de retrait	72
5. 1. 7. La couleur du sol	72
5. 1. 8. La structure.....	74
5. 1. 9. Les efflorescences salines.....	74
5. 2. La confrontation des données.....	74
5. 2.1. Confrontation avec les données de télédétection	74
5. 2.1.1. Confrontation avec les données par classe de télédétection.....	75
5. 2.1.1.1. Les différents indices de sol et de végétation.....	75
5. 2.1.1.2. Les éléments de surface et les comptes numériques moyens.....	75
5. 2.1.1.3. Les éléments de surface.....	76
5. 2.1.1.4. Les indices et les éléments de surface.....	76
5. 2.1.2. Confrontation avec les données ponctuelles.....	77
5. 2.1.2.1. Les différents indices.....	77
5. 2.1.2.2. Les éléments de surfaces et les comptes numériques moyens.....	77
5. 2.1.2.3. Les éléments de surface.....	78
5. 2.1.2.4. Les indices et les éléments de surface.....	78
5. 2.2. Confrontation avec les données de la salinité.....	79
5. 2.2.1. Aux points échantillonnés par classe de télédétection.....	80

5. 2.2.1.1. La salinité et les différents indices de sol et de végétation.....	
5. 2.2.1.2. La salinité et les éléments de surface.....	80
5. 2.2.1.3. La salinité et les comptes numériques moyens.....	80
5. 2.2.2. Confrontation avec les données ponctuelles.....	81
5. 2.2.2.1. La salinité et les différents indices.....	81
5. 2.2.2.2. La salinité et les éléments de surface.....	82

CHAP. VI. Apport de la télédétection dans la cartographie de la salinité

6.1. Cartographie de la salinité par la géostatistique.....	84
6.1.1. Variographie.....	84
6.1.2. Krigeage.....	86
6.2. Combinaison entre la télédétection et les données de CE mesurées ponctuellement dans le cadre d'un SIG.....	89
Conclusion générale.....	92
Références bibliographiques.....	94

Annexe

Liste des figures

Figure 1. Localisation géographique de la région d'étude (Encarta, 2007)	03
Figure 2. Moyennes annuelles des précipitations aux différentes stations du Bas Chélif.....	05
Figure 3. Le diagramme mbrothermique de Gaussen (1985-2006).	05
Figure 4. position de la station de Hmadena sur le climagramme d'Emberger.....	06
Figure 5. Système théorique des vents ascendant et descendant dans la vallée du Chélif (Yacono, 1955)	07
Figure 6. Carte des sols (Boulaine, 1956)	10
Figure 7. Carte des principaux territoires biogéographiques d'Algérie d'après Quézel et Santa (1962, 1963).....	13
Figure 8. Qualité des eaux des barrages de Gargar et de Merdjet Sidi Abed (2002).....	14
Figure 9. Les principaux périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chélif (Douaoui, 2005).....	15
Figure 10. Processus de télédétection (C.C.T, 1999)	16
Figure 11. Réponse spectrale caractéristique de la végétation chlorophyllienne.....	27
Figure 12. Plan d'échantillonnage des points d'états de surfaces et du sol prélevés (2006).....	32
Figure 13. Assemblage des cartes topographiques.....	32
Figure 14. L'image brute de Aster (août 2005)	33
Figure 15. Fiche terrain utilisée pour caractériser les états de surface (Douaoui, 2005).....	41
Figure 16. Etapes de la démarche générale d'analyse des données de terrain et de l'image satellitale pour la caractérisation des états de surfaces et de la dégradation par télédétection....	44
Figure 17. L'image Aster en composition colorée « infrarouge couleur » (août 2005).....	45
Figure 18. Délimitation des quatre zones retenues sur l'image Aster.	47
Figure 19. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Ouarizane	48
Figure 20. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Djidiouia.....	49
Figure 21. Diagramme bidimensionnel du plateau Benziane.....	49
Figure 22. Diagramme bidimensionnel de la zone de Gaa.	50
Figure 23. Histogramme bidimensionnel de la plaine.....	51
Figure 24. Evolution des indices de végétation selon les zones étudiées.....	52
Figure 25. Evolution du NDVI dans certaines zones en fonction de la précipitation et de la température durant l'année 2005.....	53
Figure 26. Variation annuelle de l'NDVI dans certaines zones de la plaine.....	54
Figure 27. Aperçu photographique des classes.	57
Figure 28. L'image classée retenue pour les neuf classes définies.....	59
Figure 29. Superficie des classes.....	60
Figure 30. Comportement numérique des onze classes.....	62
Figure 31. Evolution d'indice de brillance, et celui de salinité en fonction des aires d'entraînement.....	63
Figure 32. Evolution d'indice de couleur, et celui de rougeur en fonction des aires d'entraînement.....	64
Figure 33. Evolution d'indices de végétation en fonction des aires d'entraînement.....	65
Figure 34. Evolution d'indices de végétation en fonction des aires d'entraînement.....	65
Figure 35. Occupation des sols de la plaine du Bas-Chélif.....	68
Figure 36. Evolution de la CE moyenne par classes de télédétection.....	81
Figure 37. Corrélation entre la CE moyennes et le NDVI	82
Figure 38. Variogramme expérimental moyen.....	83
Figure 39. Variogramme théorique moyen de la CE ajusté à un modèle sphérique.....	85
Figure 40. Variogramme surfacique de la conductivité électrique.....	86
Figure 41. Carte de la salinité estimée par KO.....	87
Figure 42. Carte des écarts-types d'estimation de la CE par KOVG.....	88
Figure 43. Carte de la salinité.....	90

Liste des tableaux

Tableau 1. Données des moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station météorologique de Hmadna (1985-2006).....	04
Tableau 2. Gammes du spectre électromagnétique utilisées en télédétection.....	17
Tableau 3. Principales caractéristiques des couples capteurs vecteurs utilisés en télédétection spatiale terrestre (Hourizi, 2004).....	19
Tableau 4. Avantages et inconvénients de différentes méthodes de classification.....	22
Tableau 5. Caractéristiques du satellite Aster.....	34
Tableau 6. Combinaison des canaux pour l'élaboration de la trichromie RVB.....	35
Tableau 7. Echelle d'observation des éléments de surface.....	40
Tableau 8. Moyennes et écarts types des comptes numériques des trois canaux.....	47
Tableau 9. Corrélations entre les canaux de l'image.....	48
Tableau 10. Moyennes des indices de végétation pour les quatre régions.....	51
Tableau 11. Matrice de confusion établie pour les neuf classes.....	61
Tableau 12. Qualité de précision des classes.....	61
Tableau 13. Indices de végétation moyens aux points échantillonnés des classes définies....	64
Tableau 14. Recouvrement de la végétation par type de faciès.....	70
Tableau 15. La variabilité spatiale de la rugosité à l'échelle de la plaine.....	71
Tableau 16. La variabilité spatiale de la rugosité à l'échelle de la plaine.....	72
Tableau 17. Les classes de fentes de retrait obtenues.....	72
Tableau 18. La couleur selon le Code Munsell (Relation avec la radiométrie et la salinité)..	73
Tableau 19. Les classes de la structure à l'échelle de la plaine.....	74
Tableau 20. Les classes d'efflorescences saline à l'échelle de la plaine.....	74
Tableau 21. Matrice de Corrélation entre les différents indices de sol et de végétation.....	75
Tableau 22. Corrélation entre les éléments de surface et la radiométrie.....	76
Tableau 23. Matrice de Corrélation entre les éléments de surface	76
Tableau 24. Corrélation entre les indices et les éléments de surface.....	77
Tableau 25. Matrice de Corrélation entre les différents indices	77
Tableau 26. Corrélation entre les variables des états et les comptes numériques moyens sur la totalité des 400 point échantillonnés.....	78
Tableau 27. Matrice de Corrélation entre les éléments de surface.....	78
Tableau 28. Tableau des corrélations entre les indices et les éléments de surface.....	79
Tableau 29. Matrice de Corrélation entre les différents indices	80
Tableau 30. Corrélation entre les éléments de surface et la salinité.....	80
Tableau 31. Valeurs de la CE 1/5 (dS/m) des classes de télédétection.....	80
Tableau 32. Corrélations entre CE moyennes, comptes numériques moyens et CN aux points échantillonnés par classe.....	81
Tableau 33. Corrélation entre la salinité et les différents indices.....	82
Tableau 34. Tableau de corrélations entre les éléments de surface et la salinité	83
Tableau 35. Valeurs numériques du variogramme expérimental retenu	85
Tableau 36. Statistiques de la conductivité électrique des données mesurées et estimées	88
Tableau 37. Superficies des classes de CE estimées par KO et télédétection-SIG ainsi que leurs pourcentage respectifs.....	91

Résumé

La plaine du Bas-Chélif qui se trouve à 220 km à l'ouest d'Alger et s'étend sur plus de 50000 ha a fait l'objet de notre terrain d'étude. Cette plaine qui n'est qu'à 40 km de la méditerranée a un climat aride et connaît de graves problèmes de dégradation de son milieu physique. Cette dégradation qui est due essentiellement à la salinisation des sols se manifeste à la surface du sol par différents états de surface en fonction de leurs niveaux de dégradation.

L'objectif visé par ce travail est d'utiliser la télédétection pour évaluer les niveaux de dégradation des sols par l'identification et la cartographie des états de surface.

L'analyse visuelle de l'image Aster prise en août 2005 a permis de faire ressortir les grandes unités agropaysagiques, ce qui nous a amené à identifier quatre zones homogènes représentatives des différents états de surface de la plaine en l'occurrence, les deux périmètres irrigués de Ouarizane et de Djédiouia, les sols non salés céréaliers du plateau de Benziane, et la Gaa qui renferment les sols salés non cultivés à végétation halophytes.

La classification supervisée de l'image satellitaire nous a permis de généraliser cette bonne capacité discriminatoire à l'ensemble des états de surface et d'obtenir 09 classes homogènes correspondant à différents niveaux de dégradation. Cette dernière est évaluée par des indicateurs caractérisant le sol et la couverture végétale.

La bonne corrélation trouvée lors de la confrontation des données de télédétection avec les données mesurées de la salinité issues des classes des états de surface a été utilisée pour cartographier la salinité des sols par l'application de la télédétection et permettre une comparaison avec la carte obtenue par krigeage.

Les deux approches ont montré une extension importante de la salinité. Toutefois, la carte de la salinité estimée par télédétection a permis d'avoir une estimation meilleure par rapport à celle obtenue par krigeage ordinaire et ce au niveau des valeurs extrêmes.

Mots-clés: Bas-Cheliff ; télédétection ; dégradation ; salinité; états de surface.

Introduction

Introduction

Le sol est une composante principale de l'écosystème ; il joue un rôle essentiel vis-à-vis de l'agriculture comme support des cultures et en leur fournissant l'eau, l'air et les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance, comme il constitue également une interface vis-à-vis de l'environnement qui va conditionner la qualité de l'eau et de l'air et le développement diversifié des êtres vivants (biodiversité). Malheureusement, cette ressource est limitée au niveau du globe; elle ne représente que 22% des terres émergées, soit 3300 millions d'hectares seulement qui possèdent les caractéristiques bioclimatiques et physiques favorables (Robert et Cheverry, 1996).

La plaine du Bas-Chélif qui se trouve à 220 km à l'ouest d'Alger et s'étend sur plus de 50000 ha a fait l'objet de notre terrain d'étude. Cette plaine qui n'est qu'à 40 km de la méditerranée a un climat aride et connaît de graves problèmes de dégradation de son milieu physique. La salinisation des sols qui s'est accélérée ces deux dernières décennies suite au recours accru à l'irrigation est incontestablement le plus grave problème qui touche cette plaine (Douaoui et al., 2007).

Cette salinisation qui ne cesse de s'étendre spatialement et d'augmenter temporellement (Douaoui et al. 2006) provoque une détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dont les conséquences sont d'ordres agricole et éco-environnemental (Daoud et al., 1993 ; Saidi et al., 2004 ; Douaoui et al., 2004).

Cette dégradation intervient tout particulièrement à la surface des sols où l'influence du climat (pluie, température, vent..) et de l'action de l'homme (irrigation, travail du sol ...) est la plus importante. Il en découle des états de surface particuliers qui se manifestent selon leurs niveaux de dégradation par la diminution des potentialités agricoles, le développement d'un encroûtement de surface plus ou moins rugueux, le développement d'une végétation halophyte plus ou moins dense et parfois une stérilisation totale des sols voire une désertification.

L'état de la dégradation avancé dans lequel se trouvent actuellement la plaine du Bas-Chélif nécessite la connaissance de son niveau de dégradation ainsi que les régions les plus touchées par ce phénomène. Par ailleurs, pour lutter efficacement contre cette dégradation qui se manifeste à la surface du sol, il est essentiel de déterminer avec le maximum de précision possible l'étendue des zones affectées et de délimiter à l'intérieur de celles-ci les différents degrés de sensibilité (Akrimi, 1993).

La télédétection qui est en passe de devenir un outil courant dans la connaissance, l'identification et la quantification des différents constituants des états de surface est utilisée ici pour discriminer et cartographier ces états de surface. Parmi ses intérêts majeurs, on retrouve l'identification de la couverture végétale et des types de sols en vue d'une connaissance plus complète des facteurs dynamiques des sols tels que la désertification, l'érosion et la salinisation (Mannière et al., 1993 ; Metternicht et Zink, 2003).

L'intérêt majeur des données de télédétection réside dans la possibilité d'extrapoler des données acquises à une résolution pixellaire pour obtenir des informations continues spatialement avec un délai raisonnable et un coût d'acquisition moins onéreux.

Dans ce travail, Il s'agit de l'identification et la discrimination des états de surface par l'utilisation de la télédétection d'une part et d'autre part, de l'évaluation de la dégradation des couches de surface des sols de la plaine du Bas-Chélif en situation de salinité. Pour répondre à ces deux objectifs, ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du milieu physique de la zone d'étude ;
- dans le deuxième chapitre, un aperçu bibliographique est donné sur la télédétection, les états de surface et la salinité ;
- le troisième chapitre précise la problématique de notre recherche, pose les questions scientifiques et définit la démarche méthodologique ;
- le quatrième chapitre est réservé à l'analyse de l'image satellitaire et l'identification des états de surface ;
- le cinquième chapitre qui est une suite logique du chapitre précédent est une caractérisation des états de surface en étudiant leurs différents éléments qui les composent et leur confrontation avec les données de la télédétection ;
- enfin, dans le dernier chapitre, on a utilisé la géostatistique et la télédétection pour cartographier la salinité à l'échelle de la plaine et procéder à une comparaison entre les deux approches.

Chapitre I :

Milieu physique

CHAP. I. Milieu physique

1. 1 Localisation de la zone d'étude

Notre région d'étude est la plaine du Bas-Cheliff, elle se situe au Nord-ouest de l'Algérie, à environ 250 Km de l'ouest d'Alger et à 35 Km à vol d'oiseau de la méditerranée, avec en son centre la ville de Oued Rhiou (wilaya de Relizane) (fig.1).

Elle fait partie du grand bassin versant du Cheliff et occupe sa partie ouest, elle est bordée par le périmètre de moyen Cheliff à l'est, le périmètre de la Mina à l'ouest, le massif du Dahra au Nord et le massif de l'Ouarsenis au sud. La région est limitée par l'Oued Touchait (environ 3 Km à l'ouest de la ville de Boukadir wilaya de Chlef) à l'Est, et la ville de Sidi-Khattab (wilaya de Mostaganem) à l'Ouest. Boukadir, Merdjet-Sidi Abed, Oued Rhiou, Djdiouia, H'madna, Ouarizanze et Sidi-Khattab sont les principales villes situées dans le périmètre allant d'Est en Ouest.



Figure 1: Localisation géographique de la région d'étude (Encarta, 2007).

Elle fait environ 50 km de longueur sur une largeur variant de 6 à l'est à plus de 20 Km à l'ouest, avec une surface pratiquement plate d'une altitude moyenne de 70 m. La superficie totale de la plaine (si on prend comme limite ouest l'oued Mina) est estimée à 65000 ha (Douaoui, 2005). Ce qui correspond à une vaste étendue d'orientation Est-ouest.

La région du Bas-Cheliff se trouve entre $0^{\circ} 40'$ et $1^{\circ} 6' 8''$ de longitude et entre $34^{\circ} 3' 12''$ et $36^{\circ} 5' 57''$ de latitude nord. Avec les coordonnées géographiques x et y, selon la projection UTM Algérie fuseau 31, sont :

$$X = 275\ 649 \text{ et } 328\ 533 \text{ m}$$

$$Y = 3\ 968\ 469 \text{ et } 3\ 996\ 812 \text{ m}$$

1. 2 Le climat

1. 2.1. Les températures

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, où elles atteignent un maximum de 38°C en moyenne, ce qui

correspond à une forte évaporation et une remontée capillaire de la nappe qui se trouve parfois à un mètre de profondeur.

Les basses températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne de 12 °C et une minimale moyenne de 5 °C (Tab. 1).

Tableau 1. Données des moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station météorologique de Hmadna (1985-2006)

Paramètres Mois	Moyennes des températures minimales (°C)	Moyennes des températures maximales (°C)	Températures moyennes (°C)	Moyennes des précipitations (mm)
Janvier	5	18	12	33
Février	7	21	14	34
Mars	9	24	17	26
Avril	12	28	20	23
Mai	17	32	25	17
Juin	20	38	29	3
Juillet	21	38	30	1
Août	18	33	26	2
Septembre	14	28	21	15
Octobre	11	22	16	20
Novembre	6	18	12	36
Décembre	5	18	12	29

1. 2.2. Les précipitations

1. 2.2.1. Les précipitations mensuelles

La région d'étude a connu durant la dernière décennie des cycles de sécheresse s'étalant de 1987 à 1990 et de 1992 à 1995. Les précipitations moyennes annuelles en pluviométrie est de 238 mm. Généralement, la pluie tombe sous forme d'averse de courte durée donc de forte intensité causant ainsi des inondations en quelques endroits de la plaine.

L'analyse pluviométrique sur la région du Hmadna calculée sur une période s'étalant de 1985 à 2006, montre que le mois de Novembre est le mois le plus pluvieux (36 mm). Avec un été sec et une période estivale s'étale entre juin et août est la moins pluvieuse dans l'année, survenue généralement sous forme d'averses de fortes intensités. La faible pluviosité est enregistrée durant le mois de juillet avec une pluviométrie égale à 1 mm.

1. 2.2.2. Les précipitations annuelles

La région d'étude a connu durant la dernière décennie des cycles de sécheresse, la plus marquée est celle qui s'étale de 1988 à 1994 (fig. 2). Les précipitations moyennes annuelles en pluviométrie restent inférieures à 255 mm. Généralement, la pluie tombe sous forme d'averse de courte durée donc de forte intensité causant ainsi des inondations en quelques endroits de la plaine.

Sur la figure 2.

Station 12804 : DOMAINE SIDI LAKHDAR (1968-1999)

Station 12403 : MERDJA KH (1968-1999)

Station 12802 : EL HMADNA VILLAGE (1968-2002)

Station 12409 : OUARIZANE VILLAGE (1968-1999)

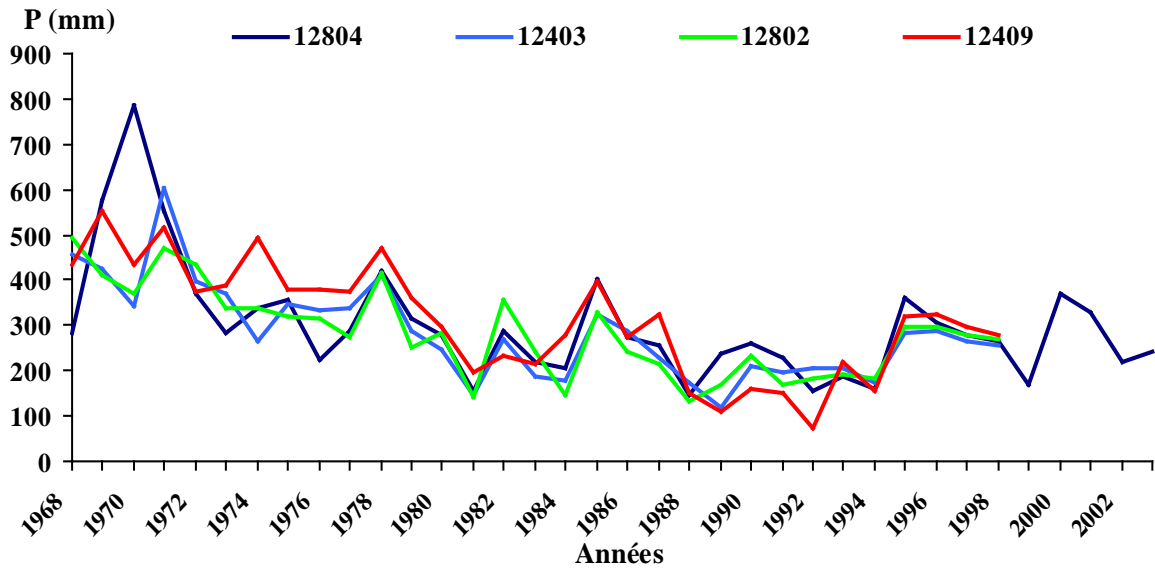


Figure 2. Moyennes annuelles des précipitations aux différentes stations du Bas-Chélif

1. 2.3. Diagramme ombrothermique et quotient d'Emberger

Les éléments climatiques n'agissent jamais indépendamment les uns des autres. Dans la synthèse climatique, parmi les formules les plus utilisées qui combinent entre les précipitations et les températures.

Nous retiendrons le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953), qui exprime la durée de la période sèche de l'année, et l'indice pluviothermique d'Emberger qui demeure l'indice le plus efficace dans la description du climat méditerranéen.

Bagnouls et Gaussen (1953) définissent la saison sèche comme étant : « l'ensemble des mois où le total mensuel des précipitations exprimé en millimètre est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle exprimée en degrés centigrades ($P \leq 2T$). ».

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadna entre 1985 et 2006 (Fig. 3) montre que le climat est de type méditerranéen avec une période de sécheresse très longue, qui s'étale sur plus de 8 mois, allant du début du mois de Mars jusqu'à la fin du mois d'Octobre.

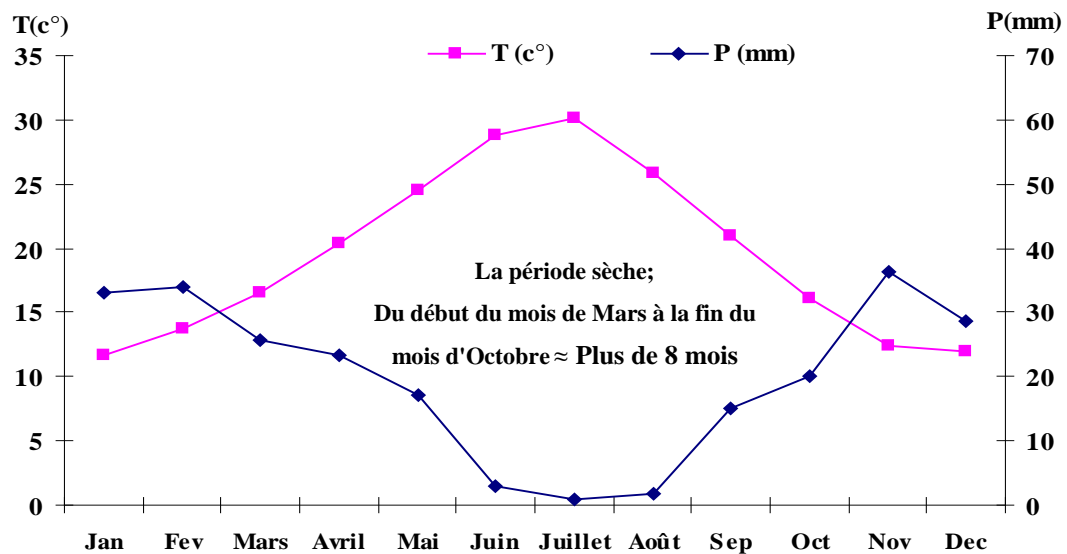


Figure 3: Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1985-2006).

L'indice pluviométrique d'Emberger appelé (Q_2) est ainsi formulé :

$$Q_2 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

M : Température moyenne mensuelle du mois le plus chaud exprimée en degrés Kelvin.

m : Température moyenne mensuelle du mois le plus froid exprimée en degrés Kelvin.

M-m : Amplitude thermique extrême moyenne.

La valeur du quotient pluviométrique varie en fonction inverse du caractère xérique du milieu. Plus la sécheresse annuelle globale est grande, moins la valeur du quotient est élevée.

En reportant la valeur de Q_2 (27.95) et de m ($5\text{ }^\circ\text{C}$) sur le climagramme d'Emberger, (tableau 1 et fig. 4), notre station d'étude se situe dans l'étage bioclimatique aride supérieur, variante à hiver tempéré.

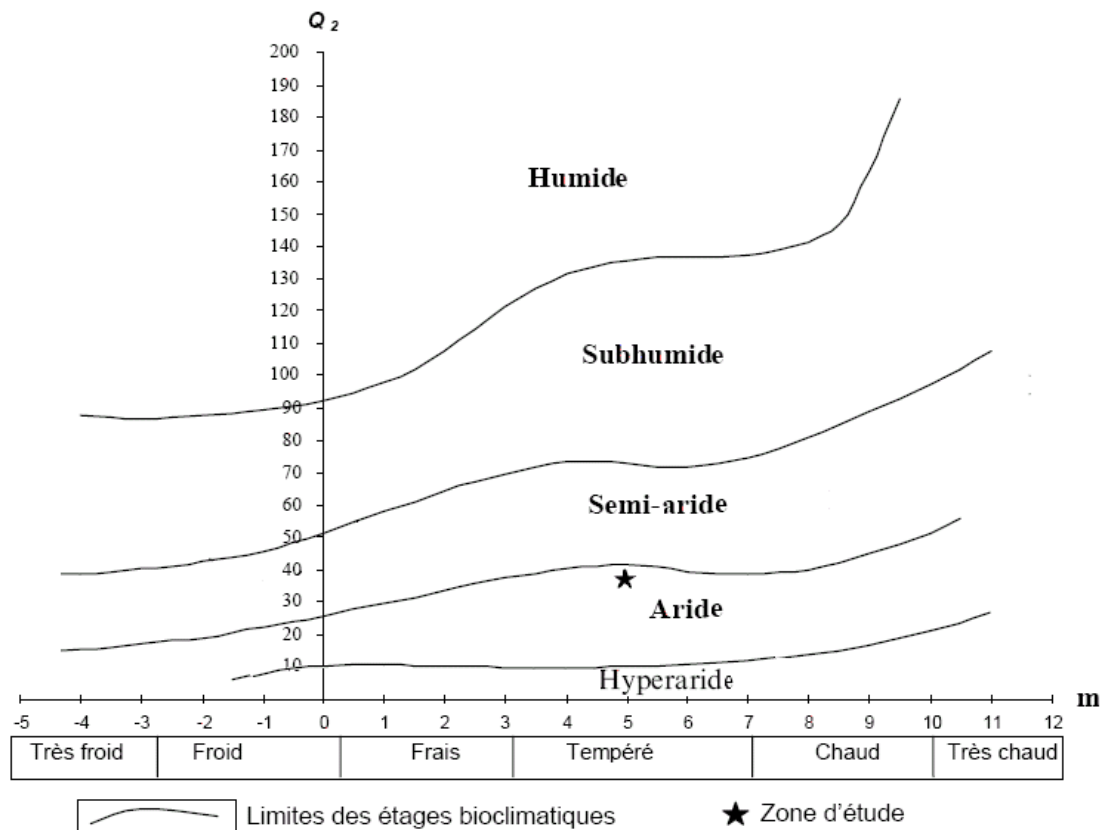


Figure 4: position de la station de Hmadena sur le climagramme d'Emberger

1. 2.4. L'indice d'aridité annuelle (I_a) de De Martonne

Après avoir analysé les différents éléments du climat, on peut donner une classification de la région de Bas-Cheliff, par l'indice d'aridité annuelle (I_a) de De Martonne qui est donnée par la formule :

$$I_a = \frac{P}{T + 10}$$

Dans laquelle, P représente la pluviométrie annuelle en (mm) et T la température moyenne annuelle en ($^\circ\text{C}$). L'indice baisse lorsque l'aridité croît. La valeur de l'indice I_a est de 8,06 classe la région du Bas-Cheliff dans l'étage bioclimatique aride (Le houérou, 2004).

1. 2.5. L'évapotranspiration (ETP)

Elle est définie comme étant la valeur maximale possible de l'évaporation dans des conditions climatiques données. Elle résulte de deux phénomènes l'un physique : l'évaporation, l'autre biologique : la transpiration. L'évapotranspiration potentielle estimée selon la formule de Penman est de 1500 mm/an (Douaoui, 2005).

1. 2.6. L'humidité

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée le matin pour tous les mois, elle est de l'ordre de 65 à 75 % en hiver et près de 35 % en été. Elle peut compenser en un certain degré l'absence ou la rareté des précipitations en favorisant le développement des plantes.

Le mois le plus humide est le mois de décembre, par contre le mois le plus sec est le mois de juillet.

1. 2.7. Le vent

Le vent agit soit directement par une action mécanique sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température (Ozenda, 1982). D'après les observations effectuées à la station du Hmadena, il ressort que le vent dominant est le vent d'Ouest. Sa vitesse moyenne varie de 13 à 33 Km/h, jouant le rôle de la dégradation mécanique du sol et agit sur l'amplitude de la température. Il constitue ainsi un agent d'érosion efficace dans les régions à couverture végétale faible à nulle, surtout durant la période sèche où beaucoup de sols acquièrent une structure micro- polyédrique (pseudo-sables) à la surface voire poudreuse dans d'autres cas (Douaoui, 2005). Les lunettes qu'on retrouve autour de la sebkha Benziane sont dues à ce phénomène (Boulaine, 1957) (fig. 5).

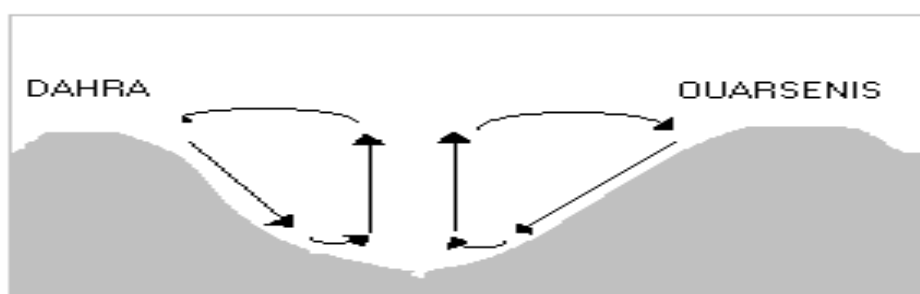


Figure 5: Système théorique des vents ascendant et descendant dans la vallée du Chélif (Yacono, 1955)

1. 2.8. Autres paramètres climatiques

Il a été enregistré aussi au niveau de la même station et pour la même période une moyenne de 18 jours de gelée, 11 jours de rosée, 20 jours de brouillard et 10 jours de siroco. (Douaoui, 2005).

1. 3. Pédologie

Boulaine (1957) distingue deux grandes divisions des sols :

1. 3.1. Les sols des bordures des plaines

Ces sols sont formés par des associations de sols plus ou moins érodés, qui peuvent évoluer sur du calcaire dur ou tendre, des grès ou des marnes. Lorsque la roche n'affleure pas à la surface, ce sont des sols généralement calcimagnésiques, le plus souvent rendziniformes avec parfois la présence d'une croûte calcaire (fig. 6).

1. 3.2. Les sols de la plaine proprement dite

Cinq classes ont été décrites : les sols salés, les sols hydromorphes, les vertisols, les sols peu évolués alluviaux et colluviaux et les sols calcimagnésiques (fig. 6).

Dans la classe des sols salés, Boulaine (1957) distingue les Solontchaks inertes avec accumulation des sels en surface ou en profondeur, les Solontchaks vifs (horizon de surface à structure micropolyédrique en pseudo-sables durant l'été) pouvant être parfois hydromorphes, les Solontchaks vifs défloculés (dispersés en surface), les Hyposolontchaks et les Eosolonetz des lunettes érodées.

La carte des sols établie par McDonald et BNEDER (Bureau National d'Etude pour le Développement Rural) (1990) selon la CPCS (1967) montre l'existence des mêmes types de sols dans la plaine. On retrouve :

1. 3.2.1. Les sols peu évolués

Les sols peu évolués d'apport alluvial : Ce sont des sols dont les caractéristiques physico-chimiques sont très variées au vu des conditions différentes de leurs dépôts et de leurs migrations. Leur granulométrie peut être argileuse, limoneuse ou sableuse. On les rencontre le plus souvent sur les terrasses des lits de l'oued. Ils sont généralement profonds. Ils peuvent présenter une nappe temporaire qui est à l'origine des taches d'oxydo-réduction qu'on retrouve dans certains profils.

Les sols peu évolués d'apport colluvial : ces sols se localisent sur les bordures de la plaine à la rupture de pentes entre les piémonts et les glacis. On les retrouve aussi au niveau des cônes de déjection des oueds tels que Oued Rhiou et Oued Djédouia. Ils sont caractérisés le plus souvent par des dépôts de cailloux et de graviers à la surface et en profondeur du profil. Leur texture peut être très variée.

1. 3.2.2. Les vertisols

Les vertisols sont riches en argiles gonflantes (smectites). Ils se définissent comme des sols à mauvais drainage. On les retrouve sur les alluvions des terrasses Rharbiennes. Ils présentent souvent le caractère salin avec une hydromorphie en profondeur.

1. 3.2.3. Les sols calcimagnésiques

Ces sols sont présents le long des limites nord et sud de l'aire d'étude. Ils sont carbonatés, plus ou moins différenciés et présentent parfois des accumulations calcaires nodulaires ou continues sous forme d'encroûtement et de croûte. Ils montrent parfois des caractères vertiques.

1. 3.2.4. Les sols isohumiques

C'est la classe la moins fréquente dans le Bas-Chéliff. Ils sont de couleur marron et peuvent présenter parfois le caractère vertique ou des accumulations discontinues de calcaire. On les retrouve sur les colluvions de la partie sud de la plaine et sur le plateau de Benziane.

1. 3.2.5. Les sols hydromorphes

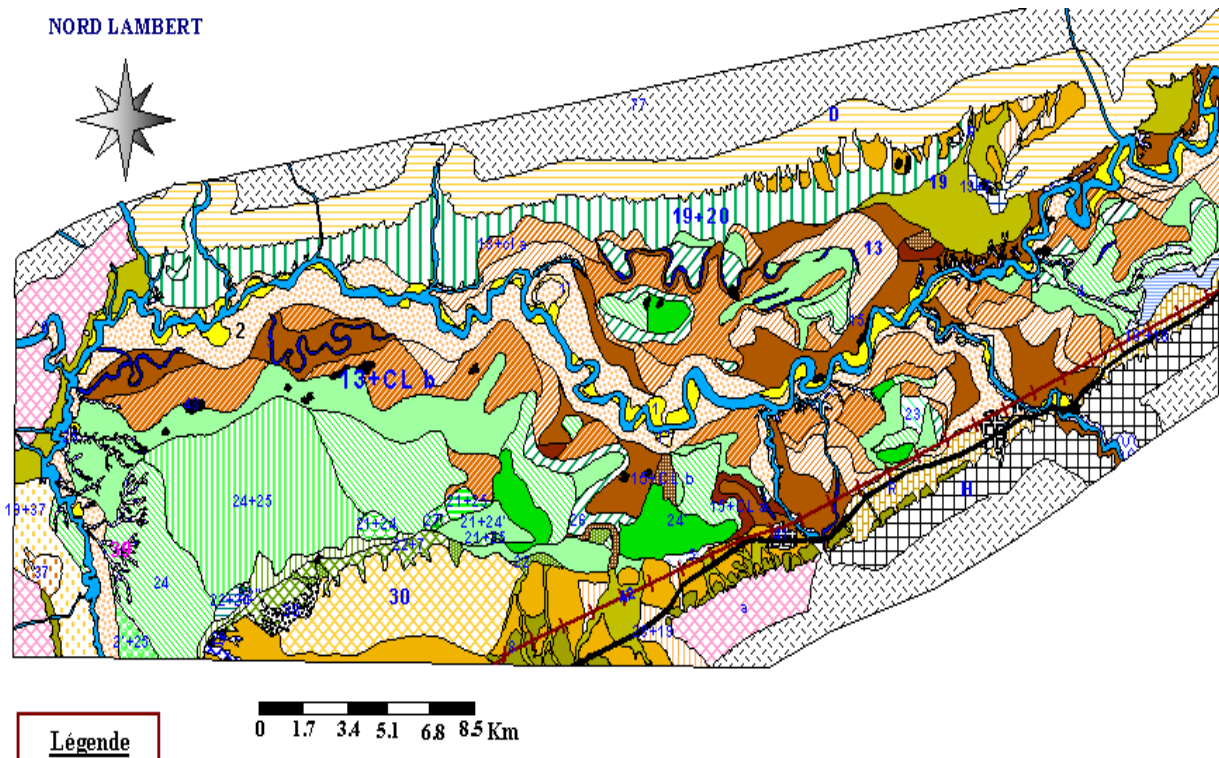
Ce sont des sols profonds avec un drainage imparfait dû à la position basse qu'ils occupent formant généralement des dépressions fermées telles que les sols de la Gaa. On les rencontre un peu partout dans le Bas-Chéliff. Leur superficie est de 29,68 km². (Douaoui, 2005).

1. 3.2.6. Les sols salsodiques

Les sols salsodiques appelés auparavant halomorphes sont définis comme étant des sols dont l'évolution est influencée par la présence de sels solubles et du pourcentage du sodium échangeable. Lorsque la conductivité électrique dépasse les 4 dS/m par la méthode de la pâte saturée, ils sont appelés sols salés (USSS, 1954). Souvent dans le Bas-Chéouiff, la présence des sels est tellement importante qu'ils deviennent apparents à l'examen visuel sous forme d'efflorescences salines.

Les sols qui étaient déjà touchés par la salinité, selon la carte de Boulaine (1956), couvraient 13500 ha soit 34 % de la superficie de la zone d'étude. (Douaoui, 2005). Les superficies qui sont actuellement touchées par la salinité avoisinent les 80 % (Douaoui et al., 2006).

Il faut rappeler que souvent plusieurs caractères relatifs à plusieurs classes se retrouvent dans le même type de sol, tels que les caractères salin, vertique et hydromorphe. (Douaoui, 2005).



1 : sols alluviaux non évolués des dépôts sableux des lits majeurs des oueds
 1' : fréquemment inondés
 1'' : salés par ruissellement latéral
 2 : sols alluviaux non évolués des dépôts sableux des bourrelets des oueds
 2' : peu épais
 3 : sols hydromorphes non salés des réseaux d'écoulement des eaux superficielles des plaines
 4 : sols hydromorphes permanents
 5 : sols hydromorphes temporaires, à nappes phréatiques non salées
 7 : sols hydromorphes à inondations temporaires hivernales
 8 : sols calciques formés sur carapace calcaire
 13 : sols alluviaux complexes à horizon d'accumulation des sulfates
 13+cla : sols alluviaux complexes à horizon d'accumulation des sulfates et chlorures
 13+clb : sols alluviaux complexes à horizons d'accumulation des sulfates+accumulation de chlorures en profondeur (>0,18 %)
 15 : sols alluviaux complexes évolués
 15+cla : sols alluviaux complexes +accumulation de chlorures en profondeur (<0,18%)
 15+clb : sols alluviaux complexes +accumulation de chlorures en profondeur (>0,18 %)
 18+18' : sols colluviaux provenant des massifs calcaires, pente assez forte
 19 : sols colluviaux provenant des massifs gréseux et des formations quaternaires anciennes
 20 : sols colluviaux et alluviaux provenant des massifs marneux et argileux

21 : Solontchaks lessivés ou solonetz par ablation éolienne (sols des dayas des zones salées)
 22 : Solontchaks vifs
 22'' : Solontchaks vifs défloculés
 23 : Solontchaks inertes avec plus de 0,18 % et moins de 0,5 % de C1 en surface
 24 : Solontchaks inertes avec plus de 0,18 % de chlore en surface
 24' : Solontchaks inertes avec plus de 0,18 % de C1 en surface et plus de 0,5 % de C1 en profondeur
 25 : Hyposolontchaks avec 0,07 à 0,18 % de C1 en surface + accumulation de Chlorure en profondeur
 26 : Hyposolontchaks avec 0,07 à 0,18 % de C1 en surface
 27' : Eosolonetz des lunettes érodés
 28 : sols partiellement décalcifiés à accumulation progressive de calcaire
 30 : sols partiellement décalcifiés à accumulation brusque du calcaire
 37 : sols dunaires rouges décalcifiés
 38 : sols dunaires de la bordure nord de l'auréole de la sebkha Benziane
 39 : griffes d'érosion
 42 : voie ferrée
 43 : villages, douars, canneaux, etc...
 77 : Massif (Dahra, Ouarsenis)
 a : Association des sols à carapace calcaire
 D : Association des sols jeunes formés sur grès et marnes
 H : Association des sols formés sur les calcaires tendres
 R : Route nationale n°4

Figure 6: Carte des sols (Boulaine, 1956)

1. 4. Géologie et géomorphologie

La plaine du Bas-chélif est un synclinal comblé du rharbien (quaternaire) encadré au Nord et au sud par des collines de l'âge Miocène pliocène (tertiaire). En conséquences, les alluvions de la plaine du Bas-chélif proviennent directement de l'érosion de ces collines (McDonald et BNEDER, 1990).

Au sud, les collines coupées par l'oued Rhiou et l'oued Djidouia, consistent en de schistes et de marnes salés, ce qui explique la haute salinité des sols alluviaux de la plaine ainsi que le niveau de la salinité des eaux de la retenue du barrage Gargar. (McDonald et BNEDER, 1990).

Au Nord, Les collines de Dahra sont composées de marnes et de limons argileux qui deviennent vers l'ouest des sables et des conglomérats plus grossiers. Encore une fois, certains de ces lits sont salés.

Les collines de l'Est du Bas-Chélif sont plus récentes que le Dahra et le massif de l'Ouarsenis, d'âge Villafranchien et sont composées de limons calcaires intercalés de sables, extrêmement tendres, une érosion sévère a ravines profondes.

Les principales formations géomorphologie sont :

1. 4.1. Les glacis colluvionnaires

Ces glacis assez étroits de 3 % à 5 % qui se retrouvent en bordure de la plaine. Où les formations récentes sont dominantes. La présence des formations plus anciennes caractérisées par la présence des croûtes calcaires est moins fréquente ; on la retrouve, par exemple, sur les piémonts du Sud des villes de Oued Rhiou et de Djidiouia. Ils sont constitués par des matériaux en provenance des calcaires du Miocène supérieur.

1. 4.2. La plaine alluviale

La plaine alluviale du Bas-Chélif date principalement du Rharbien. Les alluvions sont d'une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres ; elles sont constituées par des matériaux récents originaires des bassins versants du Chélif, de l'oued Rhiou et de l'oued Djidiouia où dominant des schistes et des marnes du Miocène et du Pliocène souvent riches en sels. Ces alluvions sont principalement des argiles et des limons souvent à caractères salins (Boulaine, 1957). Ces formations récentes constituent la plaine proprement dite avec une pente très faible et des sols non évolués.

1. 4.3. Les lits des oueds actuels

Les lits d'oueds sont encaissés dans la terrasse alluviale du Rharbien à un niveau inférieur à 10 mètres. Les bords sont très escarpés et très abrupts.

L'oued Chlef est le principal oued de la plaine, il la traverse d'Est en Ouest. Au moment des grandes crues, il déborde sur les terrasses récentes en déposant en bordure de ses berges des bourrelets alluviaux le plus souvent sableux connus sous le nom de formations actuelles et qualifiés de formations modernes par Gaucher (1947).

L'oued Rhiou et l'oued Djidiouia forment des cônes de déjections assez étendus en contact avec la plaine du Bas-Chélif. Certains cours d'eau qui n'ont pu creuser leur lit jusqu'à l'oued Chlef, forment des cônes de déjection en pleine plaine.

1. 4.4. La Sebka de Benziane

C'est une cuvette elliptique de 5 km de long sur près de 3 km de large, entaillée dans la région de Benziane au Nord de la ville de Oued El Djemaa sur une profondeur d'une quinzaine de mètres. Boulaine (1957) avait retenu l'hypothèse selon laquelle la sebka a été formée par déflation éolienne d'une zone où s'étaient formés des sols salés à la suite de

mouvements tectoniques par la combinaison d'un creusement au centre du bassin et d'une accumulation en bordure d'un bourrelet éolien.

En hiver, elle est recouverte par une couche d'eau d'environ 30 cm d'eau en son centre, en été, il y a accumulation des sels qui apparaissent sous forme d'une épaisse croûte blanchâtre.

1. 4.5. La Gaa

C'est une dépression fermée, couverte par des formations récentes très argileuses, elle se trouve dans la rive droite de l'oued Mina. On y retrouve des petits cours d'eau qui constituent des artères permettant une circulation d'eau vers le centre de la dépression où les eaux stagnent sur pratiquement toute l'année provoquant dans ceci une hydromorphie et une salinisation importantes des sols (Douaoui, 2005).

1. 4.6. La colline de partage

C'est un relief caractéristique dans cette partie des plaines du Chélif qui domine Merdjet Sidi Abed d'une dizaine de mètres. Cette formation marque la limite entre la plaine du Bas-Chélif et la plaine du Moyen-Chélif. A ce niveau, la plaine alluviale est très étroite et ne fait que 2 à 3 km de large. Cette colline fait partie d'une série d'autres collines qu'on retrouve dans les autres plaines du Chélif (Moyen et Haut-Chélif). Les formations géologiques de ces collines sont continentales du Pliocène supérieur, du Villafranchien et du Quaternaire moyen, dont le matériau est un mélange de limons, de sables, de cailloux et de galets.

1. 5. Ecologie et occupation du sol

Selon l'étude de McDonald et BNEDER (1990), la plus grande partie de la vallée du Bas-Chélif est cultivée, et caractérisée par un système de champs ouverts avec par endroits des brise-vent de conifères (Tamarix, Casuarina ...etc.) et d'eucalyptus. Les cultures principales dans l'aire d'étude sont les céréales, les cultures maraîchères (notamment les artichauts), l'arboriculture (les oliviers et les agrumes), et les cultures fourragères. La plupart des pentes faibles sont cultivées.

D'après la même étude de McDonald et BNEDER (1990), les types de cultures occupent en S.A.U. : l'orge 20 %, le blé 8,5 %, l'oliviers 3,6 %, les melons, pastèques et artichaut 6,7 %.

La carte d'occupation du sol établie par Douaoui (2005) à partir des données recueillies directement sur le terrain lors de l'échantillonnage, même si elle reste incomplète, montre que les sols sont occupés à 10 % par les cultures maraîchères, 1 % par l'arboriculture, 22 % par les céréales, 21 % par la jachère, 43 % par la végétation halophyte, et 3 % sont des sols labourés. Les sols très salés abandonnés sont couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps.

En été, certains types de sols, tels que ceux de la Gaa sont totalement dépourvus de végétation. L'espèce halophyte la plus abondante est *Suaeda fructuosa* qui peut se développer sur des sols très salés. *Salicornia fructuosa* est aussi abondante dans les sols très salés des bas fonds. D'autres espèces plus ou moins résistantes à la salinité sont aussi fréquentes, telles que : *Salsola vermiculata*, *Avena sterilis*, *Cynodon dactylon*, *Beta maritima*, *Calendula arvensis*, *Phalaris paradoxa*, *Atriplex halimus* ..etc (Douaoui, 2005).

La région souffre beaucoup d'une érosion du sol, surtout là où la végétation a été dénudée ; il n'y a pas de grande couverture de sol permanente et la région ne peut donc supporter une flore et une faune abondantes.

Plusieurs espèces d'oiseaux se trouvent dans les zones agricoles et sur les contreforts à proximité de la vallée du Bas-Chélif. Des espèces intéressantes se trouvent sur les bords de route et dans les champs ; parmi eux, le Cochevis huppé, la Bergeronnette d'yarrell, le

Traquet motteux, la Chouette chevêche. Les espèces telles que l'Aigrette garzette se trouvent dans les champs récemment irrigués et quelquefois au bord des oueds. Une plus grande diversité d'espèces se trouve dans les collines et montagnes, où la topographie et la végétation sont plus variées.

1. 6. Phytogéographie

L'étude phytogéographique constitue une base essentielle à toute tentative de conservation (Quezel, 1991 in Dahmani, 1997). Elle permet de connaître l'histoire d'une région donnée et constitue un véritable modèle pour interpréter les phénomènes de régression (Olivier et al, 1995 in Dahmani, 1997). La subdivision en domaines et secteurs floristiques est le reflet de l'étroite dépendance climat-végétation, d'après le découpage phytogéographique de Barry et al (1974), La région du Bas-Cheliff appartient à l'empire holarctique, à la région méditerranéenne, sous région eu-méditerranéenne, domaine maghrébin méditerranéen, secteur oranais et au sous-secteur des plaines littorales O2 (fig. 7).

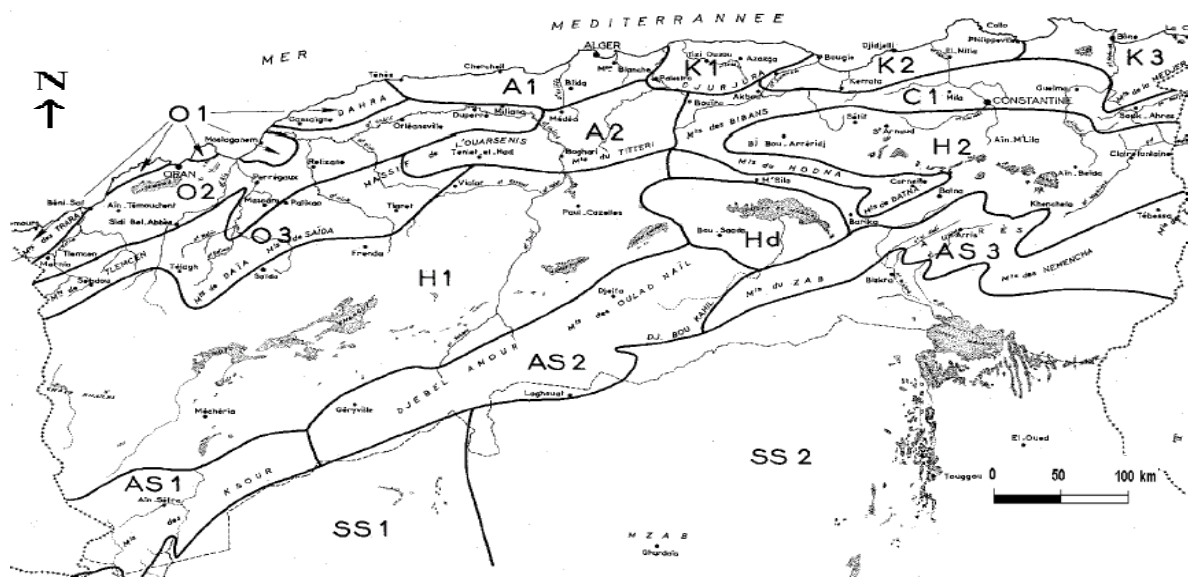


Figure 7: Carte des principaux territoires biogéographiques d'Algérie d'après Quézel et Santa (1962, 1963).

1. 7. La topographie de la plaine

La topographie du Bas-Cheliff est relativement plate avec des pentes qui sont quasi nulles d'où le mauvais drainage au niveau de cette région. Cette plaine est comprise entre deux massifs montagneux : le Dahra et Ouarsenis.

Prenant son origine au niveau de la rupture de pente entre le moyen et le Bas-Cheliff, à proximité de Merdjet Sidi Abed, la plaine commence à s'étendre de part et d'autre du lit de Oued Cheliff en faisant jonction avec Oued Rhiou et oued Djidiouia sur la rive gauche et avec les nombreux Oueds venant du Dahra, sur sa rive droite jusqu'à atteindre les apports de Oued Mina. Sur la partie gauche du Cheliff, s'étend la plaine jusqu'à ce qu'elle atteigne le bourrelet formé autour du Sebkhât où la pente du terrain augmente progressivement.

Au milieu de la plaine, la pente du terrain est modérée et augmente progressivement jusqu'aux villes situées aux piémonts de Ouarsenis, de même pour la rive droite.

1. 8. Ressources en eau

La plaine du Bas-Cheliff comporte des potentialités importantes en eau, malheureusement l'absence d'une politique d'aménagement et de gestion rationnelle fait que la plaine n'en profite pas (Douaoui, 2005).

1. 8.1. Les ressources en eaux superficielles

Les deux principales ressources en eau sont constituées par deux retenues :

- Le barrage de Gargar sur l'oued Rhiou : d'une capacité de 450 millions de m³, il est l'un des plus importants barrages d'Algérie ;

- La retenue de la Merdjet Sidi Abed , un réservoir hors cours d'eau d'une capacité de 50 millions de m³, située à l'amont du périmètre existant, qui est remplie pendant l'hiver essentiellement par dérivation des eaux de l'oued Chlef. (dévasée en 2005)

En plus de ces deux ressources, le Bas-Chélif pourrait aussi être alimenté à partir des autres ressources en eau superficielles du bassin du Chélif, telles que les eaux non régularisées excédentaires du Chélif.

La qualité de l'eau des cours d'eau du bassin de Chélif est aussi variable, mais elle est en général plutôt médiocre. La salinité de l'eau dans l'oued Rhiou varie entre 0,5 g / l environ pour les débits les plus forts et 2 g / l pour les débits d'étiage. La figure 8 montre la qualité des eaux du barrage de Gargar et de Merdjet Sidi Abed pour l'année 2002.

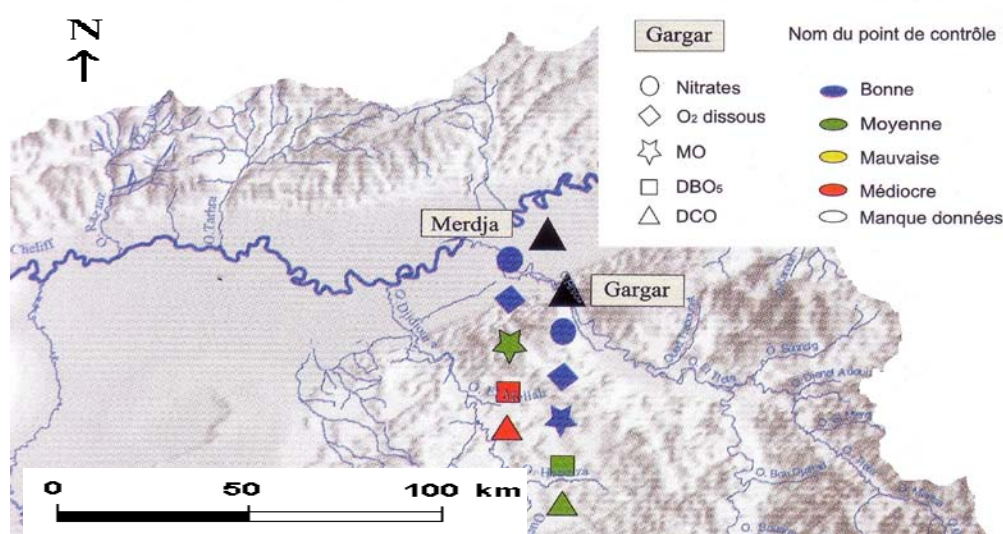


Figure 8: Qualité des eaux des barrages de Gargar et de Merdjet Sidi Abed
(Source : Agence des bassins hydrographiques, Chlef-Zahrez (ABH-CZ), 2002)

1. 8.2. Les ressources en eaux souterraines

Les principaux aquifères du Bas-Chélif sont :

- le Miocène calcaire : il affleure le long de la limite sud de la plaine. Les descriptions lithologiques ont montré l'existence de zones de fracture productives entre 37 et 60 m.

- Le Pliocène marin : c'est une suite d'argiles et de marnes avec des couches minces de grès qui affleurent au nord de la plaine. On le retrouve dans la région de Ouarizane à plus de 55 m de profondeur et dans la région de Sebkhet Benziane à plus de 400 m de profondeur.

Le Quaternaire-Pliocène continental : il est constitué de sédiments à base d'argile, de marnes et des lits de sable, de graviers et de conglomérats. La profondeur de ces forages est très variable selon les régions où elle peut aller jusqu'à 300 m alors que la moyenne est de 70 m. (Douaoui, 2005).

1. 9. L'irrigation

La région du Bas-Cheliff comporte plusieurs périmètres où l'irrigation est fréquente, dont les plus importants sont : le périmètre de Oued Rhiou, le périmètre de

Ouarizane, le périmètre de Djédouia, le périmètre Hmadna et le périmètre de Guerouaou (fig. 9).

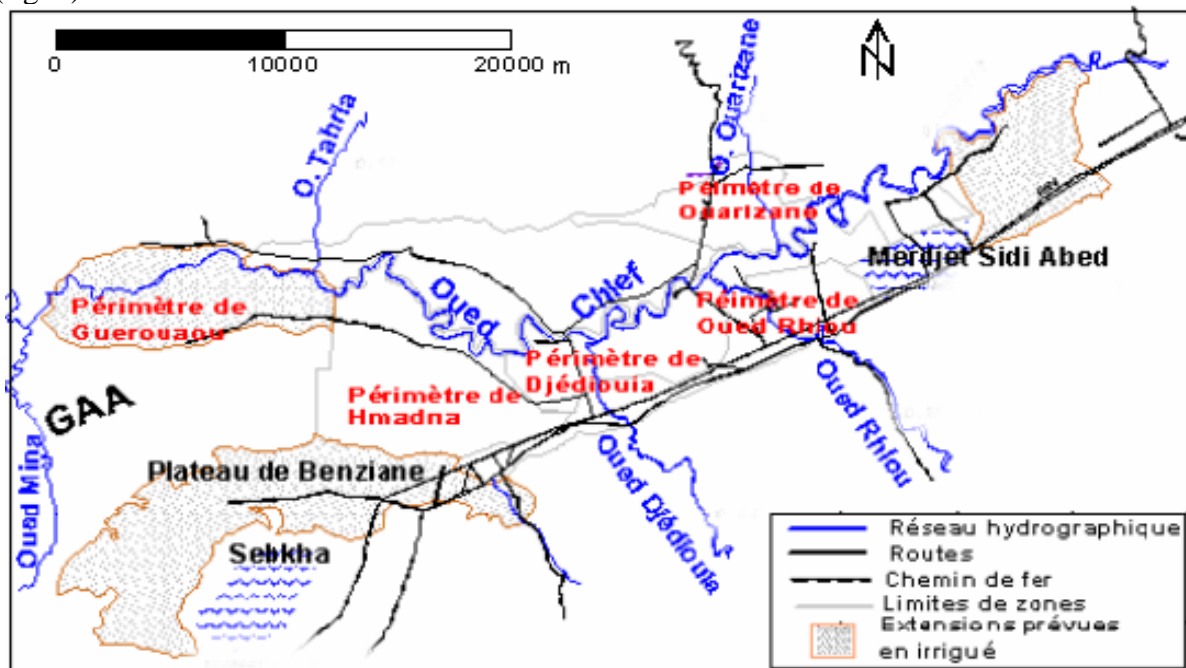


Figure 9: Les principaux périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chéiff (Douaoui, 2005).

1. 10. Etudes précédentes sur la plaine du Bas-Chéiff

La plaine du Bas-Cheliff a fait l'objet des nombreuses études au cours des dernières années, on trouve même des études datant de l'époque coloniale : citant a titre d'exemple:

- L'étude de Boulaine (1953-1957), concernant les plaines de Cheliff, a étudiée les caractéristiques des sols et établie cinq cartes de sols à l'échelle de 1/50000.
- Et les travaux de Douaoui (1997 - 2007) et qui se poursuivent sur l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la salinité et la dégradation du milieu physique.

Chapitre II :

Aperçu bibliographique

CHAP. II. Aperçu bibliographique

2.1. Télédétection

2.1.1. Définition de la télédétection

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Journal Officiel du 11 décembre 1980 in C.S.F.D, 2002). Elle 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. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phytomasse, matière organique du sol,...), etc. (Soudani, 2005). Donc, La télédétection constitue le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux ; une source d'énergie, une cible et un capteur, et consiste à mesurer un signal électromagnétique émis ou réfléchi par une cible. (Corbane, 2006).

2.1.2. Processus de télédétection

Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes suivantes (Fig.10):

- 2.1.2. 1. Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
- 2.1.2. 2. Rayonnement et atmosphère (B)** - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère.
- 2.1.2. 3. Interaction avec la cible (C)** - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci.
- 2.1.2. 4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
- 2.1.2. 5. Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images.
- 2.1.2. 6. Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- 2.1.2. 7. Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

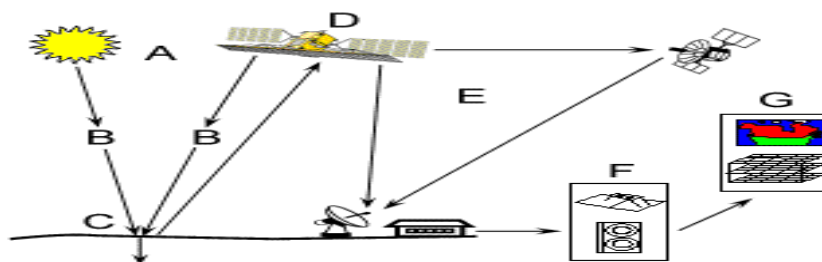


Figure 10. Processus de télédétection (C.C.T, 1999)

2.1.3. Le rayonnement électromagnétique

La télédétection utilise le rayonnement électromagnétique comme source d'enregistrements à distance. Ce rayonnement correspond à des ondes électromagnétiques transportant de l'énergie qui est plus ou moins absorbée par les différents milieux. Le rayonnement électromagnétique est caractérisé par sa longueur d'onde et sa fréquence.

Le spectre électromagnétique présente toutes les gammes d'ondes depuis les plus petites longueurs d'ondes (fréquence très élevée) jusqu'aux plus grandes (fréquence très basse).

La télédétection utilise une partie du spectre électromagnétique présenté par les gammes de longueurs d'ondes données par le (Tab.2).

Tableau .2-Gammes du spectre électromagnétique utilisées en télédétection

Domaine spectral	Longueurs d'onde	Origine
Ultraviolet	- 0.90 nm-0.38 nm	Rayonnement réfléchi par la surface terrestre
Le visible	- Violet : 0.400 - 0.446 μm - Bleu : 0.446 - 0.500 μm - Vert : 0.500 - 0.578 μm - Jaune : 0.578 - 0.592 μm - Orange: 0.592 - 0.620 μm - Rouge : 0.620 - 0.700 μm	Rayonnement réfléchi par la surface terrestre
L'infrarouge	- Proche : 0.800 - 1.500 μm - Moyen réflectif 1.600 – 2.2 μm - Moyen 3 – 5 μm - Moyen thermique 8 – 14 μm	Rayonnement émises par la surface terrestre
Les hyperfréquences	- 0.750 - 136 cm	Emises par une antenne et renvoyées par la surface terrestre en mode actif, et émises par la surface terrestre en mode passif.

2.1.4. Interaction rayonnement matière et rayonnement atmosphère

La télédétection utilise les propriétés physiques des objets observés, en particulier leurs propriétés optiques d'émission et/ou de réflexion des rayonnements électromagnétiques. Ces rayonnements ont la particularité de se propager dans le vide sans atténuation mais sont plus ou moins absorbés dans différents milieux (Girard & Girard, 1999). Tout rayonnement affectant une matière donnée est absorbé, réfléchi ou transmis par celle-ci de façon à répondre à la relation:

$$A + T + R = 1.$$

A = Absorption, T =Transmission, R = Réflexion.

C'est sur la base des propriétés d'absorption, de réflexion et d'émission des rayonnements par les différents objets ou cibles que sont définies les règles de la télédétection.

2.1.5. Systèmes Vecteurs - Capteurs

2.1.5.1. Les vecteurs

Un vecteur correspond à tout objet se déplaçant et susceptible de porter un capteur. On peut donc définir divers types de vecteurs :

- Ceux qui opèrent à quelques mètres du sol : grue ou véhicules qui supportent des radiomètres ou appareils photographiques.
- Ceux qui opèrent entre la dizaine de mètres et la dizaine de kilomètres; avions, hélicoptères et ballons.
- Ceux qui opèrent entre la dizaine et la centaine de kilomètres; les ballons stratosphériques;
- Ceux qui opèrent entre 200 et 40 000 km, ce sont les satellites soumis à l'attraction terrestre, qu'ils soient habités ou non. Ces derniers sont les plus courants pour l'observation de la terre (Girard & Girard, 1999).

2.1.5.2. Les capteurs

Ils sont représentés par des instruments permettant de mesurer, dans une longueur d'onde donnée, un signal électromagnétique délivré par une portion d'un territoire visé et le transformer sous forme mémorisable.

On distingue classiquement deux types de capteurs:

Les capteurs actifs envoient une énergie et recueillent la fraction que les objets renvoient ;(radar, lidar, laser, fluoromètre, etc.)

Les capteurs passifs reçoivent l'énergie que les objets émettent ou réfléchissent (radiomètre, cameras, spectroradiomètres, etc.), l'émetteur principale étant le plus souvent le soleil.

Chaque capteur est constitué d'un nombre de bandes spectrales et d'une résolution spectrale comme le montre le tableau 2.

2.1.5.2.1 Les caractéristiques d'un capteur

Les principales caractéristiques d'un capteur sont (Benzineh, 2002., Soudani, 2005);

2.1.5.2. 1.1. Résolution Spectrale

Elle correspond aux bandes de longueurs d'onde auxquelles les capteurs sont sensibles.

2.1.5.2. 1.2. Résolution Spatiale

Correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur satellitaire. Cette surface correspond au pixel (Picture element). Par exemple, cette résolution est 20 m * 20 m pour le satellite SPOT, 30 m * 30 m pour le satellite Landsat Thematic Mapper, 1000 m * 1000 m pour NOAA AVHRR, etc.

2.1.5.2. 1.3. Résolution radiométrique

Elle correspond à la capacité d'un système d'acquisition à distinguer entre deux niveaux d'énergie voisins. Le rayonnement réfléchi par les cibles au sol et enregistré par le capteur est codé en format numérique binaire et l'image résultante est en niveaux de gris. Pour un codage en 8 bits, le niveau de gris correspondant au rayonnement réfléchi varie entre 0 et 255 (soit 256 niveaux de gris). En 16 bits, le niveau de gris varie entre 0 et 65535. Deux niveaux de rayonnement voisins peuvent être confondus lorsque le codage est sur 8 bits alors qu'il n'est plus pour un codage sur 16 bits.

Tableau 3- Principales caractéristiques des couples capteurs vecteurs utilisés en télédétection spatiale terrestre (Hourizi, 2004)

Type d'Orbite	Satellite	Altitude de vol	Répétitivité	Type de capteurs	Bandes spectrales (µm)	Résolution au sol	Dimension de la scène (km)	Objectif
Géostationnaire	MÉTÉOSAT	35 800	25 mn	VIS, VDT, MIRT	0.4-1.1 5.7-7.1 10.5-12.5	2.5 km × 2.5 km 5 km × 5 km	Le globe terrestre sauf les pôles	Météorologie
	GEOS		17.5mn		Visible et Infrarouge thermique	1 km × 1 km	Portion du globe	
Circulaire	NOAA	850	12h (2f/j)	AVHRR	0.58-0.68 0.72-1.1 3.55-3.93 10.3-11.3 11.5-12.5	1.1 OU 4 km	2400	
Subpolaire Héliosynchrone	LANDSAT (Land Satellite)	705	16J	MSS	0.5-0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-0.1	56 × 79 km	185	Ressources terrestres
				TM	0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90 1.55-1.75 2.0-2.35	30 × 30 m		
				ETM+	10.4-12.5	120 × 120 m		
	JERS-1	570	44j	OPS	0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.86 1.59-1.70 2.0-2.1 2.1-2.2 2.2-2.3	18 × 18 m	75	
	SPOT	830	26j ou 1-6j	HRV	0.50-0.59 0.61-0.68 0.79-0.89 Panchromatique : 0.51-0.73	20 × 20 m 10m × 10 m	60	
	EarlyBird	470	2-5j		0.49-0.60 0.615-0.670 0.79-0.875 Panchromatique0.44 5-0.65	3 m × 3 m 15 m × 15m	3	

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer.

ROS: Radar à Ouverture Synthétique

2.1.5.2. 1.4. Résolution temporelle ou répétitivité

Correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. Notons que le satellite SPOT offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d'assurer une excellente résolution temporelle. Sans manœuvre, la résolution temporelle de SPOT est de 26 jours, 16 jours pour LANDSAT TM et 14.5 jours pour NOAA-AVHRR.

2.2. Les traitements des données de télédétection

2.2.1. L'analyse et l'interprétation visuelle de l'image

L'interprétation et l'analyse visuelles datent du tout début de la télédétection avec l'interprétation de photos aériennes. Actuellement, l'interprétation la plus efficace des images satellitaires associe l'utilisation des méthodes assistées par ordinateur et l'analyse visuelle (Girard, 1995).

Les images de télédétection peuvent être représentées sous forme d'une matrice de pixels, où chaque pixel correspondant à un nombre, représentant le niveau d'intensité du pixel. Il est possible pour tirer le maximum d'information de ces images, de les agrandir de telle sorte que la résolution de l'image corresponde à la résolution de l'œil.

L'interprétation est facilitée par le choix des couleurs établis en fonction des objets représentés. On dégage ainsi plus facilement les grandes organisations spatiales qui se perçoivent par des associations de couleurs. Il n'en n'est pas de même pour une autre palette de couleurs. Ainsi si l'on distribue les couleurs au hasard, l'organisation n'est plus du tous facile à interpréter.

L'interprétation peut se faire directement sur l'écran quand on dispose d'un système informatique de traitement des images. Les limites des plages cartographiques sont alors dessinées directement sur écran.

On peut augmenter ou diminuer le nombre de groupes selon le but de classification (Girard & Girard, 1999).

2.2.2. Notion de classe

La définition d'une classe repose sur le principe qu'a une signature spectrale donnée correspond un objet bien identifiable et inversement. (Laine, 1990).

Un pixel peut être caractérisé à partir de plusieurs paramètres de mesure comme par exemple les mesures spectrales du rayonnement électromagnétique (luminance, réflectance, température, coefficient de rétrodiffusion,...).

Il peut également s'agir de mesures temporelles ou ayant un lien avec la forme des objets, en fait cela comprend toutes les variables mesurables qui peuvent apporter une information quant à la nature de l'objet observé (pixel). Un pixel peut donc être défini à partir d'un ensemble de n composantes image auxquelles on associe les paramètres de mesures. Cet espace à n dimensions, parfois appelé espace spectral, est donc occupé par l'ensemble des vecteurs possibles formés des valeurs des n paramètres d'observation (Bonn et Rochon., 1992).

On appelle signature d'objet, d'une classe ou d'un pixel, la série de combinaisons singulières de valeurs de chacun des paramètres de mesure. En télédétection, les paramètres de mesure qui sont le plus souvent utilisés, sont les mesures spectrales dans les différents canaux, on parle alors de signatures spectrales.

Obtenir des classes de signatures consiste à découper l'espace spectral en sous-espaces en essayant de satisfaire deux hypothèses de base :

- 1- les pixels d'une même classe ont une signature proche ;
- 2- les différentes classes sont parfaitement distinctes les une des autres. Dans la réalité, ces deux hypothèses ne se rencontrent que très rarement. En effet, il existe des chevauchements entre les signatures qui rendent difficile la mise en place de limites de ces classes dans l'espace spectral (notion de confusion).

Etablir des classes revient donc, à diviser l'espace à n dimensions en minimisant autant que possible la confusion entre les classes. Ce découpage par classe s'appelle la segmentation et il s'effectue grâce à une règle de décision. (Gay, 1999).

2.2.3. Méthodes de classification

La classification d'une image satellitale est une transformation quantitative en image thématique. Elle consiste à rassembler les pixels de l'image en polygones pour les regrouper dans les mêmes classes correspondantes. Le principe de la classification se fait selon une règle de discrimination basée sur la différence statistique entre les valeurs numériques des pixels dans le but de réaliser le découpage optimal. (Deshayes et Maurel, 1990).

La classification d'images satellitaires a pour objectif de produire des images thématiques, c'est à dire des images dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels.

Le même pixel sera alors caractérisé par plusieurs valeurs radiométriques selon le nombre de canaux utilisés (longueurs d'onde considérées) et le nombre de dates auxquelles la mesure du pixel a été enregistrée.

Quelle que soit la méthode de classification choisie, le processus comporte trois étapes:

- 1) l'établissement des classes de signatures ;
- 2) la classification des pixels en fonction de ces signatures ;
- 3) la vérification des résultats.

L'établissement des classes de signatures peut se faire à partir de deux situations initiales distinctes:

2.2.3.1. Classification non supervisée

Dans un premier cas, aucune information préliminaire sur les signatures des objets à classer n'est communiquée à l'ordinateur qui doit alors rechercher, par association entre les pixels, les signatures les plus communes dans la scène : on dit alors que la classification est **non dirigée** (Gay, 1999).

La classification non dirigée est une classification de données d'image numérique, par traitement informatique uniquement basé sur les statistiques d'image sans recours à des échantillons d'entraînement.

Le traitement regroupe alors les pixels radiométriques semblables en un nombre de classes fixé au départ, un regroupement naturel des pixels de l'image que l'on nomme "regroupement spectral" ou "classe". Le thématicien intervient ensuite pour donner un nom à chacune des classes obtenues, ce qui n'est pas toujours facile (Deshayes et Maurel, 1990).

2.2.3.2. Classification supervisée

Dans le deuxième cas, on possède des connaissances a priori sur la nature des objets contenus dans l'image et il suffit alors de communiquer ces informations à l'ordinateur pour son apprentissage : on dit alors que la classification est **dirigée** (Gay, 1999).

La classification dirigée est une procédure utilisée pour l'identification de zones « spectralement similaires » d'une image. On identifie d'abord des sites d'entraînement dont on extrait la signature spectrale et à partir desquels on extrapole pour le reste de l'image.

La classification dirigée est basée sur une connaissance a priori de la position et de la nature d'un thème quelconque de l'image. Cette connaissance peut être acquise par travail de terrain, photographie aérienne ou par toute autre source d'information indépendante. Les sites d'entraînement (généralement de petites surfaces isolées par rapport à l'image entière), sont utilisés pour « entraîner » l'algorithme de classification à reconnaître les différents thèmes en fonction de leur signature spectrale telle que définie sur l'image.

Pour un thème en particulier, les sites d'entraînement doivent être représentatifs de toute la variabilité du thème observée sur l'image. Des variables environnementales, telles que le type de sol, la teneur en humidité et la santé de la végétation, peuvent modifier la signature spectrale d'un thème et de ce fait, affecter la précision de la carte classifiée résultante.

Tableau 4. Avantages et inconvénients de différentes méthodes de classification

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Classifications non assistées	Utiles pour réaliser une première segmentation des images en grands thèmes d'occupation du sol. Cette segmentation pourra être utilisée pour réaliser un masquage des thèmes non concernés par l'étude	Le regroupement des valeurs de comptes numériques crée des classes dont la signification thématique est parfois difficile à identifier
Classifications assistées	Les classes obtenues ont une signification thématique précise	Le temps de réalisation est long, en particulier pour le choix et la délimitation des zones d'apprentissage

2.2.3.1.1. Détermination d'algorithmes de classification

Méthode extrêmement simple qui consiste à calculer, dans l'espace spectral, la distance entre chaque pixel de l'image et les centres de regroupement préalablement déterminés (moyennes des classes spectrales calculées à partir des sites d'entraînement).

2.2.3.1.1.1. Méthode de maximum de vraisemblance

La méthode de maximum de vraisemblance est un critère de décision statistique fondé sur le calcul de la vraisemblance et servant à classer des éléments d'image dans des classes spectrales. La classification par maximums de vraisemblances est une méthode tout à fait satisfaisante mathématiquement car les pixels sont classés à partir d'une probabilité ce qui est tout à fait souhaitable en télédétection (Girard, 1999).

2.2.3.1.1.2. Méthode de distance minimale aux moyens

Cette méthode est la plus simple des méthodes de classification. elle détermine la "distance" entre chaque pixel et la moyenne de chaque classe. La méthode assigne à ce pixel la valeur de la classe la plus proche.

Si le pixel est situé plus loin qu'une distance déterminée par l'analyste, les pixels restent "non-classifiés". Donc, la méthode est moins précise que celle de classification par maximum de vraisemblance gaussienne puisqu'elle ne tient pas compte de la variance de chaque classe. En raison de sa simplicité mathématique, il est cependant le plus rapide parmi les algorithmes les plus utilisés (C.C.T, 1999).

2.2.4. L'histogramme bidimensionnel

L'histogramme bidimensionnel est un plan défini par deux axes perpendiculaires. Généralement, ce diagramme est obtenu par l'intersection du canal rouge (675 nm) et le canal proche infra rouge, sur lequel sont placés tous les pixels d'une image satellitale. Pour chaque point du plan repéré par des coordonnées sur les deux canaux.

Il est intéressant d'analyser les formes des divers histogrammes bidimensionnels. En effet, il est possible d'identifier ainsi les diverses relations qui existent entre les canaux. Dans un grand nombre de situations, il y a une assez forte corrélation entre les canaux successifs mais ce n'est pas toujours le cas, en particulier entre les bandes du visible, et celle du proche infrarouge (Girard, 1999).

2.2.5. Evaluation des résultats de la classification

La dernière étape d'une classification d'image consiste à valider ou pas la classification en évaluant sa pertinence (vérification a posteriori). Pour cela on peut consulter le taux de pixels bien classés dans une matrice de confusion et estimer la qualité de la précision de la classification par le test *Kappa*.

2.2.5.1. La matrice de confusion

La matrice de confusion se présente sous forme d'un tableau à double entrée. Une des entrées correspond aux pixels affectés aux classes d'après notre connaissance du terrain (en ligne) tandis que l'autre représente les pixels attribués aux classes après la procédure de classification (en colonne). Et en diagonale les nombres de pixels correctement classifiés.

Cette matrice permet de calculer:

La précision totale: nombre de pixels bien classés divisé par le nombre total d'individus.

L'erreur d'excédents : pourcentage de pixel d'une classe issue de la classification qu'il appartiennent, en fait à d'autres classes dans les données de références.

La précision pour l'utilisateur: pourcentage de pixels d'une classe issue de la classification correspondante à la même classe dans les données de références, elle est égale à "100 %-erreur d'excédents".

L'erreur de déficits: pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à d'autres classe de classification.

La précision pour le réalisateur : pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à la même classe, par la classification, elle est égale à "100 %-erreur de déficits" (Douaoui, 2005).

2.2.5.2. Le test de Kappa

Un des tests fréquemment utilisé est celui de Kappa qui est une technique d'analyse multivariée pour estimer la valeur d'une matrice de confusion (Gay, 1999). La formule du calcul du test de Kappa est la suivante :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} + x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} + x_{+i})}$$

Où :

r est le nombre de colonne de la matrice

x_{ii} est le nombre d'observations dans la colonne i et la ligne i

x_{i+} et x_{+i} sont les totaux marginaux de la ligne i et de la colonne i

N est le nombre total d'observations

Le coefficient *Kappa* est un estimateur de qualité qui tien compte des erreurs en lignes et en colonnes. Il varie de 0 à 1. C'est une estimation de la précision de la classification.

Il exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification complètement au hasard, une valeur de 0,75 par exemple, signifie que la classification qui vient d'être réalisée évite 75% des erreurs obtenues par une procédure qui travaille complètement au hasard (Douaoui, 2005). Le coefficient de Kappa peut aussi être utilisé pour comparer entre différentes matrices afin de montrer si un résultat est significativement meilleur qu'un autre (Gay, 1999).

2.3. Les états de surface

2.3.1. Définition des EDS

Cette notion a été proposée en 1978 par Aubert et Girard et développée par Escadafal en 1981 puis 1989 sous le terme "états de surface du sol", elle reprenait dans un cadre plus vaste les connaissances sur les travaux culturaux, les croûtes de battance, les croûtes et les efflorescences salines, etc.

Un état de surface de sol est défini par "la composition et l'organisation de la surface du sol a un instant donné" (Escadafal, 1989), de fait que la caractérisation de la surface des sols par observation sur le terrain est limitée dans le temps et dans l'espace. C'est aussi le volume qui fait la transition entre l'atmosphère et la pédosphère ; c'est en quelque sorte le premier horizon ou l'horizon zéro de la couverture pédologique.

Escadafal, 1989 le caractérise avec les paramètres suivants : couleur, texture, effervescences, éléments grossiers du sol, matière organiques animales et végétales et leurs recouvrements; recouvrement aussi des algues , mousses et autres végétaux : organisations superficielles battances, croûtes, efflorescences, pores et fentes, microreliefs. Etc.

En effet, Un état de surface est un ensemble complexe constitués de divers éléments du sol qui sont exposés aux soleil ou à l'ombre et plus au moins couverts par la végétation (Girard & Girard, 1999).

2.3.2. Historique de la télédétection des EDS

Rares sont les travaux qui se sont penchés sur le problème de la télédétection de l'EDS en tant qu'objet constitué par un assemblage de différentes composantes.

Parmi ces travaux on peut citer ; Courault (1989) a été un des premiers auteurs à se servir de l'information de télédétection dans le domaine réflectif pour caractériser différents EDS. Mais la validité de cette approche reste limitée, car seules les variabilités en terme de

rugosité de surface et de types de croûtes (structurale et sédimentaire) ont été considérées dans des conditions d'éclairage bien déterminées.

A la même époque, Escadafal, 1989, réussit à mettre en relation la composition et la réorganisation de la surface du sol avec la réflectance en modélisant l'influence de la couleur et de la rugosité. Son approche, développée dans le cadre d'un milieu aride, permet de distinguer de grands ensembles d'EDS qui se différencient par leur dominante minéralogique et leur rugosité.

Entre 1993 et 2000, Puech par ces travaux dans le Sahel, arrive à identifier des classes d'EDS par télédétection.

D'autres travaux mais dans la reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Notamment, ceux de Wassenaar, 2001 et Corbane, 2006.

Dans la plaine du Bas-Chélif, Douaoui (2005) a utilisé la télédétection pour caractériser les différents états de surface et tout particulièrement la salinité qui a été considérée comme un des principaux objets ou éléments de surface.

La quantité et la diversité des travaux qui ont été réalisés témoignent de l'insuffisance des travaux de télédétection des EDS. Or, l'exhaustivité, la répétitivité et la couverture spatiale font de la télédétection l'outil privilégié pour effectuer la surveillance de l'évolution des composantes des EDS. Les capteurs satellitaires et aéroportés fournissent aujourd'hui des informations, d'une grande précision. Ces informations ont l'avantage d'être spatialisées et d'offrir une couverture spatio-temporelle plus satisfaisante que des observations ponctuelles au sol (Corbane, 2006).

2.3.3. Télédétection des composantes des EDS

2.3.3.1. Notion de signature spectrale en télédétection

Lorsque l'on étudie l'évolution des réflectances des cibles selon différentes valeurs de longueurs d'onde, on peut observer que chaque cible à un moment donné, dans une position géographique donnée, vu sous un angle donné et recevant un rayonnement donné présente un comportement spectral qui lui est propre. C'est à partir de cette spécificité de comportement des cibles à différentes longueurs d'ondes que l'on peut établir la notion de signature spectrale (Gay, 1999). Selon Girard et Girard (1999), ce terme est inapproprié car une signature laisse supposer qu'elle est constante, or le comportement spectral varie suivant le temps, le lieu, le mode de saisie de l'information et du rayonnement incident.

2.3.3.2. Comportement spectral des composantes des EDS

Le comportement spectral des objets est une voie privilégiée pour analyser et interpréter les images de télédétection (Girard et Girard, 1999). Les objets pouvant être traités par télédétection sont divers :

2.3.3.2.1. Le sol

La télédétection passive ne peut donner que des informations sur la partie la plus superficielle du sol. Les principaux facteurs élémentaires du comportement spectral des sols sont : la couleur, la rugosité (type de surface: battant, croûtes, efflorescences, éléments grossiers, texture- structure, ombre), le calcaire, la matière organique, le fer, l'humidité, la composition chimique (Girard & Girard, 1999).

2.3.3.2.1.1. La couleur

La couleur des sols est mesurée sur le terrain en référence au code Munsell, qui est très utilisé en pédologie aussi bien pour la caractérisation d'un sol que pour sa cartographie ou dans l'étude de la pédogenèse.

La couleur des sols est liée à la teinte (hue) allant du rouge(r) au jaune (y), à la clarté (value) qui va de 0 à 8, et à la pureté (chroma) variante de 0 à 8.

En télédétection la couleur du sol influe sur la réponse spectrale. On peut relier la couleur du code Munsell pour les sols à leur réflectance et aux valeurs des comptes numériques des images satellitales. Et de même, on a la possibilité de dresser ou construire des cartes de la couleur des sols quand on dispose d'une image satellitale prise à une époque ou les sols nus apparaissent. (Girard & Girard, 1999).

2.3.3.2.1.2. L'humidité

L'humidité de surface est une caractéristique importante des EDS grâce au rôle qu'elle joue en faveur de l'infiltration. De surcroît, elle est susceptible d'influencer l'observation par télédétection. Beck et al ,1976 ont trouvé que l'humidité du sol est le facteur qui affecte le plus les propriétés de réflexion du sol (Corbane, 2006).

L'humidité détectée ne correspond qu'à l'humidité de surface exclusivement. Lorsque l'humidité augmente, la couleur s'assombrit et la réflectance devient très faible pour toutes les longueurs d'ondes (Girard & Girard, 1999).

En règle générale, la réflectance est inversement proportionnelle à l'humidité. Les domaines spectraux des hyperfréquences et de l'infrarouge thermique sont souvent utilisés pour caractériser l'état hydrique d'un sol (Bonn, 1996).

2.3.3.2.1.3. La matière organique

Au vue de sa couleur sombre, la matière organique aura la propriété d'absorber le rayonnement donc de diminuer la réflectance. En général, la courbe de réflectance de la matière organique est concave, mais son effet ne devient apparent qu'à partir de 1,5 % (Girard & Girard, 1999).

2.3.3.2.1.4. La matière minérale

Contrairement à la matière organique, certains minéraux clairs (calcaire, gypse, sable, éléments grossiers) augmentent la réflectance de la courbe qui devient convexe. Les argiles qui ont souvent une faible clarté montrent une plus faible réflectance (Douaoui, 2005).

2.3.3.2.1.5. La rugosité

La rugosité de la surface du sol dépend d'une part, des facteurs intrinsèques au sol comme (les efflorescences salines, les croûtes ferrugineuses, les fentes et les mouvements du sol, la structure, la porosité, et les croûtes de battance) et d'autre part, des facteurs extrinsèques au sol tel que (la microtopographie, et les travaux cultureux). La rugosité des EDS est donc un état non permanent dans la plus part des cas.

Concernant la rugosité, il faut faire liaison avec la hauteur du soleil sur l'horizon, donc avec la saison, l'heur de prise de vues, et la latitude de la zone étudiée.

En général, La rugosité est mise en valeur principalement par les ombres portés par les éléments grossiers (liées aux microreliefs provoqués par les sables, graviers, caillou ou blocs).

2.3.3.2.2. L'eau

Pour l'eau, les données de télédétection peuvent être fournies soit sous forme d'information directe (eau de surface) soit sous forme indirecte par la caractérisation des paramètres qui lui sont liés (Douaoui, 2005)

De fait que les surfaces en eau absorbent la quasi-totalité du rayonnement qu'elles reçoivent, la réflectance est faible dans les longueur d'onde du bleu/vert, très faible dans le rouge et le proche infrarouge (Gay, 1999).

Le comportement spectral de l'eau est en fonction des molécules d'eau mais aussi des constituants dissous ou en suspension (particules, algues, matière organique...), ainsi que de l'état de rugosité de sa surface (Girard & Girard, 1999). Les irrégularités de la surface de l'eau, la concentration en sédiments, en algues affectent fortement les propriétés optiques de l'eau. Par exemple, la matière en suspension fait augmenter la réflectance de l'eau dans l'orange-rouge. La présence de la matière chlorophyllienne fait augmenter la réflectance de l'eau dans le vert. Ces différents facteurs sont à l'origine des fortes variations de la couleur de l'eau (Soudani, 2005).

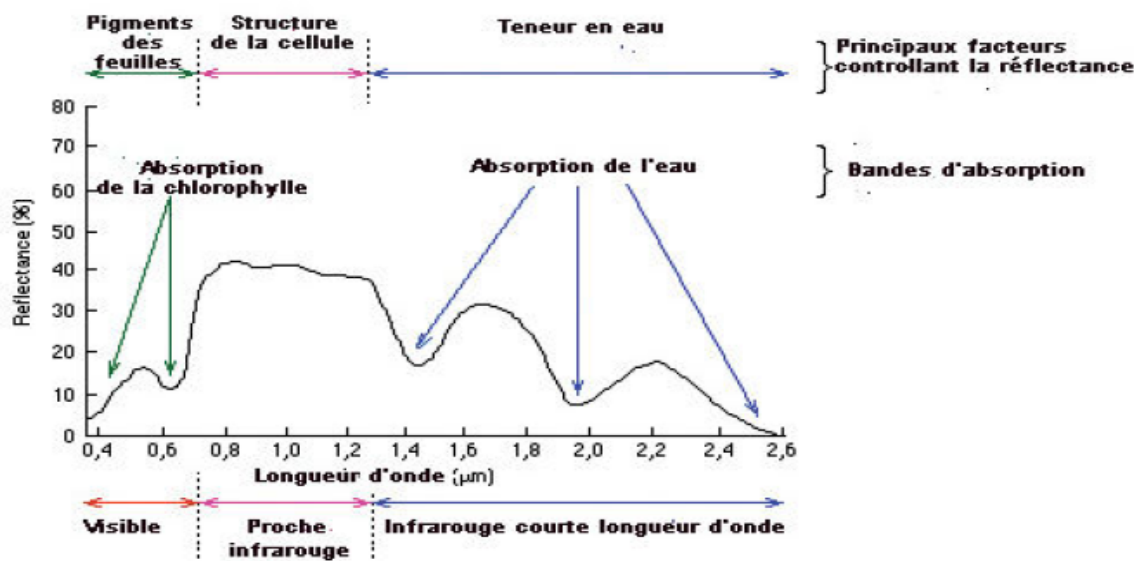
2.3.3.2.3. Géologie et géomorphologie

Le couplage de données de télédétection aux MNT dans l'interprétation morphologique et structurale des milieux étudiés concerne en particuliers les pendages, l'épaisseur des couches et les déplacements horizontaux et verticaux. Son intérêt réside dans le fait que l'image satellitaire permet d'avoir une information sur une vaste étendue, dans des conditions homogènes de façons synchrone répandant ainsi aux conditions de ces disciplines. La majorité des matériaux géologiques produisent leur maximum de réflectance au tour 1,6 μm (Hunt et Ashley, 1979).

2.3.3.2.4. La végétation

La présence des pigments chlorophylliens est responsable, en grande partie, de la forme très particulière de la signature spectrale des végétaux (Gay, 1999). Toutefois, le comportement spectral dépend de la nature de l'espèce, du stade de développement, du taux de recouvrement et de l'état du peuplement (Douaoui, 2005).

Les facteurs influençant la réflectivité de la végétation peuvent être classés en quatre groupes (Girard & Girard, 1989): Structure de la feuille (structure interne, surface de la feuille, contenu en eau, chlorophylle), Géométrie de la feuille (orientation, inclinaison), Assemblage des feuilles (recouvrement, disposition,...), et structure canopée (lisse, rugueuse, ouverte, fermée, ...) (Fig.11).



2.3.3.2.4.1. Les indices de végétation

Les indices de végétation constituent une approche empirique pour identifier et suivre l'évolution temporelle des couverts végétaux. Ils sont calculés à partir des mesures de réflectance sur le terrain ou de comptes numériques fournis par les données satellitaires, afin d'évaluer l'indice foliaire, le développement de la végétation, les effets de stress, l'évaporation de la végétation, et certains paramètres du couvert comme la biomasse aérienne chlorophyllienne. Ce qui a donné lieu à l'élaboration de diverses formules avec des coefficients de pondération (Girard & Girard, 1999).

La complexité structurale des couverts et la multitude des facteurs externes perturbateurs (géométrie de visée et élévation solaire, effets atmosphériques et propriétés optiques du sol) sont à l'origine de la multiplicité des indices. Ils sont classés en deux catégories (Baret & Guyot, 1991; Douaoui, et al, 2006):

1- Indices caractérisés par une pente : RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), etc.

2- Indices caractérisés par une distance : WDVI (Weighted Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index).

L'indice le plus utilisé reste incontestablement le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974) pour la bonne corrélation qu'il présente avec la densité de la végétation au sol. Ainsi en phase de développement d'un couvert, la biomasse et les quantités de pigments augmentent, ce qui entraîne une hausse dans le proche infrarouge et une baisse dans le rouge. L'inverse se produit en fin de cycle végétatif (Deshayes et maurel, 1990). D'autres indices plus performants ont été développés pour le suivi des surfaces végétalisées dans les domaines du visible et du proche infrarouge.

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \text{ dont les valeurs varient entre } -1 \text{ et } +1$$

(NDVI: Normalized Difference Vegetation Index)

2.3.3.2.5. La salinité

En fonction de la présence de sels en surface, on distingue deux sortes d'effets ; directs et indirects. Des effets directs sur la réflectance des croûtes ou des efflorescences salines, et des effets indirects sur la structure (pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes. (Mougenot, 1993 ; Douaoui et al., 2006).

Les effets des sels se combinent à ceux des autres composants du sol et de sa rugosité. L'effet du constituant sel sur la réflectance sera présenté dans les longueurs d'onde du visible au moyen infrarouge (400-2500 nm). Les absorptions dues aux sels sous forme de chlorures, sulfates, borates et carbonates, s'ajoutent à celles des autres constituants comme le fer, l'eau, la matière organique ou les argiles (Mougenot, 1993).

La réponse spectrale peut être très variable d'un point à l'autre suite à la mobilité des sels à la surface du sol qui est sous l'influence directe de la circulation de l'eau et de la microtopographie (Douaoui, 2005).

Certains états de surface ont une réflectance aussi élevée que celles des sols salés par leur influence sur la rugosité et la couleur à la surface du sol. C'est le cas, par exemple, des sols érodés ou la présence d'une croûte de surface sédimentaire qui risque d'être confondues avec les sols à salinité élevée (Douaoui et al., 2006). Il y a une confusion de la réponse spectrale entre la croûte de sel et les croûtes de surface des sols limoneux dans les bandes bleue et verte (De jong,

1992 ; Goldshleger et al., 2001). Comme autres confusions, on peut citer celles de la végétation halophyte qui apparaissent entre les effets du stress salin et du stress hydrique. Pour cela, les contrôles sur le terrain demeurent nécessaires. (Mougenot, 1993).

D'une façon générale, la réponse spectrale augmente avec la quantité de sel présente à la surface de sol. La présence des sels montre une réflectance élevée dans le visible et le proche infrarouge dans les sols salés que dans les sols qui ne le sont pas (Douaoui, 2005). Cette détection devient moins évidente en présence d'humidité, d'oxyde de fer et d'inclusion argileuses (Mougenot, 1993). Dans la plaine du Bas-Chéliff, la télédétection de la salinité devient directe à partir d'une CE égale à 10 dS/m en pâte saturée sur un sol nu (Douaoui, 2005).

2.3.4. Synthèse sur la télédétection des éléments de surface

De la description des principales propriétés spectrales des composantes des EDS, on s'aperçoit que pour chaque type de composante, il existe un domaine spectral privilégié permettant sa reconnaissance (Corbane, 2006).

Le domaine des micro-ondes semble être adapté à l'analyse de l'encroûtement de surface ainsi qu'à l'estimation de la rugosité et de l'humidité du sol sous certaines conditions : configurations optimales du radar et caractéristiques de la surface (i.e. absence ou faible couverture végétale). Le PIR est adapté à la caractérisation des résidus de culture et des surfaces encroûtées et de la végétation verte. Une information sur l'humidité du sol et sur les cailloux est également accessible grâce à l'infrarouge thermique (IRT).

L'hyperspectral donne accès à une information sur l'état de dégradation de la surface du sol et permet d'identifier les croûtes.

Finalement, le domaine du visible est utile pour l'étude de la végétation ainsi que pour l'analyse de l'encroûtement des sols, du microrelief de l'humidité et des cailloux grâce à l'albédo. Sachant que l'EDS est constitué par un assemblage des différentes composantes, il est donc difficile de privilégier un domaine spectral pour l'identification des EDS sans tenir compte d'autres paramètres liés aux capteurs de télédétection.

Toutes ces considérations, qui répondent souvent à nos exigences font que la télédétection est en passe de devenir un outil courant dans la connaissance, l'identification et la quantification des différents constituants des états de surface (Douaoui, 2005).

Chapitre III :

Matériels et méthodes

CHAP. III. Matériels et méthodes

3.1. Démarche générale

Il s'agit de caractériser, à partir de l'image satellitale, les états de surface, considérés comme éléments de diagnostic de la dégradation des milieux (Jauffret, 2001).

La méthodologie suivie dans ce travail est mise aux point afin de décrire les états de surface et évaluer leur dégradation. La figure 16 récapitule les grandes étapes de la démarche générale d'analyse des données de terrain et de l'image satellitale pour la caractérisation des états de surfaces et de la dégradation par télédétection. Cinq étapes principales peuvent être distinguées :

- La première étape, la collecte des données, il s'agit des données utilisées; les données quantitatives et qualitatives issues des mesures écologiques (des éléments de surface) in situ, le prélèvement des échantillons, les données cartographiques, et les données extraites de l'image satellitale utilisée.
- L'application a l'image - La deuxième phase consiste donc à identifier à partir de l'image satellitale Aster prise en août 2005 les états de surface présents, en se basant sur ;
 - Le choix de la meilleure trichromie;
 - le choix des zones tests;
 - la classification supervisée;
 - la pertinence de la classification (calcul du kappa et de la matrice de confusion);
 - Les diagrammes bidimensionnels;
 - les signatures spectrales par les méthodes qui semblent les mieux adaptées ;
 - ...etc.
- L'analyse des données terrain - La troisième étape consiste à l'analyser grâce a une approche empirique basée sur le filtrage des données quantitatives et qualitatives issues des mesures des éléments de surface in situ et de leur codification en différentes classes pour chaque élément de surface.
- La quatrième étape consiste à confronter les données des mesures de réflectances au sol (image) aux données quantitatives et qualitatives issues des mesures écologiques (des éléments de surface) in situ. Cette confrontation "vérité-terrain"- "image" permettra de tester l'intérêt et la pertinence des méthodes d'interprétation utilisées ; cela implique ;
 - Une confrontation des signatures spectrales des éléments de surfaces mesurées in situ, par les méthodes qui semblent les mieux adaptées avec les données obtenues par classe de télédétection.
 - Une confrontation des les signatures spectrales des états de surfaces avec les données obtenues des données ponctuelles de télédétection.
 - Une confrontation des signatures spectrales des états de surfaces mesurées in situ, aux des données de la salinité CE 1/5 (mesurées aux laboratoire) par classe de télédétection, ensuite avec les données ponctuelles de télédétection.
- La dernière étape consiste à cartographier la salinité à l'échelle de la plaine par utilisation de la géostatistique et de la télédétection en se basant dans cette dernière sur un nombre très limité de données de conductivité électrique (CE) mesurées.

3.2. Protocole d'observation des éléments de surface au sol

Sur chacun des points retenus, un protocole d'observation des EDS au sol a été conduit durant la période de l'été 2006. Celui-ci a eu pour objectifs :

a) de fournir les données nécessaires à l'analyse de la variabilité spatiale des éléments de surface qui sont indispensables pour établir le lien entre le terrain et la donnée télédéteectée. C'est pour cette raison, qu'elle occupe une place éminente dans les questions scientifiques auxquelles ce travail est dédié.

b) de fournir des données de validation de la carte des états de surface obtenue à partir de la classification d'image satellitale.

Le protocole de terrain mis au point pour collecter ces données consiste en :

1) un inventaire global par parcelle réalisé à chaque étendue échantillonnée de terrain. Cet inventaire a pour vocation de décrire de façon synthétique et rapide le ou les éléments de surface dominant(s) à l'échelle de l'étendue échantillonnée, tenant compte des unités homogènes de composantes (UH) présentes au sein de la plaine.

2) un inventaire par points d'échantillonnage des éléments de surface. L'avantage de ces inventaires réside dans la possibilité d'estimer la proportion de surface couverte localement par chaque type de l'élément de surface et d'en déduire ensuite un état de surface synthétique par point d'échantillonnage observé. En revenant saisonnièrement sur les mêmes points, il est possible d'analyser l'évolution d'un état de surface en fonction des opérations culturales, de l'occupation du sol, la dynamique de la végétation et du climat.

3.3. Le choix des points d'échantillonnage

Le choix des points d'échantillonnage (du terrain) et des échelles de travail a été essentiellement orienté par les éléments suivants :

_ L'objet d'étude de notre recherche : l'apport de la télédétection dans l'évaluation de la dégradation des états de surface a l'échelle de la plaine.

_ L'importante variabilité spatiale des états de surface, tributaires des pratiques culturales et d'occupation du sol.

3.4. L'échantillonnage

L'échantillonnage consiste en général, à choisir dans un ensemble, un nombre limité d'éléments de façon à obtenir des informations objectifs d'une précision mesurable (Gounot, 1969).

La reconnaissance du terrain et le prélèvement des échantillons ont été effectués durant une période s'étalant sur le mois de juillet de l'année 2006. Le choix de cette période coïncide avec une couverture végétale très faible voire inexistante dans certaines zones de la plaine. C'est aussi durant cette période que l'accumulation des sels est la plus importante à la surface du sol et par conséquent plus facilement détectable.

L'échantillonnage adopté est de type stratifié ; il s'est basé sur les classes issues de l'image satellitale de juillet 2000 (Douaoui, 2005 ; Douaoui et al., 2006), tout en veillant à ce que la densité d'échantillonnage soit plus ou moins homogène sur toute la plaine. Chaque site échantillonné a été géoréférencé et localisé sur le terrain par l'utilisation d'un système de localisation géographique GPS (Geographical Positionning System) de navigation de type Garmin. La saisie des coordonnées géographiques de chaque point (au même titre que les autres caractéristiques) permet le positionnement de ces points en utilisant le même système de projection des cartes et de l'image satellitale.

Nous avons utilisé la projection UTM (Zone 31 North, WGS 84). Le positionnement géographique des points d'échantillonnage présente une aide essentielle dans la classification supervisée appliquée en télédétection, et permet de retrouver l'emplacement de ces points au cours du temps, ce qui est essentiel dans le cas d'une analyse synchronique ou diachronique de l'état des ressources naturelles d'une région donnée.

Le plan d'échantillonnage des points sol (fig.12), montre la répartition des points prélevés dans la plaine Cet échantillonnage a été fait sur une superficie totale avoisinant les 45000 ha, couvrant ainsi presque toute la plaine. Le nombre total des échantillons prélevés est de 400.

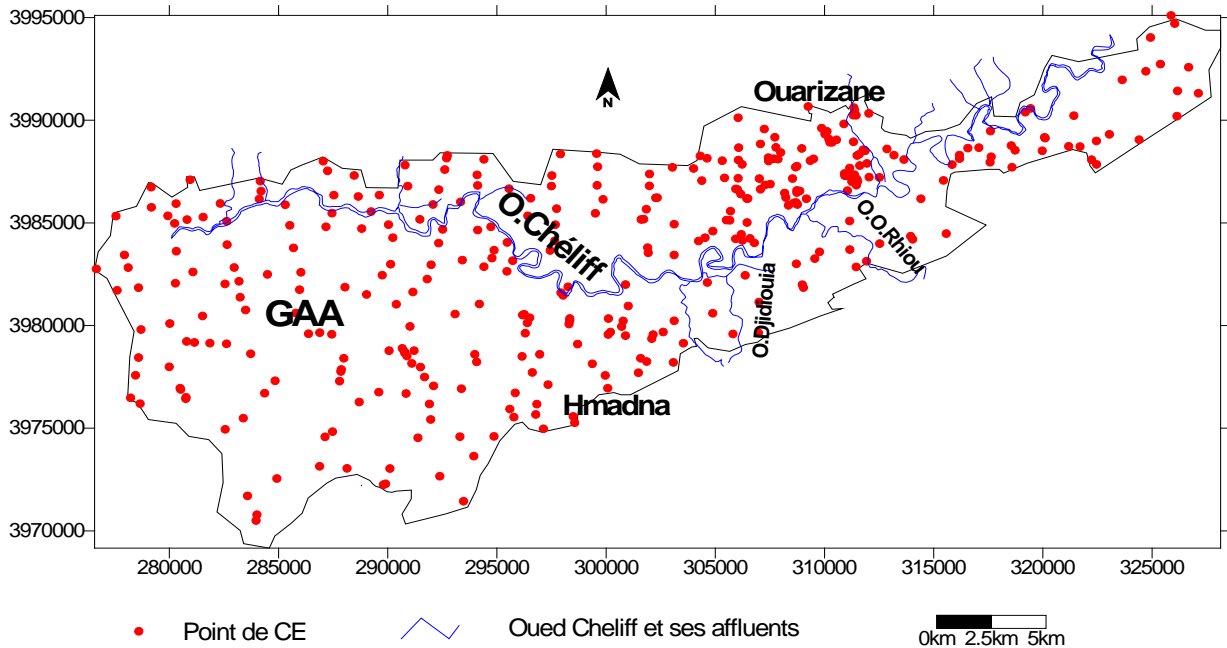


Figure 12. Plan d'échantillonnage des points d'états de surfaces et du sol prélevés (2006)

3.5. Données utilisées

Les données utilisées dans le traitement et l'interprétation sont de trois types : les données cartographiques, les données de l'imagerie satellitale, et les données de terrain.

3.5.1. Données cartographiques

Elles se composent des cartes parcellaires à 1/5000, des cartes topographiques à 1/50000 (fig.13), numérisées (Chlef ouest, Ammi Moussa est, Oued Rhiou est, Oued Rhiou ouest, Mazouna est, et Relizane ouest), de la carte des sols de la plaine (Boulaïne, 1956 ; Mc Donald et BNEDER, 1990), de la carte de l'image de télédétection classée de juillet 2000 (Douaoui, 2005 ; Douaoui et al., 2006).

		Mazouna Est	Chlef Ouest
	Oued Rhiou Ouest	Oued Rhiou Est	Ammi Moussa Est
Relizane Est Ouest	Relizane Est		

Figure 13. Assemblage des cartes topographiques

3.5.2. Données de l'image satellitaire

3.5.2.1. Une image de type Aster

- Comme image satellitaire, il a été mis à notre disposition une scène du satellite ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer*) (fig.14), prise en août 2005.

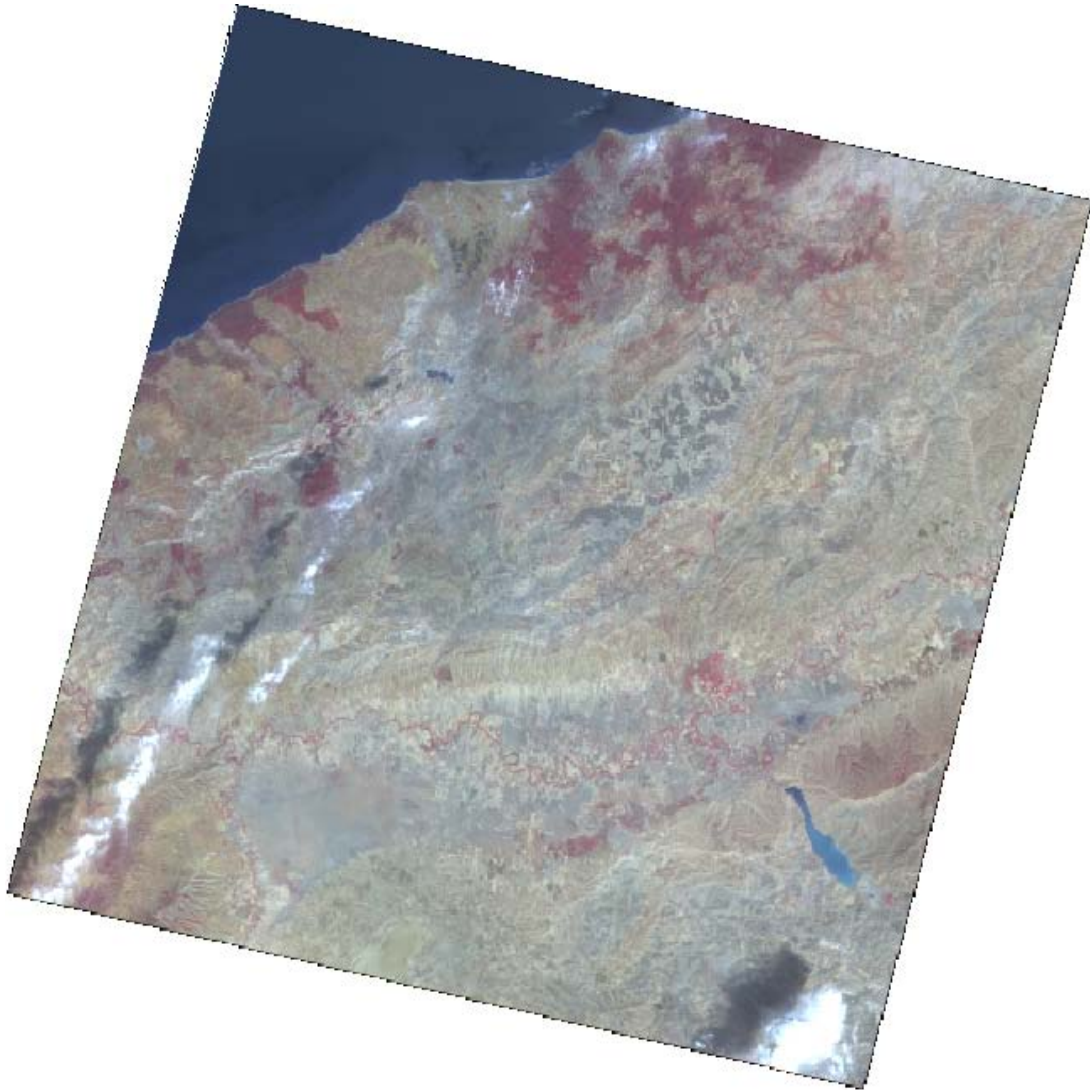


Figure 14. L'image brute de Aster (août 2005)

Cette image est constituée de 14 bandes comprenant trois régions spectrales à savoir :

- VPIR avec la bande 1 (le vert) $0.52 - 0.62 \mu\text{m}$, la bande 2 (le rouge) $0.63 - 0.69 \mu\text{m}$, et la bande 3 (le proche infrarouge) $0.78 - 0.86 \mu\text{m}$;
- MIR (bandes 4-9) 30 mètres de résolution ;
- TIR (bandes 10-14) avec 90 mètres de résolution.

Le tableau 5 représente les valeurs de longueurs d'ondes de l'ensemble des canaux de l'image Aster.

Tableau 5. Caractéristiques du satellite Aster

Aster			résolution (m)
BANDES			
V	1	0.52 - 0.60	15
R	2	0.63 - 0.69	
PIR	3	0.76 - 0.86	
MIR	4	1.60 - 1.70	30
	5	2.145 - 2.185	
	6	2.185 - 2.225	
	7	2.235 - 2.285	
	8	2.295 - 2.365	
	9	2.360 - 2.430	
TIR	10	8.125 - 8.475	90
	11	8.475 - 8.825	
	12	8.925 - 9.275	
	13	10.25 - 10.95	
	14	10.95 - 11.65	

3.5.2.2. Une série d'images Spot

Nous avons utilisé une série d'images Spot en mode multispectral (XS) issues de SPOT VEGETATION qui est un instrument multi spectral embarqué à bord des satellites Spot 4 et Spot 5. Ses images ont une résolution constante de 1 km sur toute la largeur d'un champ de 2400 km.

Le principal intérêt de SPOT VEGETATION est sa haute résolution temporelle, offrant un accès quasi- quotidien à l'ensemble du globe et des synthèses décennales calibrées géométriquement et radiométriquement.

Sur notre zone d'étude, les données dont on dispose sont des NDVI décennales calculés à partir du SPOT VEGETATION entre les années 1999 et 2005, ce qui nous a permis de comparer sous l'angle d'un indice de végétation le comportement des 4 sous périmètres sous différentes conditions climatiques

3.5.2.3. Le choix de la meilleure trichromie

La trichromie idéale devrait permettre la distinction d'un maximum de nuances sur le terrain et éviter la redondance entre canaux (Hirche 1995, Girard et Girard 1999). Cette dernière peut être estimée par l'analyse des coefficients de corrélation canal par canal. La trichromie a été établie à partir de la combinaison des canaux B1, B2, B3 de l'image Aster.

Pour cette image, l'affectation du rouge au canal correspondant à la bande proche infrarouge B3, le vert au canal correspondant à la bande B2, et le bleu au canal correspondant à la bande B1 (tab.06).

Tableau 6. Combinaison des canaux pour l'élaboration de la trichromie RVB

Canaux Spot	Canaux Aster	Longueur d'ondes	Rendu photographique
XS3	B3	Proche infra rouge	En rouge
XS2	B2	Rouge	En vert
XS1	B1	Visible	En bleu

3.5.2.4. Modèles numériques du comportement spectral de l'image

L'histogramme bidimensionnel en utilisant le plan spectral [R-PIR] a été dressé pour chaque région pour mieux caractériser leurs états de surface en s'appuyant sur les réponses spectrales propres à chaque région.

3.5.2.5. Le choix des zones-tests

Les zones test que nous avons retenues sont celles qui reflètent au mieux la diversité des paysages caractéristiques de la plaine.

3.5.2.6. La classification d'image

Du moment qu'on possède des connaissances a priori sur la terrain, Nous avons utilisé la méthode de classification supervisée en utilisant l'algorithme de "Maximum des vraisemblances" après la détermination des aires d'entraînement (*Area Of Interest*) les plus représentatives. L'évaluation de sa pertinence se fait directement avec le logiciel ERDAS imagine 8.6 par la matrice de confusion, à partir de la quelle nous avons calculé le coefficient kappa.

3.5.2.7. Comportements spectraux des classes

Le comportement numérique a été fait selon la moyenne des trois canaux afin de comparer entre les différentes tendances spectrales des classes définies issues de la classification supervisée de l'image.

3.5.2.8 L'extraction des comptes numériques et normalisation des valeurs

A fin de calculer les différents indices, les corrélations et d'autres calculs statistiques, l'extraction des comptes numériques a été faite directement avec le logiciel ERDAS imagine 8.6, le fichier exporté de type *.asc sera transformé en utilisant le logiciel Surfer 8.0 en fichier *.xls qui nous permis de combiner facilement entre les différents canaux.

3.5.2.9. Calcul des indices

3.5.2.9.1. Les indices de végétation

Ces différents indices de végétation exploitent essentiellement la différence de réponse spectrale de la végétation et des sols dans la bande rouge (R) qui est liée à l'absorption de la lumière par la chlorophylle et la bande proche infrarouge (PIR) qui est liée à la densité de la végétation verte. Les indices de végétation doivent donc être sensibles à la partie verte du couvert végétal sans pour autant être influencés par le sol. Pour une meilleure évaluation de la couverture végétale, six indices de végétations ont été retenus :

- Le RVI (Ratio Vegetation Index, Pearson and Miller, 1972) est défini sans référence à la droite des sols (définie par le plan spectral « rouge-proche infrarouge »).

$$RVI = PIR/R \quad \text{où}$$

PIR : réponse spectrale dans la bande proche infrarouge et
R : réponse spectrale dans la bande rouge.

- Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1974), est défini de même sorte que le RVI, et reste sensible à la variation des propriétés optiques des sols (Tucker, 1979).

$$NDVI = (PIR-R)/(PIR+R)$$

- Le PVI (Perpendicular Vegetation Index, Richardson and Wiegand, 1977) est défini comme la distance orthogonale entre un point qui représente le couvert végétal (rouge, proche infrarouge) et la droite de sol. Peu sensible aux variations de l'état du sol sur l'état de la végétation. Il est égal à 0 pour un sol nu, il est < 0 pour l'eau et il est > 0 pour la végétation.

$$PVI = (PIR - a*R-b)/(1+a^2)^{0,5}$$

où a est la pente de la droite des sols
b est l'ordonnée à l'origine de la droite des sols

- Le WDV (Weighted Difference Vegetation Index, Clevers, 1989) est défini de la même façon que le PVI et s'exprime par :

$$WDVI = PIR - a*R$$

- Le TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index, Baret et al., 1989) est une mesure de l'angle entre la droite des sols nus et la droite qui joint le point considéré à l'ordonnée à l'origine de la droite des sols nus. Et permet de réduire l'effet des variations de la réflectance des sols (Guérif et al., 1996).

$$TSAVI = a(PIR - a*R - b)/[R + a*(PIR - b) + 0,08(1 + a^2)]$$

- Le MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Qi et al., 1994). définie sans référence à la droite des sols (définie par le plan spectral « rouge-proche infrarouge »). Cet indice diminue l'effet du sol sur la végétation. (Qi et al., 1994)

$$MSAVI = \frac{2PIR + 1 - \sqrt{(2PIR + 1)^2 - 8(PIR - R)}}{2}$$

3.5.2.9.2. Les indices caractérisant les sols

- Le (IR), l'indice de rougeur (Mannière et al., 1993 ; Pouget et al., 1991), préconisé pour les zones méditerranéennes arides, et très sensible à la couleur du sol. (Madeira et al, 1991). Se calcule par la formule suivante :

$$IR = (R - V)/(R+V) \quad \text{ou} \quad IR = R^2/V^2$$

- Le (**IBC**²), l'indice de brillance (Manière et al., 1993), traduit les teintes des sols nus et des roches. Le passage des teintes sombres aux teintes claires s'accompagne d'une augmentation simultanée des valeurs radiométriques dans les deux canaux. Cet indice n'est donc que la représentation physique de la droite des sols. Cet indice varie aussi de manière inversement proportionnelle avec l'humidité et la rugosité du sol (Deshayes et Maurel, 1990). Cet indice de brillance (nommé aussi l'indice de brillance classique) s'exprime par :

$$IBC^2 = V^2 + R^2 + PIR^2 \quad (\text{Manière et al., 1993})$$

- Le (**IS**), l'indice de salinité (Douaoui et al., 2006), Dans la bibliographie on trouve plusieurs indices pour estimer la salinité, mais partant du principe que la combinaison entre les réponses spectrales des sols et de la végétation sont fonction de la salinité dans la plaine du Bas-Chéliff (Douaoui, 2005), nous avons utilisé l'indice de salinité (*IS*) de Douaoui et al., 2006) ;

$$IS = (V^2 + R^2)^{1/2} \quad (\text{Douaoui et al., 2006}).$$

- Le (**IC**), l'indice de couleur (Pouget et al., 1989 in Omari, 2005) Cet indice est très sensible à la couleur du sol. S'exprime par :

$$IC = (R-V)/(R+V)$$

3.5.3. Les données de terrain

3.5.3.1. Description des états de surface

Au cours de notre investigation sur terrain, une description des états de surface a été faite pour chaque site échantillonné à l'aide d'une fiche de terrain (Douaoui, 2005) (Fig. 15). Cette description comprenait l'occupation du sol, de la densité de végétation, la nature du sol, la rugosité, l'humidité, la couleur, les efflorescences salines, les fentes de retrait, l'encroûtement de surface et d'autres critères tels que la pente, la charge caillouteuse etc.

3.5.3.2. Description in situ

Une attention particulière a été donnée à la description de la végétation et de l'encroûtement de surface qui ont une grande influence sur la réponse spectrale en télédétection.

La végétation a été décrite en reportant l'espèce dominante ainsi que les autres espèces avec leurs densités de couverture respectives. L'encroûtement de surface a été décrit en reconnaissant le type de croûte (structural, sédimentaire...). Aussi, chaque croûte a fait l'objet de mesure de son épaisseur par un pied à coulisse.

3.5.3.3. Les analyses au laboratoire

Les analyses au laboratoire ont concerné la conductivité électrique de l'extrait dilué (1/5) que nous avons analysées nous même dans le laboratoire de pédologie de la faculté des sciences agronomiques et biologiques / Université de Hassiba Benbouali (UHB/Chlef) sur les 400 échantillons prélevés de la couche superficielle (0 à 20cm) au cours de l'été 2006.

3.5.3.4. Les éléments de surface retenus dans l'analyse des données de terrain

La reconnaissance et le prélèvement des échantillons qui ont été effectués durant la période de l'été 2006 ont montré le groupe des éléments de surface suivants :

1. L'occupation du sol.
2. Le recouvrement de la végétation
3. Les croûtes de surface
4. La rugosité du sol
5. L'humidité
6. Les fentes de retrait
7. La couleur
8. La structure
9. Les efflorescences salines.
10. La CE 1/5

3.5.3.4.1. L'occupation du sol

L'occupation du sol traduit le type d'utilisation des terres, et la multiplicité des cultures possibles, qui permet d'envisager de très nombreux types d'occupation du sol, ceux-ci peuvent être codé de la façon suivante:

- **Classe 1** : regroupe l'arboriculture (l'abricotier, l'olivier, les agrumes, les grenadiers, les poiriers, les pommiers, les orangers...etc.).
- **Classe 2** : regroupe les cultures maraîchères (l'artichaut, le melon, le pastèque, le poivron, la pomme de terre ...etc.).
- **Classe 3** : regroupe les jachères.
- **Classe 4** : regroupe les sols nus.
- **Classe 5** : regroupe la végétation naturelle qui est le plus souvent dominée par les halophytes.
- **Classe 6** : regroupe les sols labourés.
- **Classe 7** : regroupe les céréalicultures (le blé, l'orge...etc.).
- **Classe 8** : regroupe les cultures fourragères.

3.5.3.4.2. Le recouvrement de la végétation

Le recouvrement de la végétation répond aux critères d'homogénéité et de représentativité. Il est noté à l'aide de la codification suivante :

- **Classe 1** : regroupe le recouvrement très dense > 75 %
- **Classe 2** : regroupe le recouvrement dense 50 % a 75 %
- **Classe 3** : regroupe le recouvrement moyen 25% a 50
- **Classe 4** : regroupe le recouvrement faible 5% a 25%
- **Classe 5** : regroupe le recouvrement très faible < 5 %

3.5.3.4.3. Les croûtes de surface

La distinction entre les croûtes de surface se fait principalement selon leur mode de formation. La typologie des croûtes décrites se limite ici aux types rencontrés dans la région d'étude. La codification est faite en 3 classes:

- a) **Croûte structurale** : se forment suite à la mobilisation sur place et rejaillissement des particules par l'effet splash (Casenave et Valentin, 1989 ; Valentin et Bresson, 1997). L'épaisseur ne dépasse pas les cinq mm en général.
- b) **Croûte sédimentaire** : c'est la croûte qui se forme après sédimentation des particules dans un liquide au repos. Son épaisseur peut atteindre deux cm.
- c) **Croûte de salinisation** : dans les sols très salés, se forment parfois à la surface du sol, sous l'action flocculente des sels sur les argiles. Une croûte très fragile peu épaisse de 3 à 5 mm.

3.5.3.4.4. La rugosité du sol

La rugosité est marquée en trois classes :

- **Classe 1** : marque la rugosité élevée
- **Classe 2** : marque la rugosité moyenne
- **Classe 3** : marque la rugosité faible

3.5.3.4.5. L'humidité

L'état d'humectation de la surface est codé en quatre classes

- **Classe 1** : a humidité élevé
- **Classe 2** : a humidité moyenne
- **Classe 3** : a humidité frais
- **Classe 4** : a humidité sec

3.5.3.4.6. Les fentes de retrait

Les fentes de retrait ont été classées en trois rangs selon l'épaisseur de leur fissuration:

- **Classe 1** : dont l'épaisseur varie entre 0 et 10 mm
- **Classe 2** : dont l'épaisseur varie entre 10 et 20 mm
- **Classe 3** : dont l'épaisseur dépasse les 20 mm

3.5.3.4.7. La couleur

Différentes couleurs appartenant a plusieurs classes (brown, gray, yellow, red) ont été identifié . Les classes ont été notés de la façon suivante:

- | | | |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| 1- Brown | 2- Dark_brown | 3- Dark_gray |
| 4- Dark_grayish_brown | 5- Dark_olive_brown | 6- Dark_reddishe_brown |
| 7- Dark_yellow_brown | 8- Graysh_brown | 9- Light_brownish_gray |
| 10- Light_olive_brown | 11- Light_yellowish_brown | 12- Lihgt_olive_brown |
| 13- Olive_brown | 14- Pole brown | 15- Reddish_brown |
| 16- Redish_yellow | 17- Strong_brown | 18- Yellowish, brown |
| | | 19- Yellowish_red. |

3.5.3.4.7.1. La teinte ou "hue"

Le code se composant de l'initiale majuscule de la couleur précédée d'un nombre décimal variant de 0 à 10 par pas de 2,5. Par exemple 7,5 YR correspond à une couleur composée d'un mélange de 75 % de jaune (Yellow) et de 25 % de rouge (Red).

3.5.3.4.7.2. La clarté ou "value"

Elle correspond à un gris, mélange de noir absolu codé zéro et de blanc codé 10. La notation utilise des chiffres arabes suivis d'un slash à gauche de la planche et de bas en haut, par pas de un de la Charte Munsell.

3.5.3.4.7.3. La pureté ou "chroma"

Les proportions sont notées en chiffres arabes de 0 à 8 par pas de 1 et/ou de 2 en bas de la planche et de gauche à droite de la Charte Munsell.

3.5.3.4.8. La structure

Selon le degré de compacité, la codification de la structure du sol est faite en 5 classes:

- **Classe 1** : structure friable
- **Classe 2** : structure particulaire
- **Classe 3** : structure moyennement compacte
- **Classe 4** : structure compacte
- **Classe 5** : structure très compacte

3.5.3.4.9. Les efflorescences salines

Les efflorescences salines sont classées en quatre groupes:

- **Groupe 1** : regroupe les efflorescences salines absentes
- **Groupe 2** : regroupe les efflorescences salines faibles
- **Groupe 3** : regroupe les efflorescences salines moyennes
- **Groupe 4** : regroupe les efflorescences salines importantes

3.5.3.4.10. La CE 1/5

Les échantillons du sol ont été prélevés à partir de la couche superficielle (0-20 cm). Les classes de la salinité CE 1/5 ont été établies suivant l'échelle faite par le laboratoire américain U.S.Salinity Laboratory de Riverside par Richard et al, 1954. (Mathieu et Pieltain 2003)

- **Classe 1** : la catégorie des sols non salés (la CE 1/5 entre 0 - 0.60 mmhos/cm).
- **Classe 2** : la catégorie des sols légèrement salés (la CE 1/5 entre 0.60-1 mmhos/cm).
- **Classe 3** : la catégorie des sols salés (la CE 1/5 entre 1 - 2 mmhos/cm).
- **Classe 4** : la catégorie des sols très salés (la CE 1/5 entre 2 - 4 mmhos/cm).
- **Classe 5** : la catégorie des sols extrêmement salés (la CE 1/5 > a 4 mmhos/cm).

Les cinq classes de salinité mesurées à l'extrait dilué 1/5 sont transformées en pâte saturée (< 2, 2- 4, 4-8, 8- 16 et > 16 dS/m) (Douaoui, 2005).

3.6. Echelle d'observation des éléments de surface

Chacune des observations concerne une portion de l'espace, et le résultat de l'observation peut même changer radicalement quand on considère des étendues de taille variable (Godron et al, 1968).

On peut considérer les précisions suivantes comme les conditions minimales pour obtenir une description satisfaisant les besoins futurs (la modélisation hydrologique, et le suivi des changement par télédétection...etc.) des éléments de surface (tab.7).

Tableau 7. Echelle d'observation des éléments de surface

Paramètres	Echelle d'observation
L'occupation du sol	Extension par hectare
Le recouvrement de la végétation	100 m ²
Les croûtes de surface	< 1m ²
La rugosité du sol	Plusieurs mètres carrés
L'humidité	Plusieurs mètres carrés
Les fentes de retrait	< 1m ²
La couleur	Plusieurs mètres carrés
La structure	< 1m ²
Les efflorescences salines	Plusieurs mètres carrés

Figure 15. Fiche terrain utilisée pour caractériser les états de surface (Douaoui, 2005).

LOCALISATION				
Carte référence et échelle	Nom du lieu :			
Numéro site _ . _ . _ .	Numéro Individu : _ . _ .			
Coordonnées	X.....	Y.....	Z.....	
GEOMORPHOLOGIE				
Unités	plateau <input type="checkbox"/>	colline <input type="checkbox"/>	gaa <input type="checkbox"/>	sebkha <input type="checkbox"/>
			merdja <input type="checkbox"/>	lunette <input type="checkbox"/>
				cône de déjection <input type="checkbox"/>
Modelé	glacis <input type="checkbox"/>	cuvette <input type="checkbox"/>	crête <input type="checkbox"/>	oued <input type="checkbox"/>
Pente	Indice de pente.....	Indice de courbure.....	Exposition :	
GEOLOGIE				
Nature de l'affleurement	calcaire <input type="checkbox"/>	marne <input type="checkbox"/>	argile <input type="checkbox"/>	grès <input type="checkbox"/>
				croûte/dalle calcaire <input type="checkbox"/>
	Autres à préciser <input type="checkbox"/>		Extension (superficie).....	
HYDROLOGIE				
Drainage externe (ruissellement)	bon <input type="checkbox"/>	moyen <input type="checkbox"/>	mauvais <input type="checkbox"/>	
Drainage interne	Engorgement <input type="checkbox"/>	submersion <input type="checkbox"/>	Tâches d'hydromorphie <input type="checkbox"/>	
SOL				
Classification pédologique.....				
Texture	argileuse <input type="checkbox"/>	limoneuse <input type="checkbox"/>	sableuse <input type="checkbox"/>	
Charge caillouteuse	nature.....	diamètre moyen.....	pourcentage.....	
Couleur(Code Munsell)	sec.....	Humide.....		
Structure	structuré <input type="checkbox"/>	pseudo-sables <input type="checkbox"/>	dispersé <input type="checkbox"/>	compacte <input type="checkbox"/>
Croûte de surface	structurale <input type="checkbox"/>	glacée <input type="checkbox"/>	sédimentaire/épaisseur <input type="checkbox"/>mm	
Erosion/apport	érosion hydrique <input type="checkbox"/>	érosion éolienne <input type="checkbox"/>	alluvions <input type="checkbox"/>	colluvions <input type="checkbox"/>
Humidité	élevée <input type="checkbox"/>	moyenne <input type="checkbox"/>	frais <input type="checkbox"/>	sec <input type="checkbox"/>
Rugosité	élevée <input type="checkbox"/>	moyenne <input type="checkbox"/>	faible <input type="checkbox"/>	
Efflorescence saline	importante <input type="checkbox"/>	moyenne <input type="checkbox"/>	faible <input type="checkbox"/>	absente <input type="checkbox"/>
VEGETATION				
Naturelle	sol nu <input type="checkbox"/>	halophyte <input type="checkbox"/>	non halophyte <input type="checkbox"/>	arbustive <input type="checkbox"/>
				arborée <input type="checkbox"/>
	espèces dominantes.....		taux de recouvrement.....%	
Agricole	céréales/irrigation <input type="checkbox"/>	arboriculture/espèce <input type="checkbox"/>	Maraîchage/espèce <input type="checkbox"/>	jachère/durée <input type="checkbox"/>

3.7. La confrontation des données de terrain aux données de télédétection

La confrontation des données a été réalisée entre les données des éléments de surface et celles de la télédétection, ensuite entre les données de la salinité mesurée et celles de la télédétection, en premier lieu par classe de télédétection et en deuxième lieu sur la totalité des 400 points échantillonnés. Selon la démarche suivante:

3.7. 1. Entre les données des éléments de surface et celles de la télédétection

Cette confrontation a été faite entre les données des éléments de surface et celles de la télédétection.

3.7. 1. 1. Confrontation avec les données par classe de télédétection

La confrontation a été établie sur les moyennes par classe de télédétection.

- a)- Entre les différents indices de sol et de végétation
- b)- Entre les éléments de surface et les comptes numériques moyens
- c)- Entre les éléments de surface
- d)- Entre les indices et les éléments de surface

3.7. 1. 2. Confrontation avec les données ponctuelles

La confrontation est faite ici de façon ponctuelle sur la totalité des 400 points échantillonnés.

- a)- Entre les différents indices
- b)- Entre les éléments de surfaces et les comptes numériques moyens
- c)- Entre les éléments de surface
- d)- Entre les indices et les éléments de surface

3.7. 2. Entre les données de la salinité et celles de la télédétection

La confrontation entre les données de télédétection et celles de la salinité mesurées au laboratoire.

3.7. 2. 1. Aux points échantillonnés par classe de télédétection

- a)- Entre la salinité et les différents indices de sol et de végétation
- b)- Entre la salinité et les éléments de surface
- c)- Entre la salinité et les comptes numériques moyens

3.7. 2. 2. Confrontation avec les données ponctuelles

- a)- Entre la salinité et les différents indices
- b)- Entre la salinité et les éléments de surface
- c)- Entre la salinité et les comptes numériques moyens

Les corrélations ont été calculées, en premier lieu, sur des valeurs moyennes par classe de télédétection et en second lieu, sur les valeurs ponctuelles de télédétection correspondant aux points échantillonnés et décrits.

Les coefficients de corrélations utilisés sont celui de Pearson dans le cas des variables quantitatives et celui de Spearman dans le cas des variables qualitatives. Le seuil de signification retenu est 5 % en recherchant les liens qui existent entre les différentes variables.

3. 8. La géostatistique en tant que méthode de cartographie de la salinité

Les techniques géostatistiques procèdent en deux étapes qui sont les suivantes :

- l'analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme ;
- l'emploi de la technique de prédiction spatiale par le krigeage.

3. 8. 1. La variographie

La variographie est une étape indispensable en géostatistique. Elle permet d'établir le variogramme qui nous renseigne sur la variabilité spatiale de la salinité dont les paramètres sont utilisés pour tracer la carte de la CE par krigeage.

3. 8. 2. Le krigeage

L'estimation spatiale de la salinité a été faite par krigeage ordinaire à variogramme global. Dans ce cas, le krigeage permet l'estimation d'une propriété Z en un point quelconque de l'espace de coordonnées x_0 selon une combinaison linéaire des observations faites en des points voisins x_i .

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

où n est le nombre de points x_i
et λ_i est le poids affecté à chaque voisin

Les paramètres de la structure spatiale de la variable à kriger sont déterminés à partir de l'ajustement du variogramme à un modèle théorique (sphérique, exponentiel...) dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque.

3.9. Logiciels utilisés

- La saisie, le filtrage et la codification des données des éléments de surfaces ont été faite par le Microsoft Excel.

- Les traitements des données satellitales (choix de la meilleure trichromie, le choix des zones d'entraînement, la classification supervisée, la pertinence de la classification (calcul du kappa et de la matrice de confusion), l'extraction des comptes numériques, les diagrammes bidimensionnels; les signatures spectrales) ont été établies avec le logiciel ERDAS imagine 8.6.

- Certains calculs ont été effectués avec le surfer 8.0 à cause du nombre importants des valeurs extraites à partir de l'image satellitaire.

- La cartographie des états de surface, de l'occupation du sol et de la salinité a été faite avec le logiciel Arcgis 9.1

- Le Variowin a été utilisé pour analyser la variabilité spatiale de la salinité par variographie

- Le calcul des corrélations a été fait par le logiciel Statistica 6.1 fr.

- Le logiciel Google earth pour la localisation des points.

La figure 16 récapitule la démarche méthodologique en reprenant les différentes étapes poursuivies dans ce travail.

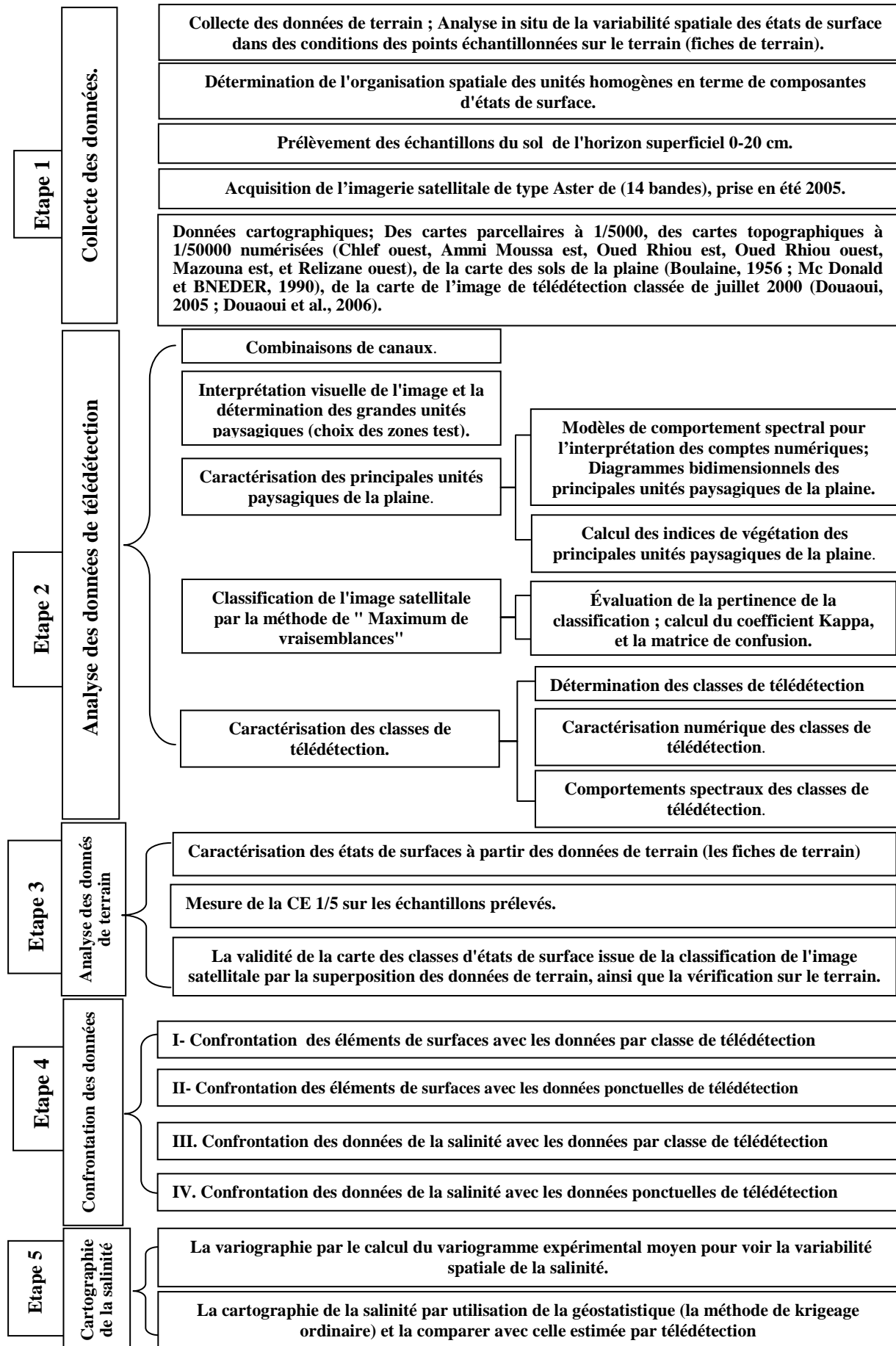


Figure 16. Etapes de la démarche générale d'analyse des données de terrain et de l'image satellitale pour la caractérisation des états de surfaces et de la dégradation par télédétection

Résultats et interprétations

Chapitre IV :

Analyse de l'image satellitale et identification des états de surface

CHAP. IV. Analyse de l'image satellitale et identification des états de surface

4. 1. Combinaisons de canaux

Il existe plusieurs possibilités pour représenter visuellement l'image satellitale. Le choix retenu est la représentation de l'image en infrarouge couleur (IRC) par combinaison de trois canaux dont deux dans le visible et un dans le proche infrarouge. Cette combinaison a été faite par l'affectation du :

- Le bleu à la bande (b1) dans le vert (le visible) ;
- Le vert à la bande (b2) dans le rouge (le visible) ;
- Le rouge à la bande (b3) dans le proche infrarouge.

Dans cette combinaison, la végétation apparaît en rouge, l'eau apparaît en bleu et les sols nus apparaissent en cyan plus ou moins sombre (fig.17).

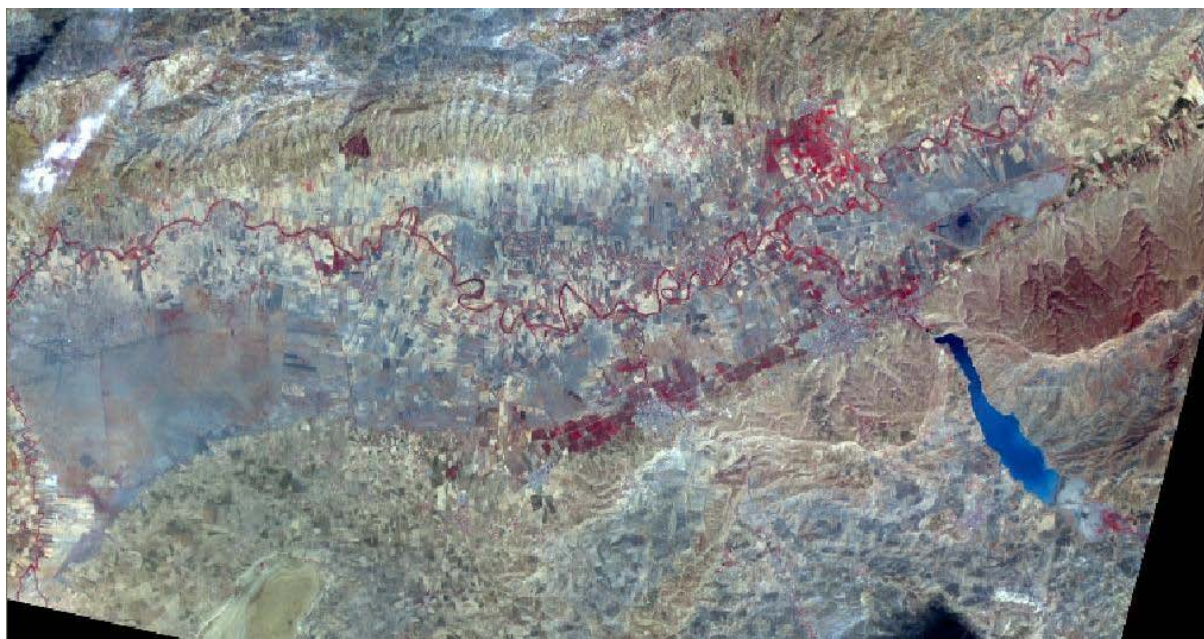


Figure 17. L'image Aster en composition colorée « infrarouge couleur » (août 2005)

On peut distinguer sur cette image :

- les zones irriguées, où la végétation chlorophyllienne est bien couvrante, apparaissent en rouge plus ou moins vif (périmètre de Ouarizane, périmètre d'Oued Rhiou et le périmètre de Djidiouia),
- les sols nus apparaissent en cyan sombre s'étendant sur la presque totalité de la plaine.
- les eaux du barrage de Gargar apparaissent en bleu, contrairement au Merdjet Sidi Abed qui a été dévasée au cours de cette période, apparaît avec la même couleur que les sols nus de la plaine.
- Les sols nus céréaliers du plateau de Benziane apparaissent en couleur plus ou moins sombre.

4. 2. Interprétation visuelle (Les grandes unités agropaysagiques)

Nous avons essayé de faire ressortir les grandes unités agropaysagiques de la plaine du Bas-Chélif à partir d'une analyse visuelle de l'image satellitale et les activités agricoles qui

s'y pratiquent en se basant sur les cartes topographiques (1/50000), la carte d'occupation du sol, la carte des sols (Mc Donald et BNEDER, 1990), et de nos connaissances acquises sur le terrain.

Les principales unités agro-paysagiques discriminées sur l'image satellitaire sont (fig. 17) :

1. la retenue Merdjet Sidi Abed dévasée en l'an 2005, apparaît en cyan ;
2. le barrage de Gargar, apparaît en bleu foncé ;
3. l'oued Chlef et ses principaux affluents (oued Mina, oued Djidiouia, oued Rhiou) autour desquels on reconnaît une activité agricole irriguée représentée par le rouge;
4. les périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chélif où se pratique une agriculture intensive apparaissent en rouge plus ou moins vif selon la densité de la végétation (le périmètre de Ouarizane, le périmètre de Oued Rhiou, et le périmètre de Djidiouia).
5. le plateau de Benziane situé au Sud-Ouest de la plaine et la colline de partage entre le Bas-Chélif et le Moyen-Chélif qui marque la limite Est de la plaine du Bas-Chélif. Les deux unités apparaissent en couleur verte sombre à claire. Ces unités agro-paysagiques constituent les zones céréalières de la plaine ;
6. les zones nues salées qui se concentrent dans la partie ouest de la plaine et au nord de la merdja apparaissent en couleur cyan plus au moins sombres.
7. La végétation halophyte a densité variable dans la plaine, de couleur sombre.
8. la grande dépression hypersalée à l'ouest de la plaine connue sous le nom de « Gaa » en couleur très claire blanchâtre nuancée en cyan foncé. C'est une zone non cultivée dont le couvert végétal naturel est pratiquement inexistant durant la période sèche d'été qui a coïncidé avec la date de la prise d'image.
9. la sebkha de Benziane située dans la dépression fermée du plateau de Benziane. C'est une zone d'accumulation des eaux salées où se forme une croûte de sels en été.
10. Les cônes de déjection sont repérables en couleur très claire au niveau Nord de la plaine.
11. Les villes, les agglomérations et les axes routiers sont en couleur cyan sombre dominante.

4. 3. Caractérisation des principales unités paysagiques de la plaine

La plaine du Bas-Chélif, qui s'étend sur plus de 50000 ha, est caractérisée par une grande variabilité des états de surface, des pratiques agricoles et les aménagements hydrauliques. Pour l'analyse des caractéristiques spectrales, quatre zones ont été prises en considération (Fig. 18) :

1. La première zone se situe dans le périmètre irrigué de Ouarizane d'une superficie avoisinant 2500 ha. Elle a été définie par rapport a sa diversité des pratiques culturales irriguées ;
2. La deuxième zone se trouve dans le périmètre irrigué de Djidiouia. D'une superficie d'environ 2500 ha, elle est caractérisée par la présence d'une arboriculture essentiellement constituée par les oliviers et les agrumes.
3. La troisième zone de 2200 ha de superficie, connue par les cultures céréalières non irriguées, fait partie du plateau de Benziane qui se trouve au sud-ouest de la plaine.
4. La dernière zone où il n'y a pratiquement pas d'activités agricoles, se trouve dans la Gaa à l'extrémité ouest de la plaine du Bas-Chélif. D'une superficie de 2800 ha, elle est caractérisée par un faible couvert végétal halophyte qui peut être par endroits quasiment absent.

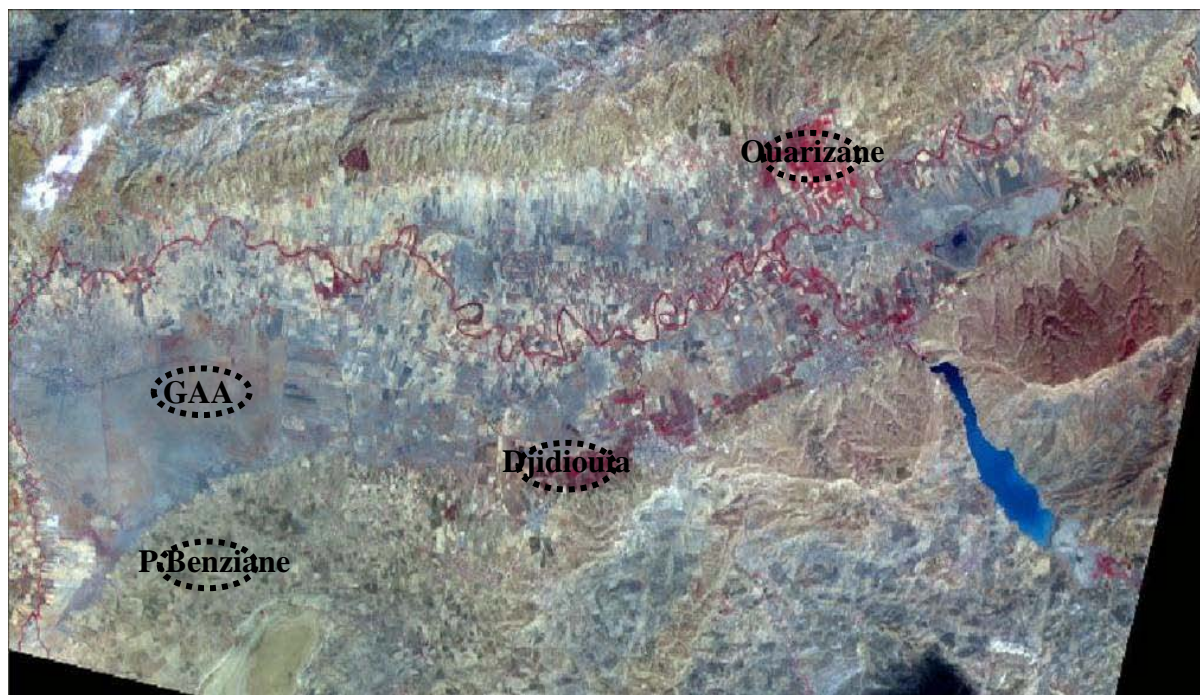


Figure 18 . Délimitation des quatre zones retenues sur l'image Aster.

4. 3.1. Caractéristiques des canaux

Le tableau 8 montre que le périmètre de Ouarizane présente pour les trois bandes des valeurs moyennes des comptes numériques les plus basses, contrairement à la Gaa et le plateau de Benziane qui sont marqués par des valeurs plus élevées. Ceci peut être justifié par un couvert végétal plus intense et plus important dans les périmètres irrigués que dans la Gaa et le plateau de Benziane.

La Gaa présente un faible couvert végétal à base des halophytes et le plateau de Benziane est formé par des sols nus dépourvus de végétation durant la période post-moisson qui coïncide avec la date de prise de l'image satellitale de l'été 2005.

Tableau 8. Moyennes et écarts types des comptes numériques des trois canaux

	Moyenne			Ecart-type		
	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>
Périmètre de Ouarizane	87.88	76.92	87.77	7.64	10.48	6.00
Périmètre de Djidiouia	97.45	87.64	81.69	7.93	10.65	7.03
Plateau de Benziane	94.18	92.07	77.94	5.64	6.53	5.45
La zone de Gaa	108.38	99.49	80.67	2.66	2.72	2.64

Les écart-types des trois bandes de la Gaa sont les plus faibles, tandis qu'ils sont plus élevés pour les périmètres irrigués. Ceci traduit l'homogénéité de l'état de surface de la Gaa.

4. 3.2. Corrélations entre les canaux

Le tableau 9 montre les coefficients de corrélation entre les trois canaux pour les deux périmètres (Ouarizane, Djédiouia), la Gaa et le plateau de Benziane.

Tableau 9. Corrélations entre les canaux de l'image

	b1-b2	b1-b3	b2-b3
Périmètre de Ouarizane	0.97	0.19	0.12
Périmètre de Djidiouia	0.98	0.53	0.55
Plateau de Benziane	0.98	0.96	0.97
La zone de Gaa	0.85	0.61	0.81

Pour l'ensemble des régions :

- la corrélation la plus grande se trouve entre les deux bandes b1 et b2.
- les corrélations les plus faibles ont été observées entre les bandes b1 et b3 et b2-b3 respectivement pour les deux périmètres de Ouarizane et Djidiouia.

Les valeurs faibles des coefficients de corrélations entre l'infrarouge et les deux bandes du visible des deux périmètres peuvent être expliquées par la différence de la réponse spectrale des états de surface du sol, entre l'infrarouge et le visible. C'est la présence de la végétation qui est à l'origine de cette différence. Ce n'est pas le cas pour la Gaa et le plateau de Benziane qui sont dépourvus de végétation et où les valeurs des coefficients de corrélations entre les deux bandes du visible et le proche-infrarouge sont élevées.

4. 3.3. Modèles de comportement spectral pour l'interprétation des comptes numériques

L'histogramme bidimensionnel a été dressé pour quatre zones sélectionnées : les deux périmètres irrigués (Ouarizane et Djidiouia), le plateau de Benziane et la Gaa.

4. 3.3. 1. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Ouarizane

La figure 19 montre que le périmètre de Ouarizane, comporte de faibles valeurs de comptes numériques où la majorité des points du diagramme se trouve concentrée dans un nuage dirigé vers l'axe du proche infrarouge marquant ainsi la présence d'une végétation dense dans ce périmètre. Par ailleurs, l'absence de la droite des sols qui n'est pas bien dessinée dans ce diagramme, indique qu'il y a une probabilité faible de rencontrer des sols nus dans cette zone.

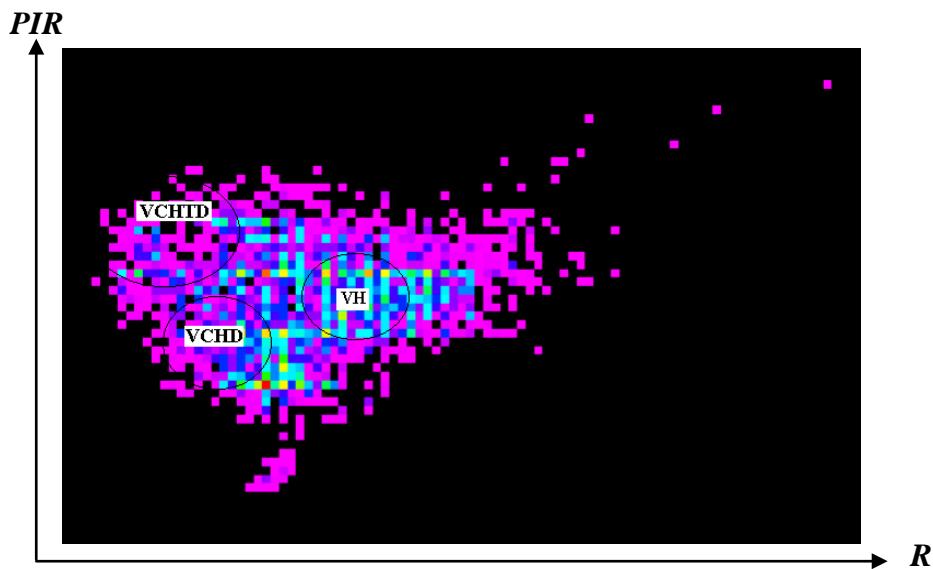


Figure 19. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Ouarizane

VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. **VCHTD** : Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. **VH** : Végétation halophyte.

4. 3.3. 2. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Djidiouia

A la différence du périmètre précédent, l'existence d'un nuage de points traduisant la droite des sols nus est bien visible. Toutefois, dans cette zone, un nuage important de points se dirige également vers l'axe du proche infrarouge ce qui explique l'existence de la végétation dense (fig. 20).

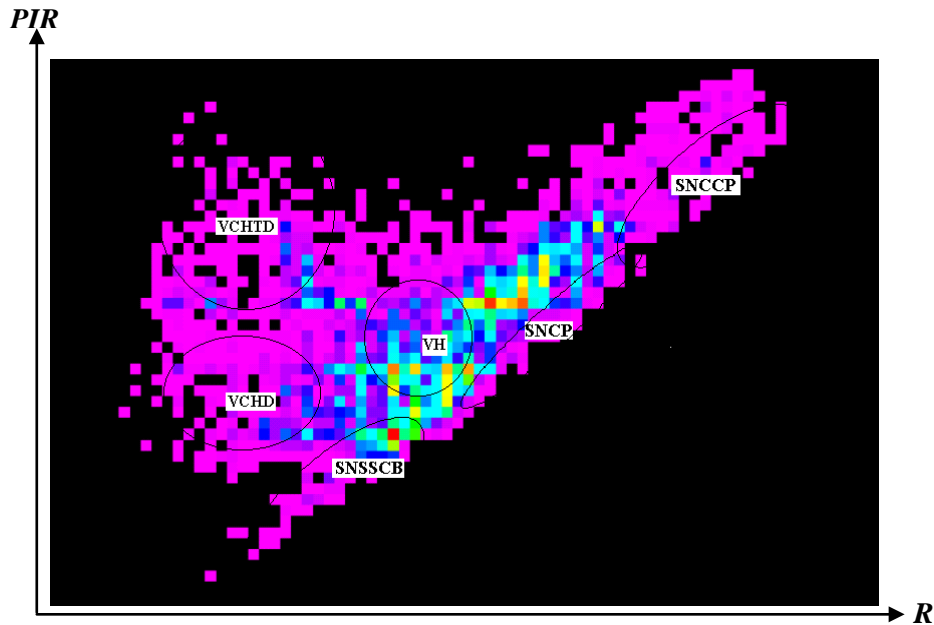


Figure 20. Diagramme bidimensionnel du périmètre de Djidiouia

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu clair céréaliers de la plaine. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

4. 3.3. 3. Diagrammes bidimensionnels du plateau Benziane et de la Gaa

Le plan spectral du plateau Benziane montre une prédominance des points autour de la droite des sols, partant des sols nus sombres jusqu'aux sols nus clairs avec une végétation presque inexistante, contrairement aux deux cas précédents (Fig. 21).

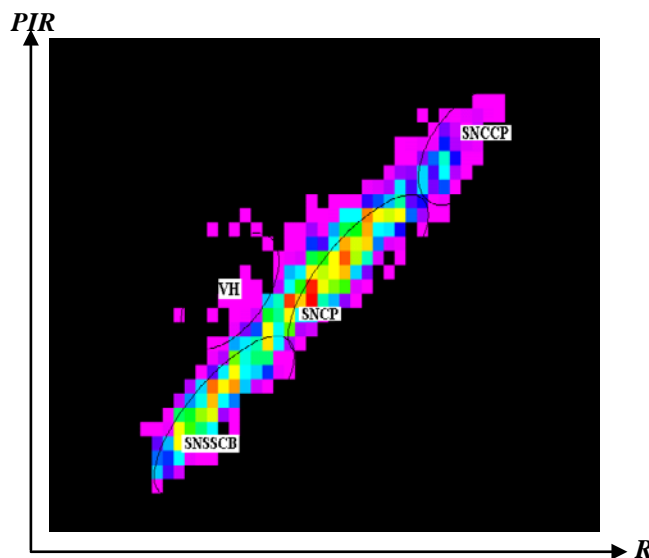


Figure 21. Diagramme bidimensionnel du plateau Benziane

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu clair céréaliers de la plaine. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VH : Végétation halophyte.

La zone de la Gaa montre une réponse spectrale nettement différente de celle des autres régions plus précisément pour les deux périmètres de Ouarizane et Djidiouia. Cette zone est caractérisée par la présence d'une végétation halophyte à faible recouvrement avec parfois des sols complètement nus. Il apparaît donc que la presque totalité des points se concentre autour de la droite des sols avec l'absence totale des sols sombres (Fig. 22).

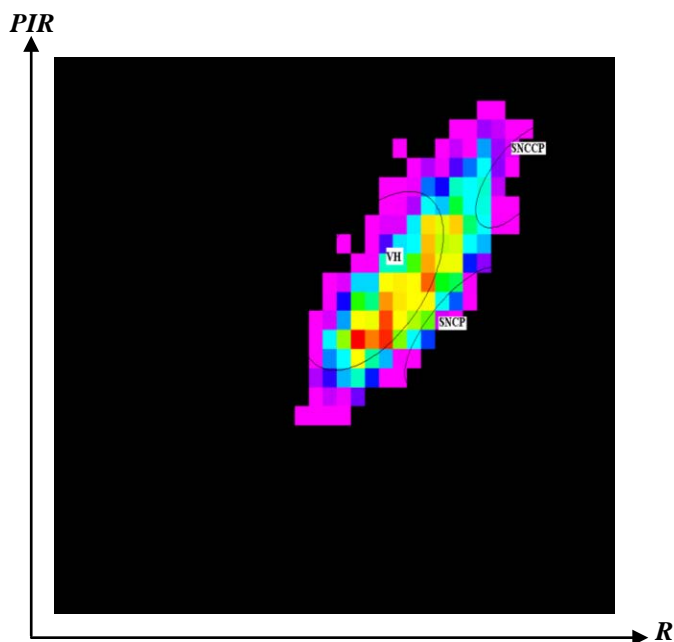


Figure 22. Diagramme bidimensionnel de la zone de Gaa.

SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine.

SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VH : Végétation halophyte.

4. 3.3. 4. Interprétation numérique de la plaine du Bas-Chéiff

L'histogramme bidimensionnel, obtenu par l'intersection du canal rouge et le proche infrarouge, est utilisé pour mettre en évidence les différents états de surface à l'échelle de toute la plaine (Fig. 23).

La concentration des points autour de la droite des sols indique l'existence d'une série importante des sols nus allant des plus sombres aux plus clairs. En contre partie, le nuage de points qui s'étale vers l'axe du proche infrarouge de l'histogramme bidimensionnel indique également la présence des classes de végétation à différentes densités.

De façon générale et à l'échelle de toute la plaine, il apparaît un net déséquilibre entre les superficies couvertes par la végétation chlorophyllienne et les sols nus qui occupent la majeure partie de la plaine.

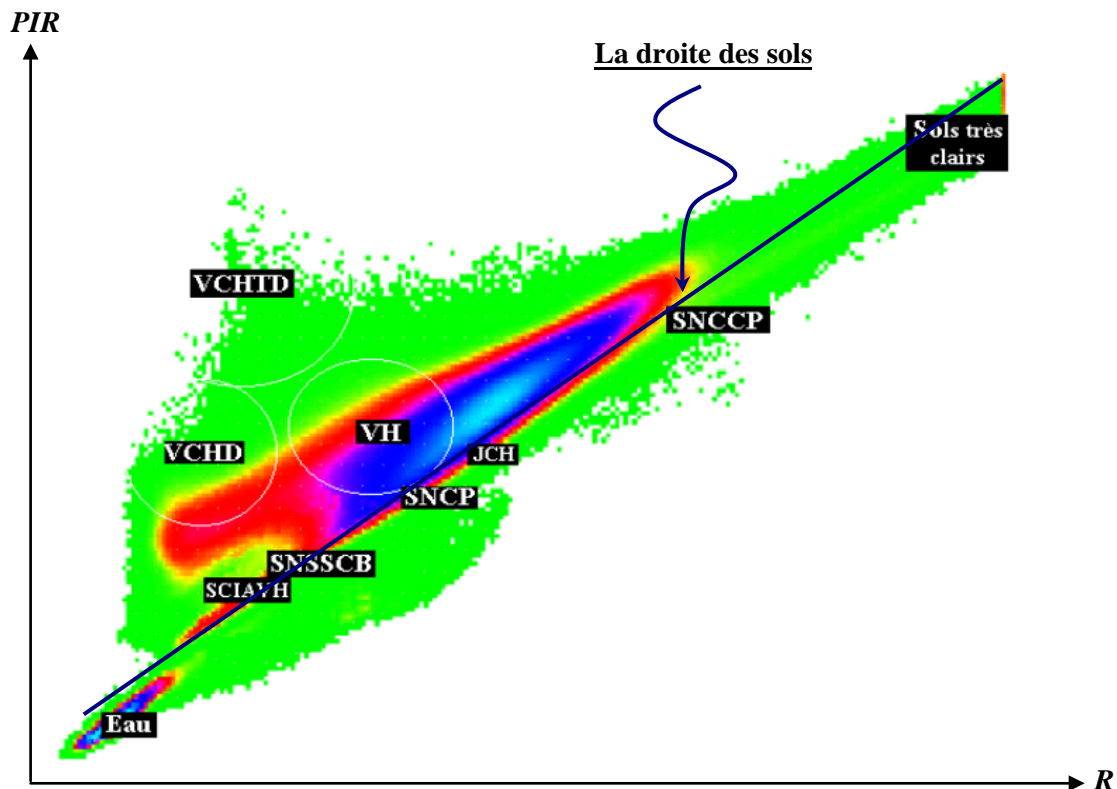


Figure 23. Histogramme bidimensionnel de la plaine

SB : Sebkhât Benziane **SNSSCB** : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. **SNCCP** : Sol nu claire céréaliers de la plaine. **JCH** : Jachères. **SNCP** : Sols nu cultivé de la plaine. **VCHD** : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. **SCIAVH** : Sols cultivés irrigués à dominance d'artichaut et végétation halophyte. **VCHTD** : Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. **VH** : Végétation halophyte.

4. 3.4. Calcul des indices de végétation des régions retenues

Les résultats relatifs aux trois indices de végétation qui ont été retenus, à savoir le (NDVI, le TSAVI et le RVI) pour les quatre zones choisies sont regroupés dans le tableau 10. (tab.10)

Tableau 10. Moyennes des indices de végétation pour les quatre régions

Classes	NDVI	TSAVI	RVI
Périmètre de Ouarizane	0,07	-0,52	1,14
Périmètre de Djidiouia	-0,04	-0,60	0,93
Plateau de Benziane	-0,08	-0,64	0,85
La zone de Gaa	-0,10	-0,65	0,81

D'une manière générale, on constate que les trois indices de végétation (NDVI, TSAVI et RVI) ont une tendance descendante respectivement pour le périmètre de Ouarizane, le périmètre de Djidiouia, le plateau de Benziane, et la zone de Gaa (fig. 24).

Cette décroissance très nette des valeurs des indices de végétation allant de Ouarizane vers la Gaa en passant par le périmètre de Djidiouia et le plateau de Benziane est bien représentée dans la figure (24) qui montre que le périmètre irrigué de Ouarizane présente les valeurs les plus élevées des indices de végétation.

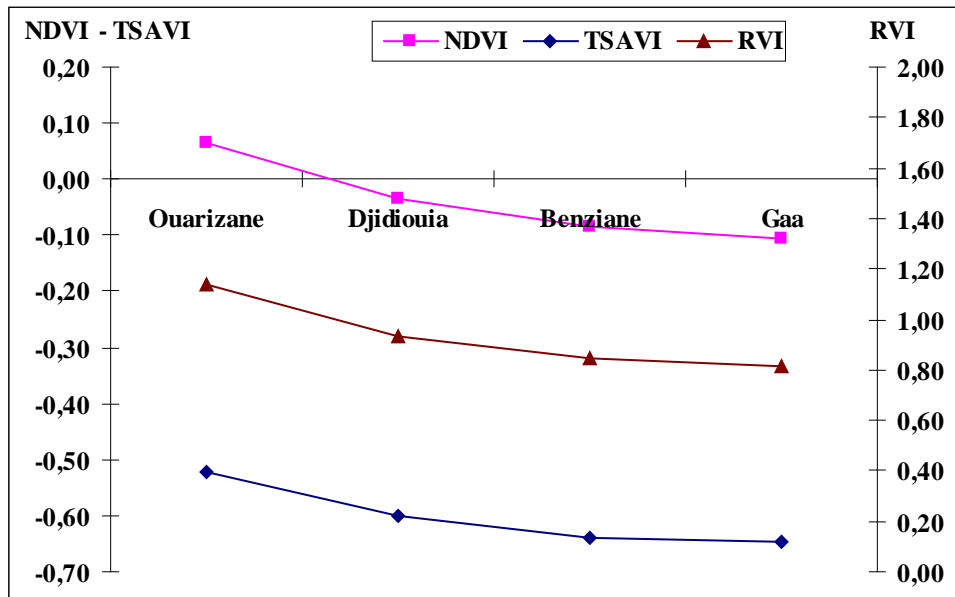


Figure 24. Evolution des indices de végétation selon les zones étudiées

Le périmètre de Ouarizane avec celui Djidiouia qui est classé en deuxième position témoignent, tous les deux, d'une densité chlorophyllienne la plus élevée qui coïncide avec la réalité du terrain où effectivement l'irrigation en été favorise le développement de la végétation.

Les signes négatifs des indices de végétation NDVI et TSAVI pour les différentes zones sont dus à la présence importante des sols nus, ce qui donne une faible réflectance dans le proche infra-rouge. En effet, la date de la prise d'image prise en août 2005 correspond à une année particulièrement sèche durant laquelle les quotas destinés à l'irrigation ont été suspendus ; les agriculteurs se sont contentés d'utiliser les eaux souterraines.

A l'opposé, le plateau de Benziane et la zone de Gâa correspondent à des sols nus. En effet, le plateau de Benziane à vocation céréalière non irriguée et la Gaa à végétation halophyte sont caractérisés par couvert végétal quasi-inexistant durant cette période de l'année.

Entre ces trois indices, il apparaît que le RVI et le NDVI discriminent le mieux la végétation dans les deux périmètres irrigués de Ouarizane et Djidiouia par rapport au TSAVI. Le NDVI aurait été plus pertinent si le couvert végétal était plus dense. En effet, le NDVI est très sensible aux sols nus lorsque le couvert végétal est faible (<15 %) (Lillesaeter, 1982). Ce constat a été également rapporté par Douaoui (2005) pour la plaine du Bas-Chélif.

4. 3.5. Evolution de l'indice de végétation NDVI durant l'année 2005 pour les différentes zones

La figure 25 représente la relation entre les variations de la phytomasse exprimée par le NDVI de trois des quatre zones retenues (les périmètres de Ouarizane et Djédouia, la Gaa et la plaine prise dans sa totalité) et la variation décadaire de la pluviosité et la température de l'année 2005.

Pendant l'été, la phytomasse reste relativement faible et stable pendant toute cette période où le NDVI ne dépasse guère la valeur de 0,30. Ceci est expliqué par la quantité très faible de pluie reçue durant la période estivale et à l'augmentation de la température qui s'est stabilisée autour des valeurs élevées tout le long de la saison sèche (D7-D26).

A partir de la fin du mois de septembre (D27), le NDVI a connu un léger accroissement correspondant à une reprise de la phytomasse qui a eu lieu en automne grâce à l'apparition des pluies automnales. Toutefois, il est à remarquer un décalage entre l'augmentation de la pluviosité et celle de la phytomasse entre la fin d'Octobre et le début du mois de Novembre (D28-D30). Par ailleurs, la reprise de l'accroissement de la phytomasse exprimée en valeurs de NDVI ne devient apparente qu'aux débuts du mois de Décembre (D32-D33). Ce décalage correspond au temps mis pour la constitution des réserves de l'eau du sol suffisantes pour provoquer un accroissement de la phytomasse qui s'accroît avec l'apparition des pluies hivernales et reste élevé pendant tout l'hiver (D35-D09) où les précipitations sont plus fréquentes (Nedjraoui, 1990).

Le pic de la phytomasse est atteint vers la fin du mois de mars qui coïncide avec la période de pleine croissance de la végétation dans la région. Au-delà de cette période, on note une diminution progressive et continue de la phytomasse depuis le début du mois d'avril jusqu'au mois de mai. Avec l'augmentation de la température et la diminution de la pluviométrie à la fin du printemps et au cours de la période estivale, la phytomasse se stabilise autour de ses plus faibles valeurs enregistrées au cours de l'année.

L'allure générale des courbes de l'évolution de la phytomasse au cours de l'année est la même pour toutes les zones y compris pour la totalité de la plaine. La différence se situe au niveau des valeurs de NDVI qui traduisent l'importance de la phytomasse. C'est ainsi qu'on peut voir que les valeurs les plus faibles, et ce pour toute l'année, sont enregistrées dans le cas de la Gaa. Cette dernière, formée par des sols salés impropres à la croissance de la plus part des plantes, ne permet le développement que de certaines plantes halophytes à faible densité de recouvrement.

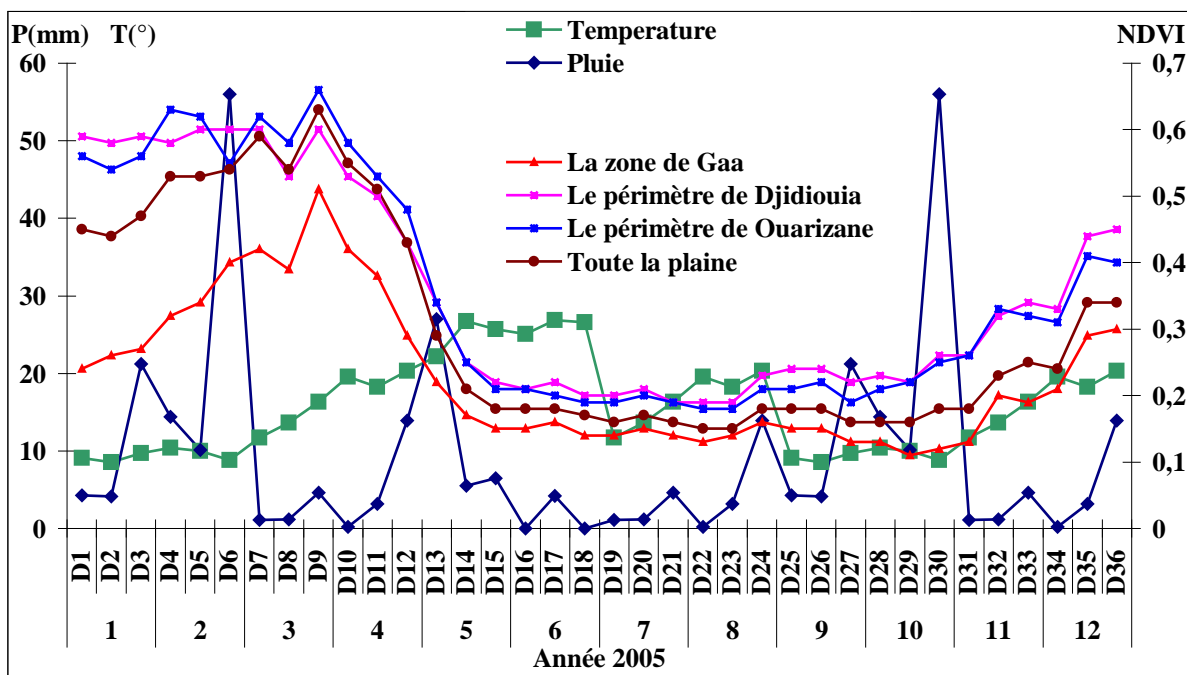


Figure 25. Evolution du NDVI dans certaines zones en fonction de la précipitation et de la température durant l'année 2005

Le périmètre de Ouarizane apparaît comme étant le plus pourvu en couverture végétale suivi dans ceci et de près par le périmètre de Djédiouia. Ces deux périmètres offrent les meilleures conditions pour le développement du végétal avec des sols non salés à texture équilibrée (Douaoui et al., 2004).

Le maintien de la même allure dans l'évolution des courbes d'NDVI des différentes zones montre l'importance de l'influence de la pluviométrie et de la température sur le développement du couvert végétal. D'un autre côté, la différence dans les valeurs des NDVI montre l'importance des paramètres locaux sur le développement de cette végétation telles que la salinité et la nature des sols. Ces facteurs ont été également signalés par Aidoud (1989) qui caractérise la pluie par sa quantité, sa répartition dans l'année et son intensité. Ainsi, l'efficacité de l'eau de précipitation se trouvent conditionnée par trois types de facteurs : atmosphériques, édaphiques et biotiques.

Généralement, les perturbations climatiques sont en effet une cause importante de la fragilité de ces milieux déjà très sensibles en provoquant des crises écologiques se répercutant sur l'ensemble de l'écosystème (Lehouérou, 1993, in Nejeraoui, 2006).

La réponse spectrale de la végétation a été largement étudiée en utilisant l'indice normal de végétation (NDVI) (Toth et al., 1991 ; Schmidt et Karnieli, 2000 ; Diouf et Lambin, 2001 ; Nagler, et al., 2001 ; AlInnutt et al., 2002).

C'est ce que nous avons essayé de faire pour suivre la dynamique annuelle de la phytomasse en se basant sur l'analyse de la variation du NDVI sur une période de 7 ans entre les années 1999 et 2005 (Fig. 26).

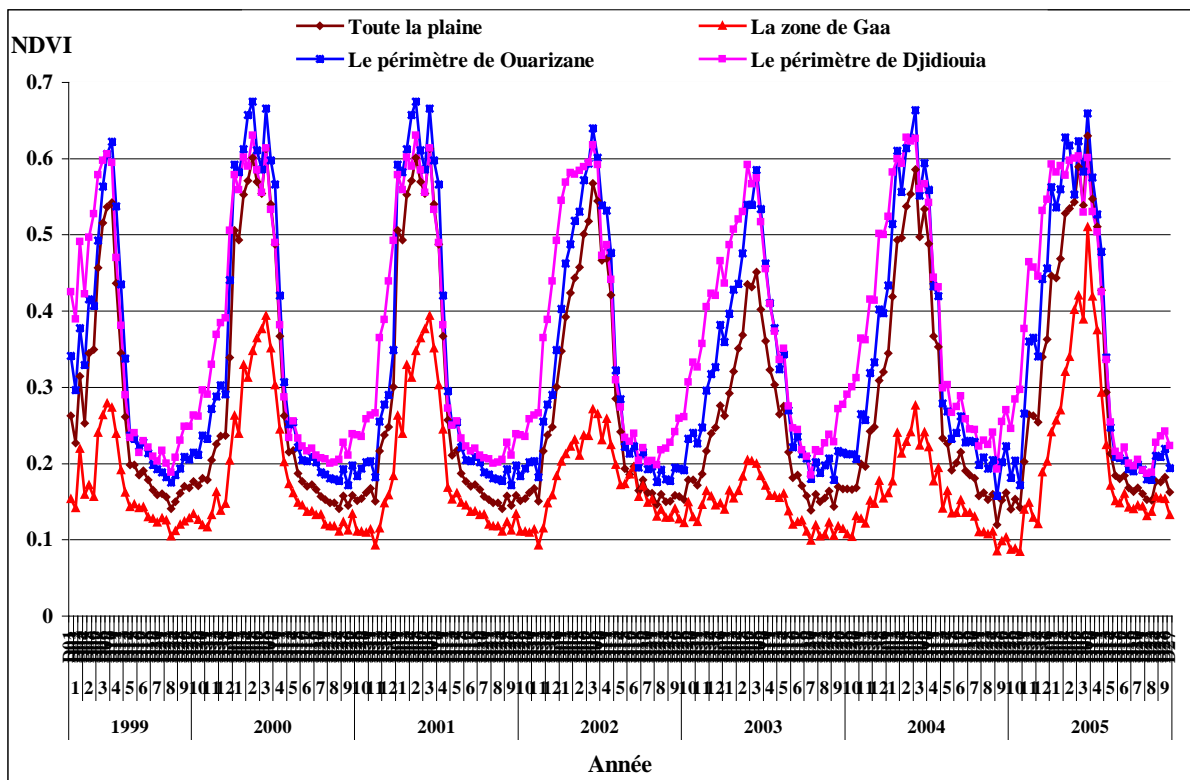


Figure 26. Variation annuelle de l'NDVI dans certaines zones de la plaine

L'analyse de la figure 26 montre que l'allure retrouvée pour l'année 2005 (fig. 25) n'est pas particulière à cette année mais se répète de la même façon pour les six autres années précédentes et ce à l'échelle saisonnière et annuelle. Il en est de même pour les différentes zones qui montrent que c'est le périmètre de Ouarizane qui est le plus pourvu en végétation et c'est la Gaa qui présentent toujours le plus faible couvert végétal, ce qui montre que la salinisation des sols est l'une des causes principales de la dégradation de sol dans la plaine du Bas-Chélif en inhibant la croissance de plantes naturelles et en limitant la production agricole.

Cette périodicité saisonnière et annuelle des indices de végétation confirme, encore une autre fois, l'effet saisonnier et par conséquent celui du climat sur le comportement de la végétation. Aussi, les positions constantes des courbes des NDVI des différentes zones les unes par rapport aux autres montrent l'influence des facteurs de station (sols, salinité, géomorphologie...) sur le végétal.

4. 4. Cartographie des classes homogènes correspondant aux différents états de surface

La discrimination obtenue par l'analyse spectrale de l'image satellitale entre les principales zones homogènes de la plaine du Bas-Chélif nous a amené à essayer de généraliser cette capacité discriminatoire à l'ensemble des états de surface de la plaine.

L'objectif est de cartographier les états de surface en classes homogènes continues par l'utilisation de la télédétection.

Les informations dont nous disposons (carte pédologique (Boulaine, 1956 ; Mc Donald et BNEDER, 1990), image satellitale classée (Douaoui, 2005), carte d'occupation des sols, photos aériennes, fiches descriptives du terrain, l'analyse visuelle de l'image et le comportement de chaque zones définies précédemment, ont permis de définir les aires d'entraînement (*Area Of Interest*) représentatives de la plaine du Bas-Chélif et de retenir la méthode de classification supervisée.

4. 4.1. Détermination des classes de télédétection

Le croisement entre les cartes thématiques en particulier la carte des sols et la carte d'occupation d'une part, et les informations acquises lors de la prospection du terrain d'autre part, en plus des résultats issus de l'interprétation visuelle de l'image satellitale nous a conduit à définir neuf (9) classes (figure 28):

- 1- **Sebkhat Benziane (SB)** : on la retrouve dans la dépression fermée du plateau Benziane, c'est une zone d'accumulation des eaux salées où se forme une croûte de sels en été à la surface du sol suite à l'évaporation de l'eau. Les sels sont formés essentiellement par du chlorure de sodium (Boulaine, 1957 ; Douaoui et al., 2006).
- 2- **Sols céréaliers du plateau de Benziane, non salés, sombres sur l'image (SNSSCB)** : dans cette classe les sols sont non salés, occupés principalement par des cultures céréalières et ont une particularité d'être sombre sur l'image.
- 3- **Sols nu céréaliers de la plaine, clairs sur l'image (SNCCP)** : cette classe est particulièrement différente des autres par la nature d'occupation des sols sur toute la plaine y compris les sols *céréaliers du plateau de Benziane*.
- 4- **Sols mis en jachère (JCH)** : ils ne sont qu'occasionnellement cultivés et sont mis le plus souvent en jachère, Ils ont une salinité élevée qui n'encourage pas les agriculteurs à les cultiver régulièrement.
- 5- **Sols nus, cultivés de la plaine (SNCP)** : se sont des sols nus qui sont cultivés et se répartissent sur toute la plaine.
- 6- **Végétation chlorophyllienne, dense (VCHD)** : présence importante d'arboriculture, de couleur rouge vive sur l'image. Cette classe se retrouve le plus souvent dans les périmètres irrigués de Ouarizane , Djidiouia, et Oued Rhiau.

- 7- **Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte (SCIAVH) :** se sont des sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut, cette classe est associée a des sols occupés par la végétation halophyte.
- 8- **Végétation chlorophyllienne, très dense (VCHTD):** présence importante d'agrumes, irriguées, la plus part de ses superficies se trouvent dans les périmètres de Ouarizane , Djidiouia, et Oued Rhiou..
- 9- **Végétation halophyte (VH) :** se sont des faciès a dominance d'espèces halophytes (*Sueda fructosa*, *Sueda molis*, et *Salsola vermiculata*), On les retrouve un peu partout dans la plaine, et surtout au milieu et dans la dépression fermée à l'ouest de la plaine connue sous le nom de la Gaa.

VCHD : *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures*



JCH : *Jachères.*



VH : *Végétation halophyte*



SCIAVH : *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte*



SNSSCB : *Sol non salé sombre céréaliers de Benziane.*



SNCCP : *Sol nu claire céréaliers de la plaine*



VCHTD : *Végétation chlorophyllienne très dense*



SNCP : *Sols nu cultivé de la plaine.*



SB : *Sebkhat de Benziane*



Figure 27. Aperçu photographique des classes.

4. 4.2. Classification de l'image

La méthode retenue pour la classification de l'image est celle de maximum de vraisemblance. C'est la méthode la plus utilisée donnant une meilleure information (Escadafal, 1992; Benzineh., 2002). Elle est basée sur les propriétés statistiques des composantes spectrales de l'image. Les traitements statistiques utilisent les statistiques des sites d'entraînement pour calculer la probabilité d'appartenance du pixel à une classe en particulier. Enfin, comme elle est assistée, elle permet de ne classer que ce qui correspond au but recherché et de mettre dans une classe toutes les autres composantes de l'image qui ne sont pas utiles (Girard et Girard, 1999).

Le recours à cette méthode nécessite une connaissance des objets à classer et par conséquent, les aires d'entraînement doivent être choisis avec beaucoup de soin de sorte à être les plus représentatifs possibles de la dynamique spectrale de chacun d'eux. (Bonn et Rochon, 1992).

4. 4.3. Le choix de couleurs

Pour l'image classée (fig.28) on a choisi ces couleurs, d'une part parce qu'elles sont plus au moins proches de la réalité et d'autre part, pour bien les différencier visuellement. Ceci a été fait par l'affectation du bleu pour la sebkhat, du vert et vert foncé respectivement pour la végétation chlorophyllienne dense et très dense, du vert jaunâtre pour la végétation halophyte et comme marron clair pour les sols non salés sombres céréaliers du plateau de Benziane. Pour les sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut, c'est le marron foncé qui a été retenu, le gris clair pour les sols nus clairs céréaliers de la plaine. Enfin le violet pour les sols nus cultivés de la plaine et les jachères distinguées en couleur beige.

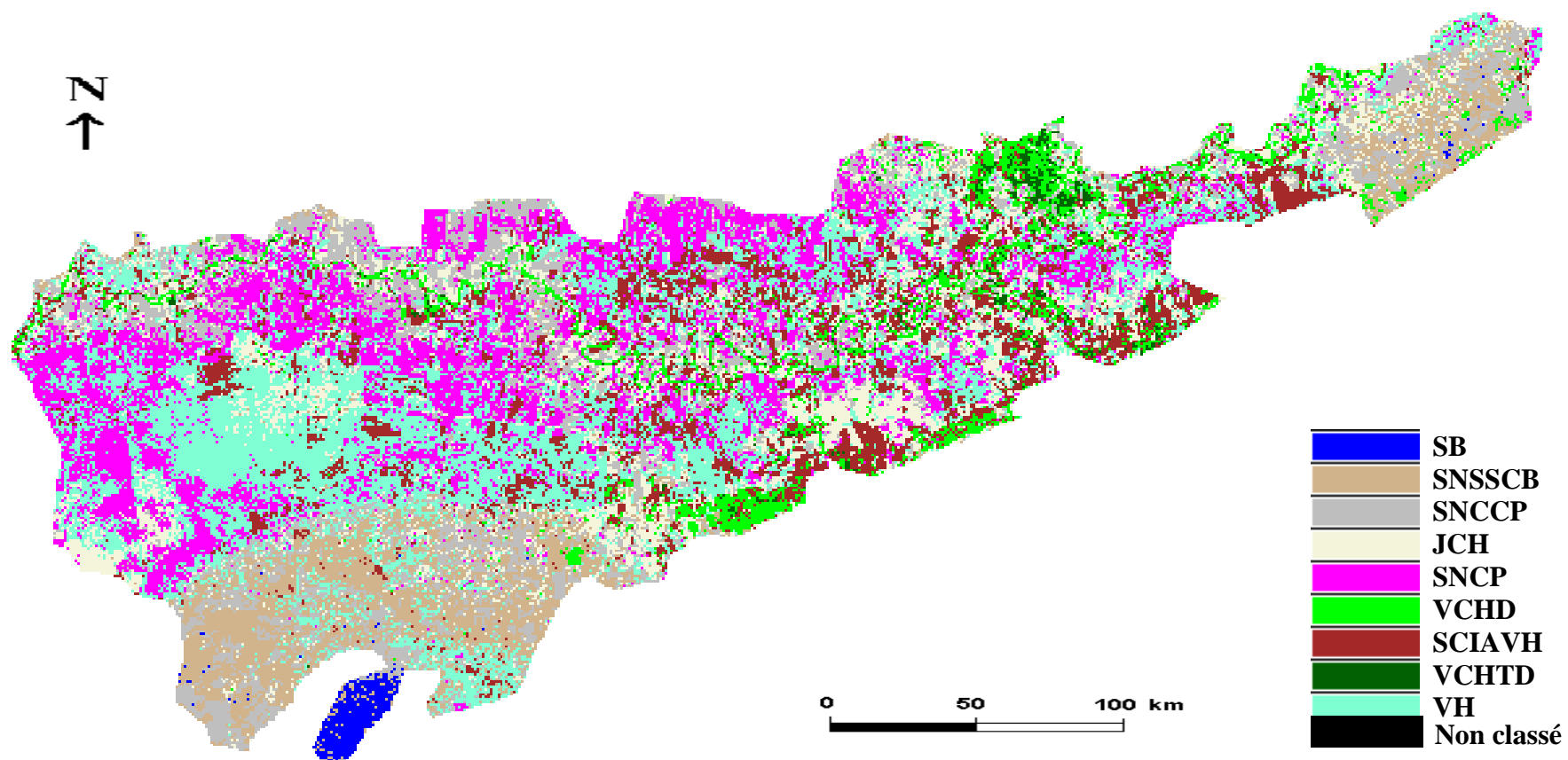


Figure. 28: L'image classée retenue pour les neuf classes définies.

SB : *Sebkhat Benziane* **SNSSCB :** *Sol non salé sombre céréaliers de Benziane.* **SNCCP :** *Sol nu claire céréaliers de la plaine.* **JCH :** *Jachères.* **SNCP :** *Sols nu cultivé de la plaine.* **VCHD :** *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures.* **SCIAVH :** *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte.* **VCHTD:** *Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes.* **VH :** *Végétation halophyte.*

4. 4.4. Superficie des classes

La répartition des superficies par classe montre que celle de la végétation halophyte représentée par la classe 9 vient en tête avec un pourcentage assez élevé de 24,73 % de la superficie totale. On la retrouve un peu partout dans la plaine, occupant des vastes étendues. Un tel résultat témoigne de la présence des sels à une échelle spatiale élevée dans la plaine.

En deuxième position, on retrouve les zones céréalières représentées par la somme des superficies des deux classes 2 et 3. Ces deux classes qualifiées de sols nus clairs et sombres représentent un total de 23,74 % avec 9,40 % pour les sols nus sombres du plateau Benziane et 14,87 % pour les sols nus clairs de la plaine.

La classe 5 qui définit les sols nus cultivés n'ayant pas de culture dominante couvrent 18,42 % et sont répartis sur toute la plaine.

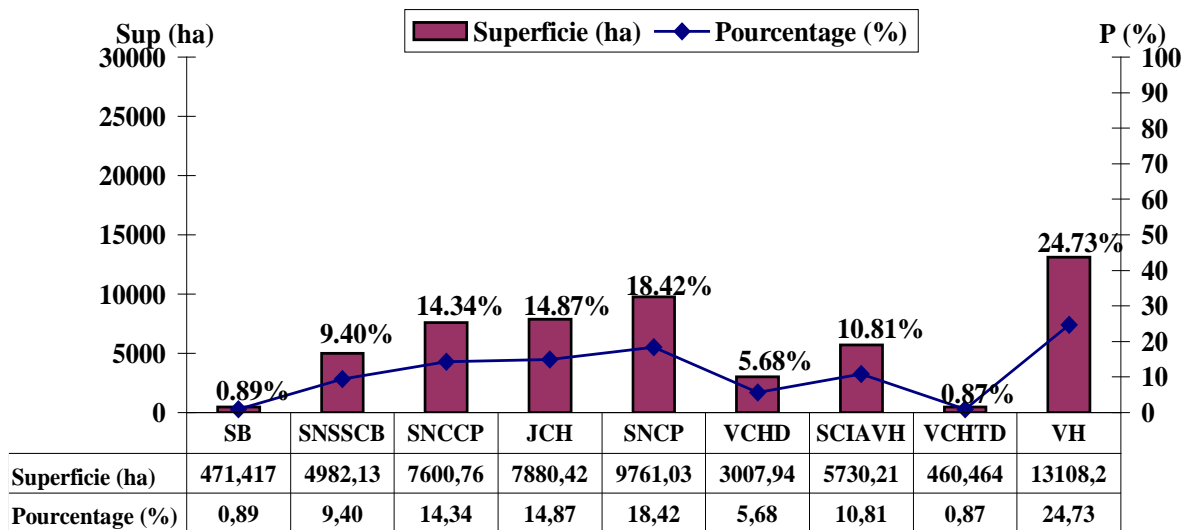


Figure 29. Superficie des classes

SB : *Sebkhat Benziane* **SNSSCB :** *Sol non salé sombre céréalières de Benziane.* **SNCCP :** *Sol nu claire céréalières de la plaine.* **JCH :** *Jachères.* **SNCP :** *Sols nu cultivé de la plaine.* **VCHD :** *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures.* **SCIAVH :** *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte.* **VCHTD:** *Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes.* **VH :** *Végétation halophyte.*

La végétation chlorophyllienne dense et très dense ne représente qu'un pourcentage très faible de 6,55 % au total avec les classes 6 et 8 ayant respectivement 5,68 % et 0,87 %. On les retrouve essentiellement dans les trois périmètres irrigués (Djidiouia, Ouarizane et Oued Rhio) et le long du cours d'eau de Oued Chlef.

La classe 4, dominée par les sols en jachère, couvre une superficie importante atteignant près de 15 % de la superficie totale de la plaine. Les sols de cette classe sont toujours plus ou moins salés, ce qui pousse les agriculteurs à ne pas les utiliser régulièrement.

La classe 7 est particulière par sa spécificité dans la plaine. C'est une classe dominée par la culture d'artichaut qui est la culture phare de la plaine au vue de sa résistance à la salinité. Elle couvre une superficie non négligeable avec 10,81 %.

Enfin, la classe 1 de Sebkhat Benziane (SB) qui se trouve dans la dépression fermée du plateau Benziane, constitue une véritable machine évaporatoire. C'est une zone d'accumulation des eaux salées durant cette période de l'année ; elle est marquée en couleur bleue sur l'image (Fig. 28) et occupe une superficie de 471 hectares (0,89 %).

4. 4.5. Pertinence de la classification

Pour valider la classification et voir sa pertinence, nous avons établi la matrice de confusion qui nous a permis de calculer le coefficient Kappa (Tableau 11):

Tableau 11. Matrice de confusion établie pour les neuf classes

Les classes	SNSSCB	SNCCP	SB	JCH	SCIAVH	VCHTD	SNCP	VCHD	VH	Total
SNSSCB	91.76	1.89	4.89	0.80	00	00	00	00	0.11	4058
SNCCP	1.46	97.75	0.96	0.18	00	00	00	00	00	1473
SB	5.31	0.29	94.15	00	00	00	00	00	00	6813
JCH	1.01	0.07	00	97.11	0.16	0.55	00	0.24	3.51	3164
SCIAVH	00	00	00	0.22	95.89	0.18	1.59	0.24	2.70	1368
VCHTD	00	00	00	00	00	87.2	00	5.49	00	500
SNCP	00	00	00	0.22	0.63	00	88.86	00	9.23	4634
VCHD	00	00	00	0.62	1.11	12.07	00	94.03	0.02	486
VH	00	00	00	0.84	2.22	00	9.55	00	84.43	22673
Total	3970	1375	7008	2251	632	547	2450	419	26517	45169

La matrice de confusion montre que presque la totalité des pixels affectés à ces classes ont été bien classés. Les faibles confusions constatées ne dépassent pas les 10 % pour la majorité des classes.

Les confusions les plus élevées ont été retrouvées pour les classes VCHTD (classe 6), SNCP (classe 7) et VH (classe 9). La confusion de la classe VCHTD est faite avec la classe VCHD qui lui est très proche, alors que la confusion entre les deux classes 7 et 9 peut être expliquée par la présence de la salinité dans certains types de sols de la classe 7 (SNCP) conduisant ainsi une réponse spectrale proche de celle de la classe 9. Cette dernière est caractérisée par des sols salés à végétation halophyte.

Les erreurs associées à la matrice de confusion expriment la précision pour le réalisateur et la précision pour l'utilisateur (Tab. 12). Il apparaît que la qualité de la précision pour l'utilisateur diffère de la qualité de précision du réalisateur. Dans notre cas, la plus part des valeurs sont au minimum supérieures à 80 %.

La classe de la végétation halophyte qui présente le risque le plus élevé de se tromper pour le réalisateur (15,57 %) montre un risque presque nul pour l'utilisateur (1.26 %). D'un autre côté, on retrouve des classes qui ont un risque très faible pour le réalisateur contre un risque relativement plus élevé de se tromper pour l'utilisateur ; c'est le cas de la classes des sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte et la classe des sols nu cultivés de la plaine.

Tableau 12. Qualité de précision des classes

Classes	Précision pour le réalisateur (%)	Erreur d'excédents (%)	Précision pour l'utilisateur (%)	Erreur de déficits (%)
SNSSCB	91.76	8.23	89.77	10.23
SNCCP	97.75	2.25	91.25	8.75
SB	94.15	5.85	96.84	3.16
JCH	97.11	2.89	69.09	30.91
SCIAVH	95.89	4.11	44.30	55.70
VCHTD	87.2	12.8	95.40	4.60
SNCP	88.86	11.14	46.98	53.02
VCHD	94.03	5.97	81.07	18.93
VH	84.43	15.57	98.74	1.26

La valeur du coefficient de Kappa estimé dans notre cas est de 79,27 % ; sachant que la valeur critique de ce dernier au-delà de laquelle une classification est jugée acceptable est de 75 % (*Girard et Girard, 1999*), on peut donc dire qu'il y a une bonne correspondance entre la cartographie issue de la classification de données de la télédétection et les observations de terrain.

4. 4.6. Caractérisation numérique des classes

4. 4.6.1. Comportements spectraux des classes

Le comportement numérique selon la moyenne des trois canaux est représenté graphiquement pour comparer entre les différentes tendances spectrales des neuf classes définies.

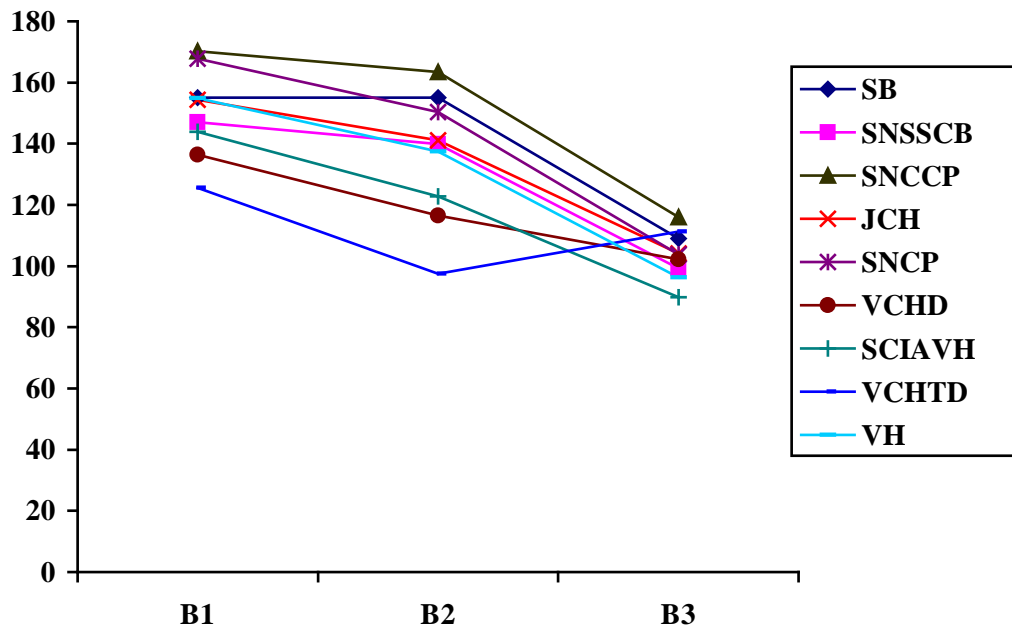


Figure 30. Comportement numérique des onze classes

SB : *Sebkhat Benziane* **SNSSCB** : *Sol non salé sombre céréaliers de Benziane*. **SNCCP** : *Sol nu claire céréaliers de la plaine*. **JCH** : *Jachères*. **SNCP** : *Sols nu cultivé de la plaine*. **VCHD** : *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures*. **SCIAVH** : *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte*. **VCHTD** : *Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes*. **VH** : *Végétation halophyte*.

- **La végétation chlorophyllienne** : Le comportement spectral de cette division diffère nettement de l'ensemble des autres classes. elle montre des courbes concaves ascendantes à droite bien visibles pour la classe à végétation chlorophyllienne très dense.

Plus rapprochée à ces deux classes, on retrouve la classe des sols irrigués et cultivés essentiellement en artichaut avec présence de végétation halophyte (SCIAVH). En effet, même si l'allure est différente, ces trois classes constituent un groupe à part qui s'écarte relativement par rapport à l'ensemble des autres classes.

Ce rapprochement entre les deux classes chlorophylliennes et la classe SCIAVH revient, au fait, à la présence d'une végétation chlorophyllienne non négligeable due à la présence des plants d'artichaut en fin de cycle et l'existence d'une végétation naturelle assez dense suite à la présence d'eau.

- **Les sols non salés sombres céréaliers du plateau de Benziane (SNSSCB) et ceux de la classe des jachère (JCH) :** présentent un comportement spectral d'une forme semblable convexe, presque constante pour les deux bandes du visible vers une déflexion descendante pour l'infrarouge.
- **Les sols non salés sombres céréaliers du plateau de Benziane (SNSSCB):** montrent un comportement spectral d'une forme convexe, presque constante pour les deux bandes du visible vers une déflexion descendante pour l'infrarouge.
- **La végétation halophyte :** cette classe montre un comportement spectral identique de forme convexe décroissante dans le sens b1, b2 et b3 est intermédiaire entre les sols clairs et les sols sombres.
- **Les deux classes des sols nus cultivés de la plaine (SNCP) et celle des sols nus clairs céréaliers de la plaine (SNCCP) :** montrent un comportement spectral d'une forme similaire convexe, presque constante pour les deux bandes du visible vers une déflexion descendante pour l'infrarouge. Notons que les sols clairs montrent les valeurs les plus élevées des comptes numériques.
- **La classe de Sebkhath Benziane :** cette classe présente de croûte de sel en été montre un comportement spectral d'une forme convexe, avec des valeurs de comptes numériques élevées. C'est la seule classe qui montre une valeur des comptes numérique plus élevée en b2 qu'en b1.

4. 4.6.2. Evolution des indices en fonction des aires d'entraînement

4. 4.6.2.1. Les indices caractérisant le sol

La figure 31 montre l'évolution des indices caractérisant le sol (IS : indice de salinité (Douaoui et al., 2006) ; IBc^2 : indice de brillance) en fonction des classes. Pour l'indice de salinité (IS), on constate que les faibles valeurs de IS sont celle des sols non salés de Benziane et celles de la végétation chlorophyllienne, et prend ses valeurs maximales avec les classes des sols nu cultivés de la plaine (SNCP), les sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut (SCIAVH) et celle de la végétation halophyte (VH).

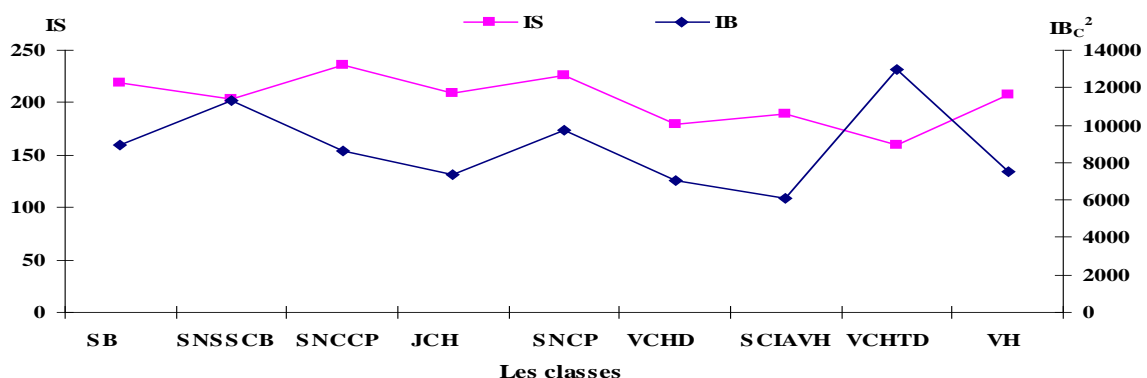


Figure 31. Evolution d'indice de brillance, et celui de salinité en fonction des aires d'entraînement

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine. JCH : Jachères. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. SCIAVH : Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

L'évolution de l'indice de brillance (IBC^2) en fonction des zones d'entraînement montre l'existence d'un ordre de croissance allant des sols sombres (SNSSCB) jusqu'aux sols clairs (SNCCP) et une décroissance après avoir atteint le pic au niveau de la végétation chlorophyllienne (VCHTD) (fig. 31).

Cette tendance montre qu'il est possible de détecter les sols salés et très salés des sols qui ne le sont pas par le calcul et la combinaison des indices.

Ce constat a été également confirmé par le calcul de l'indice de rougeur IR et celui de couleur IC qui montrent des valeurs élevées avec les sols sombres (SNSSCB) et les sols céréaliers de la plaine (SNCCP). Alors que les faibles valeurs sont favorisées par les classes de la végétation chlorophyllienne (VCHD et VCHTD) (fig. 32).

Par ailleurs, l'indice de couleur (IC) qui a permis de bien différencier la classe de la végétation chlorophyllienne très dense des autres classes, ainsi qu'entre les deux classes des sols non salés (SNSSCB) et celles des sols salés (SCIAVH) (fig. 32).

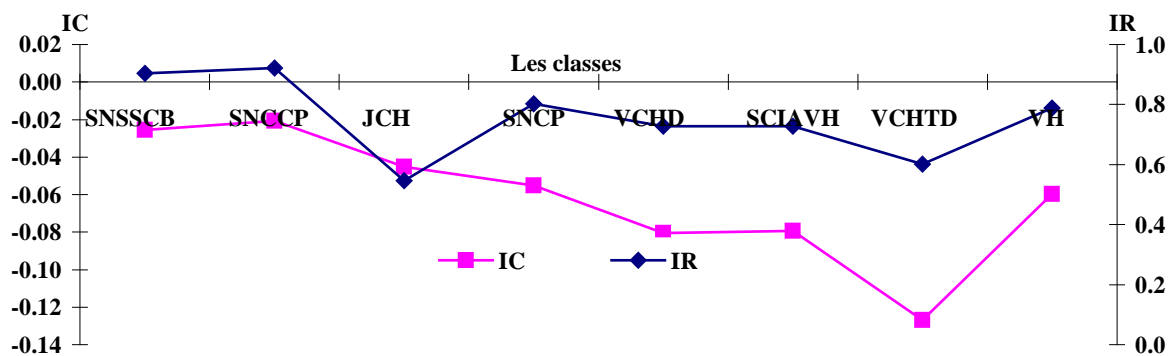


Figure 32. Evolution d'indice de couleur, et celui de rougeur en fonction des aires d'entraînement

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine. JCH : Jachères. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. SCIAVH : Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

4. 4.6.2.2. Les indices de végétation

Les indices de végétation (le MSAVI, le RVI, le TSAVI et le NDVI) montrent une tendance qui s'oppose à celle des indices liés au sol, allant des sols nus jusqu'à la végétation dense au niveau des périmètres irrigués. On constate également que le classement pour les classes définies a été respecté pour les différents indices (tab. 13).

Tableau 13. Indices de végétation moyens aux points échantillonnés des classes définies

CLASSE	NDVI	RVI	TSAVI	MSAVI
SNSSCB	-0,17	0,71	-0,65	-0,41
SNCCP	-0,17	0,71	-0,62	-0,41
JCH	-0,15	0,74	-0,63	-0,35
SNCP	-0,18	0,69	-0,65	-0,45
VCHD	-0,06	0,88	-0,57	-0,14
SCIAVH	-0,15	0,73	-0,66	-0,37
VCHTD	0,07	1,15	-0,46	0,12
VH	-0,18	0,70	-0,66	-0,42

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine. JCH : Jachères. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. SCIAVH : Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

D'une façon générale, les valeurs les plus élevées se trouvent dans les deux classes à végétation chlorophyllienne dense et très dense, ce qui reflète la bonne estimation de ces indices pour le couvert végétal. Les faibles valeurs des indices de végétation sont probablement liées à la date de prise de l'image (Fig. 33), ou reviennent au fait que les points échantillonnés seraient pour une bonne partie prélevés dans des endroits où la couverture végétale est très faible même s'ils appartiennent aux périmètres irrigués, c'est le cas des sols laissés en jachère.

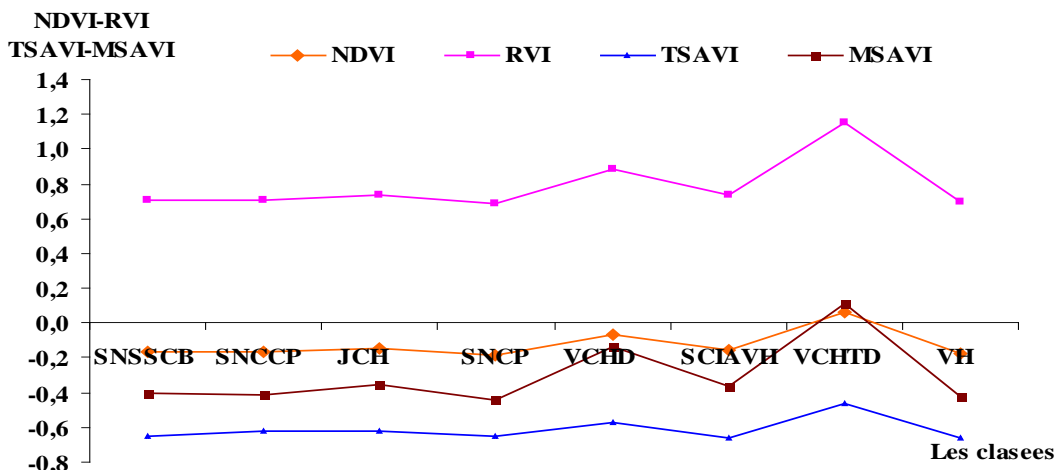


Figure 33. Evolution d'indices de végétation en fonction des aires d'entraînement

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine. JCH : Jachères. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. SCIAVH : Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

Le calcul des indices de végétation WdVI et le PVI montrent des valeurs négatives pour tous les sols, même pour les cultures irriguées, ce qui reflète leur mauvaise estimation du couvert végétal aux faibles densités voir même aux fortes densités (fig. 34).

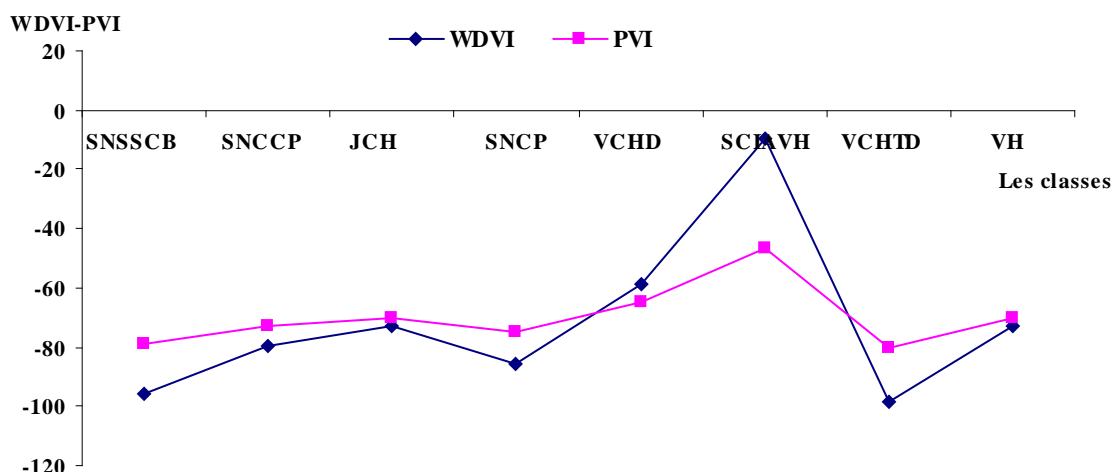


Figure 34. Evolution d'indices de végétation en fonction des aires d'entraînement

SNSSCB : Sol non salé sombre céréaliers de Benziane. SNCCP : Sol nu claire céréaliers de la plaine. JCH : Jachères. SNCP : Sols nu cultivé de la plaine. VCHD : Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures. SCIAVH : Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte. VCHTD: Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes. VH : Végétation halophyte.

Chapitre V :

**Caractérisation des états de surface
et leur confrontation avec
les données de télédétection**

CHAP. V. Confrontation des données de terrain aux celles de la télédétection

5. 1. Caractérisation des états de surface de la plaine

Les résultats trouvés dans le chapitre précédent ont montré qu'il existe des zones homogènes pouvant être caractérisées par leurs états de surfaces respectifs qui sont bien corrélées aux données de la télédétection. Un tel résultat nous a amené à décrire de façon détaillée les composantes de ces états de surfaces qui constituent les objets ou les éléments de surface ou encore les états de surface élémentaires (Douaoui, 2005).

Il est connu que les surfaces des sols des régions arides et semi-arides sont souvent hétérogènes et composées de différentes plages, qui se distinguent à l'oeil nu par leur composition, leur couleur, leur granulométrie, leur microrelief, leur structure.... L'étude d'un site doit pouvoir rendre compte de cette organisation de la surface en décrivant les états de surfaces élémentaires qui la composent (Escadafal, 1989).

La situation actuelle des sols de la plaine du bas Chélif résulte de l'interaction entre les caractéristiques du milieu et de sa longue exploitation par l'homme.

Quelles sont donc ces conditions de surface et pourquoi ont-elles un rôle si central dans la description spatialisée pour ensuite la reconnaissance par télédétection ? Il s'agit d'un ensemble de facteurs qui sont communément regroupés sous le terme d'état de surface.

Dans la plupart des études, l'état de surface est vu comme un ensemble d'indicateurs visuels en étroite relation avec les tous premiers centimètres du sol. Casenave et Valentin (1989), défini l'EDS par un ensemble d'indicateurs observables à l'œil nu et décrivant la couverture du sol et ses premiers centimètres.

Selon (Jauffret, 2001), l'état de la surface du sol est un indicateur, qui est en premier lieu le reflet de " l'état de santé du sol ", et qui aide l'observateur dans le diagnostic de la dégradation, de la désertification et de la régénération du milieu. La classification des croûtes proposée par Valentin et Bresson (1992) en est un des principaux exemples. Ces auteurs sous-entendent ce qui est explicité par Boiffin et al. (1988) : "Ces propriétés (de surface, conditionnant les débits de ruissellement) sont sous la dépendance des caractéristiques hydriques et structurales des couches superficielles du sol".

Ce rôle prépondérant de la couche superficielle du sol est accepté de façon générale dans la littérature, même si l'épaisseur de cette couche varie selon les études de 20 cm, aux tous premiers millimètres, ou en passant par les premiers centimètres (Wassenaar, 2001).

Parfois, le terme "état de surface", semble sous-entendre qu'il comprend tout aspect d'intérêt hydrodynamique présent à la surface du sol (Lelong et al., 1993 ; Hachicha et al., 1996).

Le concept " état de surface ", employé dans ces études, fait référence soit aux différents types de croûtes de surface, soit à l'humidité de la partie superficielle du sol (Dewez et Dautrebande, 1992) soit à la combinaison de variables de recouvrement de la surface du sol telles que : la rugosité, la végétation et la pente (Roose et al, 1978 ; Boiffin, 1984; Lelong et al., 1993; Roose et al, 1990), la pierrosité et l'activité de la mesofaune du sol (Corbane 2006).

En définitive, la définition de l'état de surface diffère suivant les auteurs et dépend surtout fortement du milieu concerné. Pour chaque milieu étudié il semble possible de définir un nombre limité de variables qui à elles seules déterminent la quasi-totalité des états de surface présents et leur variabilité.

La reconnaissance et le prélèvement des échantillons qui ont été effectués durant la période de l'été 2006 nous a conduit à employer un ensemble de composantes de couverture du sol décrivant ses premiers centimètres tel que défini par Casenave et Valentin (1989). Pour ce faire, nous nous sommes basés sur une fiche descriptive des états de surface établie par Douaoui (2005) spécifique à notre zone d'étude.

5. 1. 1. L'occupation du sol

L'occupation du sol peut être succinctement définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées (FAO, 1998). Elle constitue un facteur clé du développement durable.

La carte de l'occupation du sol est un paramètre déterminant de l'utilisation et de la gestion du territoire. Elle est susceptible d'éclairer toute prise de décision d'aménagement sur le territoire et d'élaborer les grandes orientations en matière de développement régional. Cette carte est un outil indispensable pour l'aménagement du territoire, pour une utilisation optimale (Bentekhici, 2006).

Les sols du Bas-Chélif sont soit occupés par l'agriculture (pratique agricoles et de mise en culture), soit abandonnés pour être occupés par la végétation halophyte. Ces types d'occupation réagissent différemment avec le rayonnement solaire et possèdent par conséquent différentes réponses spectrales.

L'agriculture concerne essentiellement :

- les vergers d'agrumes et d'oliviers dont la date de plantation remonte le plus souvent à la période coloniale. Ces vergers sont irrigués et se localisent le plus souvent dans les périmètres de Oued Rhiou, Djidiouia et Ouarizane.

- les cultures maraîchères irriguées (melon, pastèque, artichaut, oignon ...) se concentrent au bord des lits d'oueds.

- les cultures céréalières en sec se trouvent principalement sur les sols calcimagnésiques du plateau de Benziane.

La carte d'occupation du sol que, nous avons établie (fig.35) à partir des données recueillies sur le terrain lors de l'échantillonnage de juillet-août 2006, montre une occupation de 14 % par les cultures maraîchères, 32 % par les céréales, 5 % par la jachère, 25 % par la végétation halophyte et 7 % sont des sols labourés.

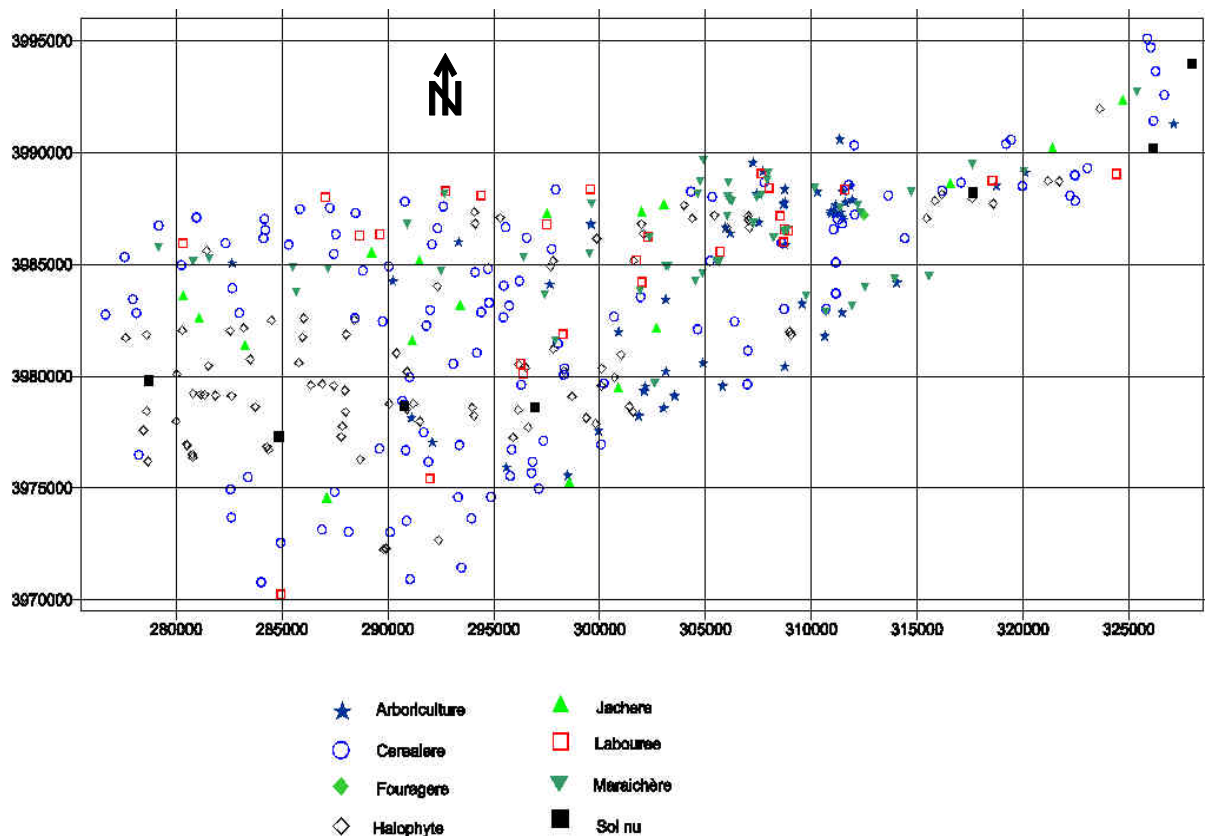


Figure 35. Occupation des sols de la plaine du Bas-Chéliff

Concernant la végétation naturelle, les sols très salés abandonnés sont couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps. En été, certains types de sols, tels que ceux de la Gaa sont presque dépourvus de végétation.

Pendant, on remarque une faible diversité floristique dominée par les espèces de dégradation halophytes ou les espèces post-culture.

L'espèce halophyte la plus abondante est sans doute *Suaeda fructuosa* qui peut se développer sur des sols très salés. *Salicornia fructuosa* est aussi abondante dans les sols très salés des bas fonds où persiste toujours une certaine humidité.

D'autres espèces, notamment *Salsola vermiculata*, semble être aussi très répandue dans la zone d'étude. La grande extension de ce type de faciès est peut-être liée à la large amplitude édaphique de *Salsola vermiculata* (Killian, 1953 in Djebaili et al, 1982) qui tolère des taux en argiles et limons importants et une salinité moyenne (Adi, 2001). *Peganum harmala* liés à des pratiques de cultures plus ou moins localisées. L'espèce *Cynodon dactylon* caractérise les sols à surface perturbée par la culture ou une autre cause permettant d'ouvrir la surface du sol (Lehouerou, 1995)

Il existe d'autres espèces plus ou moins résistantes à la salinité mais de façon moins fréquentes, telles que : *Avena sterilis*, *Beta maritima*, *Calendula arvensis*, *Phalaris paradoxa*, *Atriplex halimus*...

La dégradation semble être généralement liée à la forte salinité du milieu, et à l'action de l'homme (mise en culture, mauvaise maîtrise des techniques d'irrigation), accentuée par l'aridité climatique et édaphique.

De nombreuses études (Aidoud., 1989; Rognon., 1994; Lehouerou., 1995; Barbero., 1990; Benabadji et Bouazza., 1998, 2000, 2002; Quezel et Médail., 2003) ont montré que l'action anthropozoiïque est le principal facteur de dégradation qui conditionne l'installation des formations végétales dégradées. Au sens de Lehouerou, 1995 ; notre zone d'étude marque un stade de dégradation très avancé, il s'agit d'une végétation dégradée, cultures ou jachères.

5. 1. 2. Le recouvrement de la végétation

Chaque formation végétale est caractérisée par un recouvrement de sa végétation déterminé par une ou deux espèces physionomiquement dominantes (tab. 14).

Le recouvrement de la végétation donne une information sur l'état actuel de la végétation et constitue le premier indicateur utilisé lorsqu'on étudie l'évolution dans le temps du couvert végétal, la régression de ce couvert, constitue un signe essentiel de la désertification biologique (Lehouerou., 1968; Aidoud et al, 1999; Jauffret, 2001 ; Hourizi., 2004). Selon l'état de dégradation du recouvrement végétal, on a des signatures spectrales différentes. L'analyse des données montre qu'il existe cinq classes de recouvrement occupant naturellement les terrains.

01- Recouvrement très dense de la végétation > 75 % : correspondant aux recouvrements les plus élevés qui représente une végétation très dense, caractérisant les faciès à *Suaeda fructuosa* et *Salsola vermiculata*. Ce recouvrement n'est pas représentatif des formations végétales de la zone d'étude, elle n'est que très localement représenté.

02- Recouvrement dense de la végétation 50 % a 75 % : représente une végétation dominée par les faciès à *Suaeda fructuosa* avec un recouvrements dense de 50 à 75 %.

03- Recouvrement moyen de la végétation 25% a 50 % : caractérise les formations les plus ou moins dégradées, avec un recouvrement moyen de 25 à 50 %, leur physionomie est caractérisée par la codominance des espèces de dégradation principalement *Sueda fructuosa* et *Salsola vermiculata*.

04- Recouvrement faible de la végétation 5% a 25% : représente un état plus avancé de dégradation par rapport à la classe précédente, avec un recouvrement faible de 5 à 25 %. Les faciès sont dominés principalement par les formations dégradées à base de *Sueda fructuosa* et *Salsola vermiculata* associées à d'autres espèces telle que *Peganum harmala*...etc.

05- Recouvrement très faible de la végétation < 5 % : représente les formations les plus dégradées avec un recouvrement inférieur à 5%. Cette classe de recouvrement reflète la dégradation très avancée du couvert végétal.

Tableau 14. Recouvrement de la végétation par type de faciès

Recouvrement	Faciès de végétation	%
< 5%	<i>3 Faciès a Sueda fructuosa</i>	2
	<i>1 Faciès a Zizphus lotus</i>	2
	<i>1 Faciès mixte a Sueda fructuosa et Piganum harmala</i>	2
5% a 25%	<i>3 Faciès a Piganum harmala</i>	20
	<i>1 Faciès a Piganum harmala</i>	5
	<i>3 Faciès a Sueda fructuosa</i>	15
	<i>2 Faciès a Salsola vermiculata</i>	10
	<i>12 Faciès a Sueda fructuosa</i>	10
	<i>1 Faciès mixte a Sueda fructuosa et Piganum harmala</i>	10
	<i>7 Faciès a Sueda fructuosa</i>	20
	<i>3 Faciès a Salsola vermiculata</i>	20
25% a 50 %	<i>4 Faciès a Salsola vermiculata</i>	15
	<i>6 Faciès a Sueda fructuosa</i>	30
	<i>2 Faciès a Salsola vermiculata</i>	30
	<i>4 Faciès a Sueda fructuosa</i>	40
50% a 75%	<i>1 Faciès a Salsola vermiculata</i>	40
	<i>3 Faciès a Sueda fructuosa</i>	60
	<i>5 Faciès a Sueda fructuosa</i>	70
> 75%	<i>1 Faciès a Sueda fructuosa</i>	80
	<i>1 Faciès a Salsola vermiculata</i>	90
	<i>1 Faciès a Sueda fructuosa</i>	90

5. 1. 3. Croûtes de surface

Le terme de croûte de surface fait référence à l'existence d'un micro horizon de la surface du sol à faible porosité et faible infiltrabilité. L'apparition des croûtes de surface est considérée comme une forme spécifique de dégradation structurale des sols (Valentin & Bresson, 1997). L'importance de l'encroûtement de surface confère à la surface du sol une certaine rugosité plus ou moins importante, ce qui donne un comportement spectral différent en fonction du développement de l'encroûtement (Douaoui, 2005).

On peut distinguer deux principaux types morphologiques de croûtes (Casenave & Valentin, 1989; Valentin & Bresson, 1992).

i) La croûte structurale:

Résulte d'une réorganisation in situ des fragments et particules produits par éclatement et désagrégation mécanique, sans déplacements importants, ni tri granulométrique. Elle se présente sous la forme d'une couche très fine de 1 à 5 mm d'épaisseur (Douaoui et al., 2004).

ii) La croûte sédimentaire :

Résulte d'un déplacement et d'un tri des particules lors d'un excès d'eau (flaquage et ruissellement). Elle se présente sous la forme d'une couche litée, épaisse (5 à plus de 10 mm) et surmontant généralement une croûte structurale. La limite entre ces deux couches est bien prononcée. Les conséquences majeures de la formation des croûtes sont la réduction de la capacité d'infiltration à la surface du sol (Boiffin., 1984 ; Douaoui et al., 2004), et le développement d'un pédoclimat défavorable a certaines espèces même si le climat général soit favorable (Kadi-Hanifi, 2003).

Sur notre terrain d'étude, L'encroûtement de surface est généralisé dans la plaine mais à différents degrés. Ce sont les sols en jachère qui sont les plus encroûtés. Quatre types de croûtes ont été décrites in situ dans le Bas-Chélif : la croûte structurale se localise surtout sur les reliefs dont l'épaisseur reste inférieure à 5 mm avec un pourcentage plus élevé de 55,92 %, la croûte sédimentaire avec un pourcentage de 44,07 % se trouve dans les dépressions dont l'épaisseur peut dépasser les 2 cm sur les jachères de longue durée. Les deux autres types de croûtes sont spécifiques aux sols salés ; la croûte de salinisation formée sur les pseudo-sables et la pellicule glacée formée sur les sols solonchacks défloculés (Douaoui, 2005).

5. 1. 4. La rugosité du sol

La rugosité a un effet sur la réponse spectrale par le fait qu'on mesure la réponse spectrale propre du sol, et la réponse des ombres sur un sol rugueux. Elle est en relation avec la longueur d'onde utilisée et la taille des différents aspects rugueux. La rugosité constitue un paramètre difficile à définir et à quantifier (King, 1977).

La rugosité détermine les irrégularités de surface et dépend de la structure du sol, de l'état de la végétation et aussi des méthodes d'exploitation culturale. Elle joue un rôle important dans les processus d'érosion, notamment l'érosion éolienne : atténuation de la force de frottement du vent sur le sol et donc diminution de sa vitesse.

En milieu cultivé la rugosité est souvent décomposée en une composante aléatoire, induite par les mottes de terre, et une composante périodique liée à la pratique culturale (Champion & Faivre, 1996). Du fait que ces deux composantes concernent différentes échelles, l'état de la rugosité peut varier avec le niveau d'observation.

Nous ne disposons pas de mesures quantitatives de cette variable, comme on peut les obtenir au sol à l'aide d'outils comme le rugosimètre (Courault, 1989). Sur le terrain, le niveau de rugosité est noté en trois classes ordinales (élevée ; moyenne ; et faible).

Tableau 15. La variabilité spatiale de la rugosité à l'échelle de la plaine

Rugosité	n	%
Faible	140	38.78
Moyenne	126	34.9
Elevée	95	26.31

5. 1. 5. L'humidité

En règle générale, la réflectance est inversement proportionnelle à l'humidité. Les domaines spectraux des hyperfréquences et de l'infrarouge thermique sont souvent utilisés pour caractériser l'état hydrique d'un sol (Bonn, 1996).

L'état d'humectation de la surface est noté en quatre classes : élevé (saturé), moyen, frais et sec. Un état d'humidité plus humide que sec renseigne sur l'état d'humidité superficielle du sol. Par contre l'état sec sans informations contextuelles ne fournit aucune information sur l'humidité en profondeur.

Pour les sols de la plaine, il ressort de l'analyse des données que plus de la moitié (53,97 %) des sites prospectés sont d'une humectation moyenne, qui pourrait être expliquée par les sols irrigués durant cette période de l'année et ceux des bas-fonds où il existe une nappe superficielle à faible profondeur, Les sols secs représentent 37,8 % et correspondent aux sols naturels avec une faible densité de recouvrement.

Tableau 16. La variabilité spatiale de l'humidité à l'échelle de la plaine

Humidité	n	%
Elevée	11	3.01
Moyenne	197	53.97
Frais	19	5.2
Sec	138	37.8

5. 1. 6. Les fentes de retrait

Sous l'effet de l'évaporation (dessiccation), le sol se fissure et les fentes de retrait deviennent apparente et peuvent atteindre des dizaines de centimètre de profondeur. Ce phénomène est d'autant plus important que les argiles gonflantes sont plus présentes (Douaoui, 2005).

Le tableau 17 montre que l'épaisseur de la fissuration peut souvent dépasser les 2 cm.

Tableau 17. Les classes de fentes de retrait obtenues

Classe de fentes de retrait	n	%
0-10 mm	8	25.81
10-20 mm	12	38.71
> à 20 mm	11	35.48

5. 1. 7. La couleur du sol

En télédétection, la couleur du sol influe sur la réponse spectrale et de ce fait, il existe une relation entre la couleur d'un sol nu et les valeurs des comptes numériques de l'image satellitaire qui peut servir à dresser des cartes de couleur des sols (Girard et Girard, 1999).

Les fortes valeurs de comptes numériques moyens on été observées pour les sols ayant une teinte plus claire (2.5 Y), alors que les sols ayant une teinte plus foncée (10 YR) présentent les faibles valeurs de comptes numériques moyens (tab. 18).

La couleur du sol selon le chroma (hue) montre que la teinte globale de la couverture pédologique du Bas-Chélif est compartimentée en quatre catégories. Elle varie du jaune rougeâtre (10YR-7.5YR-5YR) au jaune (2.5 Y) respectivement avec des pourcentages de 29,03 %, 11,06%, 8,93%, et 50,37).

Suivant la gamme des teintes Munsell, la clarté et la pureté varient respectivement de 3/3 à 6/4, 3/1 à 5/6, 3/3 à 6/8 et 3/4 à 6/4 respectivement pour les teintes (2.5 Y, 5YR ,7.5YR, 10YR)

Le groupe des individus sol ayant une teinte plus claire (2.5Y) possède une salinité moyenne élevée 1.25 ds/cm. Par contre, le groupe le plus foncé (10YR) renferme des sols ayan une salinité faible 0.11 ds/cm. (Tab. 18).

Tableau 18. La couleur selon le code Munsell (Relation avec la radiométrie et la salinité).

Hue	V_C	Couleur	n	%	CE 1/5	B1	B2	B3	N	%	CE 1/5
2_5Y	3_3	dark_olive_brown	1	0.25	3.20	106.68	99.98	85.67	117	29.03	1,25
	4_2	olive_brown	8	1.99	1.75						
	4_3	olive_brown	11	2.74	1.44						
	4_4	olive_brown	17	4.23	0.95						
	5_2	grayish_brown	2	0.50	0.55						
	5_3	lihg_t_olive_brown	50	11.69	1.21						
	5_4	lihg_t_olive_brown	27	5.72	1.33						
6_4	light_yellowish_brown	1	0.25	0.09							
5_YR	3_1	dark_reddishe_brown	1	0.25	0.25	104.11	102.33	89.07	47	11.66	0,61
	3_2	dark_reddishe_brown	1	0.25	0.12						
	3_4	dark_reddishe_brown	15	3.73	0.87						
	4_3	reddish_brown	5	1.24	1.36						
	4_4	reddish_brown	15	3.73	0.33						
	4_6	yellowish_red	5	1.24	0.29						
	5_4	reddish_brown	2	0.50	0.56						
5_6	yellowish_red	3	0.75	0.33							
7_5YR	3_3	dark_brown	1	0.25	0.13	103.71	101.36	87.93	36	8.93	0,75
	3_4	dark_grayish_brown	5	1.24	0.13						
	4_2	brown	1	0.25	0.32						
	4_3	brown	2	0.50	0.15						
	4_4	brown	8	1.74	0.19						
	4_5	brown	1	0.25	0.28						
	4_6	strong_brown	8	1.99	0.28						
	5_3	brown	1	0.25	1.32						
	5_4	brown	6	1.49	1.87						
	5_6	strong_brown	2	0.50	0.12						
6_8	redish_yellow	1	0.25	8.97							
10_YR	3_4	dark_yellow_brown	3	0.75	2.80	103.05	95.48	85.86	203	50.37	0,11
	3_6	dark_yellow_brown	1	0.25	0.23						
	4_1	dark_gray	1	0.25	0.30						
	4_2	dark_grayish_brown	28	6.97	1.95						
	4_3	brown	45	11.19	1.82						
	4_4	brown	29	7.21	0.96						
	4_6	dark_yellow_brown	8	1.99	1.05						
	5_2	graysh_brown	3	0.75	1.54						
	5_3	brown	19	4.73	1.31						
	5_4	yellowish_brown	31	7.71	1.30						
	5_6	yellowish_brown	10	2.49	0.61						
	5_8	yellowish , brown	2	0.50	0.72						
	6_2	light_brownish_gray	1	0.25	0.83						
	6_3	pole_brown	2	0.50	1.17						
6_4	light_yellowish_brown	1	0.25	0.19							

5. 1. 8. La structure

La structure de sol traduit l'organisation spatiale de l'ensemble des constituants du sol (argile, limon, sable...), ainsi que leur compaction. Généralement, les sols compacts sont détectables par la rareté du couvert végétal qui présente une réponse typique dans le visible et le PIR ainsi que par leur comportement thermique spécifique (Mulders et Girard, 1993).

Les différents types de structures décrites sur terrain sont représentée dans le tableau 19. Il apparaît que les structures compacts sont les plus dominantes ; ceci peut être expliqué par la présence élevée des argiles et une stabilité structurale médiocre (Douaoui et al., 2007).

Tableau 19. Les classes de la structure à l'échelle de la plaine

Structure	n	%
Friable	13	3.63
Particulaire	16	4.46
Moyennement compacte	175	48.88
Compacte	34	9.49
Très compacte	120	33.51

5. 1. 9. Les efflorescences salines

Dans certaines conditions particulières, le sol peut se couvrir de cristaux de sels solubles ; ils constituent ce qu'on appelle des efflorescences salines.

La présence d'efflorescences salines est l'une des caractéristiques des états de surface salins, de couleur claire à l'état sec. On les retrouve surtout dans les dépressions salées et les sols irrigués avec des eaux chargées en sels (Douaoui et al., 2007).

La présence des sels peut être décelée par la télédétection directement en cas des croûtes de sels ou d'efflorescences salines à la surface des sols (Mougenot, 1993 ; Khan et al., 2001).

Dans la plaine du Bas-Chélif, les observations sur terrain nous ont permis de distinguer quatre classes d'efflorescences salines : absente, faible, moyenne et importante.

Le tableau 20 montre qu'il n'y a, paradoxalement, presque pas d'efflorescences salines à une telle période de l'année qui serait la plus favorable à leur formation.

Tableau 20. Les classes d'efflorescences saline à l'échelle de la plaine

Efflorescences	n	%
Absentes	341	96.87
Faibles	6	1.7
Moyenne	4	1.13
Importante	1	0.28

5. 2. La confrontation des données

5. 2.1. Confrontation avec les données de télédétection

Cette confrontation a été faite entre les données de terrain et de laboratoire (salinité) d'une part, et les données de télédétection d'autre part. Dans ce sens, des corrélations ont été calculées, en premier lieu, sur des valeurs moyennes par classe de télédétection et en second lieu, sur les valeurs ponctuelles de télédétection correspondant aux points échantillonnés et décrits.

Les coefficients de corrélations utilisés sont celui de Pearson dans le cas des variables quantitatives et celui de Spearman dans le cas des variables qualitatives. Le seuil de signification retenu est 5 %.

5. 2.1.1. Confrontation avec les données par classe de télédétection

Les corrélations ont été établies sur les moyennes par classe de télédétection. L'absence de quelques éléments de surface (les fentes de retrait, les efflorescences, et le recouvrement) dans les tableaux 23 et 24 est due au fait que le nombre des points appartenants aux classes de télédétection correspondantes est non significatif pour le calcul des corrélations.

5. 2.1.1.1. Les différents indices de sol et de végétation

Les principaux résultats obtenus montrent l'existence de fortes corrélations au sein et entre les indices liés aux sols et les indices de végétation (tab. 21).

Comme corrélations positives entre les indices liés au sol, on retrouve les valeurs de : 0,81 entre IBC^2 et IC, 0,60 entre IBC^2 et IR, 0,98 entre IS et IBC^2 , 0,84 entre IS et IC, et 0,74 entre IR et IC.

Comme corrélations positives entre les indices de végétation, on peut citer les valeurs de : 0,98 entre RVI et TSAVI, 0,90 entre PVI et TSAVI, 0,97 entre NDVI et PVI, 0,98 entre NDVI et TSAVI, 0,99 entre le NDVI et (RVI avec MSAVI).

En ce qui concerne les corrélations négatives entre les indices liés aux sols et les indices de végétation, on peut citer à titre non exhaustif les valeurs de : -0,72 entre NDVI et IBC^2 , -0,85 entre NDVI et IS, -0,86 entre IBC^2 et PVI, -0,88 entre IC et RVI et -0,88 entre IC et PVI.

Tableau 21. Matrice de Corrélation entre les différents indices de sol et de végétation

Variables	NDVI	IBC^2	IC	IR	IS	RVI	PVI	TSAVI	MSAVI
NDVI	1.00	-0.72	-0.80	-0.56	-0.85	0.99	0.97	0.98	0.99
IBC^2		1.00	0.81	0.60	0.98	-0.71	-0.86	-0.57	-0.74
IC			1.00	0.74	0.84	-0.80	-0.88	-0.69	-0.80
IR				1.00	0.60	-0.54	-0.63	-0.48	-0.57
IS					1.00	-0.84	-0.95	-0.73	-0.86
RVI						1.00	0.96	0.98	0.99
PVI							1.00	0.90	0.97
TSAVI								1.00	0.97
MSAVI									1.00

5. 2.1.1.2. Les éléments de surface et les comptes numériques moyens

Les coefficients de corrélation ont été calculés entre les trois bandes (B1, B2, B3) et les éléments de surface par classe de télédétection.

On constate que l'occupation du sol et l'humidité agissent dans le même sens, elles sont corrélées négativement avec les deux bandes du visible b1 et b2 avec "r" -0,61, -0,71 pour l'occupation et de -0,46, -0,55 respectivement. Ceci explique que la réflectance est inversement proportionnelle à l'humidité ainsi qu'à l'occupation du sol.

On constate aussi de bonnes corrélations négatives entre la couleur et les trois bandes (B1, B2, B3), ceci explique que les sols à couleur sombre diminuent la réflectance contrairement aux sols claires qui augmentent la réflectance. Par opposition, on retrouve des corrélations positives entre la rugosité et les trois bandes (B1, B2, B3), marquant l'effet de la

rugosité qui augmente la réflectance. Ce résultat est contraire à ce qui se trouve dans la littérature (Douaoui, 2005) où la rugosité par l'effet ombre qu'elle induit diminue la réflectance.

En effet, les bonnes corrélations qui caractérisent la dépendance entre les bandes (B1, B2, B3) et les éléments de surfaces (positivement ou négativement), ont conduit plusieurs chercheurs à la définition de différents indices spécifique à chaque variable a partir de la combinaison entre les différents canaux. Citons à titre d'exemples ; l'indice de coloration (Escadafal et Pouget, 1987), l'indice de forme lié à la teinte (Escadafal et al., 1994), l'indice de rougeur (Mannière et al., 1993 ; Pouget et al., 1991), l'indice de brillance qui traduit les teintes des sols nus et des roches (Deshayes et Maurel, 1990)...etc.

Tableau 22. Corrélation entre les éléments de surface et la radiométrie

Variables	B1	B2	B3
La couleur	0.49	-0.60	-0.45
La structure	-0.01	-0.20	-0.41
L'humidité	-0.46	-0.55	-0.09
La rugosité	0.46	0.37	0.18
L'occupation du sol	-0.61	-0.71	-0.01

5. 2.1.1.3. Les éléments de surface

Les éléments de surface qui sont les plus significativement corrélés entre elles et qui sont intéressantes à citer à notre sens sont (tab. 23) :

- La corrélation la plus élevée est enregistrée entre l'occupation du sol et la couleur. L'explication d'une telle relation peut être expliquée par le fait que les sols sombres sont également les plus pourvus en matière organique (d'où leur couleur) et sont par conséquent les plus fertiles, les moins salés et donc les plus propices au développement du végétal.

- l'occupation du sol est également corrélée positivement avec l'humidité, ce qui montre l'importance de l'humidité sur le développement de la végétation ;

- la rugosité est inversement proportionnel à l'humidité, ce qui apparaît logique car les sols labourés qui ont une rugosité élevée ne sont pas irrigués.

Tableau. 23. Matrice de corrélation entre les éléments de surface

Variables	La couleur	La structure	L'humidité	La rugosité	L'occupation do sol
La couleur	1.00	-0.49	0.61	-0.37	0.84
La structure		1.00	0.01	-0.30	-0.35
L'humidité			1.00	-0.50	0.74
La rugosité				1.00	-0.46
L'occupation do sol					1.00

5. 2.1.1.4. Les indices et les éléments de surface

Il ressort de l'analyse des résultats des corrélations obtenus entre les éléments de surface et les indices (tab. 24) que la couleur, l'humidité, et l'occupation du sol ont un comportement relativement proche du moment qu'elles sont corrélées négativement avec les indices liés aux sols et positivement avec les indices de végétation. Ceci explique clairement que la présence de végétation réduit l'influence du sol sur les données spectrales.

Par opposition, la rugosité est corrélée positivement avec les indices liés aux sols, et négativement avec les indices de végétation. Ceci explique que la présence de végétation réduit également la rugosité.

Tableau 24. Corrélation entre les indices et les éléments de surface

Variables	NDVI	IC	IR	RVI	TSAVI	MSAVI	PVI	IS	IBc ²
La couleur	0.53	-0.74	-0.84	0.53	-0.15	0.53	0.73	-0.49	-0.62
La structure	0.11	0.51	0.54	0.11	0.38	0.11	-0.27	0.01	0.27
L'humidité	0.55	-0.55	-0.46	0.55	0.27	0.55	0.55	-0.46	-0.46
La rugosité	-0.82	0.27	0.46	-0.82	-0.46	-0.82	-0.46	0.46	0.37
L'occupation do sol	0.76	-0.77	-0.87	0.76	0.37	0.76	0.85	-0.61	-0.66

5. 2.1.2. Confrontation avec les données ponctuelles

La confrontation est faite ici de façon ponctuelle sur la totalité des 400 points échantillonnés.

5. 2.1.2.1. Les différents indices

L'analyse du tableau des résultats de corrélation obtenus sur la totalité des 400 points échantillonnés (tab.25) montre l'existence de fortes corrélations négatives entre les indices liés aux sols (IC, IBc², IS, IR) et les indices de végétation (NDVI, RVI, TSAVI, MSAVI, PVI), ce qui est tout à fait logique puisque les premiers indices traduisent les sols plus ou moins nus et les seconds indices expriment, contrairement au premiers indices, la densité du couvert végétal.

On constate également que les meilleures corrélations intra-indices sont obtenues entre les indices de végétation plutôt qu'entre les indices liés au sol.

Tableau 25. Matrice de Corrélation entre les différents indices

	NDVI	IC	IR	RVI	TSAVI	MSAVI	PVI	IS	IBc ²
NDVI	1.00	-0.59	-0.41	0.99	0.92	0.99	0.90	-0.64	-0.47
IC		1.00	0.63	-0.60	-0.30	-0.57	-0.79	0.76	0.74
IR			1.00	-0.40	-0.23	-0.41	-0.55	0.54	0.54
RVI				1.00	0.92	0.97	0.89	-0.62	-0.45
TSAVI					1.00	0.91	0.67	-0.30	-0.10
MSAVI						1.00	0.90	-0.65	-0.48
PVI							1.00	-0.90	-0.80
IS								1.00	0.98
IBc ²									1.00

5. 2.1.2.2. Les éléments de surfaces et les comptes numériques moyens

La recherche des corrélations entre les éléments de surface et les caractéristiques spectrales montre que les corrélations significatives ont été obtenues ;

- entre la rugosité et le (B1, B2) négativement avec des valeurs de -0,16 et -0,13 respectivement contrairement à ce qui a été trouvé dans la confrontation par les moyennes des classes. Ceci nous amène à dire que la rugosité diminue la réflectance dans le visible et le rouge. C'est à dire que plus la surface est rugueuse plus la réflectance est faible citant le cas des sols labourés.

- entre l'occupation du sol et le (B1, B2, B3) négativement avec des valeurs du coefficient "r" -0,38, -0,46, et -0,26 respectivement. C'est la même tendance avec le recouvrement mais les corrélations négatives sont faibles.

Ces résultats montrent que la réflectance est inversement proportionnelle à l'occupation du sol et au recouvrement, ainsi qu'avec l'humidité.

Tableau 26. Corrélation entre les éléments de surface et les comptes numériques moyens sur la totalité des 400 points échantillonnés

Variables	B1	B2	B3
La couleur	-0.07	-0.09	-0.07
La structure	-0.02	-0.04	-0.14
L'épaisseur de croûte	0.04	-0.02	-0.04
Les fentes de retraits	-0.15	-0.15	0.04
L'humidité	-0.07	-0.13	-0.08
La rugosité	-0.16	-0.13	0.02
Les efflorescences	0.03	00	-0.03
Le recouvrement	-0.12	-0.15	0.05
L'occupation do sol	-0.38	-0.46	-0.26

5. 2.1.2.3. Les éléments de surface

L'analyse des corrélations entre les différents éléments de surface sur la totalité des points échantillonnés nous permet de noter que (tab. 27) :

- la corrélation la plus élevée est enregistrée entre l'humidité et l'occupation du sol positivement de (+0,74), ce qui semble raisonnable car les sols irrigués marquent le plus souvent une occupation importante.
- une corrélation entre les fentes de retrait et l'humidité positivement de (+0,48) ce qui marque surtout l'effet de gonflement d'argile qui favorise l'apparition des fentes de retrait et la fissuration après la dessiccation.
- entre l'occupation du sol et la rugosité de (-0,45), ceci explique que la rugosité agit d'une manière inverse à l'occupation du sol sur la réflectance, en effet, les sols nus et les sols labourés ont une rugosité élevée contrairement aux sols des périmètres irrigués.

Autres corrélations significatives sont celles caractérisant la dépendance :

- positivement entre les fentes de retrait et la structure (+0,37). En effet, plus la structure du sol est friable ou particulaire plus il y a l'absence des fentes de retrait et inversement, et négativement entre l'épaisseur de croûte et la rugosité (-0,28) ainsi que les fentes de retrait (-0,32).

Tableau. 27. Matrice de Corrélation entre les éléments de surface

Variables	La couleur	Struct-ure	Epaiss. croûte	Fentes d.retrait	humidité	Rugosité	Efflorescences	Recouvrement	Occupation
La couleur	1.00	-0.06	0.00	-0.09	-0.02	0.02	0.04	0.00	0.04
La structure		1.00	0.08	0.37	0.09	-0.03	0.06	-0.15	-0.02
Epaisseur			1.00	-0.32	0.09	-0.28	0.05	0.07	-0.06
F. de retraits				1.00	0.48	0.61	0.17	-0.06	-0.36
L'humidité					1.00	0.02	-0.02	-0.11	0.19
La rugosité						1.00	0.00	-0.05	-0.45
Efflorescences							1.00	0.09	-0.13
Recouvrement								1.00	0.37
Occupation (sol)									1.00

5. 2.1.2.4. Les indices et les éléments de surface

Il est intéressant de noter que les éléments les plus corrélés avec les différents indices sont l'occupation du sol, et à un degré moins le recouvrement. (tab. 28).

- L'occupation du sol, présente les fortes valeurs de corrélation avec les différents indices. Ces corrélations sont négatives avec les indices liés aux sols (IC, IR, IS, IBC² de "r" - 0,47, -0,44, -0,43, -0,43 respectivement) et positives avec les indices de végétation (NDVI, RVI, MSVI, le PVI de "r" 0,26, 0,26, 0,26, 0,46 respectivement).

- De même, des corrélations positives ont été observées entre le recouvrement et les indices de végétation et négatives avec les indices liés aux sols, ce qui signifie que l'augmentation des indices de végétation est liée à l'augmentation du couvert végétal et inversement avec les indices liés aux sols .

Ces résultats obtenus entre les indices et l'occupation du sol, ainsi qu'avec le recouvrement font que la méthode d'application des indices peut faire l'objet d'une bonne estimation de la densité de végétation ainsi que la reconnaissance de l'occupation du sol.

Pour la couleur du sol, nous avons trouvé qu'elle est corrélée positivement avec l'indice de rougeur (IR), ce qui explique que les sols sombres marqués par un indice de rougeur (IR) élevée sont favorisés par des couleurs plus foncés.

Les bonnes corrélations trouvées entre l'humidité et les indices de couleur et de rougeur (positivement) montrent que la couleur et la rougeur du sol s'assombrissent avec l'augmentation de l'humidité et vis versa.

Des corrélations négatives ont été obtenues entre les fentes de retrait et les indices de végétation. Ceci est conforme avec le terrain où les fentes de retrait qui apparaissent dans les zones dégradées sont marquées le plus souvent par une faible couverture végétale.

Ce constat a été également observé entre la rugosité et les indices de végétation négativement, ceci signifie que la rugosité diminue dans les zones à fortes densités chlorophylliennes.

Tableau 28. Tableau des corrélations entre les indices et les éléments de surface

Variables	NDVI	IC	IR	RVI	TSAVI	MSAVI	PVI	IS	IBC ²
La couleur	-0.06	0.08	0.10	-0.06	0	-0.06	-0.1	0.08	0.08
La structure	-0.05	-0.05	-0.07	-0.05	-0.14	-0.05	0.03	-0.03	-0.05
L'épaisseur de croûte	-0.02	-0.09	0.14	-0.02	-0.05	-0.02	0.01	0.01	0
Les fentes de retraits	-0.13	0.09	0.09	-0.13	-0.14	-0.13	-0.13	0.13	0.15
L'humidité	-0.07	0.17	0.18	-0.07	-0.01	-0.07	0.12	0.1	0.11
La rugosité	-0.2	0.08	0.13	-0.2	-0.17	-0.2	-0.19	0.15	0.13
Les efflorescences	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.04	-0.03	0.02	0.01
Le recouvrement	0.23	-0.11	-0.14	0.23	0.17	0.23	0.17	-0.13	-0.12
L'occupation do sol	0.26	-0.47	-0.44	0.26	0.05	0.26	0.46	-0.43	-0.43

5. 2.2. Confrontation avec les données de la salinité

La salinité est l'un des principaux objets constituant une surface élémentaire et dont l'influence est très apparente sur les états de surface de façon générale (Metternicht et Zink, 2003 ; Fernandez-Buces et al., 2006) et de la plaine du Bas-Chéiff de façon particulière (Douaoui, 2005 ; Douaoui et al., 2006).

La confrontation a été faite entre les données de salinité mesurées sur des échantillons prélevés sur terrain aux données numériques de télédétection issues de l'image ASTER de 2005. Deux cas ont été retenus : le premier cas prend en compte la confrontation de la CE par classes de télédétection ; en second lieu, cette confrontation a été faite avec les données ponctuelles de la CE.

5. 2.2.1. Aux points échantillonnés par classe de télédétection

5. 2.2.1.1. La salinité et les différents indices de sol et de végétation

Les corrélations entre les différents indices (sol et végétation) restent faibles avec la salinité mesurée (conductivité électrique). Les corrélations les plus élevées ont été obtenues avec le NDVI, le TSAVI et le MSAVI comme indices de végétation et le IR comme indice lié au sol. Les corrélations étant toutes négatives entre la salinité et les indices de végétation, ce qui montre l'impact négatif de la salinité sur le développement de la végétation. Cette relation est également négative entre la salinité et l'indice de rougeur, ce qui confirme la faible salinité des sols sombres situés sur le plateau de Benziane et la périphérie de la plaine (tab. 29).

Tableau 29. Matrice de Corrélation entre les différents indices

Variables	NDVI	IBc ²	IC	IR	IS	RVI	PVI	TSAVI	MSAVI
CE 1/5	-0.31	0.01	-0.26	-0.35	0.12	-0.30	-0.18	-0.41	-0.32

5. 2.2.1.2. La salinité et les éléments de surface

Les résultats obtenus montre que la salinité est fortement corrélée négativement avec l'humidité (-0,61) et à un degré moins avec l'occupation du sol (-0,27), et positivement avec la rugosité (+0,61). Ceci explique que la salinité augmente la rugosité et diminue avec l'accroissement de l'humidité et de l'occupation du sol (tab. 30).

De plus, la salinité est faiblement corrélée négativement avec la couleur et la structure du sol (-0,17) ceci traduit la réalité du terrain où les sols salés sont marqués souvent par une couleur claire.

Tableau 30. Corrélation entre les éléments de surface et la salinité

Variables	CE 1/5
La couleur	-0.17
La structure	-0.17
L'humidité	-0.61
La rugosité	0.68
L'occupation do sol	-0.27

5. 2.2.1.3. La salinité et les comptes numériques moyens

Les 400 échantillons dont nous disposons ont été utilisés pour évaluer l'apport de la télédétection dans la cartographie de la salinité en tenant compte des classes définies. Le tableau 10, donne les caractéristiques statistiques de la conductivité électrique pour les différentes classes.

Les classes des sols cultivés a dominance d'artichaut, les sols nus, et la végétation halophyte montrent les valeurs moyennes de CE les plus élevée respectivement de 1.20 dS/m, 1.28 dS/m et 1.54 dS/m (tab.31).

Tableau 31. Valeurs de la CE 1/5 (dS/m) des classes de télédétection

Stat	SNSSCB	SNCCP	JCH	SNCP	VCHD	SCIAVH	VCHTD	VH
Moyenne	0.18	0.43	0.90	1.28	0.42	1.20	0.39	1.54
Ecart-type	0.19	0.94	1.58	1.34	0.49	1.93	0.30	1.73
Max	0.74	6.86	8.98	6.46	2.06	9.58	1.22	9.93
Min	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.07

SB : *Sebkhat de Benziane* SNSSCB : *Sol non salé sombre céréaliers de Benziane*. SNCCP : *Sol nu claire céréaliers de la plaine*. JCH : *Jachères*. SNCP : *Sols nu cultivé de la plaine*. VCHD : *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures*. SCIAVH : *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte*. VCHTD : *Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes*. VH : *Végétation halophyte*.

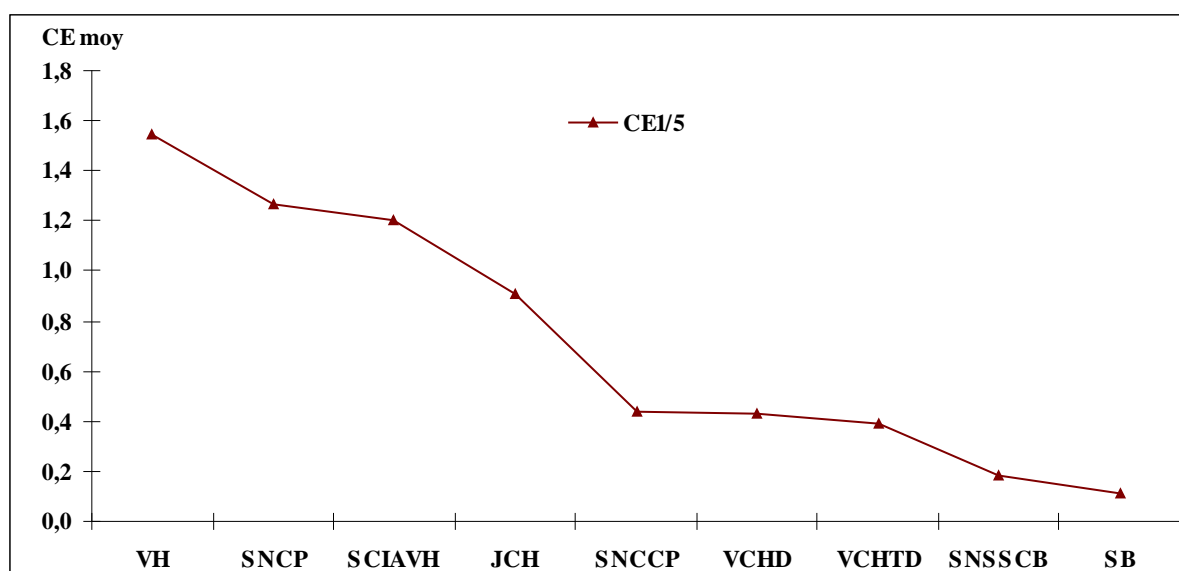
La conductivité électrique moyenne calculée pour chaque classe montre des corrélations assez bonnes avec les comptes numériques moyens calculés sur la totalité des pixels par classe et les pixels correspondants uniquement aux points échantillonnés de ces classes. La corrélation est significative au seuil de 5 % dans ce dernier cas. (tab. 32)

Tableau 32. Corrélations entre CE moyennes, comptes numériques moyens et CN aux points échantillonnés par classe

	CN moyenne. Classes	CN moyenne. points échantillonnés
CE (dS/m) moyenne. classes	0,61	0,68
CN moyenne. Classes	1	0,89

En gras les corrélations significatives au seuil de 5 %.

Cette bonne relation entre les valeurs moyennes des comptes numériques des classes et des pixels aux points échantillonnés aussi bien entre eux qu'avec la CE, montre la pertinence de la représentativité de l'échantillonnage et de sa validité dans l'évaluation de l'apport de la télédétection dans la télédétection de la salinité moyenne qui s'est traduite par une bonne discrimination entre les teneurs moyenne de CE représentées par les différentes classes de télédétection (fig. 36).

**Figure 36. Evolution de la CE moyenne par classes de télédétection**

SB : *Sebkhat de Benziane* SNSSCB : *Sol non salé sombre céréaliers de Benziane*. SNCCP : *Sol nu claire céréaliers de la plaine*. JCH : *Jachères*. SNCP : *Sols nu cultivé de la plaine*. VCHD : *Végétation chlorophyllienne dense d'arboricultures*. SCIAVH : *Sols cultivés irrigués a dominance d'artichaut et végétation halophyte*. VCHTD : *Végétation chlorophyllienne très dense d'agrumes*. VH : *Végétation halophyte*.

5. 2.2.2. Confrontation avec les données ponctuelles

La confrontation est faite ici de façon ponctuelle sur la totalité des 400 points échantillonnés avec les données de la CE 1/5 mesurées au laboratoire.

5. 2.2.2.1. La salinité et les différents indices

On constate que les corrélations obtenues avec les indices sont faibles à très faibles. Elles sont toutefois toutes négatives avec les indices de végétation dont certaines sont significatives tels que le NDVI, le TSAVI et le MSAVI (tab. 33).

L'origine de la faiblesse des corrélations entre les différents indices et la salinité est du probablement au déséquilibre dans la balance des valeurs de la CE 1/5 dans la plaine, où plus de 98 % des échantillons prélevés ont une valeur de CE inférieure à 10 dS/m (en pâte saturé), alors que c'est au delà de ce seuil que la détection de la salinité devient possible (Mougenot, 1993 ; Douaoui et al., 2006) (tab. 33).

Tableau 33. Corrélation entre la salinité et les différents indices

Variabes	NDVI	IC	IR	RVI	TSAVI	MSAVI	PVI	IS	IBc ²
CE 1/5	-0.19	-0.1	-0.08	-0.18	-0.24	-0.21	-0.1	0.02	-0.04

Le nuage de points issus de la projection entre la salinité et le NDVI montre que les points correspondant à une CE élevée (≥ 2 dS/m au 1/5 soit 10 dS/m à la pâte saturée) coïncident toujours avec un très faible indice de végétation. D'un autre coté, tous les points qui ont un NDVI élevé enregistrent une faible salinité.

Il en ressort donc que la cause de la faible corrélation entre la salinité et le NDVI se trouve au niveau des sols qui ont à la fois un faible couvert végétal et une faible salinité ; c'est le cas des sols céréaliers et les sols des périmètres irrigués en jachère qui sont quasiment nus au cours de cette période de l'année.

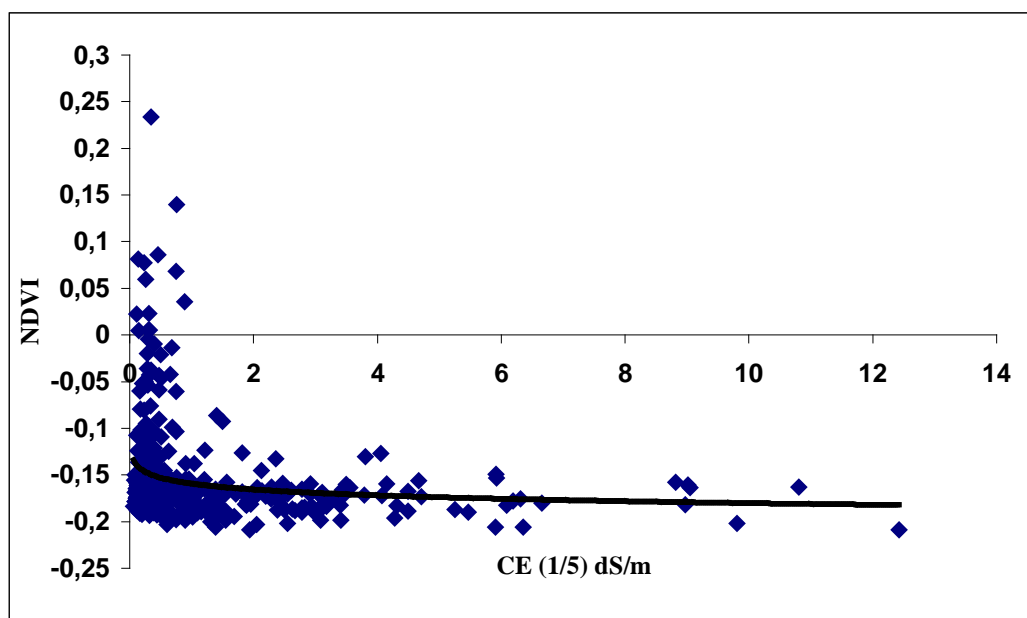


Figure 37. Corrélation entre la CE moyennes et le NDVI

5. 2.2.2.2. La salinité et les éléments de surface

Les corrélations obtenues entre la salinité et les éléments de surface sur la totalité des 400 points échantillonnés marque ;

- Une corrélation positive a été obtenue entre l'épaisseur de croûte et la CE (+0,40). Il apparaît donc que l'épaisseur de croûte augmente avec la salinité. C'est le cas des sols en jachère de longue durée à salinité élevée qui sont les plus encroûtés et dont l'épaisseur peut dépasser les 2 cm (croûte sédimentaire) (Douaoui, 2005). De plus, les croûtes spécifiques aux sols salés ; la croûte de salinisation et la pellicule glacée témoignent aussi des conditions saline du milieu.

- La rugosité est inversement proportionnelle à la CE, ce qui montre que les sols les plus salés et par conséquent les moins cultivés sont ceux qui montrent une faible rugosité.

- Une corrélation négative entre l'humidité et la CE même faible (-0,18) montre que les fortes valeurs de la CE s'aperçoivent dans les sols secs tandis que les faibles valeurs de la CE se trouvent dans les sols a humidité élevée.

Tableau 34. Tableau de corrélations entre les éléments de surface et la salinité

Variables	CE 1/5
La couleur	-0.06
La structure	0.1
L'épaisseur de croûte	0.4
Les fentes de retraits	-0.2
L'humidité	-0.18
La rugosité	-0.23
Les efflorescences	0.11
Le recouvrement	0.06
L'occupation do sol	-0.13

Chapitre VI :

Apport de la télédétection dans la cartographie de la salinité

CHAP. VI. Apport de la télédétection dans la cartographie de la salinité

De tout temps, la cartographie des phénomènes naturels sur des grands espaces s'est heurtée au faible nombre d'échantillons prélevés, qui permettent de bien décrire la variabilité spatiale du phénomène étudié. En science du sol, les cartographes ont toujours été confrontés à ce type de problème et particulièrement lorsqu'ils sont en face de certaines variables plus difficiles d'accès (Douaoui et al., 2006).

Pour palier à cette difficulté, il existe des techniques de cartographie combinant plusieurs outils à la fois, tels que le SIG, la géostatistique et les relations existantes entre les propriétés étudiées et des variables du milieu physique, en tant qu'information externe complémentaire appelée variable secondaire ou auxiliaire (Bishop et McBratney, 2001 ; Carré, 2002 ; Douaoui, 2005). Dans notre cas, la variable secondaire est issue des données de la télédétection.

La salinité qui est la composante la plus importante caractérisant les états de surface des sols de la plaine du Bas-Chéiff représente la variable d'intérêt dont l'échantillonnage sur terrain et les mesures au laboratoire sont très onéreux en termes de finances et de temps. Elle est déduite à partir des données de télédétection qui ont montré la présence d'une corrélation significative à l'échelle des classes des états de surface issues de la classification de l'image satellitaire.

Dans ce travail, la cartographie de la salinité a été faite par deux méthodes très différentes dans leurs principes : i) la première utilise la technique géostatistique qui se base sur les seules données mesurées ponctuellement ; ii) la seconde est une combinaison entre les données de télédétection (variable externe) et un nombre très limité de données mesurées ponctuellement dans le cadre d'un SIG.

6.1. Cartographie de la salinité par la géostatistique

6.1.1. Variographie

Le variogramme expérimental moyen calculé sur la moitié de la distance entre les deux points les plus éloignés montre une régularité dans la variabilité spatiale de la salinité. Cette régularité est confirmée par une bonne continuité de la structure de la CE qui montre une diminution de la variance au-delà d'une certaine distance qui commence ici à partir de 1000 m (fig.38).

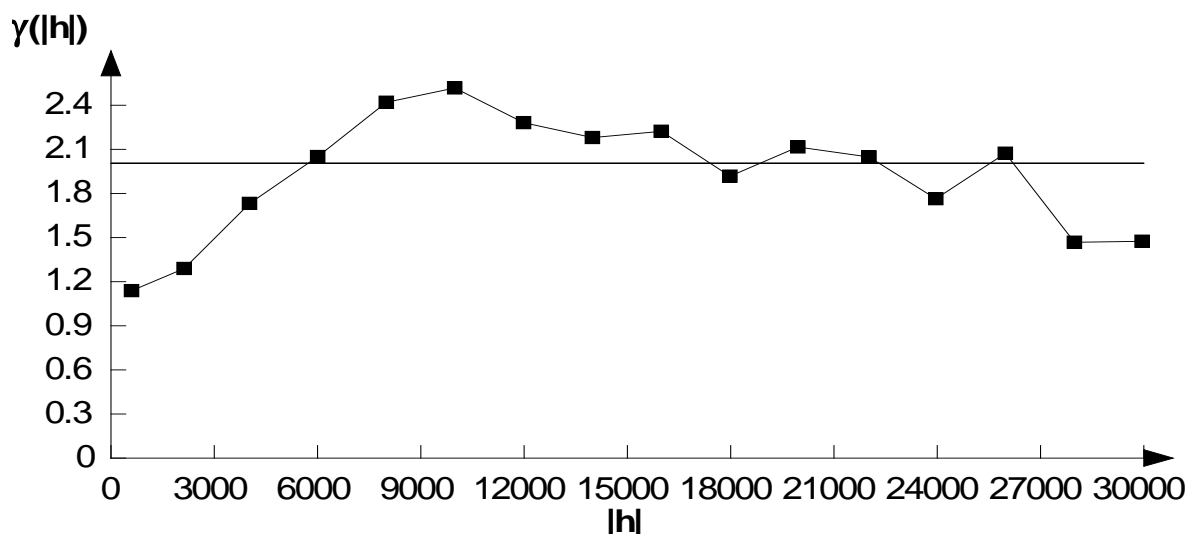


Figure 38. Variogramme expérimental moyen

Comme le krigeage est de type ordinaire, c'est-à-dire que l'interpolation se fera autour d'un voisinage de point, il n'est pas nécessaire d'ajuster le variogramme sur la distance de calcul de 30 km retrouvée ici.

En général pour tracer un variogramme expérimental, il faut veiller à ce que celui-ci soit d'une robustesse tel qu'il reste le même si on venait à changer l'échantillonnage. Pour cela il faut tenir compte d'un certain nombre de conditions parmi lesquelles on peut citer le nombre de couples qui doit être supérieur à cinquante et la distance de calcul qui doit être équivalente au maximum à la moitié de la distance entre les points les plus éloignés (Journel, 1977).

Dans notre cas, ces deux conditions ne constituent pas une contrainte dans la mesure ou le nombre de couples par classe est toujours supérieur à 50 au vu du nombre d'échantillons (400) et à la distance de calcul du variogramme qui est de plusieurs kilomètres offrant ainsi plusieurs possibilités quant à sa détermination.

Le tableau 35 représente le nombre de couples par classe, les distances moyennes des classes et les valeurs des semi-variances correspondantes.

Tableau 35. Valeurs numériques du variogramme expérimental retenu

Classes	Pairs	H moyenne	Variogramme
0	848	470,75	0,027
1	4484	1614,88	8.61759e-02
2	7620	3.03512e+03	1.82012e-01
3	8818	4.51886e+03	2.95203e-01
4	10086	6.00011e+03	4.27869e-01
5	10044	7.49542e+03	5.25481e-01
6	10310	9.00332e+03	5.99480e-01
7	10202	1.04904e+04	6.27745e-01
8	9838	1.19949e+04	5.95108e-01

Le variogramme expérimental moyen retenu donc pour faire l'objet d'ajustement a été calculé sur une distance de 12 km avec des classes distantes de 1500 m en moyenne.

Ce variogramme a été ajusté par un modèle sphérique avec un effet de pépite de 0,96 (dS/m)², un palier de 2,43 (dS/m)² et une portée égale à 10680 m (fig.38).

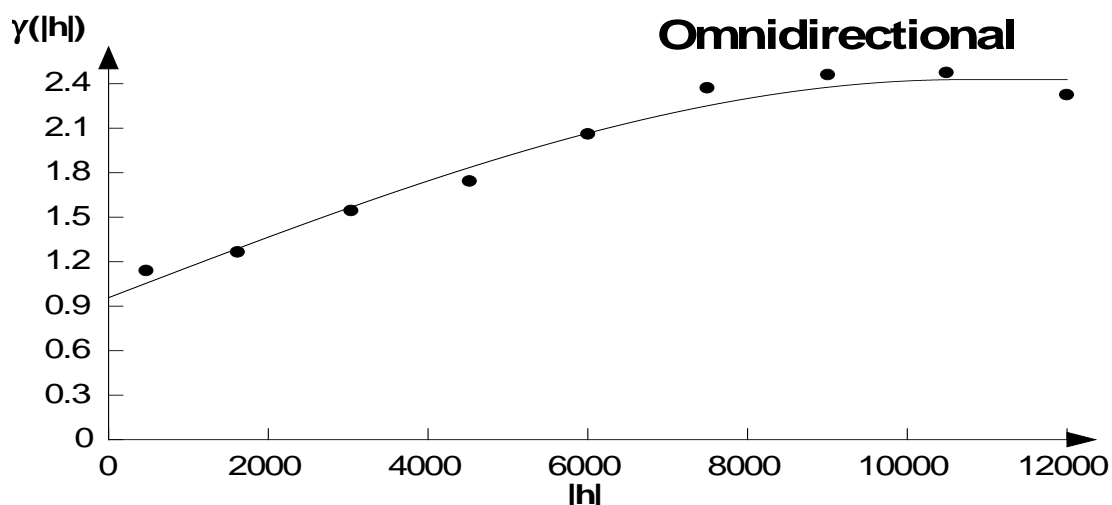


Figure 39. Variogramme théorique moyen de la CE ajusté à un modèle sphérique

La valeur élevée de l'effet de pépite qui représente près de la moitié de la variance totale, exprime une variabilité locale importante qui ne sera pas sans conséquence sur la qualité des estimations. La valeur élevée du palier par rapport à la CE moyenne traduit aussi la grande variabilité de la CE à l'échelle de la plaine du Bas-Chélif.

Le variogramme surfacique est un bon outil qu'offre le logiciel Variowin pour connaître directement les deux principales directions anisotropiques de la CE à l'échelle de la plaine (Douaoui, 2005).

L'établissement du variogramme surfacique a été calculé sur des incréments de 2500 m et 1200 m respectivement pour X et Y avec un nombre de 11 classes. Il montre l'existence d'une anisotropie principale selon les directions 65° et 155° (variation régulière et continue) (fig.40). Cette anisotropie, déterminée par le logiciel ArcGis, qui est égale à 1,7 n'est certes pas très marquée, mais témoigne d'un changement de comportement de la salinité selon au moins deux directions dont il faut tenir compte lors du krigeage.

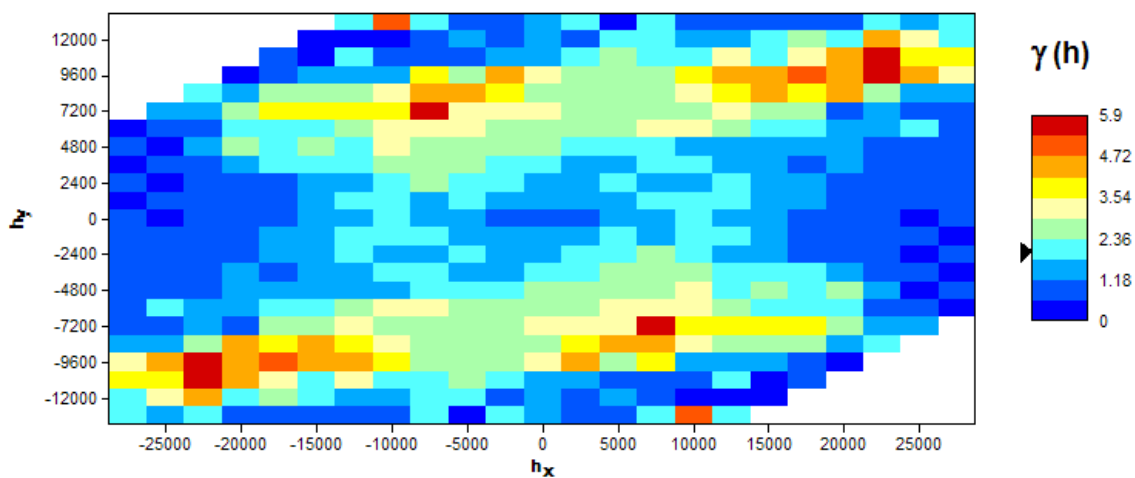


Figure 40. Variogramme surfacique de la conductivité électrique

Les valeurs élevées de gamma ($\gamma(h)$) qui peuvent atteindre jusqu'à 6 $(dS/m)^2$ traduisent une forte dissimilarité qui indique que la continuité spatiale n'est pas toujours bonne dans la plaine du Bas-Chélif. Il est aussi à remarquer que les valeurs élevées de gamma aux faibles distances et particulièrement dans la direction NO-SE indiquent une variabilité locale élevée.

6.1.2. Krigeage

Le krigeage ordinaire à variogramme global a été fait en tenant compte des résultats de la variographie. En effet, l'anisotropie a été respectée en choisissant un rayon de krigeage selon une ellipse dont le rapport entre le rayon majeur et le rayon mineur est égal à 1,7 tout en étant inférieurs à la portée moyenne (4000/2350 m). Le nombre de points maximal retenus dans le voisinage pour l'estimation est de 6.

L'interpolation par bloc (surface) de 15 m de côté au lieu de l'interpolation ponctuelle a été retenue pour pouvoir faire la comparaison avec la salinité estimée par télédétection sur des pixels de mêmes dimensions.

La carte de la salinité obtenue par krigeage ordinaire, après avoir transformé l'extrait dilué 1/5 en pâte saturée (Douaoui, 2005), montre que les sols les moins salés ($CE < 2 dS/m$) se localisent sur les périphéries de la plaine. On peut, en effet, les voir sur le plateau de Benziane, la colline de partage et les périmètres de Ouarizane, Djédiouia-Oued Rhiou et Guerouaou.

Les superficies dont la salinité est supérieure à 16 dS/m couvrent la région centrale de la plaine et se prolongent vers l'ouest. Cette région couvre une bonne partie du périmètre de Hmadna et s'étale vers la partie sud de la Gaa. Cette classe de salinité apparaît également sur la rive droite de oued Chlef au nord du périmètre de Hmadna. Le reste de la partie centrale jusqu'à l'extrême ouest est occupé essentiellement par une salinité comprise entre 1 et 2 dS/m, ce qui montre localement une salinité moyenne (USSSL, 1954). Cette classe de salinité apparaît également à l'est de la plaine aux alentours de Merdjjet Sidi Abed.

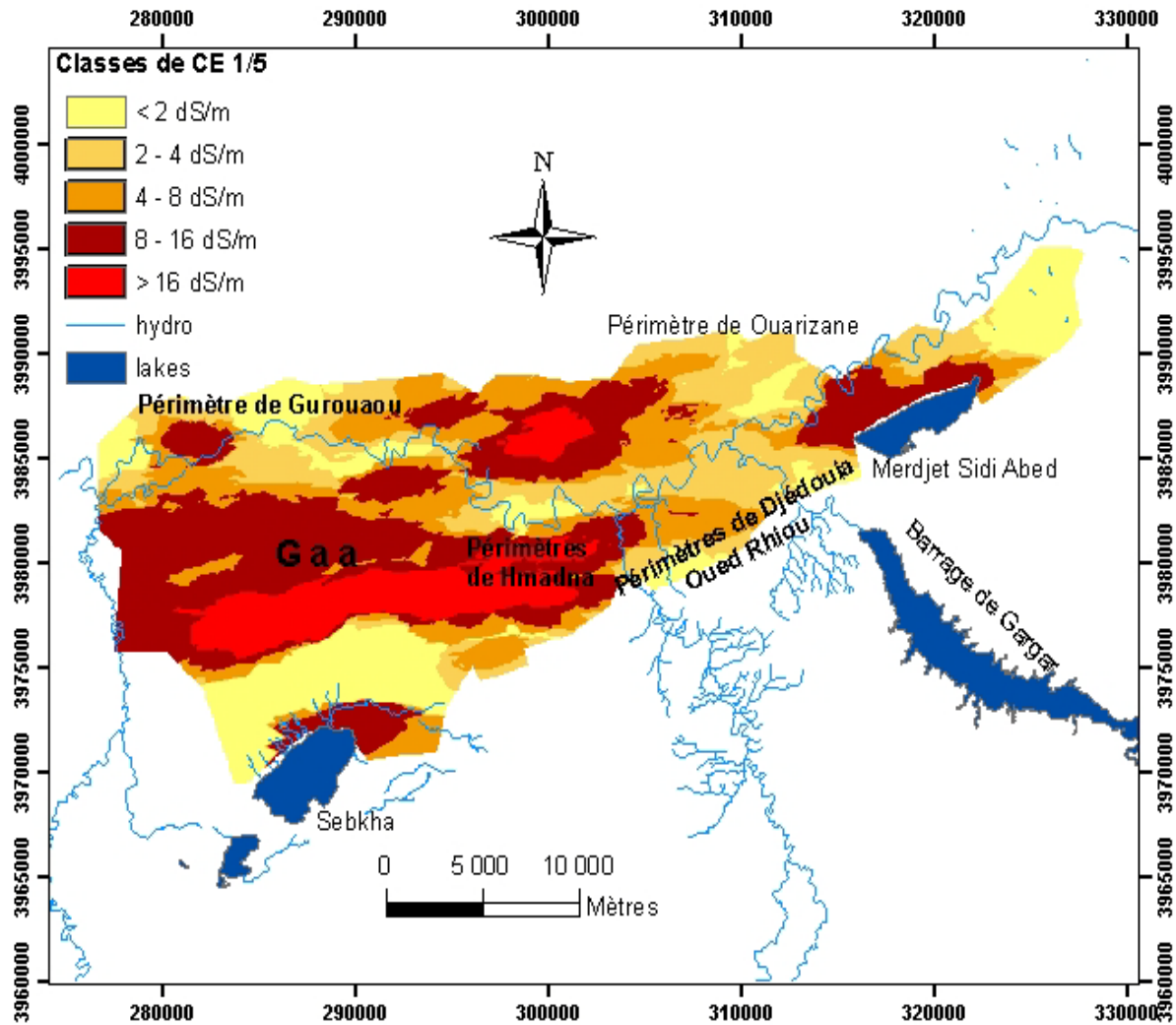


Figure 41. Carte de la salinité estimée par KO

La carte des écarts-types d'estimation (fig.42) montre des zones plus ou moins bien estimées. Ces zones ne sont pas spécifiques à une région donnée mais se répartissent sur toute la plaine. Il apparaît également que la qualité de l'estimation est due essentiellement à la densité du krigeage. Ceci est vérifié au niveau de périmètre de Ouarizane qui montre des superficies importantes dont l'écart estimé reste inférieur à 3,2. C'est en effet, la région qui été la plus échantillonnée en termes du nombre de points prélevés par unité de surface.

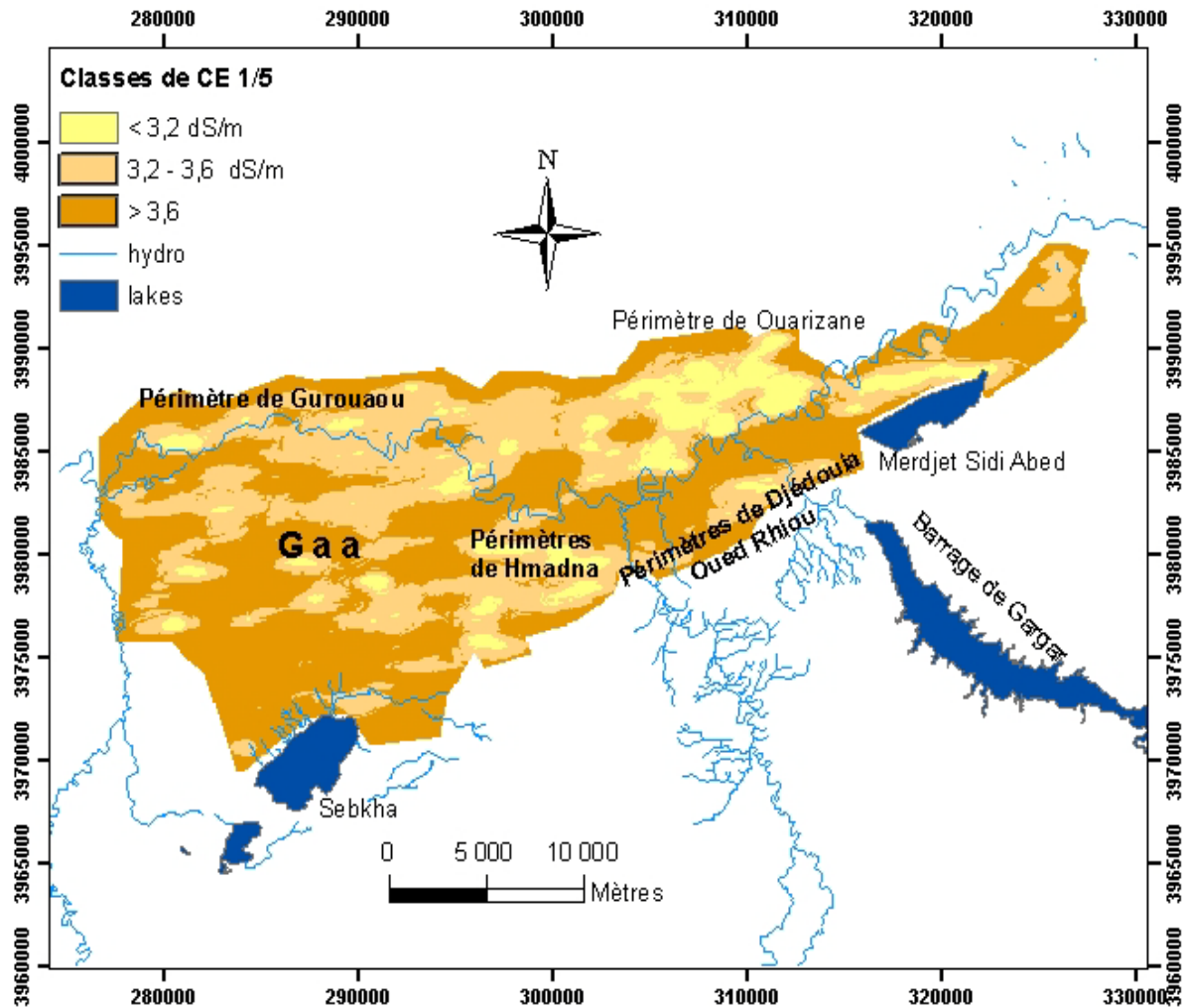


Figure 42. Carte des écarts-types d'estimation de la CE par KOVG

La cartographie de la salinité par le krigeage ordinaire a montré ses limites et ce malgré un nombre de 400 points utilisés dans l'estimation. Les mauvaises estimations sont dues au lissage important engendré par l'utilisation du krigeage ordinaire à variogramme global comme le montre la valeur moyenne de la variance d'estimation qui est nettement inférieure à la variance statistique des valeurs de CE mesurée. Le même constat peut être fait au niveau des valeurs min et max où on constate des sur-estimations au niveau des valeurs faibles et des sous estimations importantes au niveau des valeurs élevées (tab.36).

Tableau 36. Statistiques de la conductivité électrique des données mesurées et estimées

	Points	Moyenne (dS/m)	Variance (dS/m) ²	Min. (dS/m)	Max. (dS/m)
Données	400	6,9	14,14	0,49	66,92
KO	400	6,85	3,5	0,98	26,6

L'une des causes qui est également à l'origine de cette insuffisance dans l'estimation est la faiblesse de la densité de l'échantillonnage de certaines parties de la plaine, comme on peut le voir au niveau du plateau de Benziane et de la périphérie de la plaine où le nombre des échantillons prélevés est faible.

L'effet de pépité élevé du variogramme traduit aussi une microrégionalisation non détectée par le pas d'échantillonnage moyen qui reste trop élevé par rapport à la structure spatiale de la salinité.

Pour palier à ces insuffisances dans l'échantillonnage, le recours à la télédétection qui offre un capital d'informations à la fois disponible et très important est d'un apport certain dans l'amélioration de la cartographie de la salinité.

6.2. Combinaison entre la télédétection et les données de CE mesurées ponctuellement dans le cadre d'un SIG

L'image satellitaire classée avait révélé l'existence de 08 classes en dehors de la sebkha. La corrélation significative entre la salinité moyenne et les données de télédétection par classe nous a amené à utiliser ce résultat positif pour la cartographie de la salinité à l'échelle de toute la plaine du Bas-Chélif. En effet, la disponibilité de l'information, dans le cas d'une image Aster, chaque 15 m et de façon continue sur toute la plaine est à même de combler le déficit d'un échantillonnage sur terrain tels qu'il soit.

Pour ce faire, l'utilisation du logiciel ArcGis 9.1 nous a permis d'affecter la valeur moyenne de la CE d'une classe de télédétection données (zones d'entraînement issues de l'occupation des sols) à chaque pixel (15×15 m) la valeur moyenne de la classe correspondante par l'opération « jointure ». Cette opération a été rendue possible après avoir transformé l'image classée en raster avec des pixels de 15×15 m correspondant à la résolution initiale de l'image Aster par le même logiciel. Par simple requête, la carte a été classée ensuite établie selon les cinq classes de salinité mesurée à l'extrait dilué 1/5 et transformées en pâte saturée (< 2, 2- 4, 4-8, 8- 16 et > 16 dS/m).

La carte de la salinité établie à partir de 08 valeurs seulement montre la même répartition spatiale des niveaux de la salinité que celle obtenue par krigeage. On peut en effet voir que les superficies les plus salées se trouvent dans le périmètre de Hmadana et la Gaa mais également au nord de Merdjjet Sidi Abed. Cette dernière est effectivement connue par ses sols très salées et abandonnés (Douaoui, 2005). Les superficies les moins salées se trouvent également sur le plateau de Benziane et les autres périmètres irrigués ainsi que tout au long de l'oued Chlef ce qui concorde avec la réalité du terrain.

La variabilité spatiale de la salinité à l'échelle locale est plus fidèle à la réalité ici qu'à celle établie par krigeage comme l'avait montré la valeur élevée de l'effet de pépité du variogramme.

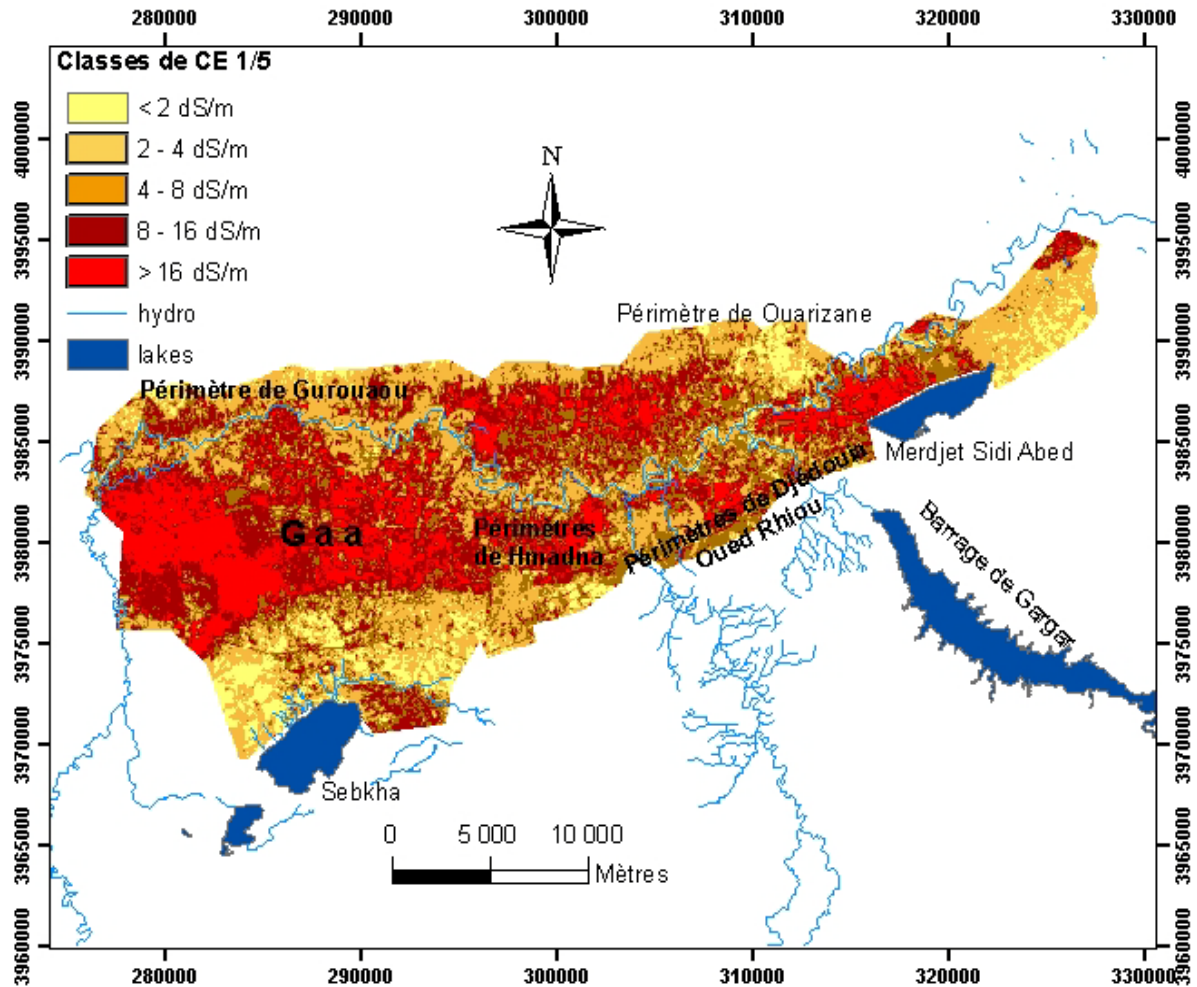


Figure 43. Carte de la salinité estimée par application de la télédétection

En examinant les superficies correspondant aux superficies des classes de salinité par les deux méthodes (krigeage et télédétection-SIG), il apparaît nettement que la carte estimée par télédétection-SIG a permis d'avoir une estimation meilleure par rapport à celle obtenue par krigeage ordinaire et ce au niveau des valeurs de extrêmes de CE.

On peut en effet voir (tab.37) que les sur-estimations obtenues au niveau des faibles valeurs de CE sont passées de 19 % à 14 % pour les sols légèrement salins ($CE < 2$ dS/m), soit une diminution d'une superficie de 2718 ha. Par ailleurs, les sous-estimations obtenues au niveau des valeurs de CE très élevée (> 16 dS/m) sont passées de 10 % à 14 % ; soit une augmentation d'une superficie de 2460 ha.

Concernant les sols salés dont la CE est comprise entre 8 et 16 dS/m, les superficies trouvées par les deux approches sont équivalentes, ce qui montre encore la pertinence de la méthode télédétection-SIG. Les superficies qui sont mal estimées par la télédétection se situent au niveau des valeurs moyennes comme cela a été trouvé dans plusieurs travaux (Metternicht et Zink, 2003 ; Douaoui, 2005).

Tableau 37. Superficies des classes de CE estimées par KO et télédétection-SIG ainsi que leurs pourcentages respectifs

	<i>classes de CE (dS/m)</i>					Total
	< 2	2-4	4-8	8-16	> 16	
	CE estimée par KO					
ha	10480	10840	11300	16476	5254	54350
%	19	20	21	30	10	100
	CE estimée par télédétection-SIG					
ha	7762	17059	5784	16031	7714	54350
%	14	31	12	29	14	100

Faut il encore le rappeler, et c'est très important à notre sens, que cette performance dans la cartographie de la salinité en vue de sa meilleure estimation spatiale a été obtenue avec seulement 8 valeurs de CE représentant la moyenne de chaque classe des états de surface obtenus par télédétection à partir de 400 échantillons.

Il est également vrai que cet échantillonnage était fait de façon stratifiée pour tenir compte des différents états de surface de la plaine. Néanmoins, le choix des sites de prélèvement a été fait sur la base d'une classification faite sur une image Spot de l'été 2000. Une durée de 5 années sépare donc cette date à celle qui correspond à l'image qu'on a utilisé. Au cours de cette période de 5 ans, les états de surface ont connu une certaine évolution qui n'a pas été sans conséquences sur leur classification, ce qui a fait qu'on s'est retrouvé avec une hétérogénéité élevée dans le nombre d'échantillons prélevés par classe de télédétection (états de surface) qu'on a déterminé à partir de l'image Aster 2005.

Tout ceci nous amène à avancer que cette performance serait sûrement plus pertinente si nous avons travaillé dès le départ sur notre propre image satellitaire en prenant soins d'avoir un équilibre relatif dans les échantillons prélevés par rapport à l'hétérogénéité et la superficie de chaque classe des différents états de surface. Dans ce cas, on aurait eu besoin de beaucoup moins d'échantillons pour avoir des moyennes suffisamment représentatives de ces différentes classes.

Enfin, les résultats des deux approches ont montré une extension importante de la salinité qui risque de s'étendre encore à des sols qui ne sont pas encore touchés par ce fléau si les mesures nécessaires ne sont pas prises concrètement et rapidement.

Conclusion

Conclusion

L'objectif principal de ce mémoire consistait d'une part à l'identification et la discrimination des états de surface par l'utilisation de la télédétection et d'autre part, l'évaluation de la dégradation des couches de surface des sols salés de la plaine du Bas-Chéliff.

Afin de répondre à ces deux objectifs, des traitements et une analyse ont été faites sur l'imagerie satellitaire Aster prise en août 2005 dont les données ont été confrontées à celles obtenues directement sur terrain ou après analyse au laboratoire. Les données de terrain concernent la description des états de surface et les mesures de la salinité effectuées au laboratoire sur des échantillons prélevés in situ et géoréférencés. Une série d'imagerie Spot végétation ont fait également l'objet de traitement et d'analyse temporelle.

L'analyse visuelle de l'image satellitaire Aster a permis d'identifier onze (11) unités agropaysagiques tels que les oueds, les étendues d'eau, la sebka, la Gaa, les périmètres irrigués et sols à végétation halophytes.

L'analyse numérique a montré différents comportements spectraux d'une zone à une autre de la plaine. Les histogrammes bidimensionnels qui ont été dressés pour les quatre zones sélectionnées montrent la distinction entre les différents états de surface, partant des sols nu sombres non salés jusqu'aux sols nu clairs plus ou moins salés, ainsi qu'entre les classes de type et de densité de végétation différents.

Les différents indices de végétation et tout particulièrement le NDVI et le RVI ont permis une bonne discrimination entre ces zones.

L'indice NDVI issu des images Spot végétation a été également utilisé pour suivre l'évolution temporelle de la végétation dans ces mêmes zones entre 1999 et 2005, ce qui a permis d'établir une distinction entre les zones à faible taux de recouvrement de végétation et les zones à un taux de recouvrement importants. C'est ainsi qu'on a pu voir que l'effet saisonnier et la salinité sont les principaux facteurs intervenant sur le développement de la végétation.

La classification supervisée de l'image a fait ressortir 09 classes correspondant aux différents états de surface de la plaine et exprimant ainsi différents niveaux de dégradation dont les principaux indicateurs sont la végétation et la salinité. Le comportement spectral des neuf classes explique bien les différentes tendances spectrales qui ont été définies selon les trois canaux du visible et du proche infrarouge.

L'analyse des caractéristiques des éléments de surface montre que dans l'ensemble de la plaine, il apparaît un fort déséquilibre écologique. En effet les milieux stables, avec le maintien d'un bon couvert végétal n'occupant qu'une superficie faible représentée par les périmètres irrigués, le reste se partage entre la céréaliculture, la jachère et les parcours dégradés. Les superficies de ces parcours dégradés couvrent pas moins de 20 % de la superficie totale de la plaine et sont occupés par de la végétation halophyte plus ou moins dense selon le degré de la salinité.

Plusieurs types de relations spectrales ont été identifiés pour notre milieu d'étude ponctuellement et par classe de télédétection à partir de la confrontation des données spectrales aux celles des éléments de surface. Toutefois, les meilleures relations ont été trouvées dans les cas de la confrontation entre classes de télédétection où les corrélations les plus élevées concernent la rugosité, l'occupation du sol et le recouvrement de la végétation.

La confrontation des données de télédétection avec la salinité mesurée au laboratoire a également montré que les meilleures corrélations, même si elle restent globalement faibles, correspondent aux classes de télédétection plutôt qu'à celle de la corrélation ponctuelle entre les données. Il s'est avéré que la salinité est toujours positivement corrélée aux indices sols et négativement aux indices végétation, ce qui montre l'influence de la salinité sur le développement de la végétation.

Aussi, cette confrontation a donné de bonnes corrélations entre les comptes numériques moyen et la salinité, ce qui a permis de caractériser les différentes classes de télédétection avec différents niveaux de salinité. Ceci est d'autant vrai que dans la plaine du Bas-Chélif, comme cela a été montré dans ce travail, la salinité est l'indicateur principal de la qualité des sols et de la végétation.

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

En termes de perspectives, une analyse plus fine des états de surface, un échantillonnage plus adéquat et un traitement plus spécialisé de télédétections sur des images à des résolutions plus élevées combinés à la géostatistique sont envisagées pour mieux évaluer et discriminer les niveaux de dégradation du milieu physique de la plaine en général et des sols de façon particulière.

Enfin, Nous espérons avoir montré par ce travail l'état de dégradation dans lequel se trouve la plaine du Bas-Chélif et avoir mis l'accent sur les principaux facteurs qui en sont responsables. Les conséquences sur la durabilité environnementale d'un tel système que ce travail sont donc mieux ressenties, ce qui tire la sonnette d'alarme pour une meilleure prise en charge de ces problèmes et tout particulièrement celui de la salinité.

Bibliographie

Bibliographie

- Adi N., 2001. Contribution à l'étude des formations à *Salsola vermiculata* le long d'un gradient de salinité dans la région du Chott Chergui (Sud Oranais). Thèse Mag. Univ. Sci.Technol. H. Boumediène, Alger, 118 p.
- Aidoud A., 1989. Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques pâturés des Hautes Plaines Algéro-Oranaises. Fonctionnement, évaluation et évolution des ressources végétales. Thèse Doct.; Uni. Sci. Techn H. Boumediène. Alger, 253 p.+ ann.
- Aidoud, A., Slimani, H., Aidoud-Lounis, F., & Touffet, J., 1999. Changement édaphique le long d'un gradient d'intensité de pâturage dans une steppe d'Algérie. ECOLOGIA MEDITERRANEA 25(2), 1999 :163-171.
- Akrimi N.1993. Adéquation entre programmes de recherches menés et besoins réels en matière de lutte contre la désertification. CIHEAM - Options Mediterraneennes. P 53-68.
- Alnlnutt T.F., Wettengel W.W., Valdes Reyna J., De Leon Garcia R., Inigo Elias E., Olson, D.M., 2002. The efficacy of TM satellite imagery for rapid assessment of Chihuahuan xeric intactness for ecoregion-scale conservation planning. Journal of Arid Environments 52, 135-153.
- Bagnouls F. & Gaussen H. , 1953.- Saison sèche et indice xéothermique. *Bull. Soc.Hist. Nat.* Toulouse., 88, 193-239.
- Barbero M., 1990. Méditerranée: bioclimatologie, sclérophilie, sylvigénèse. ECOLOGIA MEDITERRANEA XVI, 1990 :1-12.
- Baret F., Guyot G., Major D. J., 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria (PRS), 43, 241-256.
- Baret F., Guyot G., 1991., Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment Remote Sensing of Environment, 35, 161-173.
- Barry J.P., Celles J.C., Faurel L.,1974 .- Notice de la carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques. Feuille d'Alger au 1/ 1000.000. CRBT/Ex ONRS., Univ., d'Alger, 42 p.
- Benabadji N et Bouazza M, 1998 ; Composition florestique et pression anthropozoiique au Sud Ouest de Télémcen. Sci. Tech. Numéro 10 Décembre. 1998, Constantine. 93-97.
- Benabadji N et Bouazza M, 2000 ; Contribution a l'étude bioclimatique de la steppe a artemesia herba alba Asso dans l'oranais (Algérie occidentale). Rev.Sci. Chang. Plan. Paris Vol, II, N° 2, 117-123.
- Benabadji N et Bouazza M, 2002 ; Contribution a l'étude du cortège florestique de la steppe au sud d'El Aricha (Oranaie-Algérie). Sci. Tech. Numéro spétial- D Constantine. 11-19.
- Bentekhici N.,2006; SIG et l'imagerie spatiale pour la gestion des déchets solides. Cas d'application : la zone d'Ain Témouchent. Division de la télédétection. Centre National des techniques spatiales.p1-6.
- Benzineh S, 2002. Prise en main d'un logiciel de traitement d'image spatiales; Séminaire de formation et formulation sur les Outils et méthodes géomatiques pour le développement de l'agriculture et la gestion des ressources naturelles. (Alger).
- Bishop T.F.A., McBratney A.B., 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. Geoderma 103, 149-160.
- Boiffin J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. These de doctorat, INA P-G, Paris, 320 p.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. 1. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8 (8), 663-673.

- Bonn F., 1996. Précis de télédétection. Vol. 2 : Application thématique. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 633 p.
- Bonn F., Rochon G., 1992. Précis de télédétection. Vol. 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Boulaine J., 1956. Carte des sols des plaines du Cheliff au 1/50.000e, feuilles 1 à 5. Inspection générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie.
- Boulaine J., 1957. Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'état de l'Université d'Alger, 582 p.
- Carré F., 2002. Cartogénèse des sols et changements d'échelle. Application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations. Thèse Doct. INAPG, 399 p.
- Casenave A., Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne-Influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, Paris, 229 p.
- CCT, 1999. Cours de télédétection du Centre canadien de télédétection (C.C.T). Le site consulter le 22/09/2006 (version française), adresse électronique: <http://www.ess.nrcan.gc.ca> .
- Champion, I., Faivre, R., 1996. The field row direction relative to the radar azimuth considered as an apparent surface roughness for smooth bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (16), 3305-3311.
- Clevers J. P. G. W., 1989. The application of a weighted infrared vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing Environ.*, 29, 25-37.
- Corbane, C., 2006. Reconnaissance des états de surface en milieu cultivé méditerranéen par télédétection optique à très haute résolution spatiale. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Sciences: Terre, Eau, Espace. Montpellier, 264 p.
- Courault D., 1989. Etude de la dégradation des états de surface du sol par teledetection. These de doctorat, INAP-G, Sols, 239 p.
- C.P.C.S., 1967. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Classification des sols. Institut national de la recherche agronomique (INRA). Paris: Laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA, 87 p.
- C.S.F.D, 2002. La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. Document n° 02, du Comité Scientifique Français de la Désertification; 48 p.
- Dahmani M., 1997- Le chêne vert en Algérie : Syntaxonomie, phytoécologie et dynamique des peuplements. Thèse Doct. Es. Sci. Univ. U.S.T.H.B. Alger. 383 p.
- Daoud Y., Cheverry C., Robert M., 1993. Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols des plaines du Chéiff (Algérie). *Science du Sol*, Vol. 31, 4 : 281-293.
- De Jong S., 1992. The analysis of spectroscopical data to map soil types and soil crusts of Mediterranean eroded soils. *Soil Technology*, 5, 199-211.
- Deshayes M., Maurel P., 1990. L'image spatiale et son contenu. CIHEAM-Options méditerranéennes, Ser. A, 4-La télédétection en agriculture, 20 p.
- Dewez A., et Dautrebande, S., 1992. Utilisation des données SAR d'ERS-1 pour l'étude des états de surface. "Proceedings First ERS-1 symposium - Space at the Service of our Environment". ESA ed., Cannes, France, 1993. p. 569-571.
- Diouf, A., Lambin, E.F., 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *Journal of Arid Environments* 48, 129-148.
- Djebaili S, Achour H, Aidoud F, Khelifi H; 1982 ; Groupes écologiques édaphiques dans les formations steppiques du Sud Oranais. *Biocénoses*. 1 .1 .pp 8-59.

- Douaoui A., Gascuel-Oudou C., Walter Ch., 2004 : Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. EGS, Vol. 11, N°4, 379-39.
- Douaoui A., 2005. Variabilité Spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif .Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct d'état, INA Alger, 233 p.
- Douaoui A., Nicolas H., Walter Ch., 2006. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. GEODERMA,134 (2006) 217–230.
- Douaoui A., Hartani T. Lakehal M., 2006. Deuxième atelier régional scientifique et technique sur les systèmes irrigués dans les pays maghrébins. IAV Hassan II et l'ENA de Meknes. Marrakech, Maroc, SIRMA 29-31 mai 2006.
- Douaoui A.,Hartani T.,2007 - Troisième atelier régional scientifique et technique sur les systèmes irrigués dans les pays maghrébins. Nabeul, Tunisie, SIRMA 04-08 juin 2007.
- Encarta., 2007. Encyclopédie d'Encarta 2007. CD-ROM.
- Escadafal R., Pouget M., 1987. Cartographie des formations superficielles en zones arides (Tunisie méridionale) avec Landsat TM, Photo-interprétation, vol. 4, 2, 9-12.
- Escadafal R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. (Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération). Thèse de Doctorat, l'Université de ParisVI, France, Editions de l'ORSTOM. 293 p.
- Escadafal, R. 1992. Télédétection de la surface des sols arides. Concepts et applications. In: L'aridité, une contrainte au développement. Caractérisation, réponses biologiques, stratégies des sociétés. E. Le Floch, M. Grouzis, A. Cornet, J.C. Bille éd. Coll. didactiques, Orstom, Paris. pp. 105-121.
- Escadafal R., Belghith A., Ben Moussa H., 1994. Indices spectraux pour la télédétection de la dégradation des milieux naturels en Tunisie aride. Actes du sixième symposium international, Mesures physiques et signatures spectrales en télédétection. 17-21 janvier, Val d'Isère (France), 253-259.
- FAO. 1998. FRA 2000: termes et définitions. Document de travail no.1. Programme d'évaluation des ressources forestières 2000 (Forest Resources Assessment, 2000). Département des forêts, Rome.20p. [Document internet disponible sur le site <http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>]
- Fernandez-Buces N., Siebe C., Cramb. S, Palacio J. 2006., Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. Journal of Arid Environments 65 (2006) 644–667
- Gaucher G., 1947. Méthodes actuelles d'étude des terrains salés en Afrique du Nord. Conférence de Pédologie Méditerranéenne, AFES, Paris.
- Gay M, 1999. Cours rédigé de télédétection sur la classification des images satellitaires à l'Ecole Supérieure d'Agriculture de PURPAN.
- Girard M-C., 1995; Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. Un exemple dans la région de Lodève. Étude et Gestion des Sols, 2, 1, 1995, pages 7- 24.
- Girard M.-C., & Girard, C.-M., 1989. Teledetection appliquee, zones temperees et intertropicales. (2 ed.), Paris, Masson, 260 p.
- Girard M.C. & Girard C.M., 1999. – Traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p. + CD-ROM.

- Godron M, Daget Ph, Long G, Sauvage Ch, Emberger L, Le Floc'h E, Wacquant J, Poissonet J; 1968. Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Edition du CNRS.Paris, 268p.
- Goldshleger N., Ben-Dor E., Benyamini Y., Agassi M., Blumber D., 2001. Characterization of soil's structural crust by spectral reflectance in the SWIR region (1.5-2.5 μm). *Terra Nova*, 13, 12-17.
- Gounot M., 1969. Méthodes d'études qualitatives de la végétation. *éd Masson et Cie*. Paris, 314p.
- Guérif M., Lagouarde J. P., Nicolas H., 1996. Variables de fonctionnement des couverts végétaux issues des données de télédétection dans les domaines optiques et infrarouge thermique. Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 25-29 mars 1996, Tome 2 : Du couvert végétal à la région. 81-108
- Hachicha, M., Pontanier, R., Dridi, B., 1996. Comportement des sols argileux irrigués sous pluies simulées. Rôles des organisations superficielles pour le lessivage des sol et leur érodibilité dans le choix d'irrigation. *MADS*, 22p.
- Hirche A., 1995. Contribution à l'étude de l'apport de l'image satellitaire à l'inventaire cartographique et phytoécologique d'une zone pré-saharienne, cas de Ouled- Djellal. Thèse Mag. Univ. Sci.Thechnol. H. Boumediène, 230 p.
- Hoffer A. M., 1978. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, Ed.Swain, & Davis: McGraw-Hili Book Company, p. 227-289.
- Hourizi .R, 2004. Contribution à l'étude d'un écosystème à *Lygeum spartum L* dans le Sud Oranais : diagnostic phytoécologique et cartographique. Mémoire de magister, Université USTHB, écologie et environnement, 144 p.
- Hunt G. R., Ashley R. P., 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared, *Economic Geology*, 74, 1613-1629.
- Jauffret S., 2001. Validation et comparaison de divers indicateurs des changements à long terme dans les écosystèmes méditerranéens arides. Application au suivi de la désertification dans le Sud tunisien. PhD, Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme, Université d'Aix-Marseille III, Marseille, France, 365 p.
- Journel A. G., 1977. Géostatistique minière. Centre de géostatistique. Ecole des mines, Fontainbleau, Tome 1 et 2, 737 p.
- Kadi-Hanifi H., 2003 ; Diversité biologique et phytogéographique des formations à *Stippa tenacissima L* de l'Algérie. *SECHRESSE* ; 14(3) : 169-179.
- Khan N. M., Rastoskuev V. V., Shalina E., Sato Y., 2001. Mapping salt-affected soil using remote sensing indicators. A simple approach with the use of Gis Idrissi. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November, Singapore.
- King Ch., 1977.- Examen des possibilités des hyperfréquences en pédologie. 1er coll. Pédologie. Télédétection. *ORSTOM*. Rome. Pp 43-54.
- Laine. G, 1990 - La télédétection à l'IRCT / CIRAD. CIHEAM - Options Méditerranéennes, Série. A -n 4, La Télédétection en agriculture, 11-20 p.
- Le houerou H.N., 1968 - La désertisation du Sahara septentrional et des steppes limitrophes. *Annales algériennes de Géographie*, n°6, :2- 27
- Lehouerou H.N., 1995; Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique Diversité biologique, développement durable et désertisation. CIHEAM - Options méditerranéennes. Série B no 10. 396p.
- Lehouerou H.N., 2004 ; An Agro-Bioclimatic Classification of Arid and Semiarid Lands in the Isoclimatic Mediterranean Zones. *Arid Land Research and Management* 18: 301-346

- Lelong F., Roose E., Darthout R., & Trevisan D., 1993. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluies simulées. *Science du Sol*, 31(4): 251-279.
- Lillesaeter O., 1982. Spectral reflectance of partly transmitting leaves. Laboratory measurements and mathematical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 12, 247–254.
- Madeira J., Pouget M., Bedidi A., Cervelle B., 1991. – Relations entre les constituants minéraux d'oxisols brésiliens et leurs signatures spectrales du visible à l'infra-rouge moyen: application à des données satellitaires (Landsat TM). Implications sur la texture., Deuxièmes Journées de Télédétection "Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales. Colloques et Séminaires. Paris : Éditions de l'Orstom., 27-38.
- Manière R., Bassisty E., Celles J. C., Melzi S., 1993. Utilisation de la télédétection spatiale (données XS de Spot) pour la cartographie de l'occupation du sol en zones arides méditerranéennes : exemple d'Aïn Oussera (Algérie). *Cah. Orstom, ser. Pédol.*, vol. XXVIII, 1, 67-80.
- Mathieu C., Pieltain F., Jeanroy E., Marcovecchio F., Servian F., Soucheyre H. 2003; Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Edition Tec et Doc. Paris, 424 pp.
- McDonald, BNEDER (Bureau National d'Étude pour le Développement Rural), 1990. Étude de l'avant projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhath Benziane et du réaménagement du Bas Chélif.
- Metternicht G. I., Zink J. A., 2003. Remote sensing of soil salinity : potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 5812, 1-20.
- Mougenot B., 1993. Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés. *Cah. Orstom, ser. Pédol.*, vol. XXVIII, 1, 45-54.
- Mulders M. A., & Girard M. C., 1993. Remote sensing of soils in warm arid and semi-arid lands. *Remote Sensing Reviews* , 7: 341-363.
- Nagler P., Glenn E.P., Huete A.R., 2001. Assessment of spectral vegetation indices for riparian vegetation in the Colorado River delta, Mexico. *Journal of Arid Environments* 49, 91–110.
- Nedjraoui D., 1990.- Adaptation de l'Alfa (*Stipa tenacissima*) aux conditions stationnelles. Contribution à l'étude du fonctionnement de l'écosystème steppique. Thèse Doct. ; Uni. Sci. Techn H. Boumediène. Alger, 256 p.
- Nedjraoui D, 2006. La recherche scientifique, un moyen de lutte contre la désertification. Conférence internationale sur la désertification. Septembre 2006.
- Omari L., 2005. Contribution à l'étude d'un écosystème à *Artemisia herba alba* dans le Sud-Oranais ; Diagnose phytoécologique et cartographique par télédétection spatiale. Mémoire de magister, Université USTHB, écologie et environnement, 125 p.
- Ozenda P, 1982 ; les végétaux dans la biosphère. Ed : Edoine. Paris. pp431.
- Pearson R. L., Miller L. D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie Pawnee National Grasslands, Colorado, Proc. 8th Int. Symp. On Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, 1357-1381.
- Pouget M., Madeira J., Le Floch E., Kamal S., 1991. Caractéristiques spectrales des surfaces sableuses de la région côtière nord-ouest de l'Égypte : application aux données satellitaires Spot. In : Deuxièmes journées de la télédétection, caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales, Paris, Orstom, 27-38.
- Qi, J., Chehbouni, Al., Huete, A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48, 119– 126.

- Quezel P et Médail F., 2003. Que faut-il entendre par “ forets méditerranéennes”? FORET MEDITERRANEENNE XXI N°1.Mars 2003.
- Quezel P. et Santa S., 1962.- Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. CNRS, Paris. 1 : 1-570 ; 2 : 571-1170.
- Richardson A. J., Wiegand C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 43, 1541-1552.
- Robert M et Cheverry C., 1996 ; les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahiers d'agricultures*.5, 243-248.
- Rognon P., 1994. Désertification et dégradation des sols. *In : Med-Campus*, 8 : Désertification et Aménagement. Cours des séminaires 1993 de Médenine (Tunisie) et d'Agadir (Maroc). (eds.) Coude-Gaussen et P. Rognon, Caen : 69-87.
- Roose J., Asseline J., 1978. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVI, no 1, 43-72.
- Roose J., Sarrailh J., 1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux vingt années de mesure en parcelle d'érosion sous pluie naturelle. *Cah. ORSTOM. Sér.Pédol.* n° 1-2, 7-30p.
- Rouse J. W., Hass R. H., Shell J. A., Deering D. W., Harlan J. C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, 371 p.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y., Halitim A., 2004. Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols*, 137-148.
- Schmidt H., Karnieli A., 2000. Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments* 45, 43–59.
- Soudani. K, 2005. Cours rédigé de télédétection. Introduction générale à la télédétection. ECO II, Version 1.2 – Séries -Version PDF. ., Univ. Paris Sud XI. 26 p.
- Toth, T., Csillag F., Biehl L.L., Micheli E., 1991. Characterization of semivegetated salt-affected soils by means of field remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 37, 167–180.
- U.S.S.L.S. (Unated State Salinity Laboratory Staff), 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC.
- Valentin C., Bresson, L.-M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55, 225-245.
- Valentin C., Bresson L. M., 1997. Soil crusting. In Lal R., Blum W.H., Valentine C. and Stewart B.A., *Methods for assessment of soil degradation*. 89-107, CRC press LLC.
- Wassenaar. T, 2001. Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale. Thèse de doctorat en SCIENCE DU SOL, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. École Doctorale : Biologie des Systèmes Intégrés – Agronomie – Environnement.
- Yacono X. 1955. Colonisation des plaines du Chélif (de Lavigerie au confluent de la Mina), Tome 1, Imprimerie Imbert, Alger.

www.georezo.net

www.gisclub.com

www.googleearth.com

ملخص

يقع سهل الشلف الأدنى على 220 كم من غرب الجزائر و يتسع على أكثر من 50000 هكتار كان محل دراستنا. هذا السهل الذي لا يبعد سوى 40 كم عن البحر المتوسط بمناخ جاف , يعاني من مشاكل عديدة لتدهور محيطه. هذا التدهور يرجع أساسا للملوحة التي تظهر على الطبقة السطحية للتربة بعدة أشكال مختلفة على حسب مستوى تدهورها. الهدف من هذه الدراسة هو استعمال تقنية الاستشعار عن بعد لتقييم مستوى تدهور للتربة و كذا التعريف بأشكالها ورسم خريطة تتضمن حالات الطبقة السطحية.

التحليل المرئي لصورة القمر الصناعي أستر المأخوذة في أوت 2005 سمح لنا بإستخراج مختلف الوحدات الكبرى. الشيء الذي قمنا من خلاله بتعريف أربع وحدات متجانسة تمثل التنوع الموجود في كامل المنطقة على سبيل الحصر الوحدات المسقية لوريزان و جديوية. التربة الغير مالحة المشغولة بالحبوب لهضبة بن زيان, و القعة التي تحوي الترب المالحة الغير مزروعة و التي تنمو بها النباتات الملحية.

إن طريقة التقسيم المختارة لصورة القمر الصناعي سمحت لنا بتطبيق قدرتها الهائلة في التميز على كامل الطبقات السطحية لسهل الشلف الأدنى و الحصول على 09 أقسام متجانسة لمختلف مستويات تدهور التربة.

الارتباطات الجيدة المحصل عليها إثر مطابقة المعلومات الرقمية لصورة القمر الصناعي مع النتائج المحصل عليها للملوحة لأقسام حالات الطبقات السطحية للتربة. سمحت لنا برسم خريطة الملوحة بتطبيق تقنية الاستشعار عن بعد و مقارنتها مع تلك المحصل عليها بطريقة الجيوإحصاء.

الطريقتان أوضحنا الاتساع الشاسع للملوحة , غير أن خريطة الملوحة المحصل عليها بالاستشعار عن بعد سمحت لنا بالوصول إلى تقييم أحسن بالمقارنة مع الخريطة المحصل عليها بطريقة الجيوإحصاء وذلك بالنظر للتقييم الدنيا والقصى.

الكلمات المفتاحية : سهل الشلف , الاستشعار عن بعد , تدهور التربة , الملوحة , حالات الطبقة السطحية.

Abstract

The plain of the lower Chélif which is located 220 km from the west of Algiers and extend over 50000 ha is the subject of our study. This plain which is only 40 km far from the Mediterranean has an arid climate and has suffered from dangerous problems of degradation of its physical environment. This degradation is essentially due to the salinisation of the soil which manifested on the surface of the soil in different ground surface related to the levels of degradation.

The aim of this work is to use the remote-sensing to evaluate the levels of degradation of the soil by the identification and the mapping of the ground surface. The visual analysis of the Aster image (taken in August 2005) with allows us to extract the big agropaysagic units. And this led us to identify four homogeneous areas representative of the different ground surface of the plain. The two irrigated perimeters of Ouarizane and Djediouia, the non saline cereal soil of Benziane hill, and the Gaa which contain uncultivated saline soil with halophytic vegetation.

The supervised classification of the satellite image allows us to generalize this good discriminatory capacity with the whole ground surface and to obtain 9 homogeneous classes corresponds to various levels of degradation. This latter is evaluated by the indicators characterizing the soil and the vegetal cover.

The good correlation found during the confrontation of the remote-sensing data with the measured of salinity data of the ground surface classis has been used to map the salinity of the soil by the application of the remote-sensing and allow a comparison with the obtained map by kriging.

The two methods have shown an important extension of the salinity. However, the map of the salinity estimated by remote-sensing made it possible to have a better estimate compared to that obtained by kriging ordinary and this on the level of the extremes values.

Key words: Bas-Cheliff; remote-sensing; degradation; salinity; ground surface.