

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Année 2017

Faculté des sciences de la Terre

Département de Géologie

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences

Option : Hydrogéologie

THEME

*La télédétection au service des ressources en eaux,
Application à la gestion des ressources en eaux dans
la vallée d'Oued Righ*

Par : M^{me} BOUSSAADA NAWEL

Directeur de thèse : Pr KHERICI-BOUSNOUBRA Houria

Devant le jury:

Président: Pr LARABA Abdelaziz Université Badji Mokhtar Annaba

Examineurs : Pr DERRADJI El Fadel Université Badji Mokhtar Annaba

Pr KACHI Slimane Université 08 Mai 1945 Guelma

Pr MAOUI Ammar Université 08 Mai 1945 Guelma

Pr BAALI Fethi Université Larbi Tebessi Tébessa

وجعلنا من الماء كل شيء حيا



Remerciements

Je tiens à remercier d'abord Dieu qui m'a permis de goûter le plaisir de la vie scolaire.

La thèse peut être définie comme un grand périple de quête de connaissance et de découverte. Elle est aussi l'étiquette scientifique du thésard qui, à l'instar d'un enfant qui marche à quatre pattes, est suivi par une ou plusieurs personnes plus expérimentées. C'est pourquoi, la fin de la thèse est, pour le thésard, le moment privilégié pour exprimer sa reconnaissance et sa gratitude à l'ensemble des personnes qui ont compté dans sa vie scientifique.

Mes remerciements infinis et respect les plus sincères vont directement à mon encadreur M^{me} KHERICI .H . Ses enseignements et sa confiance m'ont permis de m'épanouir scientifiquement pendant ces années.

Mes vifs remerciements vont également à Mme Danielle Ducrot et M^R et Yann Kerr, Directeur du CESBIO, qui m'ont accueilli dans leur laboratoire et ont permis à cette thèse de se dérouler dans les meilleures conditions.

Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu juger ce travail.

Dédicace

Je dédie le fruit de mon travail en signe d'amour, d'éternelle et de respect :

A celle que j'aime : ma mère ;

A la mémoire de mon père.

A mon fidèle campagne, pour sa patience,

A ma fille chérie : Meryem (Myma)

A mon cher frère : Mehdi

A ma chère sœur : Hana (Noussa)

A ma nièce : Sara

A mon neveu : Rami

A mes tantes et oncles ainsi que mes cousins et cousines.

Je dédie ce travail également à tous qui auront le plaisir de lire cette thèse.

Résumé

En termes de volume stocké, les ressources souterraines de la vallée d'Oued Righ comptent probablement parmi les plus importantes du monde. Ceci a envisagé la possibilité d'un développement important de l'agriculture au Sahara.

La question de gérer ces ressources fait l'objet d'un grand intérêt depuis plusieurs décennies. La télédétection constitue un outil d'aide à la décision, optimisant le suivi et la gestion des ressources terrestres, elle s'avère de plus en plus utile dans les grandes étendues, telle que le désert, où tous les moyens de supervision sont difficiles.

Pour cela, le but de ce travail vise à évaluer le potentiel de cette approche pour mesurer l'ampleur des modifications du paysage et l'analyse de l'évolution actuelle de l'occupation du sol, afin de mieux comprendre le rôle respectif des facteurs contrôlant cette évolution.

La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement est l'étude multi-date.

A ce propos, nous avons réalisé une approche diachronique en domaine aride portant sur des données datant de 1987, 2000 et 2009 (images Landsat TM et ETM+) de la région d'Oued Righ dans le Sud Est Algérien.

L'objectif principal de la présente étude consiste à traiter des images satellitaires multi-dates par la méthode de classification supervisée de Support vector machine (SVM) et d'élaborer une cartographie détaillée de la dynamique d'occupation et d'utilisation du sol

La démarche établie a permis une évaluation quantitative et qualitative des changements des états de surface à savoir la multiplication des populations (surface bâtie), l'évolution du nombre des palmeraies, la hausse des plans d'eaux à la surface (les chotts et les sols humides), ainsi que la salinité des sols.

L'analyse de l'évolution de ces différents états permet de mieux identifier les facteurs affectants l'environnement et donne une nouvelle vision de la gestion de ces ressources.

Mots-clés : télédétection- occupation et utilisation de sol- composition colorée – classification - Sahara Septentrional.

ملخص

يعد حجم موارد المياه الجوفية لمنطقة وادي ريغ من بين الأكثر أهمية في العالم ويعتبر هذا احتمال تطور كبير للزراعة في الصحراء.

مسألة إدارة هذه الموارد هي موضوع اهتمام كبير لعدة عقود.

الاستشعار عن بعد هو أداة لدعم اتخاذ القرارات، وتحسين رصد وإدارة الموارد ، يصبح ذا أهمية خاصة في المناطق الواسعة مثل الصحراء، حيث وسائل الإشراف صعبة.

لهذا، فإن الهدف من هذه الدراسة هو تقييم إمكانات هذا النهج لقياس مدى التغير في الطبيعة وتحليل الاتجاهات الحالية في استخدام الأراضي، لفهم أفضل للعوامل المتحركة و المسيطرة على هذا التطور.

وبالمناسبة، أجرينا دراسة متعددة التاريخ في المنطقة القاحلة على بيانات من 1987 - 2000 و 2009 (لاندسات TM و+ ETM) من منطقة وادي ريغ لجنوب شرق الجزائر

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو علاج لصور الأقمار الصناعية متعددة التاريخ بواسطة طريقة التصنيف (آلة الدعم الموجه) ووضع خرائط تفصيلية لإشغال و استخدام الأراضي.

سمحت الدراسة بإنشاء التقييم الكمي والنوعي لتغيرات مساحة الأرض والمتمثلة في زيادة السكان (منطقة البناء) والتغيرات في عدد بساتين النخيل والمساحات المائية الصاعدة على السطح و كذا ملوحة التربة.

كلمات مفتاحية: الاستشعار عن بعد- استخدام الأراضي- تركيبة ملونة- تصنيف- الصحراء الشمالية.

Abstract

In terms of stored volume, the underground resources of the Oued Righ Valley are probably among the largest in the world. This envisaged the possibility of an important development of agriculture in the Sahara.

Remote sensing is a decision support tool, optimizing a monitoring and management of land - resources; it is becoming increasingly useful in large areas such as the desert, where all supervising means are difficult.

This study aims to evaluate the potential of this approach for the analysis of the evolution of soil occupation and quantify the modifications of the landscape in arid area and this through a multi-data study.

To better understand the role of factors controlling this development, we have achieved a diachronic approach bearing on data from 1987, 2000 and 2009 (Landsat TM and ETM +) of the Oued Righ valley in Algerian south eastern.

The main objective of this study is to process multi-date satellite images using the supervised classification support vector machine (SVM) and to develop a detailed mapping of the dynamics of land cover and land use.

The proposed approach has allowed a quantitative and qualitative assessment of change in surface states to know the multiplication of populations (built area), evolution in the number of palm groves, water upwelling to the surface (Chotts ,wet soils) as well as soil salinity.

The analysis of the evolution of these different states allows a better identifying the factors affecting at this environment and gives a new vision of resource management.

Keywords: Remote sensing- land and use cover- colored composition - classification- Northern Sahara.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
ملخص.....	iv
Abstract	v
Acronymes	xvii
Introduction générale.....	2
I. PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	7
I.1. Chapitre 01 : Cadre général.....	9
Introduction	9
I.1.1. Situation de la zone d'étude	9
I.1.2. La démographie	12
I.1.2.1. L'Origine	12
I.1.2.2. Evolution.....	13
I.1.2.3. Répartition de la population	14
I.1.3. Le système de production agricole de la région	15
I.1.3.1. Les zones agricoles et leur découpage communal.....	16
I.1.3.2. La pédologie des sols	16
I.1.4. Relation Plante – Sol – Eau	17
I.1.5. Historique du canal Oued Righ	18
I.1.5.1. Pendant la colonisation.....	19
I.1.5.2. Après l'indépendance	19
I.2. Chapitre 02 : Géologie et Géomorphologie.....	22
Introduction.....	22
I.2.1. Géologie régionale	22
I.2.2. Cadre géologique local.....	25
I.2.2.1. Lithostratigraphie	27
I.2.2.1.1. Secondaire	27
I.2.2.1.1.1. Le crétacé	27
I.2.2.1.1.1.1. Le Néocomien	27
I.2.2.1.1.1.2. Le Barrémien.....	27
I.2.2.1.1.1.3. L'Aptien	27
I.2.2.1.1.1.4. Albien.....	28

I.2.2.1.1.1.5.	Vraconien	28
I.2.2.1.1.1.6.	Cénomaniens	28
I.2.2.1.1.1.7.	Turonien	28
I.2.2.1.1.1.8.	Sénonien	29
I.2.2.1.1.1.8.1.	Sénonien lagunaire	29
I.2.2.1.1.1.8.2.	Sénonien carbonaté.....	29
I.2.2.1.2.	Tertiaire	29
I.2.2.1.2.1.	Eocène	29
I.2.2.1.2.1.1.	Eocène carbonaté.....	29
I.2.2.1.2.1.2.	Eocène évaporitique	29
I.2.2.1.2.2.	Mio-Pliocène	30
I.2.2.1.3.	Quaternaire	31
I.2.3.	Tectonique	32
I.2.4.	Paléogéographie	32
I.2.5.	Cadre géomorphologique	34
I.2.5.1.	La topographie.....	34
I.2.5.2.	Géomorphologie.....	34
I.3.	Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique.....	37
	Introduction	37
I.3.1.	Climat	37
I.3.2.	Le bilan hydrique.....	38
I.3.2.1.	Précipitations	38
I.3.2.1.1.	Coefficient pluviométrique.....	40
I.3.2.1.2.	Répartition saisonnière des précipitations	42
I.3.2.2.	Température.....	42
I.3.2.2.1.	Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN	43
I.3.2.2.2.	La contrainte d'aridité.....	43
I.3.2.2.2.1.	Indice d'Aridité de DEMARTONE	43
I.3.2.2.2.2.	Méthode d'EUVERTE.....	44
I.3.2.3.	Humidité relative de l'air.....	45
I.3.2.4.	Les Vents	45
I.3.2.5.	Durée d'insolation	46
I.3.2.6.	L'évaporation.....	47
I.3.3.	Estimation des facteurs du bilan hydrique.....	48

I.3.3.1.	Evapotranspiration.....	48
I.3.3.1.1.	Evapotranspiration réelle « ETR »	48
I.3.3.1.2.	Evapotranspiration potentielle « ETP ».....	49
I.3.3.2.	Détermination du ruissellement « R »	49
I.3.3.3.	Détermination de l'infiltration.....	50
I.3.3.4.	Calcul du bilan hydrique	50
I.3.4.	Hydrologie.....	52
I.4.	Chapitre 04 : Ressources en eaux, géométrie et gestion des aquifères.....	55
	Introduction	55
I.4.1.	Description des aquifères	56
I.4.1.1.	Les nappes profondes	56
I.4.1.1.1.	Le Continental Intercalaire	56
I.4.1.1.1.1.	Alimentation	59
I.4.1.1.1.2.	Écoulement.....	60
I.4.1.1.1.3.	Exutoires.....	62
I.4.1.1.1.3.1.	Exutoires naturels	62
I.4.1.1.1.3.2.	Exutoires artificiels.....	62
I.4.1.1.2.	Le Complexe Terminal.....	63
I.4.1.1.2.1.	La première nappe des sables CT1.....	64
I.4.1.1.2.2.	La deuxième nappe du sable CT2	64
I.4.1.1.2.3.	La nappe du Sénonien-Eocène CT3	64
I.4.1.1.2.4.	Alimentation	65
I.4.1.1.2.5.	Direction des écoulements.....	66
I.4.1.1.2.6.	Exutoires.....	68
I.4.1.1.2.6.1.	Exutoires naturels	68
I.4.1.1.2.6.2.	Exutoires artificiels.....	68
I.4.1.2.	La nappe superficielle.....	68
I.4.2.	Les problèmes rencontrés	69
I.4.2.1.	Le problème du grand nombre de forages.....	69
I.4.2.2.	La remontée du niveau hydrostatique de la nappe superficielle.....	70
I.4.2.3.	La salinité des sols.....	71
I.4.2.4.	Température, Corrosion et Entartrage	72
I.4.3.	La potabilité.....	73
I.4.4.	Exploitation des nappes.....	74

I.4.5.	Drainage	77
I.5.	Chapitre 05 : Qualité des eaux.....	82
	Introduction	82
I.5.1.	Chimie des eaux superficielle (eau du canal)	82
I.5.1.1.	Paramètres physiques	82
I.5.1.1.1.	Le potentiel d'Hydrogène (pH)	82
I.5.1.1.2.	La minéralisation	83
I.5.1.1.3.	La conductivité électrique	84
I.5.1.2.	Paramètres chimique	84
I.5.1.2.1.	Variation dans le temps et dans l'espace des cations	84
I.5.1.2.2.	Variation dans l'espace et dans le temps des anions	86
I.5.1.3.	Classification des eaux	87
I.5.1.3.1.	Classification de Stabler (formule caractéristique)	88
I.5.1.3.2.	Classification de Piper.....	88
I.5.1.4.	Diagramme de Richards	90
I.5.2.	Chimie des eaux souterraines	91
I.5.2.1.	Eau du Complexe Terminal (CT).....	91
I.5.2.1.1.	Paramètres physiques	91
I.5.2.1.1.1.	Le potentiel d'Hydrogène (pH)	91
I.5.2.1.1.2.	Le résidu sec (Rs)	92
I.5.2.1.1.3.	La Conductivité électrique (CE).....	92
I.5.2.1.2.	Paramètres chimiques.....	93
I.5.2.1.2.1.	Les cations.....	93
I.5.2.1.2.1.1.	Le Calcium (Ca^{2+})	93
I.5.2.1.2.1.2.	Le Magnésium (Mg^{2+})	93
I.5.2.1.2.1.3.	Le sodium et le potassium (Na^+ , K^+)	94
I.5.2.1.2.2.	Les anions.....	95
I.5.2.1.2.2.1.	Les chlorures Cl^-	95
I.5.2.1.2.2.2.	Les sulfates (SO_4^{3-})	95
I.5.2.1.2.2.3.	Les bicarbonates HCO_3^-	96
I.5.2.1.3.	Classification de Piper.....	97
I.5.2.1.4.	Aptitude des eaux à l'irrigation	97
I.5.2.2.	Eau du Continental Intercalaire (CI)	98
I.5.2.2.1.	Paramètres physiques	98

I.5.2.2.2.	Paramètres chimique	99
I.5.2.2.2.1.	Variation des cations	99
I.5.2.2.2.2.	Variation des anions	100
I.5.2.2.3.	Classification de Piper.....	101
	Conclusion.....	103
II. DEUXIEME PARTIE : APPORT DE LA TELEDETECTION A LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU : APPLICATION A LA VALLEE D'OUED RIGH		104
II.1.	Chapitre 06 : Télédétection, Principes d'Acquisition.....	106
	Introduction	106
II.1.1.	Généralités.....	107
II.1.1.1.	Définition de la télédétection.....	107
II.1.1.2.	Historique de la télédétection	107
II.1.1.3.	Système LANDSAT et ses produits	108
II.1.1.4.	Notion et conception d'une image satellitaire	112
II.1.2.	Principes de base de la télédétection : www.ccrs.nrcan.gc.ca	112
II.1.2.1.	Le rayonnement électromagnétique.....	114
II.1.2.2.	Le spectre électromagnétique	115
II.1.3.	Les comportements spectraux	117
II.1.3.1.	Comportement spectral de l'eau.....	119
II.1.3.2.	Comportement spectral des couverts végétaux	120
II.2.	Chapitre 07 : Objectifs et démarche méthodologique	123
	Introduction	123
II.2.1.	Objectifs et démarche méthodologique	123
II.2.1.1.	Objectifs	123
II.2.1.2.	Méthodologie.....	124
II.2.2.	Traitements des images	126
II.2.2.1.	Traitements d'amélioration de la qualité ou de rehaussement.....	126
II.2.2.2.	Traitement thématique.....	127
II.2.2.2.1.	Composition colorée.....	127
II.2.2.2.2.	Procédure de traitement par classification supervisée	129
II.3.	Chapitre 08 : Résultats et discussion	132
II.3.1.	Analyse des compositions Colorées	132
II.3.2.	Analyse des classifications	135
II.3.2.1.	Validation de la classification	135

II.3.3.	Dynamique de l'occupation du sol	136
II.3.3.1.	Occupation du sol	136
II.3.3.2.	Quantification du taux de changement	138
II.3.3.2.1.	Analyse et évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols entre 1987 – 2000	138
II.3.3.2.2.	Evolution de l'occupation des sols entre 2000 – 2009	140
II.3.3.2.3.	Bilan final de l'évolution de l'occupation du sol (1987-2000-2009)	142
II.3.4.	Carte des changements	144
	Conclusion.....	147
	Conclusion générale et recommandations	149
	Bibliographie	153
	Annexes.....	161

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la région d'étude. (Chenchouni, 2012).....	10
Figure 2: les territoires du Sud (Kouzmine, 2009).....	11
Figure 3: Projet concernant le chemin de fer au Sahara (Kouzmine, 2009).....	12
Figure 4: Dynamiques démographiques des agglomérations urbaines (1966-1998): ONS, 1998, RGPH in Kouzmine 2005	13
Figure 5: Répartition de la population de l'Oued-Righ par Zone.....	14
Figure 6: Répartition des superficies en Km ² par communes.....	16
Figure 7: Tracé de l'oued Righ et positionnement des stations de jaugeage	18
Figure 8: Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978).....	22
Figure 9: Carte géologique du bassin du Sahara Septentrional (ABHS, 2006).	23
Figure 10: Carte géologique du SASS (OSS, 2003).....	24
Figure 11: Carte géomorphologique du Sahara Septentrional (ABHS 2006)	25
Figure 12: Carte géologique du Sahara orientale 1/1 000 000. Extrait de la carte géologique du Nord-Ouest de l'Afrique (1976). [Légende page suivante].	26
Figure 13: Carte géologique de la région de Touggourt, extrait de la carte géologique	31
Figure 14: Colonne litho-stratigraphique synthétique de la région de Touggourt (sans échelle).....	32
Figure 15: La morphologie de l'Oued Righ (Ballais ,2010).....	35
Figure 16: Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations Météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse, No : 1/98	38
Figure 17: Les Isohyètes de la moyenne des précipitations annuelles du Sahara de l'Algérie D'après J. DUBIEF Le climat du Sahara 12; 1963	39
Figure 18: Histogramme de distribution moyenne mensuelle de la station de Touggourt période (1982 – 2013).....	40
Figure 19: Evolution des précipitations annuelles de la station de Touggourt période (1982– 2013) ..	42
Figure 20: Figure illustrant la répartition saisonnière des précipitations.	42
Figure 21: Diagramme pluvio- thermique à la station de Touggourt ; période (1982-2013)	43
Figure 22: Humidité relative moyenne mensuelle période d'observation (1982-2013) de la station de Touggourt	45
Figure 23: Moyennes mensuelles des vitesses de vent.....	46
Figure 24: Insolation moyennes mensuelles.....	47
Figure 25: Les évaporations moyennes mensuelles	47
Figure 26: Variation de l'ETP de THORNTHWAITE en fonction des précipitations (mm) de la station de Touggourt.	51
Figure 27: Figure montrant les principaux lacs et chotts de la région d'oued Righ.....	52
Figure 28: Limite du système aquifère du Sahara Septentrional (Saradeth & al, 2010).	55
Figure 29: Carte des ressources en eau souterraines des deux Systèmes Aquifères du Sahara septentrional (continental intercalaire et complexe terminal) (OSS-2003)	56
Figure 30: Carte hydrogéologique dans le Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003)	58
Figure 31: Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI. ..	59
Figure 32: Carte montrant l'alimentation des deux nappes aquifères du Sahara Septentrional (Le CI et Le CT) (Kouzmine, 2007).	60
Figure 33: Carte piézométrique de référence du "CI" (OSS, 2003).	61
Figure 34: Carte des transmisivités du Continental Intercalaire (OSS, 2003).....	61

Figure 35 : Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (Unesco, 1972)	63
Figure 36: Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région de Touggourt.....	65
Figure 37: Coupe hydrogéologique schématique Nord Sud du Complexe Terminal (Castany, 1982) ..	65
Figure 38: Carte piézométrique de référence du "CT" (OSS, 2003)	66
Figure 39: Carte de transmissivités du Complexe terminal (OSS, 2003).....	67
Figure 40: Carte des répartitions des débits mobilisés dans la vallée d'Oued Righ.....	76
Figure 41: Situation des stations de jaugeage.....	78
Figure 42: Variation des débits en fonction des stations de jaugeage (période 1993-2012)	80
Figure 43: Variation du pH du canal Oued Righ.....	83
Figure 44: Variation de la salinité en g/l des eaux du canal.....	83
Figure 45: Variation de la conductivité électrique en (ms/cm.)	84
Figure 46: Variation spatio-temporelle du Calcium (Ca) en mg/l.....	85
Figure 47: Variation spatio-temporelle du Magnésium (Mg) en mg/l.	85
Figure 48: Variation spatio-temporelle du Sodium et Potassium (Na+K) en mg/l.	86
Figure 49: Variation spatio-temporelle des Chlorures (Cl) en mg/l.....	86
Figure 50: Variation spatio-temporelle des Sulfates (SO ₄) en mg/l.	87
Figure 51: Variation spatio-temporelle des Bicarbonates (HCO ₃) en (mg/l).....	87
Figure 52: Diagrammes losangiques de Piper des eaux du canal Oued Righ (2004 - 2006 - 2007- 2012)	89
Figure 53: Diagrammes de RIVERSIDE de la nappe phréatique (2004 - 2006 - 2007- 2012).....	91
Figure 54: Variation du pH du Complexe Terminal.....	92
Figure 55: Variation de la salinité en mg/l des eaux du Complexe Terminal.	92
Figure 56: Variation spatiale de la conductivité électrique en (ms/cm.)	93
Figure 57: Variation spatio-temporelle du Calcium (Ca) en (mg/l).	93
Figure 58: Variation spatio-temporelle du Magnésium (Mg) en (mg/l).....	94
Figure 59: Variation spatio-temporelle du Sodium(Na) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).....	94
Figure 60: Variation spatio-temporelle du Potassium(K) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).....	95
Figure 61: Variation spatio-temporelle des Chlorures (Cl) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).....	95
Figure 62: Variation spatio-temporelle des Sulfates (SO ₄) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).	96
Figure 63: Variation de la concentration des Bicarbonates (HCO ₃) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).	96
Figure 64: Diagramme de PIPER des eaux du Complexe Terminal (2016).....	97
Figure 65: Diagramme de RIVERSIDE des eaux du Complexe Terminal (2016).....	98
Figure 66: Variation du pH	98
Figure 67: Variation de la conductivité électrique	99
Figure 68: Variation de la salinité en g/l	99
Figure 69: Variation de la concentration des cations en (mg/l) des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (2010).	100
Figure 70: Variation de la concentration des anions en (mg/l) des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (2010).	101
Figure 71: Diagramme de PIPER des eaux du Continental Intercalaire (2010).....	102

Figure 72: Principe de base de la télédétection (Bacour, 2001 in Benhadj, 2008).....	112
Figure 73: Le capteur passif et actif	113
Figure 74: Les sept étapes de la télédétection (d'après TONON M, 2009 in LAOUINI).....	114
Figure 75: Figure présentant le rayonnement électromagnétique et ces composants.....	115
Figure 76: Représentation des ondes électromagnétique et la relation entre la fréquence et la longueur d'onde.....	115
Figure 77: Le spectre électromagnétique	116
Figure 78: Résolution spectrale (Benkaddour ; 2002).....	117
Figure 79: Le domaine du visible dans le spectre électromagnétique.....	117
Figure 80: Réflectances comparées de l'eau et d'une végétation.....	118
Figure 81: Réflectance de l'eau selon la concentration chlorophyllienne (Bonn & Rochon, 1992)....	119
Figure 82: Signature spectrale en réflectance de plusieurs végétaux et selon le degré de flétrissement. (Minet, 2011, Anselme).....	121
Figure 83: Les scènes ETM+ de LANDSAT (Bensaid, 2006).....	125
Figure 84: Organigramme global de la méthodologie suivie.	126
Figure 85: Traitements de rehaussement des images	127
Figure 86: Répartition des forages dans le système aquifère du Sahara septentrional pour les années 1960 et 2000 (Boussaâda, 2007)	132
Figure 87: Limites, exploitation et intensité des forages de la vallée d'Oued Righ.....	133
Figure 88: (A), (B), (C)- Compositions colorées 543 de la vallée d'Oued Righ.....	134
Figure 89: (A), (B), (C)-Cartes d'occupation des sols en 1987-2000 et 2009.....	137
Figure 90: Evolution selon l'occupation de sol entre 1987-2000.....	139
Figure 91: Variation des nombre de pixels entre 1987-2000.	139
Figure 92: Evolution selon l'occupation de sol entre 2000-2009.....	141
Figure 93: Variation des nombre de pixels entre 2000-2009.	141
Figure 94: (A), (B), (C)-Bilan final du taux de changement d'occupation de sol (1987-2000 et 2009).	144
Figure 95: (A), (B), (C)-Cartes de changements entre les années 1987-2000/ 2000-2009 et et 1987-2000-2009.....	145

Liste des tableaux

Tableau 1: Les sols caractéristiques de la vallée de l'Oued Righ (Sogreah, 1971).....	17
Tableau 2: Caractéristiques techniques du canal et des stations de jaugeage. (ABHS)	20
Tableau 3:Coordonnées de la station météorologique de la station de Touggourt.....	38
Tableau 4: Distribution moyenne mensuelle des précipitations à la station de Touggourt sur une période de 32 ans (1982– 2013)	39
Tableau 5: Coefficient pluviométrique de la Stations de Touggourt période (1982 – 2013)	41
Tableau 6: La variation des températures moyennes mensuelles à la station de Touggourt période– 1982-2013.....	43
Tableau 7: Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE.....	44
Tableau 8: La relation température précipitation, méthode d'EUVERTE.	44
Tableau 9: L'Humidité relative moyenne mensuelle, période (1982-2013).....	45
Tableau 10: Représentant la vitesse du vent moyenne mensuelle, période (1982-2013).....	46
Tableau 11: La durée d'insolation moyenne mensuelle, période (1982-2013).....	46
Tableau 12: L'évaporation moyenne mensuelle, période (1982-2013).	47
Tableau 13: Résultats de l'ETR par la méthode de Turc.....	49
Tableau 14: Résultats de l'ETP obtenus par la formule de Serra.....	49
Tableau 15: Résultats du ruissellement par la formule de TEXERONT BERKALOFF.....	50
Tableau 16: Résultats de l'infiltration par la formule générale.	50
Tableau 17: Bilan hydrique selon la méthode de C.W. THORNTHWAITE pour la station de Touggourt (1982 – 2013)	51
Tableau 18: caractéristiques des sites de la remontée (CRSTRA, 2011)	53
Tableau 19: Caractéristiques du Continental Intercalaire (EPDGDRS .1, 1998).....	62
Tableau 20: Coefficients d'emmagasinement du CT estimés à partir de la lithologie des forages (OSS, 2003).....	67
Tableau 21: Concentrations des normes Algériennes de potabilités.	74
Tableau 22: Evolution des forages et des débits mobilisés (Merrouchi, 2009).....	75
Tableau 23: Nombre de forages et débits mobilisés par zone (ANRH 2007in Merrouchi Lounnes, 2009).....	76
Tableau 24: Variations des débits en fonction du temps dans les stations de jaugeage (ANRH 2012)	79
Tableau 25: Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du canal.....	88
Tableau 26: Dates de lancement et autres spécificités générales des satellites LANDSAT (Gomèz, 2004).....	109
Tableau 27: les caractéristiques des différents capteurs	110
Tableau 28: Caractéristiques du capteur Landsat 7ETM+ (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).	111
Tableau 29: Caractéristiques des bandes spectrales du capteur ETM+ Landsat 7 (http://landsat.gsfc.nasa.gov/).....	111
Tableau 30: Caractéristiques des bandes spectrales ETM+ de LANDSAT (Bensaid, 2006).....	128
Tableau 31: Changement d'occupation du sol entre 1987 et 2000. T1 = surface à la date 1 ; T2 = surface à la date 2 ; Tc1 = taux de changement entre les dates 1987 et 2000.	140
Tableau 32: Changement d'occupation du sol entre 2000 et 2009.....	142

Liste des photos

Photo 1: Photos présentant la remontée des eaux à Temacine & à Sidi Slimane (Boussaâda, 2007) ...	70
Photo 2: Rejet d'eaux usées sans traitement directement dans le canal.....	71
Photo 3: Formation de croutes blanchâtres	71
Photo 4: Vapeur d'eau dégagée par un forage albien.....	72
Photo 5: Photos illustrant les dépôts de tartre.	73
Photo 6: Photos illustrant le caractère agressif des canalisations de la vallée d'Oued Righ.	73
Photo 7: Photos illustrant les seguias en terre	75
Photo 8: Apparition de la végétation sur les berges du canal.....	80

Acronymes

A.E.P: Alimentation en Eau Potable

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques

CESBIO: Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère

CI: Continental Intercalaire

CRD: Centre de Recherche et de Développement

CRSTRA: Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides

CT : Complexe Terminal

D.P.A.T: Direction et de Planification et d'Aménagement du Territoire

D.S. A: Direction des Services Agricole

ENVI: Environment for Visualizing Images (logiciel de traitements et de visualisation d'
d'images).

ERESS: Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional

ETM+: Enhanced Thematic Mapper plus

FAO: Food and Agriculture Organization

LANDSAT : Land Satellite (satellite de terre).

MSS: Multi Spectral Scanneur

NAD83: Nord-Américain De 1983

NASA: National Aeronautics and Space Administration

O.M.S: Organisation Mondiale de la Santé

O.N.M: Office National de Météorologie.

PDGDRS: Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes

RBV: Return Beam Vidicon

RGB: Red Green Bleu

SASS: Système Aquifère du Sahara Septentrional.

TM: Thematic Mapper

TDRS: Tracking and Data Relay Systems

UTM: Universal Transverse Mercator (Projection cartographique).

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Avec près d'un million de km² de superficie, le Sahara septentrional, qui s'étend d'Ouest en Est entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, est l'un des plus grands déserts au monde.

Les hydrogéologues (*ERESS, 1972 ; OSS, 2002 ; Hamidi, 2014 ; Petersen, 2014*) ayant mené des investigations dans cette région désertique reconnaissent qu'elle recèle d'énormes réserves d'eaux souterraines.

Certains s'accordent à dire que leurs eaux sont héritées de périodes plus humides ; alors que pour d'autres, ces nappes peuvent encore être actuellement alimentées lorsque certaines conditions sont réunies. Actuellement un problème de gestion est prédominant, Cette gestion inclut toutes les activités permettant d'utiliser profitablement ces ressources, adhérant une politique de développement durable.

L'augmentation de la demande en eau accroît les situations de surexploitation, ce qui place sa gestion au centre des préoccupations actuelles, et lui confère une attention particulière dans le monde de la recherche. Cette dernière a une place importante dans tous les pays où l'usage de l'eau à des fins agricoles représente un fort pourcentage de la demande totale. C'est le cas pour la majorité des pays méditerranéens. Cependant, la gestion de la demande en eau nécessite d'avoir plusieurs types de données concernant non seulement les aspects économiques mais également surtout à l'état de la ressource et de son usage.

Devant cet énorme espace, les moyens classiques d'investigations deviennent impuissants. L'outil télédétection s'avère le meilleur pour venir en aide et compléter ces anciennes méthodes. La question de gérer ces ressources fait l'objet d'un grand intérêt depuis plusieurs années (*Benhadj, 2008 ; Clauzel, 2008 ; EL Hadani, 1997 ; Hoang, 2007 ; Hoang, 2008 ; Lecerf, 2008 ; Sarr, 2009*).

A une époque où il semble que l'on s'approche des limites cruciales du stock d'eau, des difficultés de conflit caractère géopolitique surgissent. Des solutions sont envisagées alors pour mieux gérer et faire profiter tous les usagers de l'eau. Dans la situation de gestion régionale, la télédétection est un outil privilégié. Elle apporte une vision régionale exhaustive et objective, qui doit contribuer à renforcer les outils d'aide à la décision conçus à la destination des gestionnaires de la ressource (*Benhadj ; 2008*).

Par ailleurs, elle permet l'acquisition de données régulièrement distribuées dans l'espace et le temps (*Lambin, 1988 ; Nonguierma, 2005*).

C'est dans ce contexte que nous cherchons l'apport de la télédétection à l'hydrogéologie dans la région d'Oued Righ qui fait partie d'une unité géographique du bas Sahara où la richesse en eau reste favorable aux accroissements démographiques et aux extensions agricoles. L'usage de l'eau agricole représente plus de 90 % de la consommation totale en eau.

Le but du présent travail de recherche s'inscrit dans le champ intermédiaire entre l'hydrogéologie et les approches spatiales, il veille à améliorer les méthodes classiques par un aspect de développement technique associé à l'utilisation des images satellitaires. Il s'agit de décrire, dans l'espace (à la résolution « kilométrique ») et sur de longues périodes temporelles (un peu plus de deux « décennie »), l'utilisation des eaux de la vallée d'Oued Righ, au Sud-est algérien.

Introduction générale

La télédétection n'est pas le remède pour les problèmes de développement et de gestion des ressources en eau. Néanmoins, elle peut fournir des données qui sont des outils de base pour un inventaire sérieux, une surveillance et une gestion saine de ces ressources.

Une question qui se pose : est-ce que les images satellitaires conviennent pour une utilisation en hydrogéologie ? Le problème principal est la méconnaissance du potentiel des données de télédétection par les hydrogéologues (*Hoffmann, 2005*).

Le lien entre les images et l'eau souterraine est indirect. En effet, l'image ne cartographie pas les eaux souterraines mais plutôt des éléments d'intérêt pour indiquer la présence de cette ressource (*Chalifoux & al, 2005*). En effet, selon (*Kouassi, 2007 in Soro & al, 2014*) l'occupation du sol influence les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement de surface et l'infiltration selon la nature des végétaux.

Dans cette recherche, il s'agit d'apprécier l'apport de la télédétection à l'étude de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol. Elle facilite la gestion durable et forme une base d'information nécessaire pour la planification, la surveillance et l'évaluation du déploiement de l'activité humaine.

Les effets cumulés du climat, la pression démographique et le développement de l'agriculture ont entraîné une rapide dégradation des écosystèmes.

Les aspects les plus ressentis par les populations ont été la réduction significative des ressources en eaux avec la salinisation des sols et le rabattement des nappes.

L'intérêt scientifique de l'utilisation des techniques de télédétection pour l'étude des écosystèmes africains n'est plus à démontrer (*Elliott, 1996 ; Hulme, 1996 ; Gueye et Ozer, 2000*).

La méthode de comparaison des classifications d'images satellitaires multi dates pour une région donnée est largement utilisée et couramment appliquée (*Franklin & al, 2002, 2005; Braimoh & Vlek 2005; Liu & al, 2005; Yuan & al, 2005; Kintz & al, 2006*).

Cette approche a pour but, de quantifier les changements de l'occupation du sol tout en considérant la répartition spatiale de ces changements (*Franklin & al, 2002; Griffith & al, 2003; Kupfer, 2006*) et permet d'en évaluer les impacts sur la biodiversité (*Lecerf, 2008 ; Moufaddal, 2005 ; Poschlod & al, 2005 ; Reidsma & al, 2006 ; Tombre et al, 2005*). C'est une meilleure connaissance de l'état présent et des évolutions des écosystèmes des régions arides et de leurs services (*Hiernaux & Turner, 2002 ; Hountondji & al, 2003*).

Cette importance de l'occupation des sols en fait une thématique incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques, c'est l'un de éléments clé, notamment, à partir de l'exploitation de longues séries d'images satellitaires (*Han & al ; 2004 in lecerf ; 2008*).

Cependant, obtenir une bonne cartographie de l'occupation des terres par télédétection demeure un problème délicat (*Ouattara, 2006*).

La carte d'occupation du sol tente à mettre en évidence la relation entre l'homme et son milieu (*Omrane, 1977*).

La cartographie des sols, avancée par plusieurs auteurs depuis quelques années, est encore d'actualité de nos jours au niveau national. Elle est soutenue par plusieurs auteurs dont (*Benmessaoud, 2008, 2009 et Toumi & al, 2013*).

Introduction générale

Dans le contexte de cette étude l'occupation du sol (OS) est définie comme une description du couvert biophysique du sol, à titre d'exemple la végétation et l'eau, et l'utilisation du sol (US) est définie comme étant la description du développement anthropique du territoire, comme l'agriculture et l'espace urbain (*Chalifoux & al, 2006*).

L'exploration d'un ensemble adéquat de protocoles harmonisés à utiliser pour les observations au sol reste un grand défi (*Foody, 2003 ; Eklundh & Olsson, 2003*).

Au niveau international, le thème de l'occupation et d'utilisation du sol a fait l'objet de plusieurs recherches, programmes et rapports (*Andrieu, 2008 ; Chalifoux & al, 2006 ; El Garouani & al, 2007 ; Hoang, 2007 ; Hoang, 2008 ; Lecerf, 2008 ; Noyola-Medrano, 2013 ; Risser & al, 1998 ; Sarr, 2009 ; Soro & al, 2014 ; Zombre, 2006*).

L'un des plus importants, est le rapport présenté par la communauté scientifique du programme international LUCC « Land Use and Cover Changes », pendant les journées « Open Science Meeting » en janvier 1996 à Amsterdam (*Samaali, 2011*).

Ce programme insiste sur l'importance d'un effort international, pour mieux comprendre les effets découlant de la gestion des sols, ainsi que leurs impacts sur la variabilité spatiale et temporelle de l'utilisation des sols (*Podaire, 2003*).

En effet, l'urbanisation, l'explosion démographique, l'accroissement de l'économie et diverses causes anthropiques ont créés une grande pression sur les ressources naturelles en générale, la ressource en eau et l'utilisation des terres (*Hoang ; 2007*).

L'objectif principal de cette thèse est de faire une cartographie détaillée de la dynamique d'occupation et d'utilisation du sol, en se basant sur les indicateurs et les processus d'évolution de la zone.

Dans cet objectif, deux grands axes de recherche ont été explorés:

La mise en valeur optimale de l'espace, la connaissance précise du terrain, de son occupation et utilisation du sol est indispensable. Aujourd'hui, l'extension des méthodes d'analyses intégrées et les avantages de la télédétection aérospatiale, nous permettent d'approfondir les études en accédant à une information multi-temporelle, et de faire une cartographie détaillée facilement gérable et mise à jour.

Renforcer le processus résolutif de la contribution des ressources à la recherche et au développement pour l'application de la télédétection au Sahara.

Pour arriver à voir les services qu'apportent la télédétection à la gestion des ressources dans l'oued Righ, le travail s'étale sur huit(08) chapitres, répartis sur deux parties, devancés par une introduction et suivis par une conclusion générale et des annexes.

La première partie est constituée par 05 chapitres

Chapitre 1 :

Le chapitre 1 présente les principaux aspects et caractéristiques de la région d'Oued Righ utiles à la compréhension de l'écosystème, à savoir : la situation géographique de la zone d'étude, la population, la géologie, l'exploitation des nappes.

Chapitre 2 :

Le chapitre 2 traite une synthèse géologique du bassin du Sahara septentrional et présente une description litho stratigraphique des formations géologiques.

Nous distinguons trois ensembles :

Les terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux du Tademaït et Tinghert et le massif du Hoggar,

Les terrains du Mésozoïque et Cénozoïque, constituent l'essentiel des affleurements des bordures du bas Sahara.,

Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaires, occupent le centre.

Les sols de la vallée d'Oued Righ ont une texture fine limono-argileuse, avec des teneurs élevées en sels au Nord (au-delà d'El Meghair) et grossière à dominance sableuse au Sud, tandis que le fond est comblé par des sédiments sableux entrecoupés de lentilles d'argile salifère.

Chapitre 3

Dans ce chapitre est abordé l'aspect hydroclimatique de la région de Touggourt, caractérisée par un climat désertique ou hyperaride. Un bilan a été calculé sur une période d'observation de 30 années, avec le calcul des moyennes annuelles des précipitations, de la température, de l'évapotranspiration, du ruissellement et de l'infiltration. Le caractère hyperaride est aussi discuté.

Chapitre 4

Le chapitre 4 développe l'hydrogéologie de la région d'étude, La vallée d'Oued Righ apparaît ainsi particulièrement dépourvue en eaux souterraines mais l'étude hydrogéologique montre que la vallée renferme d'énormes réserves d'eaux souterraines. L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part et l'existence d'un fossé de subsidence d'autre part, ont favorisé la formation de deux grands systèmes aquifères captifs définis par le Complexe Terminal (CT) du Miopliocène d'une profondeur relative de 500m et le Continental Intercalaire (CI) formés entre les deux cycles marins du Paléozoïque et du Crétacé Supérieur constituent respectivement les limites inférieures et se trouvant à plus de 1200 m.

Chapitre 5

Ce chapitre révèle le traitement des données hydrochimiques par les différentes méthodes (formules et diagrammes). Le faciès chimique et l'origine de la composition chimique en relation avec la géochimie ont été largement révélés.

La deuxième partie est composée de trois chapitres qui traitent la télédétection et son apport à l'hydrogéologie

Chapitre 6

Avec l'apparition de la télédétection, de nouveaux produits et méthodes d'application cartographique sont expliqués dans ce chapitre avec la définition et l'historique de la télédétection. Les principes de base de la télédétection sont bien détaillés. Le rayonnement et

le spectre électromagnétiques des objets sont aussi bien expliquer avec la présentation des comportements spectraux de l'eau et du couvert végétal.

Chapitre 7

Ce chapitre démontre la méthodologie suivie et les échantillons de vérifications avec déplacement sur terrain avec discussions des applications de la télédétection ayant trait avec la thématiques du présent travail. On trouve un aperçu des méthodes de cartographie de l'occupation du sol, qui est un préalable aux études permettant de comprendre les interactions homme-environnement et à la gestion des ressources naturelles

Dans ce chapitre, une recherche approfondie a permis le choix de la meilleure méthode de traitement qu'est la méthode de classification dite du Support Vector Machine (SVM).

Chapitre 8 :

Le chapitre exprime les différents résultats trouvés et leurs interprétations suite à l'analyse diachronique des images Landsat TM (1987) et ETM+ (2000 et 2009) et la réalisation des cartes de changements.

**I. PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DE LA
ZONE D'ETUDE**

Chapitre 01 :

CADRE GENERAL

I.1. Chapitre 01 : Cadre général

Introduction

Dans cette première partie, on décrit le contexte général de la région d'Oued Righ et on présente les principaux aspects utiles à la compréhension de l'écosystème, à savoir : la population, la géologie, l'exploitation des nappes ainsi que la qualité des eaux.

En premier lieu, il s'agit d'une présentation générale de la zone d'étude, du milieu naturel qui est le support de l'occupation-utilisation du sol, ainsi que la présentation de quelques aspects du milieu humain. L'attention est portée sur le rôle de l'homme et son intervention dans la nature au moyen des différents aménagements.

Ce premier chapitre rappelle brièvement les différentes phases historiques de la constitution et de la formation du canal Oued Righ.

Cette présentation nous permet d'approfondir le sujet et la démarche de la thèse.

I.1.1. Situation de la zone d'étude

L'Oued Righ, avec les Ziban et le Souf est la troisième composante du Bas Sahara. C'est le pays du sable, du sel et des eaux artésiennes, située à l'Est du Sahara septentrional, est une longue dépression méridienne, en position entre le grand Erg Oriental et la zone des chotts au Nord. La gouttière artésienne et le couloir de communication ont fait la richesse de cet espace avec un ruban d'oasis (une cinquantaine). La vallée doit sa fortune à l'exploitation des eaux artésiennes dans la dépression qui constitue l'axe du Bas-Sahara. C'est la seule région saharienne dans laquelle la colonisation se soit implantée en force, en multipliant les forages. Elle s'allonge sur 150 km du Sud au Nord sur une largeur de 10 à 40km (*Fig.1*).

Grâce à la disponibilité en eau, et aux conditions climatiques, l'Oued Righ est la première région dattière au Sahara algérien par la quantité (1,7 million de palmiers) et la qualité (forte proportion de Deglet Nour) (*Chaouche – Bencherif, 2008*). Ce privilège explique qu'elle soit la seule région à avoir attiré la colonisation, massivement installée dans la partie

C'est une des régions les plus anciennement cultivées, une vallée parsemée d'un chapelet de 50 oasis dont Touggourt est la capitale, même si elle n'a pas le statut de chef-lieu de Wilaya. (*Fig.I-02*)

Touggourt, capitale de l'Oued Righ commande une vaste région depuis le 14^e siècle. A l'époque coloniale, elle bénéficia de la voie ferrée dont elle était l'aboutissement au départ de Skikda (*Fig.3*).

vit de son dynamisme privé aussi bien dans le domaine agricole, en tant que pays de

Deglet Nour (le plus important marché de la datte) que dans le domaine industriel (unités industrielles). Celle-ci anime une multitude de noyaux villageois qui constituent son aire d'attraction: Djamaa (un gros centre actif), Mghaier (ville des palmeraies modernes et d'une forte zone d'activité), Temacine, Tamelaht (siège de la zaouïa Tidjania) et Blidet Amor (l'oasis Sud de l'Oued Righ) (*Chaouche – Bencherif, 2007*).

Grâce à la disponibilité en eau, et aux conditions climatiques, l'Oued Righ est la première région dattière au Sahara algérien par la quantité (1,7 million de palmiers) et la qualité (forte

Chapitre 01 : Cadre général

proportion de Deglet Nour (*Chaouche – Bencherif, 2008*). Ce privilège explique qu'elle soit la seule région à avoir attiré la colonisation, massivement installée dans la partie Nord.

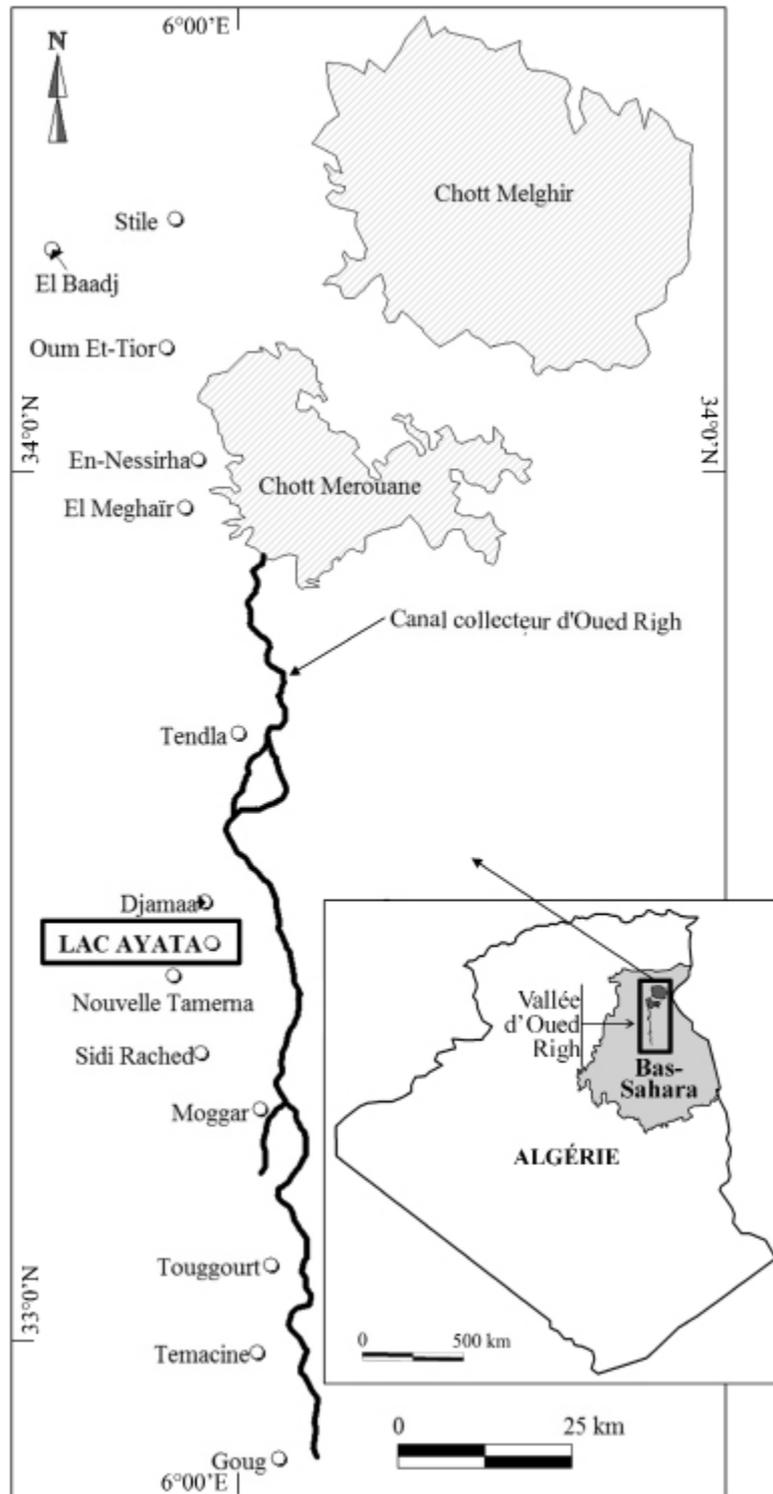


Figure 1: Situation géographique de la région d'étude. (Chenchouni, 2012)

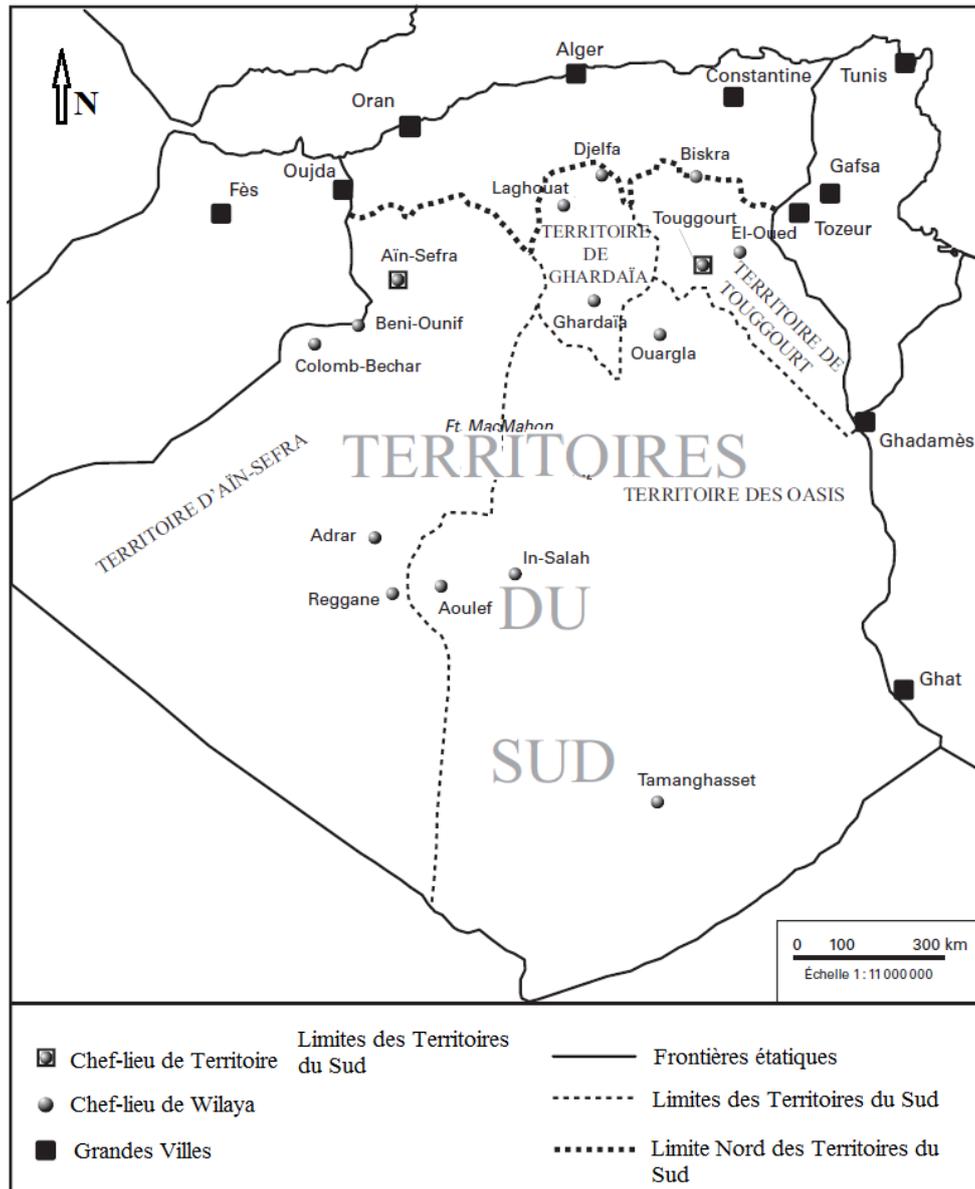


Figure 2: les territoires du Sud (Kouzmine, 2009)

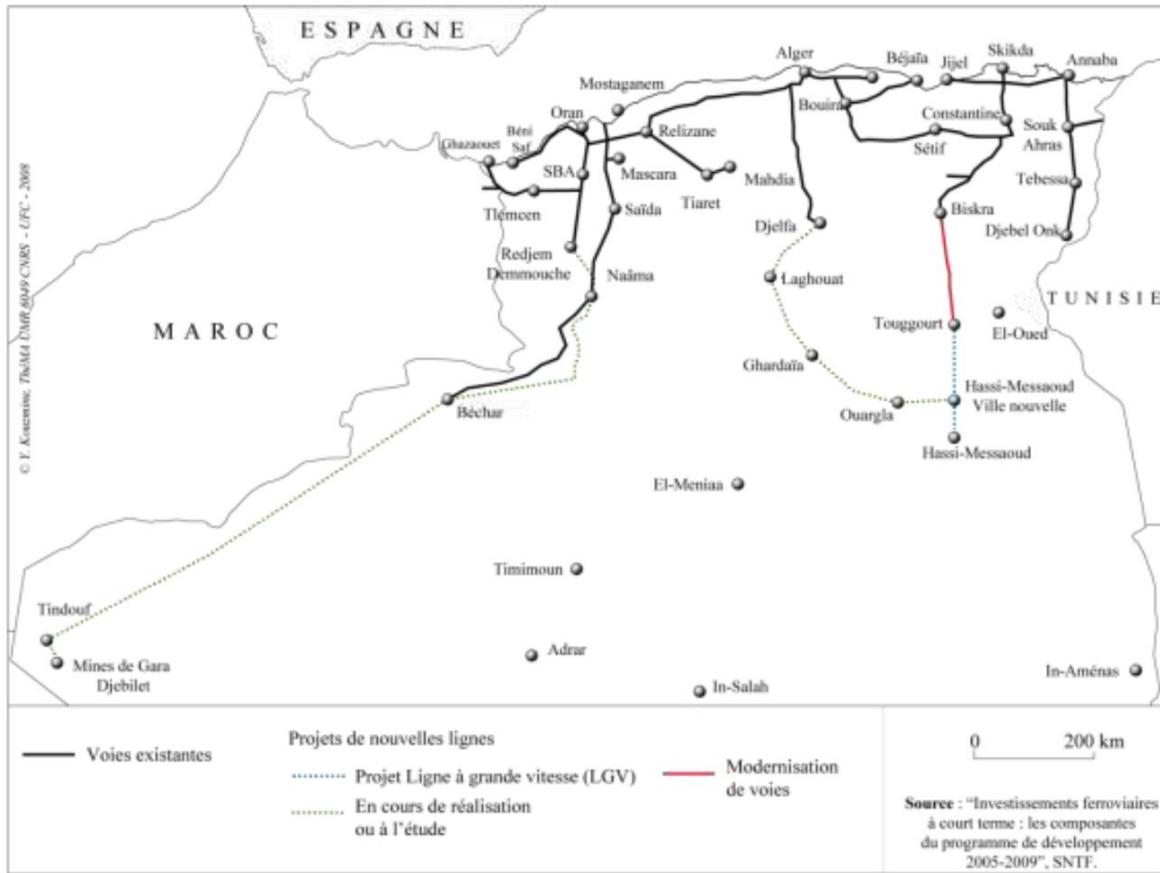


Figure 3: Projet concernant le chemin de fer au Sahara (Kouzmine, 2009)

La disposition en cuvette y provoque engorgement et salure; où toute autre culture que le palmier, y est difficile

I.1.2. La démographie

Le Bas Sahara constitue la région la plus favorisée et la plus peuplée du Sahara et cela depuis longtemps (hormis la vallée du Nil) grâce à l'abondance en eau et à la siccité de l'air permettant la culture des dattes (Deglet Nour) les plus prisées à la consommation.

Aussi, ses ressources expliquent l'expansion des agglomérations, la mise en place d'un réseau routier conséquent, la dynamique de l'agriculture, tous les éléments qui accroissent le poids d'une région qui était déjà traditionnellement plus habitée que les autres. Aussi, le Bas-Sahara, appelé le "pays de palmiers et pétrole", représente la partie la plus active du Sahara, puisqu'il regroupe 2/3 des palmeraies et 2/3 des habitants du territoire saharien. (Chaouche – Bencherif, 2007). La population saharienne représente un peu moins de 10% de la population totale sur une superficie quatre fois supérieure à l'ensemble Tell- Hautes Plaines, qui concentre logiquement les 90% restant. Cette situation de polarisation de la population sur la frange Nord du pays n'est pas le fruit du hasard et s'est construite par le biais de facteurs historiques et géographiques.

I.1.2.1. L'Origine

Arborant une situation stratégique, la vallée de l'Oued-Righ a servi de charnière entre le Nord et le Sud. Elle a été à travers les âges un appui matériel aux flux de population et de marchandises. Aujourd'hui, les habitants de la vallée de l'Oued-Righ sont un brassage de populations diversifiées venus d'horizons divers. Quatre types de populations sont distinguées

Chapitre 01 : Cadre général

: les Rouagha, les Arabes, les Ascendants et les Métis (*Benlamouidi, 1995*). Alors que d'autres auteurs citent: les Rouagha, les Arabes, les Noirs et les Métis. D'après **Perennes, (1979)**, la population noire est appelée « Hachachna », elle constitue l'essentiel des cultivateurs des palmeraies et vive en habitat groupé, d'où les Oasis de l'Oued-Righ sont jalonnées de ksours.

I.1.2.2. Evolution

En 1880, la vallée de l'Oued-Righ comptait 13 000 habitants (*Niox, 1890*). En 1967, la population est passée à 104 380 personnes pour arriver à 153 600 personnes en 1977, voit atteindre

203 087 personnes en 1987 (*ONRS, 1988 in Açourene et al, 1994*). Le recensement de 1998 va révéler une augmentation de la population qui fait grimper le nombre à 280 824 personnes, soit 10 % de la population du Sud Algérien, estimée à 2 802 250 personnes selon **Kouzmine, (2003)**. (*Fig.4*)

En 2005, la population de l'Oued-Righ a atteint 356 479 personnes (*D.P.A.T, 2005*).

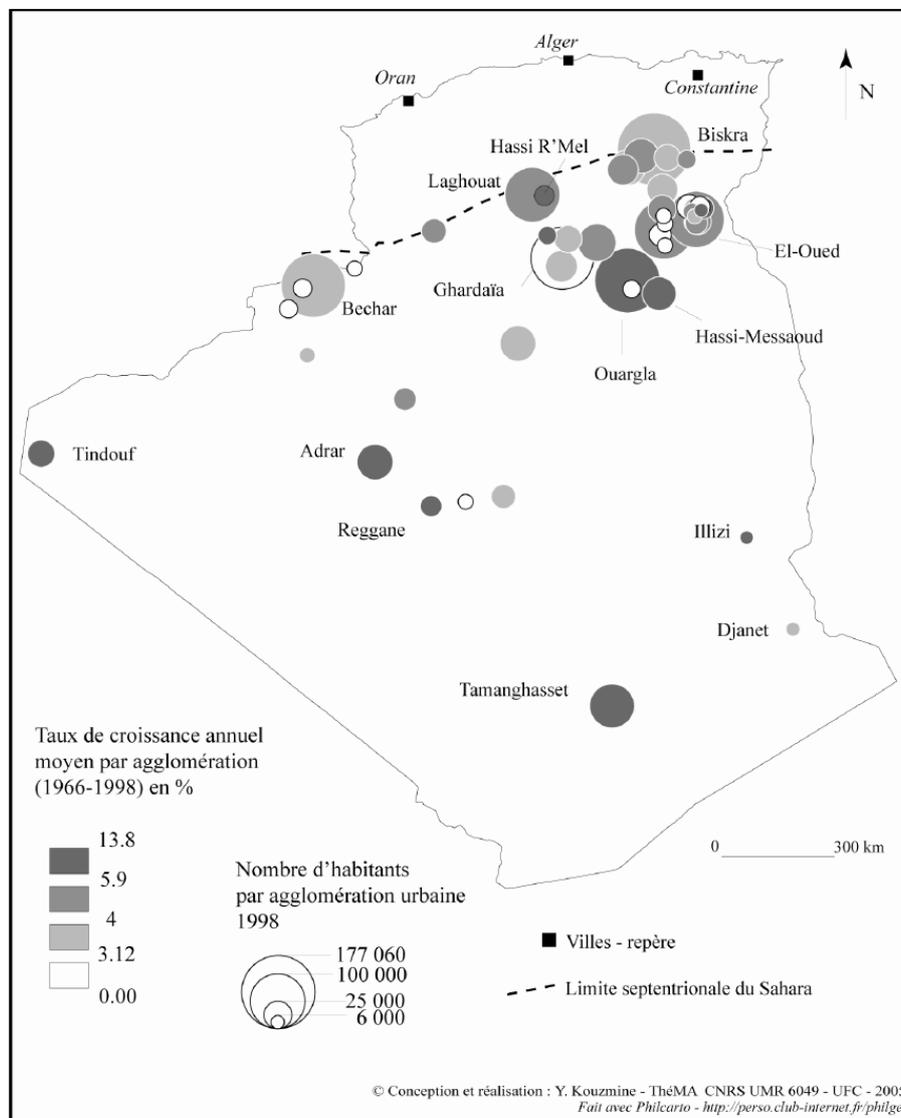


Figure 4: Dynamiques démographiques des agglomérations urbaines (1966-1998): ONS, 1998, RGPH in Kouzmine 2005

I.1.2.3. Répartition de la population

La population de l'Oued-Righ se concentre dans 26 agglomérations. Les statistiques montrent que les agglomérations de Touggourt, Témacine, Méggarine, Djamaa et M'ghaier abritent 168 361 personnes, soit 47.22 % de la population totale. Le reste de la population est abrité par les chefs-lieux de communes et villages qui englobent 188 120 personnes, soit 52.77 % de la population totale. L'agglomération de Touggourt, avec ses quatre circonscriptions, est le plus grand centre urbain de la vallée de l'Oued-Righ. Elle abrite environ 154 446 personnes, soit 43.32 % de la population totale (D.P.A.T, 2005).

La répartition par zone de la population, selon les statistiques 2005, se présente comme suit : la zone du haut couvre 211 088 personnes, soit 59 % ; la zone du moyen abrite 77 348 personnes, soit 22 % et la zone du bas abrite 68 043 personnes, soit 19 %.(Fig.5)

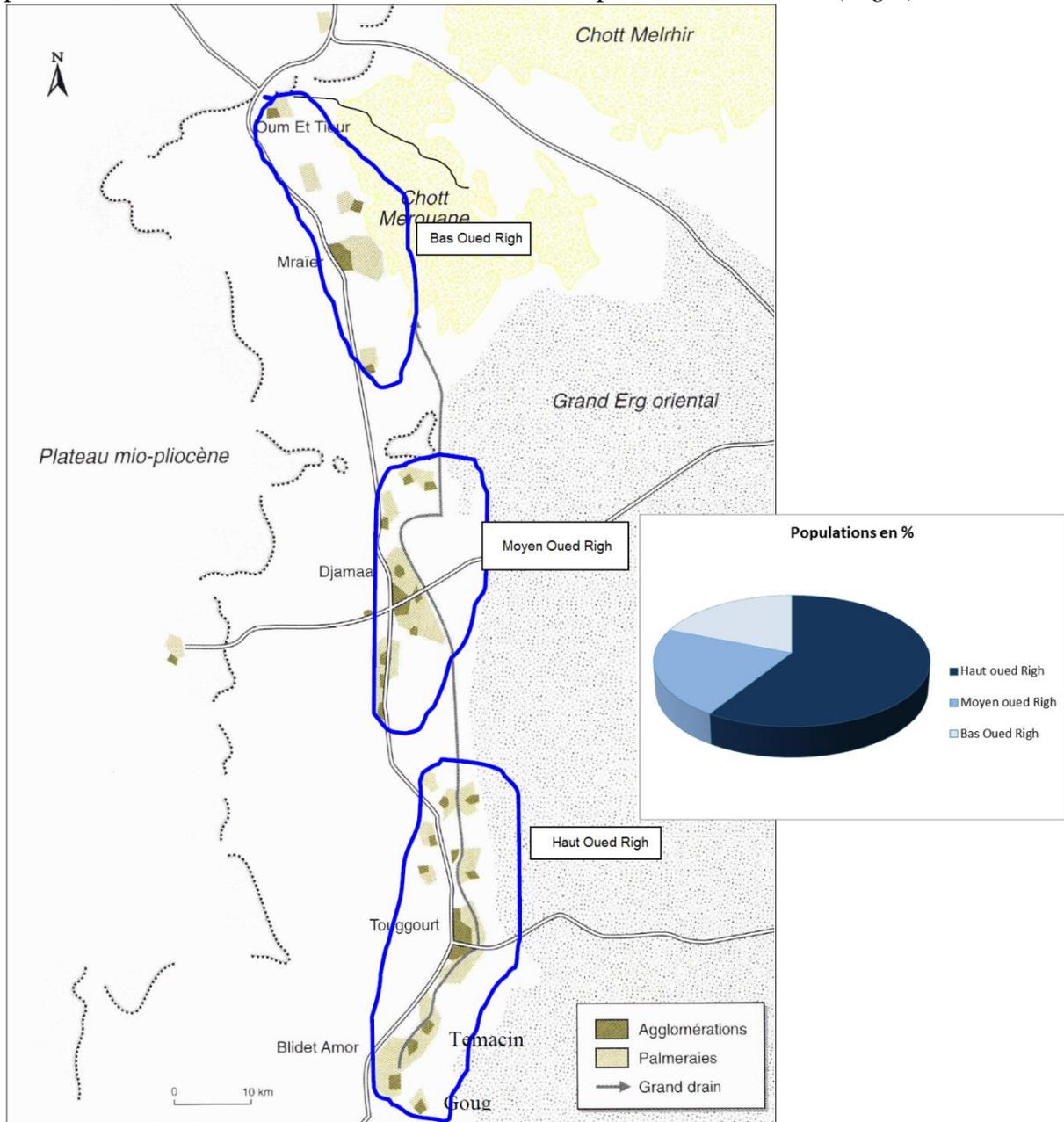


Figure 5: Répartition de la population de l'Oued-Righ par Zone.

La zone du haut Oued-Righ: se situe entre l'oasis d'El Goug au Sud et l'Oasis de Sidi-Slimane au Nord ; tandis que la zone du moyen Oued-Righ se situe entre l'Oasis de Ain-Echoucha au Sud et l'Oasis de Tinedla au Nord.

Le bas Oued-Righ: Se situe entre l'Oasis de Sidi-Khlil au Sud et l'Oasis d'Oum-Ethiour au Nord.

Ces trois zones coïncident avec des limites administratives des trois anciennes daïras que constituait la vallée de l'Oued-Righ, à savoir :

- L'ancienne daïra de Touggourt, aujourd'hui élargie à deux autres daïras qui sont

Témacine et Meggarine, formant la zone du haut et relèvent administrativement de la wilaya d'Ouargla.

- Les daïras de Djamâa et M'ghair relèvent administrativement de la wilaya d'El-Oued, forment respectivement les zones du moyen et du bas.

I.1.3. Le système de production agricole de la région

Au Sahara, l'agriculture constitue l'activité principale et un facteur de stabilisation des populations et c'est à ce titre que l'état a retenu dans le cadre de la mise en valeur dans le Sud l'option « agriculture saharienne » qui vise un développement harmonieux des régions concernées, favorisant une gestion rationnelle des ressources en eau et en sol, ainsi que la réhabilitation et l'extension de la phoëniciculture (agriculture d'Oasis).

L'agriculture au Sahara a été tout le temps dominée par le mode d'exploitation Oasien qui couvre une superficie de plus de 60 000 ha pour un nombre de palmier dattier de plus de 8 millions concentrés notamment dans les régions du Sud-est du Sahara (Biskra, El Oued, Ouargla.....) qui place l'Algérie au cinquième rang mondial de production de dattes. (*khadraoui, 2007*).

La vallée d'Oued Righ se caractérise par un agro- système qui se caractérise depuis l'antiquité, essentiellement par sa disposition sous forme d'Oasis, le long du canal, aux voisinages des sources d'eau et dans les endroits où les niveaux des nappes phréatiques sont peu profonds.

Une des caractéristiques majeures de l'agriculture de la région, est la culture du palmier dattier, centrée autour de la micro société que représente l'Oasis, ce qui la rend la plus importante du point de vue patrimoine phoënicole du pays. Sa diffusion à la quasi-totalité des Oasis, en a fait un élément structurant du paysage saharien. Cette diffusion est liée aux atouts qui caractérisent ce type de culture, le premier de ces atouts, est la formidable adaptation aux climats et aux milieux arides, voir hyper- arides. En effet, cet arbre s'accommode aisément des fortes températures ainsi que du faible bilan pluviométrique qui définit l'espace saharien.

Il faut distinguer l'Oued Righ Nord riche en palmeraies et en eau artésienne dont le chef-lieu est El M'Ghaier, de l'Oued Righ central autour de Djamma. Touggourt est surtout en relation avec les palmeraies les plus méridionales d'El Goug et Balidat Ameer. Au Sud l'eau est moins abondante et la *deglet nour* de moins bonne qualité. Touggourt commande également les relations avec le Souf tout proche (90 km), Hassi Messaoud (180 km) et Ouargla (190 km).

Par sa position la ville connaît une grande activité dans le stockage (silos à céréales, citernes à hydrocarbures) et le transport des produits de grande consommation. Elle est aussi dotée d'un aéroport aux normes habituelles.

En résumé cette agriculture saharienne constitue non seulement la principale ressource des populations locales, mais aussi un moyen de les fixer dans un territoire vaste et austère.

I.1.3.1. Les zones agricoles et leur découpage communal

On peut distinguer du Nord au Sud quatre zones agricoles:

- Zone d'El M'Ghair : La région la plus basse en périphérie des Grands Chotts où l'eau est abondante, souvent artésienne et le drainage difficile, zone dattière par excellence entourée de steppes halophiles à la végétation abondante (communes de Still, Oum el Thiour, Sidi Khellil).
- Zone de Djamaa : Partie centrale de l'Oued Righ, exclusivement dattière où les eaux sont généralement salées à très salées et où on doit faire appel au Continental Intercalaire (Communes de Tenedla, Djamaa, Sidi Amrane).
- Zone de Touggourt : Région sud de l'Oued Righ, qui constitue l'arrière-pays immédiat de la ville de Touggourt dont l'agglomération se trouve scindée en 4 communes (Touggourt, Nezla, Tebesbest, Zaouia El Abidi). Les conditions sont moins favorables à la Deglet Nour que dans les deux zones précédentes, l'artésianisme a disparu, le drainage dépend du fonctionnement du Grand canal collecteur (Outre l'ensemble de Touggourt : communes de Sidi Slimane, Mégarine, Temacine, Balidat Ameer).
- Le flanc ouest de la vallée : s'étend sur le plateau mio-pliocène avec du nord au sud les communes M'Rara, El Alia et El Hadjira. C'est une zone possible d'extension des périmètres irrigués, sur l'exemple du M'Rara qui est une daya qui offre des conditions de sol et de drainage particulièrement favorables.

La figure ci-dessous illustre la répartition des superficies agricoles (Fig.6).

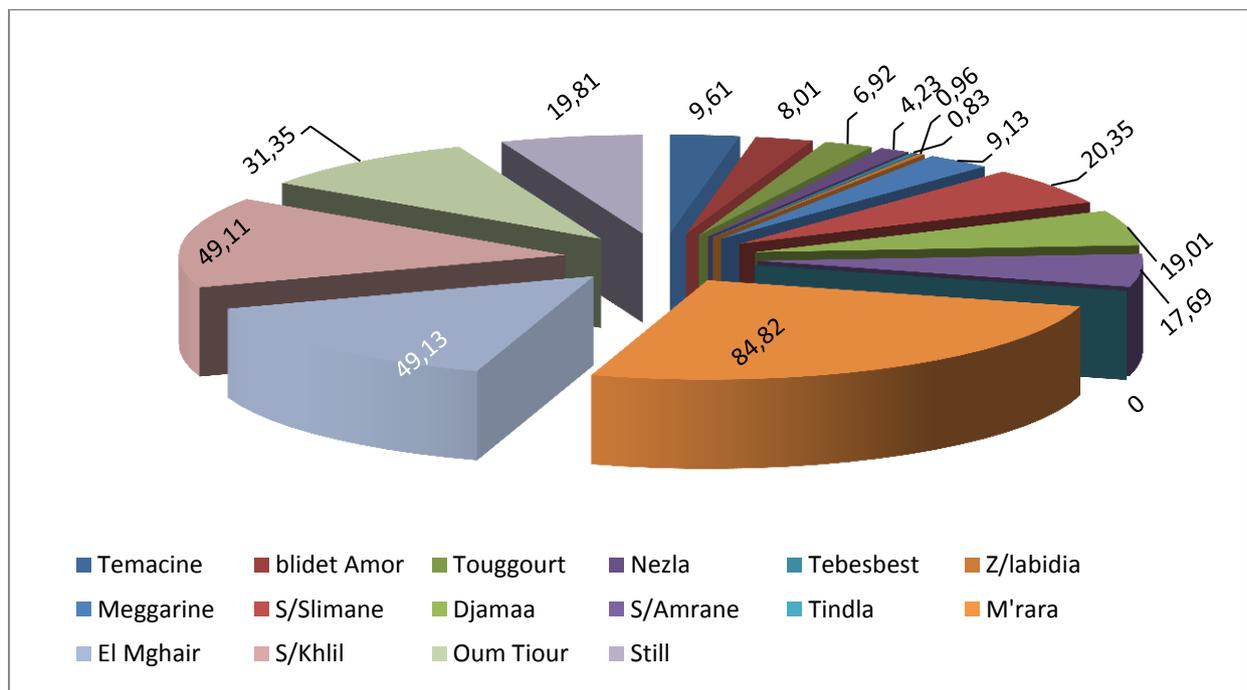


Figure 6: Répartition des superficies en Km2 par communes.

I.1.3.2. La pédologie des sols

L'origine des sols dans la vallée de l'Oued Righ se définit comme mélange alluvionnaire, colluviale et éolienne (Sogreah, 1971 ; Abid, 1995). Les deux premières proviennent de l'érosion du niveau encrouté datant du Quaternaire ancien ou du Mio-Pliocène. Les phases

Chapitre 01 : Cadre général

successives d'érosion et de comblement du fond de la vallée, sont responsables de l'hétérogénéité texturale constatée dans les horizons profonds, contrairement aux horizons supérieurs qui ont une origine éolienne (plages sableuses plus ou moins remaniées et récentes) (Boumaraf, 2013).

Les sols caractéristiques de la vallée de l'Oued Righ sont présentés dans le *Tableau.1*.

Tableau 1: Les sols caractéristiques de la vallée de l'Oued Righ (Sogreah, 1971)

Classes	Groupes	Sous-groupes
I-Classes des sols peu évolués non climatiques	Sols bruts d'apport	1. Sol anthropique (représenté dans l'extension des palmeraies vers les chotts)
		2. sol à hydromorphie de pseudogley.
		3. sol à hydromorphie d'amas, nodules et cristaux gypseux.
		4. sol modaux.
II-Classes des sols hydro morphes minéraux	Sols à gley de surface	
	Sols à pseudogley de surface ou d'ensemble.	
	Sols à accumulation de gypse	Sous-groupe à croute ou à banc cristallin
		Sous-groupe à encroutement gypseux
Sous-groupe à amas et cristaux gypseux.		

Les sols de la vallée contiennent des fortes proportions de gypse provenant des sels contenus dans la nappe aquifère (Boumaraf, 2013).

Les sols de la région sont caractérisés essentiellement à la surface par des apports éoliens sableux. Ce sont des sols généralement meubles et bien aérés en surface, en majorités salés ou très salés.

La texture des sols est très grossière par endroits et la teneur en sable fin et grossier peut dépasser les 90 %. La détermination de la composition granulométrique des agrégats de certains profils a été perturbée par la présence importante de gypse. La très mauvaise structure des sols s'explique surtout par la texture grossière et la très faible teneur en matière organique, moins de 0.5%.

La vallée de l'oued Righ est scindée en trois grandes zones : la zone d'El Meghair et Djamaa qui font parties de la wilaya d'El oued et la zone de Touggourt qui dépend de la wilaya de Ouargla.

I.1.4. Relation Plante – Sol – Eau

Le palmier a un enracinement différent selon qu'il est irrigué ou pas. En absence d'irrigation, mais en présence d'une nappe d'eau à plus de 3 mètres, les racines se développent jusqu'à la zone de capillarité de la nappe. Les cordons racinaires descendent alors à une profondeur

pouvant atteindre plus de 5 mètres. Les palmiers se développent normalement mais ont une production très faible. Ce cas le palmier développe son système racinaire en longueur pour satisfaire ses besoins en eau. C'est ce qui lui donne sa grande résistance à la sécheresse.

En culture irriguée, c'est alors la zone où une humidité suffisante est maintenue en permanence, la plus grande partie des racines se trouve du côté de la pente d'écoulement de l'eau.

La description idéale du sol pour la culture du dattier c'est qu'il doit être profond, meuble et léger (il faut un minimum de 1mètre de sol aéré et humide).

Du fait que les racines ne se reforment qu'à partir du bulbe, la production du dattier est fortement influencée par tout ce qui modifie le système racinaire.

I.1.5. Historique du canal Oued Righ

Le système de drainage de la vallée de l'Oued Righ est assuré par un canal collecteur à ciel ouvert constituant le nerf principal pour la vie des oasis qui y existent de part et d'autre de la vallée sur une longueur de 150 Km à partir de la localité d'EL Goug (daïra de Temacine) jusqu'à chott Merouane (wilaya d'El Oued) (Fig.7).

L'alimentation de ce dernier est en effet, hors les quelques orages annuelles, le fait des écoulements de drainage en provenance des palmeraies

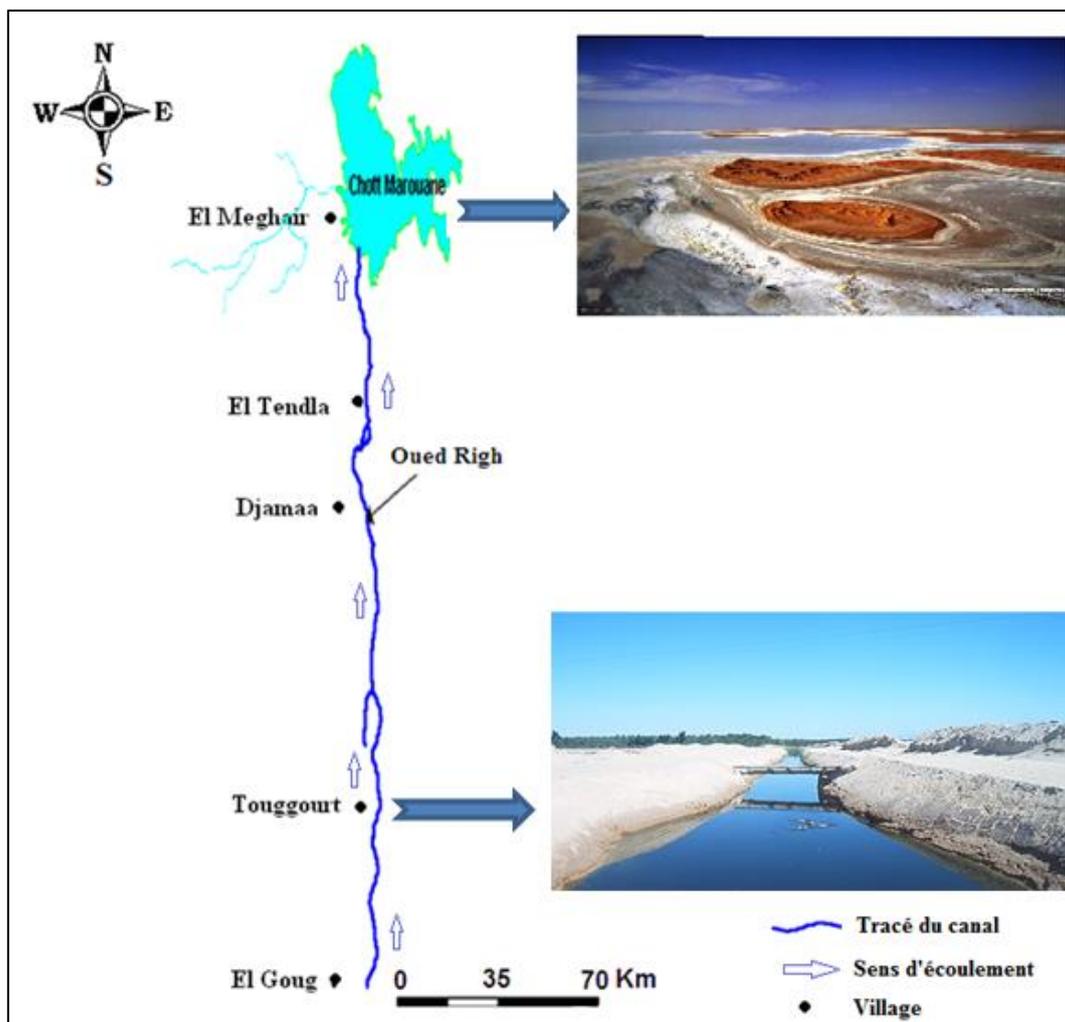


Figure 7: Tracé de l'oued Righ et positionnement des stations de jaugeage

L'irrigation de la palmeraie de la vallée de l'Oued Righ est le principe pratiqué depuis des millénaires. Les eaux d'irrigation proviennent des sources naturelles à partir des puits artésiens et ceux exploités par pompage.

Avant 1910, ces eaux d'irrigation ont provoqués la remontée des eaux en surface créant une stagnation à la surface. Cette situation a engendré l'apparition de plusieurs maladies à transmission hydriques.

Pour résoudre ces problèmes épineux, la population de la vallée de l'Oued Righ a créé un canal déversant ces eaux le long de cette vallée au niveau du Chott Mérouane.

Le canal d'Oued Righ est passé par deux étapes avant d'aboutir à l'état actuel :

- ❖ étape de la réalisation pendant la colonisation.
- ❖ étape de la réalisation après l'indépendance.

I.1.5.1. Pendant la colonisation

Initialement, l'étude du canal collecteur de a été lancée avant 1910 après l'apparition de la remontée des eaux de la nappe phréatique

En 1912, un premier tronçon a été creusé manuellement par les fellahs à partir du village de Témacine jusqu'à la zone des lacs de Sidi Slimane.

Les eaux de drainage de la région de Djamaâ étaient versées vers le Sud dans la zone des lacs de Sidi Slimane, par contre celles de la région d'El Meghaïer sont versées au Nord vers le chott Mérouane, et cela à travers l'Oued El Khrouf (sur une longueur d'environ 12km).

Avec la multiplication du nombre de forages pour satisfaire l'extension des cultures irriguées, les problèmes de drainage commencent à s'aggraver:

- apparition des eaux stagnantes;
- apparition de plusieurs maladies telles que le paludisme;
- accumulation des sels nuisibles dans les parcelles irriguées;
- suffocation des palmiers dattiers.

En 1926, il a été remarqué que la région présente une dénivelée naturelle moyenne de 1‰ à partir de la commune de Blidet Amor (Daïra de Témacine wilaya de Ouargla) jusqu'à Dendouga (daïra d'El Mghaïer wilaya d'El-Oued) sur une longueur d'environ 136 km.

Sur la base de cette dénivelée des travaux manuels ont été lancés pour le creusement de l'actuel Oued Righ représentant le début de ce canal collecteur.

Une deuxième opération de raccordement des tronçons a été entamée par la population de la région durant la même année (1926) avec des méthodes traditionnelles dans le but de faire drainer les eaux en excès d'irrigation des palmeraies vers Chott Mérouane.

Le canal est resté dans cet état de bon fonctionnement grâce au nettoyage périodique assuré par les autorités de cette époque jusqu'à l'indépendance.

I.1.5.2. Après l'indépendance

A cette époque, l'efficacité de canal était très faible à cause du manque de nettoyage et curage, avec la croissance du nombre de forages créés dans les nouveaux périmètres irrigués ou même dans les anciennes palmeraies sans oublier le débit d'assainissement provoqué par les agglomérations urbaines.

C'est pour cela que l'Etat a proposé plusieurs études d'aménagement dans la région à savoir:

a)- Le projet ERESS (Etude des Ressources en eau du Sahara Septentrional) en 1972 concernant les nappes souterraines.

b)- l'étude de bureau **TESCO, (1989) :**

Les travaux d'aménagement ont commencé en 1980 dans le canal collecteur et en 1984 pour les canaux secondaires (drains).

Le canal d'Oued Righ permet :

- Le rabattement de la nappe phréatique ;

Chapitre 01 : Cadre général

- L'assèchement de la vallée par l'évacuation des eaux d'irrigation excédentaires;
- L'évacuation des eaux d'assainissement des zones urbaines qui sont situés de part et d'autre du canal.

Depuis 1993 *l'ANRH* réalise des suivis sur une dizaine de stations de jaugeage (*Tableau 2*) qui permettent de suivre les fluctuations des débits de l'oued.

Tableau 2: Caractéristiques techniques du canal et des stations de jaugeage. (ABHS)

Stations	Largeur du canal en (m)	Profondeur moyenne en (m)
Kardache	4.40	0.426
Ranou	5.90	0.304
Z,labidia	5.50	0.990
Sidi Slimane	7.20	0.670
Sidi Amrane	8.40	0.442
Tindla aval	10.0	0.883
Boufeggoussa	7.50	0.750

Chapitre 02 :

GEOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

I.2. Chapitre 02 : Géologie et Géomorphologie

Introduction

Dans ce chapitre, on présente une synthèse géologique ainsi qu'une description Litho stratigraphique des formations. Dans un deuxième temps, on décrit les mouvements tectoniques subits. Dans un troisième temps, nous discutons la topographie et la géomorphologie de zone d'étude.

I.2.1. Géologie régionale

La géologie permet la description lithologique et stratigraphique des formations et d'identifier celles susceptibles d'être aquifères.

Nous aborderons les aspects géologiques à différentes échelles d'étude : celle régionale du bas Sahara et locale propre au secteur d'étude.

La région d'étude fait partie du bassin du Sahara septentrional de l'Algérie ou du Bas Sahara.

Le Bas Sahara se présente comme une vaste cuvette, limitée à l'Ouest par la dorsale du Mزاب, au Sud par les hamadas du Tadmaït et de Tinghert et à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien (Fig.8).

Les bordures du Bas Sahara, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie relativement basse matérialisée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ. Vers le Nord au contraire, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer, limité au Nord par les monts de l'Aurès et des Nememcha.

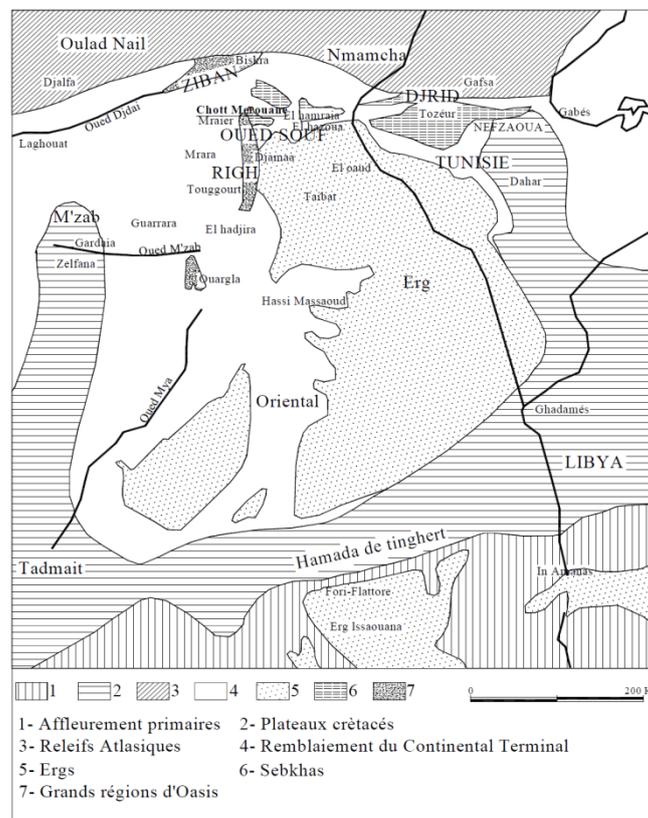


Figure 8: Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978).

Chapitre 02 : Géologie et Géomorphologie

La région a connue au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternativement marines et continentales. Les dépôts résultants, ont été d'autant plus importants qu'un immense bassin est apparu très tôt en cette partie du Sahara, et qu'il a été presque constamment affecté ensuite, par des mouvements de subsidence.

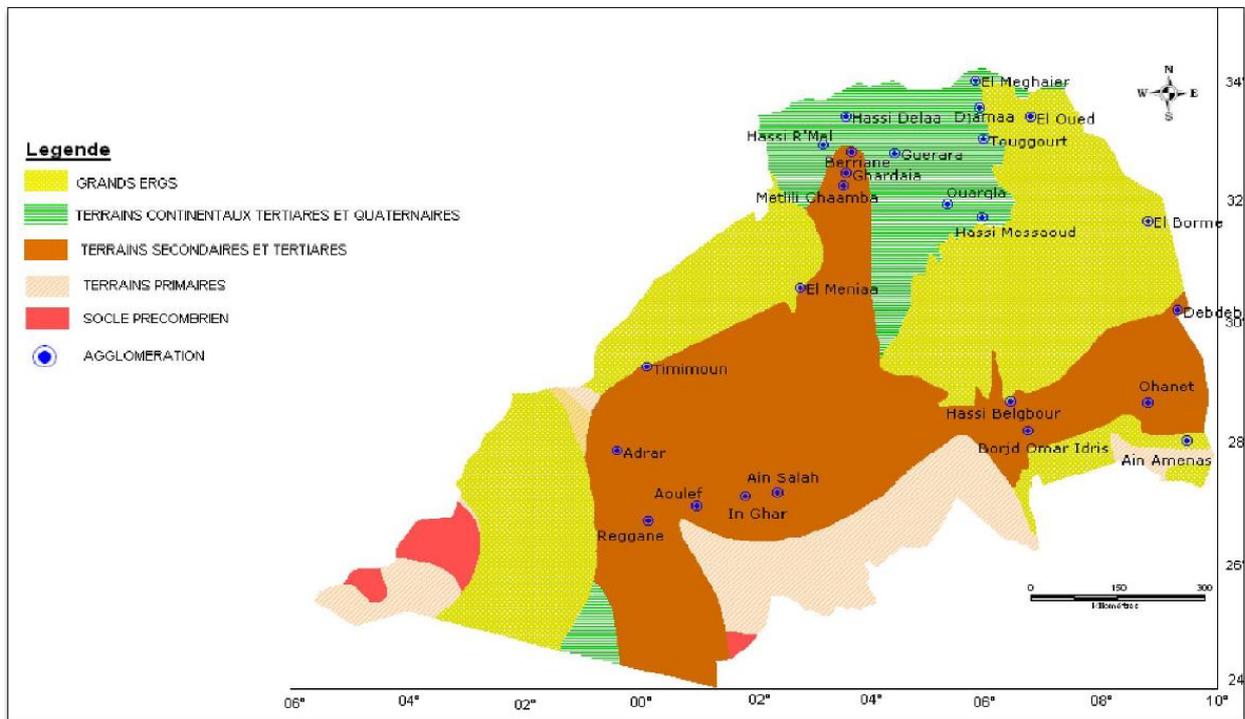


Figure 9: Carte géologique du bassin du Sahara Septentrional (ABHS, 2006).

Le bassin du Bas Sahara est comme son nom l'indique un pays plat, de faible altitude (200 à - 30 m dans les chotts). C'est un pays d'erg (le Grand Erg Oriental), et de chotts (Chott Melrhir) où le sable et le sel dominant (Fig.9). Mais c'est une région abondamment pourvue en eau bien souvent artésienne (Cornet, 1961).

La disposition en cuvette très plane en a fait une région ouverte, à la circulation facile, de tout temps pénétrée par les influences venues aussi bien du Nord et du Nord Est que du Grand Sud. C'est donc entre la bordure septentrionale du Hoggar et la bordure méridionale de l'Atlas saharien que se situe le grand bassin sédimentaire du Bas-Sahara. Avec plus de 600 Km de diamètre il couvre 720 000 Km² de superficie. Il s'étend des pieds de l'Aurès au Nord jusqu'au Tassilis au Sud. Une grande partie du bassin est recouverte par le grand Erg oriental, soit 125 000 Km². Dont la région d'étude en fait partie (Fig.10).

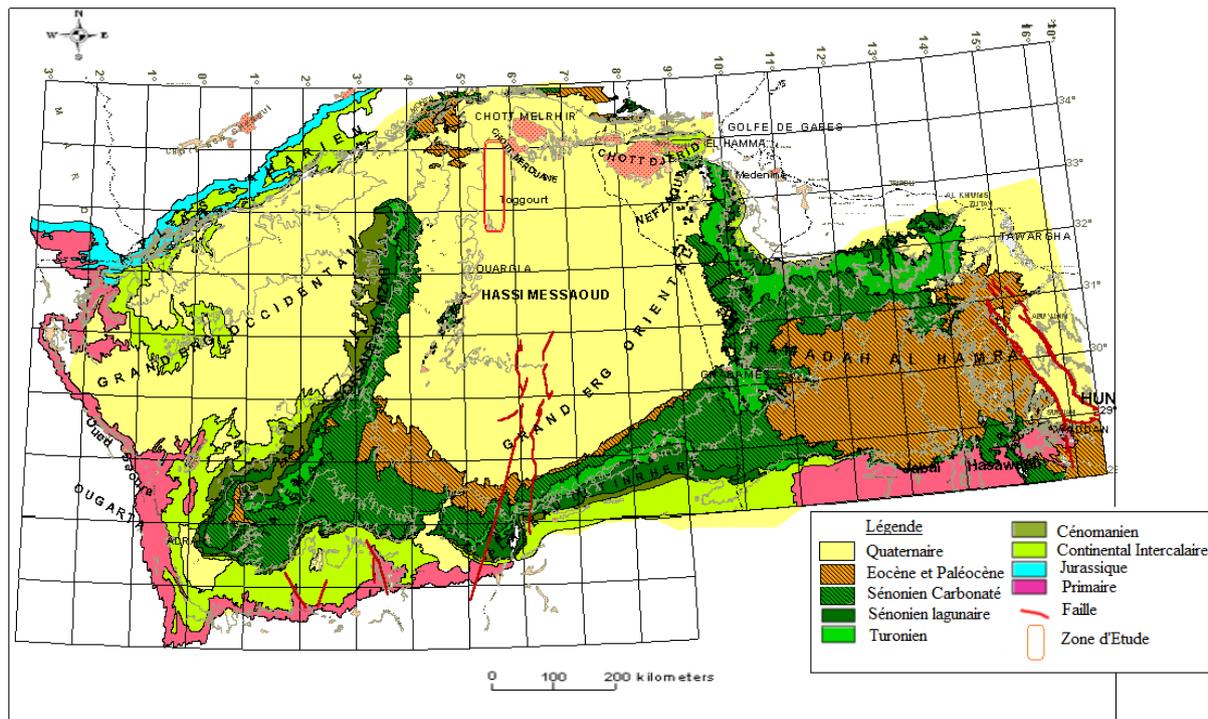


Figure 10: Carte géologique du SASS (OSS, 2003).

Les travaux de **Bel & Demargne (1966)**, de **Busson (1970)** et de **Fabre (1976)** constituent les références de base utilisées dans cette synthèse géologique.

À partir du massif ancien les couches géologiques s'enfoncent vers le Nord pour être brutalement pincées par l'accident Sud atlasique. Dans l'ensemble, la couverture mésozoïque n'a pas subi de mouvements orogéniques et est demeurée tabulaire, mais elle est affectée à l'Est d'un mouvement de subsidence, qui est à l'origine de la cuvette des Grands Chotts algéro-tunisiens. Le dôme central (la dorsale mozabite) forme un môle (*Paix, 1956*), qui l'isole des formations occidentales.

Au cours des périodes plus humides, l'Oued Igharghar descendait des pentes du Hoggar pour rejoindre ce grand bassin mais l'arbre hydrographique est aujourd'hui masqué par la mer de dunes du Grand Erg Oriental. La grande gouttière de l'Oued Righ en représente la partie avale, plus ou moins colmatée par des placages sableux et des dunes vives et jalonnée de petites sebkhas.

On trouve ici le socle ancien à 3000 m ou plus de profondeur surmonté par les grès primaires plus ou moins plissés et érodés qui constituent les roches réservoirs des hydrocarbures. Au-dessus s'entassent les grès du Continental Intercalaire qui constituent l'aquifère du même nom. A la suite de la discordance céno manienne s'empilent encore les couches marines du Sénonien et de l'Eocène qui se terminent par la couverture continentale du Miopliocène également aquifère (Complexe Terminal).

La disposition des formations sédimentaires dans la cuvette du Bas-Sahara favorise ainsi une circulation souterraine des eaux précipitées sur les affleurements en auréoles concentriques du pourtour. L'alternance de terrains perméables et imperméables assure en outre leur mise en charge à mesure qu'elles s'écoulent vers les parties déprimées. Ces conditions géologiques particulièrement favorables sont à l'origine de la formation des nappes souterraines qui alimentent les oasis (*Castagny, 1982*).

Chapitre 02 : Géologie et Géomorphologie

Le Bas-Sahara a désormais atteint sa structure actuelle en cuvette synclinale dissymétrique bordée à l'Ouest, au Sud et à l'Est par des bancs à pendages faibles tandis qu'au Nord une fosse profonde se creuse au pied de l'Aurès et redresse presque à la verticale les sédiments déposés.

Les principales formations géomorphologiques sont :

- ✓ Les regs ¹: sont des plateaux caillouteux dont les plus vastes sont le Tanezrouft au Sud et le Tademaït au centre. On peut y associer les hamadas, plateaux recouverts d'une couche dure.
- ✓ Les ergs: sont des massifs de dunes dont trois ont une importance considérable : l'Erg Chèche, le grand Erg oriental et le grand Erg occidental.
- ✓ Les plaines et vallées alluviales : qui témoignent de la présence de nombreux oueds au début du Quaternaire. (Fig.11)

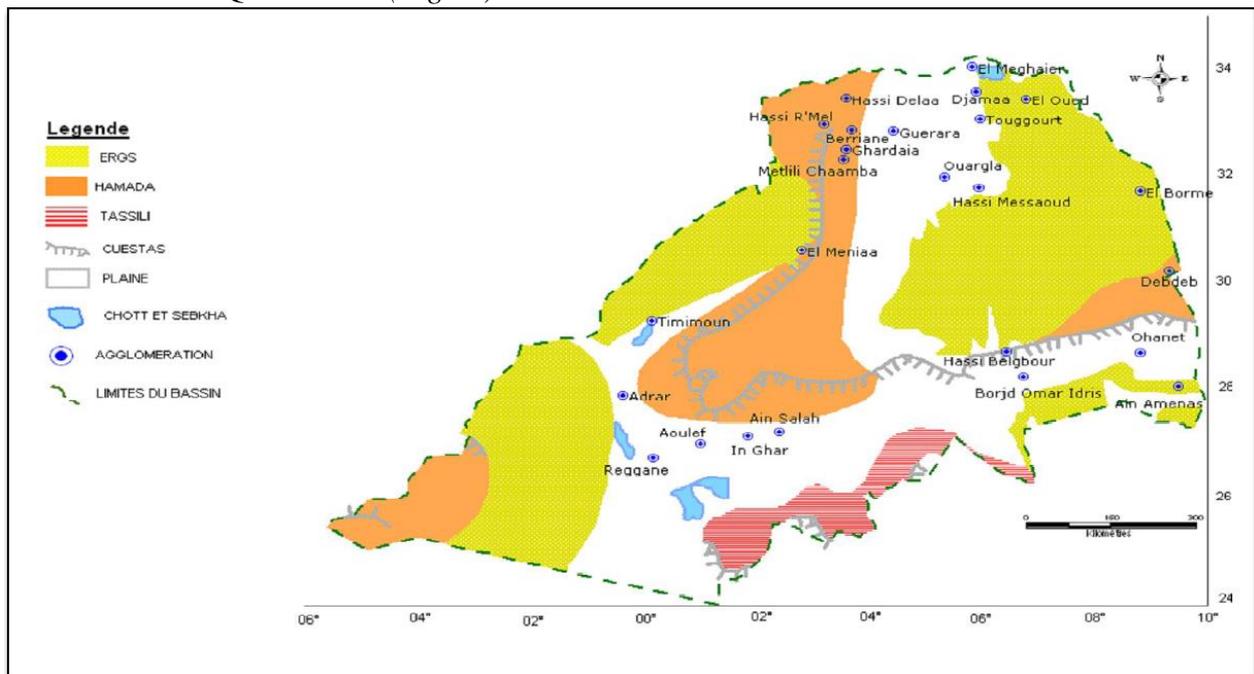


Figure 11: Carte géomorphologique du Sahara Septentrional (ABHS 2006)

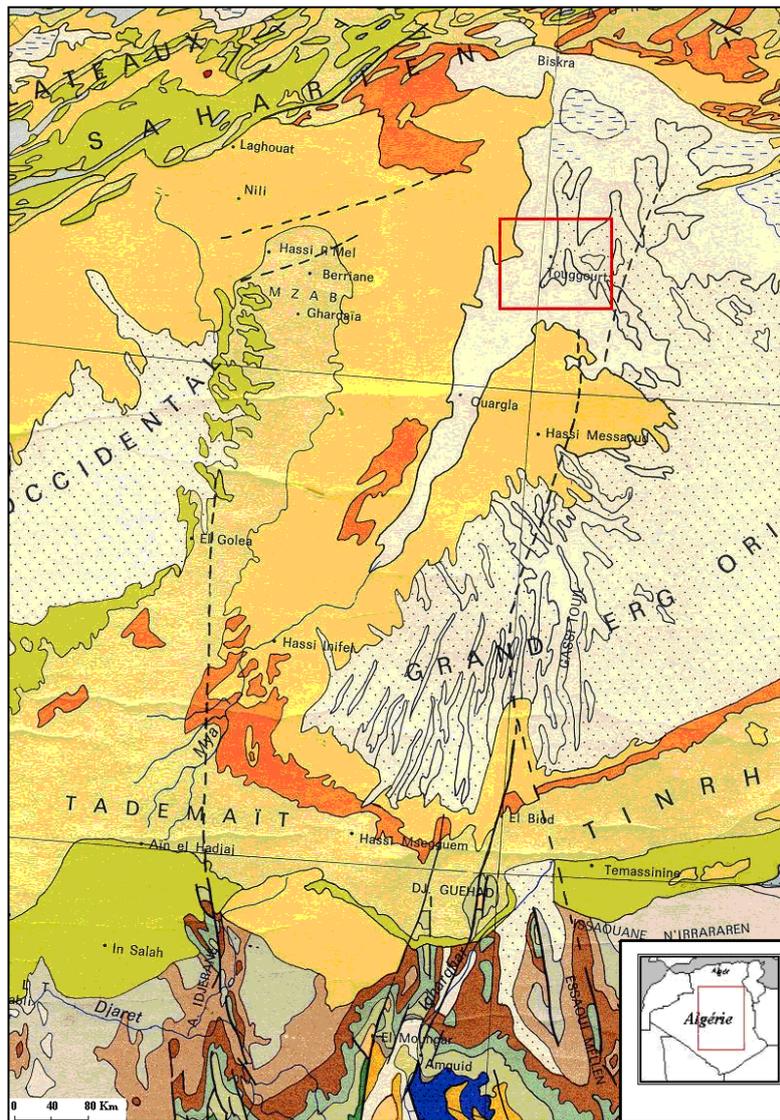
I.2.2. Cadre géologique local

La zone d'étude fait partie du bassin oriental du Sahara qui est bien connu grâce aux recherches pétrolières. C'est pour cela, pour étudier la géologie de la région, nous étendrons le champ d'investigation à tout le Bas-Sahara, en raison de l'ampleur des phénomènes géologiques, stratigraphiques et tectoniques, caractérisant la région.

Nous distinguons trois ensembles (Fig.12):

- Les terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux du Tademaït et Tinghert et le massif du Hoggar,
- Les terrains du Mésozoïque et Cénozoïque, constituent l'essentiel des affleurements des bordures du bas Sahara.,
- Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaires, occupent le centre (Fig.13).

¹ Un **reg** est un désert de pierres, une surface caillouteuse débarrassée des éléments fins par le vent.



Légende

QUATERNAIRE CENOZOÏQUE

- QUATERNAIRE.
- Sebkhia, lacs.
- Dunes.
- Néogène + Oligocène.
- Eocène.

MESOZOÏQUE

- Crétacé indifférencié.
- Crétacé supérieur et moyen.
- Crétacé inférieur.
- Jurassique indifférencié.
- Jurassique supérieur et moyen.
- Jurassique inférieur.
- Trias ou Permo-Trias.

PALEOZOÏQUE

- Carbonifère indifférencié.
- Carbonifère supérieur et Permien.
- Carbonifère inférieur.
- Dévonien indifférencié.
- Dévonien supérieur et moyen.
- Dévonien inférieur.
- Silurien.
- Ordovicien.
- Cambrien.
- Primaire indifférencié.
- Champ de dykes.
- Contour, limite d'affleurement.
- Faille, décrochement.
- Front de chevauchement.

Figure 12: Carte géologique du Sahara orientale 1/1 000 000. Extrait de la carte géologique du Nord-Ouest de l'Afrique (1976). [Légende page suivante].

La prospection géophysique et les sondages pétroliers ont précisé la profondeur du socle précambrien (*Furon, 1968*), qui se situe entre 3000 et 5000 mètres. Il s'ensuit que les dépôts sédimentaires font environ 4500 mètres d'épaisseur.

Dans cette étude, nous nous intéresserons surtout à la couverture sédimentaire post Paléozoïque, qui renferme les principaux aquifères du Sahara. La série géologique renferme deux ensembles hydrogéologiques importants dénommés : Continental Intercalaire (à la base) et Complexe terminal (au sommet), présents dans tout le Sahara Nord oriental (*Cf. Chapitre 4*).

De nombreux travaux antérieurs tels que : (*Savornin, 1931 ; Karpoff, 1952, Cornet, 1961 ; Furon, 1968*) ont permis de reconstituer une série stratigraphique, aussi complète que possible.

I.2.2.1. Lithostratigraphie

Les formations géologiques sont décrites du plus anciennes au plus récentes.

I.2.2.1.1. Secondaire

I.2.2.1.1.1. Le crétacé

Cette époque géologique est intéressante pour deux raisons : d'une part, le Crétacé affleure sur les bords du Bas-Sahara et constitue le substratum immédiatement superposé au Paléozoïque (*KARPOFF, 1952*) d'autre part, l'étendue des affleurements crétacés est très importante en Algérie orientale.

I.2.2.1.1.1.1. Le Néocomien

Se subdivise en deux séries :

❖ *la série inférieure :*

A prédominance argileuse, elle est représentée par des argiles grises et vertes, plus ou moins pélitiques. Dans ces argiles, sont intercalées des dolomies microcristallines et cristallines.

❖ *la série supérieure :*

On distingue deux ensembles :

- l'ensemble supérieur, constitué de dolomies et de calcaires microcristallins, avec des intercalations d'argiles, de pélites et de marnes blanches et grises,
- l'ensemble inférieur, surtout anhydritique avec intercalations d'argiles. Plus ou moins anhydritique, grises, vertes et rouges ces argiles passent à des marnes avec lits dolomitiques.

L'épaisseur du Néocomien est de 350m

I.2.2.1.1.1.2. Le Barrémien

Son épaisseur varie de 310 à 345m. Le barrémien est constitué de grés fins à moyens à ciment argileux, avec des passées de dragées de quartz blanc laiteux, des intercalations de sables et de grés arkosiques, plus ou moins grossiers.

Cette épaisse série détritique poreuse du Barrémien constitue un important aquifère.

I.2.2.1.1.1.3. L'Aptien

L'aptien est constitué de dolomies microcristallines à cristallines, parfois blanches, crayeuses et tendres, contenant des débris de mollusques et entrecoupé de marnes grises dolomitiques. L'aptien présente les caractéristiques d'un terrain semi-perméable, son épaisseur varie de 28m à 31m.

I.2.2.1.1.1.4. Albien

Se présente comme une série très épaisse formée d'une alternance de couches gréseuses avec des passées d'argiles schisteuses.

I.2.2.1.1.1.5. Vraconien

Dans le bassin oriental du Sahara algérien, le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomanién argilo-carbonaté (base du complexe terminal).

Le Vraconien est constitué d'une alternance irrégulière de niveaux argileux et dolomitiques, d'argiles sableuses et, rarement, de grès à ciment calcaire, difficile à reconnaître en forage. Il est souvent été interprété comme de l'Albien ou du Cénomanién. Ses limites supérieures et inférieures sont parfois assez floues, il est raisonnable de choisir comme limite inférieure du Vraconien la disparition du faciès sableux franc de l'Albien.

I.2.2.1.1.1.6. Cénomanién

Le Cénomanién est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. L'épaisseur des bancs est de 1 à 5m environ. Dans la moitié Sud du bassin, le Cénomanién est essentiellement constitué d'argiles et de marnes, avec de l'anhydrite et parfois même du sel, les carbonates sont rares. Dans la moitié Nord, au contraire les carbonates deviennent plus importants et alternent avec des évaporites, les argiles sont plus rares. La présence de nombreux bancs d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomanién imperméable (*Bel & Cuhe, 1969*).

Dans certains forages, le passage du Vraconien au Cénomanién est net : un faciès sableux franc rapporté à l'Albien, est suivi par des argiles et des évaporites rapportées au Cénomanién. Dans d'autres forages, le passage est moins visible : il existe un niveau de transition rapporté au Vraconien, dans ce cas il est préférable de choisir comme limite supérieure du Vraconien l'apparition des évaporites et dolomies du Cénomanién. La limite supérieure du Cénomanién est toujours nette, elle correspond à l'apparition des bancs calcaires ou dolomitiques du Turonien.

I.2.2.1.1.1.7. Turonien

La barre calcaire turonienne est la formation sédimentaire la mieux connue et facile à identifier sur les diagraphies par sa résistance électrique élevée. Le Turonien consiste en une épaisse barre de calcaire et de dolomie, qui tranche avec les évaporites et les argiles du Cénomanién au-dessous et du Sénonien au-dessus. Du Sud au Nord du bassin oriental, le Turonien se présente avec un faciès caractéristique, on distingue trois zones :

Dans la zone Sud du parallèle El Goléa, le Turonien est formé de deux barres : calcaire-marneux et calcaire-dolomitique encadrant un niveau marneux souvent de couleur verte. L'existence d'évaporites mélangées aux marnes vertes est signalée.

Entre El Goléa et Djamaâ, le Turonien est uniquement formé de calcaires et de dolomies les marnes vertes ont disparues. L'épaisseur utile de la barre turonienne est égale ou supérieure à **85%** de l'épaisseur totale (**80 m**).

Au Nord de Djamaâ, le Turonien change à nouveau de faciès et devient marneux, ce changement de faciès s'accompagne d'un épaissement très important. L'épaisseur cumulée des niveaux a priori perméables devient inférieure à **25%**.

Le Turonien à une épaisseur moyenne qui varie entre **50 et 100 m**. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse 300 m (*Bel & Cuhe, 1969*).

I.2.2.1.1.1.8. Sénonien

Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

Le Sénonien lagunaire à la base.

Le Sénonien carbonaté au sommet.

I.2.2.1.1.1.8.1. Sénonien lagunaire

Le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argile et de sel, il est très peu perméable (*Busson, 1970*).

Les variations de faciès sont peu importantes. L'anhydrite forme des bancs dont l'épaisseur peut atteindre quelques mètres. La dolomie constitue parfois des bancs qui peuvent aller de 10 à 15 mètres. Généralement, les argiles ne dépassent pas 1 à 2 mètres. On rencontre à la base du Sénonien dans certains endroits des bancs de sel.

La limite inférieure du Sénonien lagunaire est généralement franche : on peut facilement distinguer les évaporites et les argiles sénoniennes des calcaires et des dolomies. On prend comme limite supérieure : soit le toit du dernier banc d'anhydrite lorsque le changement est franc, soit le niveau où le pourcentage des carbonates devient supérieur à celui des évaporites lorsque le changement est progressif.

L'épaisseur du Sénonien lagunaire varie de 0 à 500 mètres ; elle augmente vers le Nord.

I.2.2.1.1.1.8.2. Sénonien carbonaté

Le Sénonien carbonaté est formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrites. Le sommet de la formation est souvent marqué par un petit banc à silex.

La limite supérieure est toujours difficile à situer car il y a une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène carbonaté qui le recouvre. Ces deux formations constituées de calcaire de même nature, ne peuvent se différencier qu'en ayant recours à des critères paléontologiques. Dans certaines coupes de forages pétroliers, les calcaires sont attribués à l'Eocène, en raison de la présence des nummulites.

Du fait de leur identité de faciès, le Sénonien et l'Eocène carbonatés doivent constituer une seule et même unité hydrogéologique que nous interpréterons comme un aquifère.

I.2.2.1.2. Tertiaire

I.2.2.1.2.1. Eocène

Comme dans le Sénonien, on distingue deux formations : l'Eocène carbonate à la base et évaporitique au sommet.

I.2.2.1.2.1.1. Eocène carbonaté

L'Eocène carbonate a des caractéristiques lithologiques qui le rendent difficile à distinguer du Sénonien. Seule la présence ou l'absence de nummulites permet de faire la différence. Les calcaires ont tendance à prédominer sur les dolomies et les évaporites sont beaucoup plus rares que dans le Sénonien, sinon totalement absentes. Les calcaires à silex rencontrés au sommet du Sénonien carbonate se poursuivent dans l'Eocène. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m.

I.2.2.1.2.1.2. Eocène évaporitique

Il est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts (*Bel & Cuhe, 1969*).

Dans l'oued Righ, la nappe des calcaires semble être située dans un niveau carbonaté appartenant à l'Eocène évaporitique.

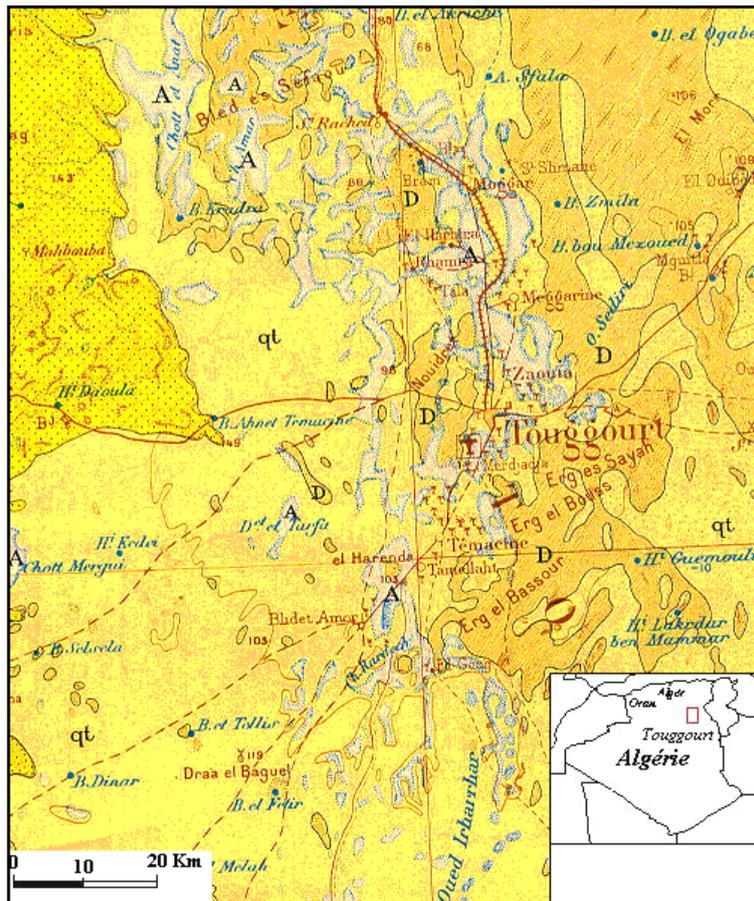
L'Eocène constitue le dernier épisode marin du Sahara algérien (*Busson, 1970*).

I.2.2.1.2.2. Mio-Pliocène

Dans le domaine oriental du Sahara, le Mio-Pliocène est un puissant ensemble constitué de sables et d'argiles qui reposent en discordance sur diverses formations antérieures : Primaire, Continental Intercalaire, Cénomanién, Turonien, Sénonien ou Eocène. Les niveaux sableux, argileux ou argilo - sableux ont une structure lenticulaire. Le Mio-Pliocène est caractérisé par une forte hétérogénéité, aussi bien dans la direction verticale que dans les directions horizontales (*Fig.13*).

Bel & Demargne en 1966, ont tenté de différencier à l'échelle du bassin oriental plusieurs niveaux alternativement sableux ou argileux. Ces auteurs décrivent quatre niveaux différents dans le Mio-Pliocène qui seraient valables sur toute l'étendue du bassin oriental.

- ❖ le niveau 1 : de faible épaisseur et essentiellement argileux, n'existerait que dans la partie centrale du Sahara oriental, suivant une bande Nord-Sud.
- ❖ le niveau 2 : grés - sableux, serait le niveau le plus épais et le plus constant, il s'étend sur tout l'ensemble du Sahara oriental et continu dans le Sahara occidental. A la base on trouve parfois des graviers, le sommet se charge progressivement en argiles pour passer au niveau 3.
- ❖ le niveau 3 : une petite formation argilo - sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont mal définies. cette couche imperméable n'existe que dans certaines zones, elle est épaisse et constante que dans la région des chotts. les argiles sableuses du niveau 3 séparent les sables des niveaux 2 et 4.
- ❖ le niveau 4 : c'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène, très épais dans la région des chotts. son sommet affleure sur de grandes surfaces, est constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne). On ne peut le distinguer seulement lorsqu'il repose sur le niveau 3 ; ailleurs les niveaux 2 et 4 sont confondus.



Légende :

<table border="0"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">A</td> <td>Alluvions actuelles, lacs, marécages, Dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-Salines.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">D</td> <td>Dunes récentes.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">qt</td> <td>Quaternaire continental : alluvions, regs, terrasses.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">qm</td> <td>Quaternaire marin : plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">qC</td> <td>Calabrien : grès marins formations dunaires associées.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">qV</td> <td>Villafranchien : calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">pv</td> <td>Pliocène continental et Villafranchien non séparés.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">pc</td> <td>Pliocène continental poudingues, calcaires lacustres.</td> </tr> </table>	A	Alluvions actuelles, lacs, marécages, Dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-Salines.	D	Dunes récentes.	qt	Quaternaire continental : alluvions, regs, terrasses.	qm	Quaternaire marin : plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent.	qC	Calabrien : grès marins formations dunaires associées.	qV	Villafranchien : calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges.	pv	Pliocène continental et Villafranchien non séparés.	pc	Pliocène continental poudingues, calcaires lacustres.	<table border="0"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">p</td> <td>Pliocène marin Conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">mp</td> <td>Pontien (localement équivalent du mc)</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ms</td> <td>Miocène terminal marin et lagunaire : couche à tripoli, marnes à gypse.</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">mm</td> <td>Miocène supérieure marin : calcaire, grès ; argiles</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">mc</td> <td>mc Miocène continental anté Pontien</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px;">mi</td> <td>Miocène inférieur marin (burdigalien)</td> </tr> </table>	p	Pliocène marin Conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées	mp	Pontien (localement équivalent du mc)	ms	Miocène terminal marin et lagunaire : couche à tripoli, marnes à gypse.	mm	Miocène supérieure marin : calcaire, grès ; argiles	mc	mc Miocène continental anté Pontien	mi	Miocène inférieur marin (burdigalien)
A	Alluvions actuelles, lacs, marécages, Dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-Salines.																												
D	Dunes récentes.																												
qt	Quaternaire continental : alluvions, regs, terrasses.																												
qm	Quaternaire marin : plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent.																												
qC	Calabrien : grès marins formations dunaires associées.																												
qV	Villafranchien : calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges.																												
pv	Pliocène continental et Villafranchien non séparés.																												
pc	Pliocène continental poudingues, calcaires lacustres.																												
p	Pliocène marin Conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées																												
mp	Pontien (localement équivalent du mc)																												
ms	Miocène terminal marin et lagunaire : couche à tripoli, marnes à gypse.																												
mm	Miocène supérieure marin : calcaire, grès ; argiles																												
mc	mc Miocène continental anté Pontien																												
mi	Miocène inférieur marin (burdigalien)																												

Figure 13: Carte géologique de la région de Touggourt, extrait de la carte géologique

I.2.2.1.3. Quaternaire

Il est essentiellement sableux, à la base des couches d'argiles et d'évaporites semi-perméables le séparent du Pliocène supérieur Cette formation quaternaire renferme une nappe phréatique alimentée principalement par l'infiltration des eaux des Oueds et surtout par percolation des eaux en excès lors des périodes d'irrigation (Fig.14).

Le Quaternaire atteint une épaisseur variante entre 39 m à 67 m.

Ere	Etages	Prof	Chronostratigraphie	Lithologie	
CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE	10m	Sable		
			Argile		
			Évaporite		
			Sable		
	Mio-pliocène			Argile	
				Gravie	
				Grés	
				Argile	
				Argile Lagunaire	
				Dolomie	
MÉSOZOÏQUE	ÉOCÈNE	Moyen	180m	Argile Lagunaire	
		Inférieur		Dolomie	
	CRETACE	Sénonien	280m	Calcaire	
		Calcaire	500m	Evaporite	
		Sénonien		Anhydrite	
		Lagunaire		Sel massif	
		Argile		Argile	
		Marne		Marne	
		Turonien	1100m	Calcaire marneux	
		Cénomanien	1160m	Dolomie	
			Argile Anhydrite Marne		
		Vraconien	1320m	Argile et dolomie	
		Albien	1450m	Sable	
			Grés		
Argile sableuse					
Dolomie					
Aptien	1660m	Sable			
Barrémien	1680m	Et			
Grés					

Figure 14: Colonne litho-stratigraphique synthétique de la région de Touggourt (sans échelle)

I.2.3. Tectonique

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post triasique.

L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon, les calcaires du M'Zab sont transformées en dorsale, ceux de Tadmaït en cuvette, au Sud l'axe d'Amguid -el-Biod s'effondré pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès (Be l& Demargne, 1966).

Et enfin la phase Plio-Quaternaire dont les mouvements s'insèrent avec le précédents dans la phase Alpine, d'où l'apparition des cassures de direction Est Ouest accentuant la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie Sud "Sillon sud Aurésien". Ces fractures régissent directement l'écoulement des eaux souterraines d'où la formation des Chotts tels que Chott Melghir et Chott Merouane ou se déverse l'oued Righ.

I.2.4. Paléogéographie

Bel & Demargne, en 1966 ont reconstitué l'histoire paléogéographique du Quaternaire de la vallée de l'oued Righ comme suit :

Effondrement de la fosse pré atlasique (centre de la région actuelle des chotts) et entaillage de profondes et larges vallées (dont celle de l'oued Righ) dans la couverture Mio-Pliocène de la périphérie.

Surélévation locale du sol, avec détachement de l'Oued Righ de l'oued Igharghar et de son affluent l'Oued Mya.

Descente lente et continue de la région des grands chotts avec d'énormes apports fluviaux et éoliens en transformant l'oued Righ en nappe souterraine et en ne laissant que quelques chotts (les actuels en surface).

Le Cénomaniens est caractérisé par la grande transgression qui ramène le retour du milieu marin tantôt franc, tantôt lagunaire (le Turonien supérieur et le Sénonien inférieur paraissent régressifs).

La sédimentation dans la vallée et dans tout le Sahara oriental a été de type continental et lagunaire. En effet, du Trias à l'Albien, se sont déposés des argiles et des sables d'origine éolienne ou fluviale et des évaporites d'origine lagunaire. On note cependant, quelques incursions marines, en particulier en Jurassique et à l'Aptien.

D'autres phénomènes se sont succédé :

- Au Cénomaniens les calcaires marins viennent de déposer en transgression sur les grès continentaux albiens. Ces calcaires qui s'intercalent avec les argiles et des évaporites traduisent un régime marin peu profond, évoluant vers un régime lagunaire responsable du dépôt des évaporites et des argiles gypsifères.
- Au Turonien, le régime marin s'est stabilisé, permettant le dépôt d'une série calcaire homogène, atteignant parfois plus de 100 mètres dans le Sahara oriental. La stabilisation du régime marin durant le Turonien n'est que temporaire.
- En effet, dès le début du Sénonien dans Touggourt se dépose en alternance de l'anhydrite, des argiles, des dolomies ainsi que quelques bancs calcaires. Le dépôt parfois d'un banc de sel massif à la base dans le bas Sahara témoigne particulièrement du régime lagunaire qui s'était installé sur le Sahara oriental.
- Au Sénonien supérieur, le régime marin réapparaît une nouvelle fois déposant ainsi la seconde série calcaire. Cette transgression Sénonienne semble moins importante que celle du Turonien. En effet, on note la présence de petites intercalations d'évaporites dans les calcaires Sénoniens, ce qui n'est pas le cas des dépôts turoniens.
- Au début de l'Eocène inférieur, la mer recouvre toujours le Sahara oriental, c'est le dépôt des calcaires à Nummulites.
- Durant l'Eocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Eocène inférieur sont peu à peu remplacés par des dépôts lagunaires où alternent les argiles, les évaporites et les calcaires. La faible extension de ce golfe marin localisé dans le bas Sahara marque les dernières manifestations de la mer saharienne dont la disparition définitive se situe vers la fin de l'Eocène.
- A la fin de l'Eocène, le Sahara oriental se présente sous l'aspect d'une plate-forme calcaire émergée qui sera exposée à l'érosion durant tout l'oligocène.
- Au Mio-pliocène, suite à l'épiorogénèse alpine, des sédiments argileux et sableux continentaux se déposent sur l'ensemble du Sahara oriental. Cette sédimentation continentale se poursuit durant le Quaternaire. C'est donc aux époques Tertiaires et Quaternaire que le Sahara oriental a pris la configuration que nous lui connaissons aujourd'hui.

I.2.5. Cadre géomorphologique

I.2.5.1. La topographie

Le domaine d'étude fait partie de la cuvette du Bas Sahara il offre une topographie basse comme son nom l'indique et constitue un vaste bassin sédimentaire dont certaines couches sont pétrolifères ou aquifères.

Le centre de la région est une grande dépression large de 20 km ; elle ressemble à une espèce de gouttière très aplatie, orientée Nord-Sud et longue de 150km, la pente générale est de l'ordre de 1‰, on note la présence de petits chotts communicants entre eux par des seuils bas (*Laborde, 2003*).

L'altitude passe très progressivement de +100m à El Goug, +70m à Touggourt, +30m à Djamaa, +15m à Oum Touyourt pour s'annuler à El Meghair, parfois elle devient inférieure au niveau de la mer pour donner des valeurs topographiques négatives. L'Oued Righ résulte de la confluence des oueds Mya et Ighargar et aboutit au grand chott Melrhir (Merouane) qui fait son aire d'épandage final. Le chott est situé à une cote nettement au-dessous du niveau de la mer (-30m) (*Dubost, 1991*).

I.2.5.2. Géomorphologie

La morphologie de l'Oued Righ est homogène et se présente comme une dépression (large fossé) orientée Sud-Nord, composée d'une véritable mer de sable et de dunes qui s'étendent sur la plus grande partie et quelques plaines composées de sable et d'alluvions.

Dans la vallée apparaît quatre niveaux morphologiques bien distincts (*Boumaraf & al, 2014*) :

Le niveau 1 ou niveau supérieur est représenté soit par des glaciaires à croûte gypseuse, soit par des surfaces résiduelles apparaissant en buttes témoins à reliefs plus ou moins accidentés.

Le niveau 2 ou niveau intermédiaire caractérisé généralement des glaciaires du Quaternaire ancien.

Les pré-chotts apparaissent à un niveau nettement au-dessous et représentent des surfaces planes à pente faible.

Les chotts représentent les zones les plus basses de la vallée et jouent le rôle de cuvette de décantation (*Fig.15*).

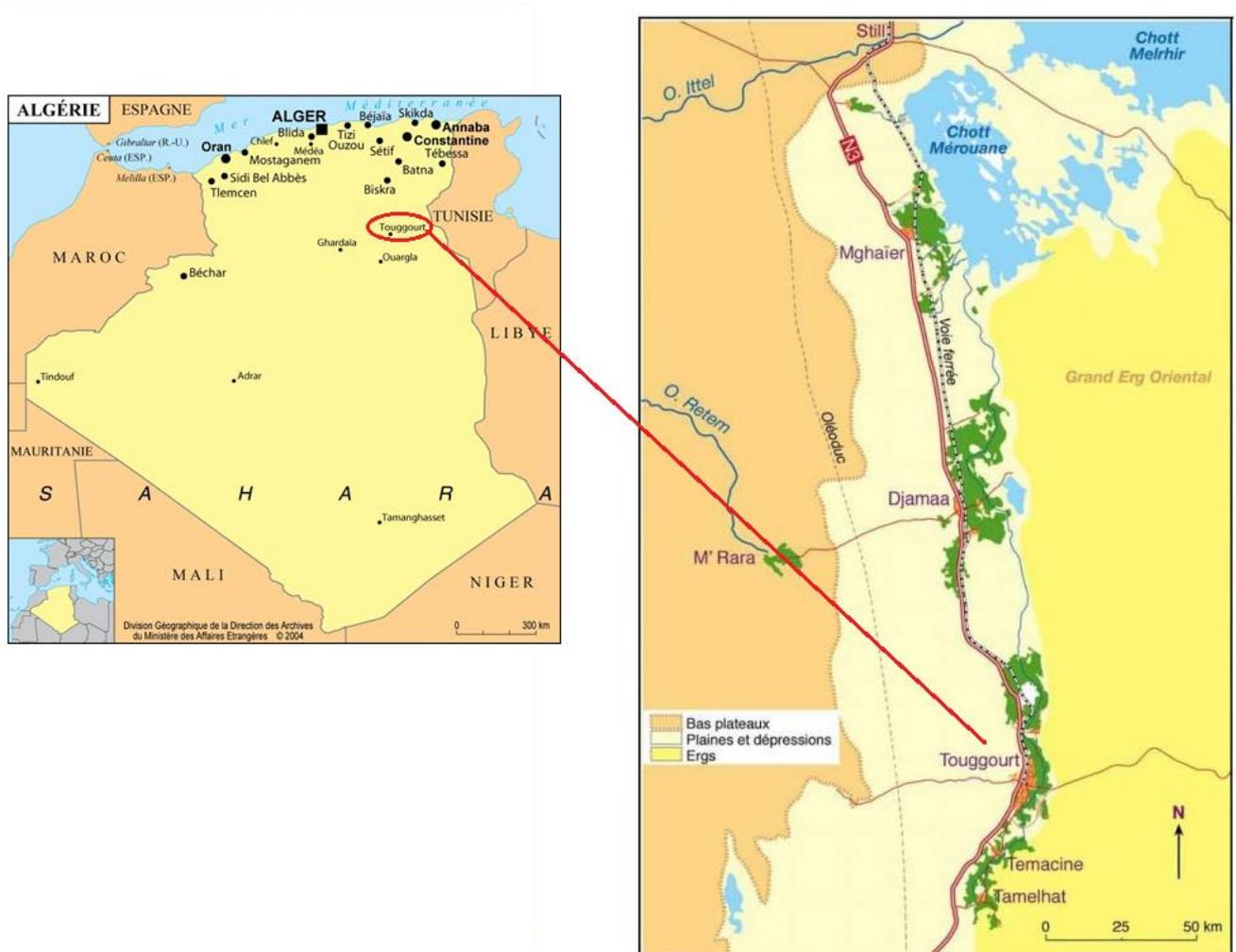


Figure 15: La morphologie de l'Oued Righ (Ballais ,2010)

Cependant, le tableau I-03, résume la géologie de la région en deux grands ensembles représentant un système aquifères à différentes nappes, selon la lithologie et la perméabilité des formations.

Ainsi on note :

- ❖ Formations perméables siège de nappes aquifères on a :
 - La nappe superficielle constituée de sable d'âge Quaternaire.
 - Le Complexe Terminal du Mio–Pliocène constitué d'un remplissage de formations continentales sablo - argileuse qui repose en discordance sur les calcaires érodés de l'Eocène inférieur.
 - Le continental Intercalaire Sablo – gréseux de l'Albien.
- ❖ Formations imperméables constituées d'argiles et de marnes servants de substratum et toits des nappes.

Chapitre 03 :

CONTEXTE HYDRO CLIMATOLOGIQUE

I.3. Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Introduction

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous-sol est une étape d'un grand circuit sur la terre, le cycle global de l'eau. La source d'alimentation de l'eau souterraine est l'infiltration qui renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain (*Castany 1998*).

Le Sahara au sens large est caractérisée par des périodes de sécheresse prolongées. Le Sahara algérien correspond à un désert zonal dans la typologie des zones désertiques. La sécheresse qualifie une situation d'occurrences d'eau « déficitaires », caractérisée par des écarts négatifs accusés de diverses variables hydrologiques par rapport à leur état pour une région ou une zone climatique donnée.

C'est d'abord un fait climatique majeur actuel qui règne dans des zones du globe, elle se caractérise par des précipitations annuelles faibles, à distribution très irrégulière dans le temps comme dans l'espace.

En zone aride, il pourrait s'évaporer en moyenne 10 à 20 fois plus d'eau qu'il n'en tombe chaque année (*Margat, 1985*).

Ce chapitre s'articule autour des données climatiques utilisées ainsi que les traitements effectués.

I.3.1. Climat

L'étude hydro-climatologique a pour objet de ressortir les caractéristiques climatiques en se basant sur des données mesurées et qui sont représentatives du climat régnant sur notre aire d'étude.

Pour l'évaluation d'un bilan hydrologique, il faut déterminer des facteurs en l'occurrence les précipitations, le ruissellement et l'infiltration.

La zone d'étude fait partie du grand bassin saharien. Le climat est typiquement saharien caractérisé par des précipitations très peu abondantes et aléatoires, par de fortes amplitudes thermiques et une faible humidité relative de l'air.

La carte ci-dessous configure les différents sous bassins versants du Sahara algérien, ainsi que les principales stations météorologiques, actuellement en activité.

Selon cette carte, basée sur le découpage hydrologique adopté par L'ANRH, la zone étudiée appartient au sous bassin versant N° **04** (Erg Oriental), incluse du grand bassin saharien N° **13** (*Fig.16*).

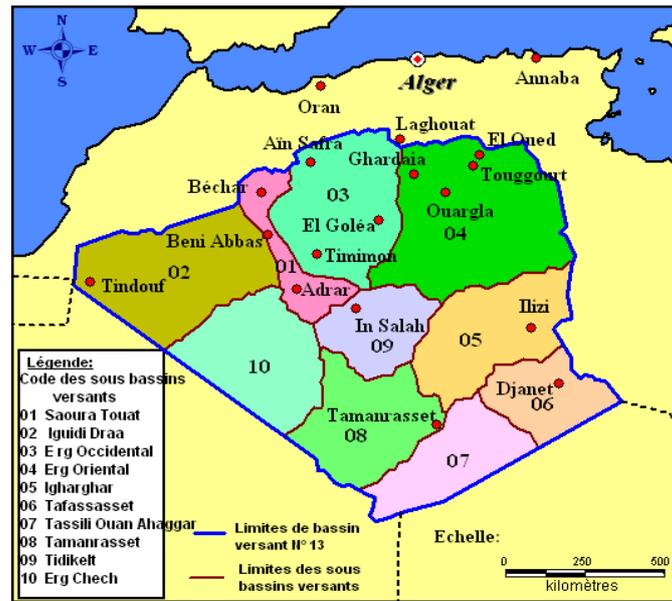


Figure 16: Carte des sous bassins versants du Sahara algérien et des stations Météorologiques d'après Cahiers de Sécheresse, No : 1/98

Pour caractériser le climat de la zone d'étude, nous disposons des relevés fournis par la station de Touggourt dont les coordonnées sont mentionnées dans le tableau qui suit (Tableau 3). Les renseignements que nous donnerons dans ce chapitre se rapportent à la période de 32 ans.

Tableau 3: Coordonnées de la station météorologique de la station de Touggourt

Coordonnées	Latitude	Longitude	Altitude
Station de Touggourt	33° 11'	06° 13'	85 m

I.3.2. Le bilan hydrique

Le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnés par comparaison entre les apports et les pertes en eau dans ce lieu et pour cette période. Il tient aussi compte de la constitution de réserves et des prélèvements ultérieurs sur ces réserves. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations. Les pertes sont essentiellement dues à la combinaison de l'évaporation et la transpiration des plantes, que l'on désigne sous le terme d'évapotranspiration.

I.3.2.1. Précipitations

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental du climat saharien.

On note dans la vallée de l'oued Righ un gradient pluviométrique décroissant du Nord vers le Sud (Fig.17).

Les précipitations annuelles sont très faibles et irrégulières avec un nombre de jours ne dépassant pas 34 jour/an (Benzouche, 2005).

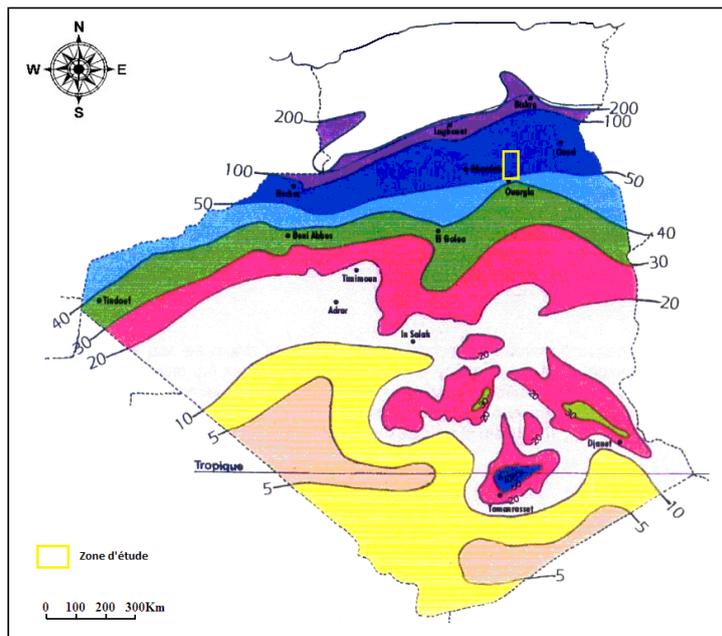


Figure 17: Les Isohyètes de la moyenne des précipitations annuelles du Sahara de l'Algérie D'après J. DUBIEF Le climat du Sahara 12; 1963

Les fluctuations mensuelles montrent une répartition variable de la pluie d'un mois à l'autre comme l'indique le tableau ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4: Distribution moyenne mensuelle des précipitations à la station de Touggourt sur une période de 32 ans (1982– 2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
P _{moy} (mm)	7,5	5,3	5,2	7,1	16,6	2,27	3,8	4,2	1,8	0,7	0,2	2,3

Cependant, la moyenne mensuelle maximale est enregistrée au mois de Janvier avec une valeur de **16.6 mm** et le minimum au mois de Juillet avec une valeur de l'ordre de **0.2 mm** (Fig.18).

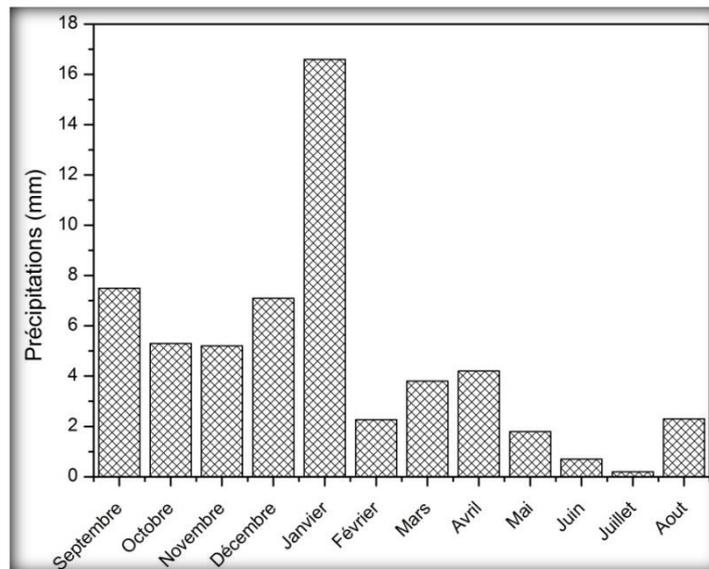


Figure 18: Histogramme de distribution moyenne mensuelle des précipitations de la station de Touggourt période (1982 – 2013)

Ces précipitations sont réparties d'une manière assez anarchique au cours de l'année. La moyenne est de l'ordre de 68.8 mm

I.3.2.1.1. Coefficient pluviométrique

Ce coefficient permet de déterminer pour une station donnée, si l'année est excédentaire ou déficitaire. L'année est d'autant plus excédentaire que $(H > 1)$ et si $(H < 1)$ l'année correspondante est déficitaire.

Il est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne \overline{P} pour une période de n années.

$$H = P / \overline{P} \quad (1)$$

Avec :

H : Coefficient Pluviométrique

\overline{P} : Pluviométrie d'une année (mm)

\overline{P} : Pluviométrie moyenne (mm)

Le tableau ci-dessous (*Tableau 5*) montre les variations du coefficient pluviométrique au cours des années d'observation.

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 5: Coefficient pluviométrique de la Stations de Touggourt période (1982 – 2013)

Années	Hauteurs des pluies (mm)	Coefficient pluviométrique	Type de l'année
1982	72.4	1.05	E
1983	31.6	0.46	D
1984	30.9	0.50	D
1985	33.7	0.49	D
1986	79.4	1.15	E
1987	41.7	0.60	D
1988	54.4	0.79	D
1989	11.5	0.17	D
1990	148.4	2.15	E
1991	42.8	0.62	D
1992	132.2	1.92	E
1993	55.2	0.80	D
1994	48.7	0.70	D
1995	61.4	0.89	D
1996	88.5	1.27	E
1997	64.2	0.93	D
1998	46.4	0.67	D
1999	118.1	1.72	E
2000	58.6	0.85	D
2001	141.2	2.05	E
2002	96.9	1.40	E
2003	69.2	1.00	E
2004	161.8	2.35	E
2005	25.7	0.37	D
2006	84.5	1.22	E
2007	77.1	1.12	E
2008	59.2	0.86	D
2009	155.7	2.26	E
2010	31.2	0.45	D
2011	17	0.24	D
2012	15	0.21	D
2013	47	0.68	D

Les valeurs du coefficient pluviométrique obtenues montrent sur une période de 32 ans ; **13** années excédentaires et **19** déficitaires. Cette évolution est indiquée par la figure ci-dessus (Fig.19).

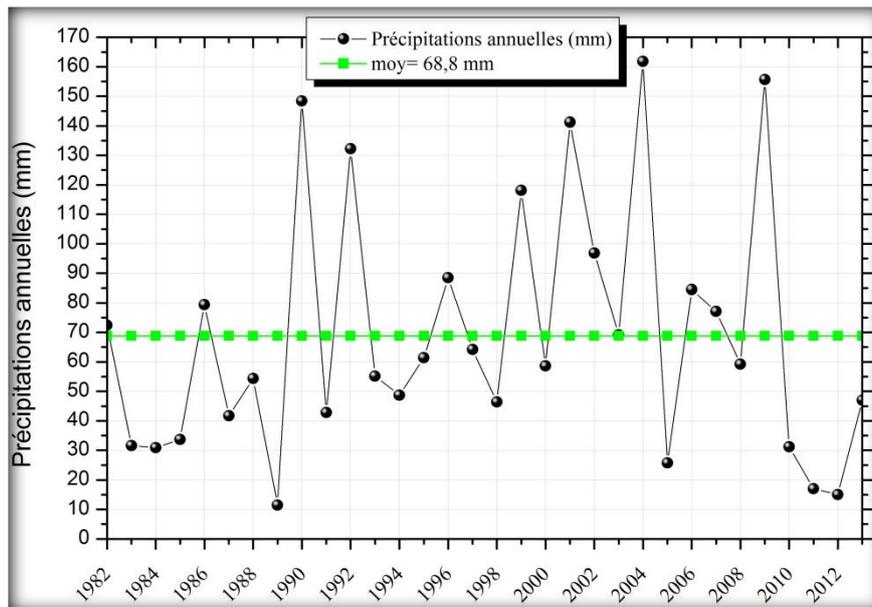


Figure 19: Evolution des précipitations annuelles de la station de Touggourt période (1982– 2013)

I.3.2.1.2. Répartition saisonnière des précipitations

D'après la saison agricole chaque saison est subdivisée en trois mois comme suit :

- ❖ Automne : Septembre – Octobre – Novembre.
- ❖ Hiver : Décembre – Janvier – Février.
- ❖ Printemps : Mars – Avril – Mai.
- ❖ Été : Juin – Juillet – Août.

On peut en conclure que la saison hivernale est la saison la plus pluvieuse où on enregistre 45 % des précipitations totales (Fig.20).

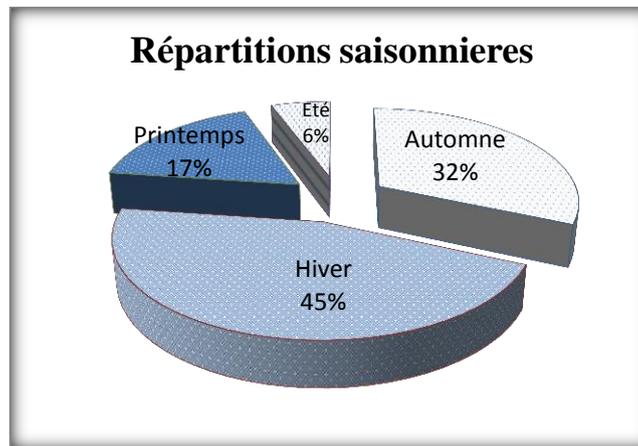


Figure 20: Figure illustrant la répartition saisonnière des précipitations.

I.3.2.2. Température

La température est le second facteur après les précipitations qui conditionne le climat d'une région et joue un rôle primordial dans l'évaluation du déficit d'écoulement qui rentre dans l'estimation du bilan hydrique. Dans notre zone d'étude, elle a plus d'ampleur et influe grandement sur les autres paramètres météorologiques tels que l'évaporation et le taux d'humidité de l'atmosphère. Elle est donc un paramètre déterminant dans le calcul du bilan hydrologique.

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 6: La variation des températures moyennes mensuelles à la station de Touggourt période– 1982-2013

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
TmaxC°	35,3	30,3	22,6	18	16,9	18,1	24	28,4	33,3	37,9	41,4	41,3
TminC°	22,2	16,8	11,7	5,8	4,6	5,9	10,1	14,3	18,9	23,4	27,1	26,6
TmoyC°	0,6	23,3	5,9	1,3	0,2	2,3	6,7	23,4	25,7	31	33,4	34

Les données observées du *Tableau 6* pendant une période de 32 ans à la station de Touggourt font ressortir deux périodes:

Une période relativement froide allant du mois de Novembre jusqu'au mois d'Avril avec une température minimal au mois de Janvier avec **4.6°C**. Une seconde période chaude du mois de Mai au mois d'Octobre avec un maximum au mois de Juillet (**37.9°C**).

I.3.2.2.1. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN

La combinaison des facteurs thermiques et pluviométriques permet l'établissement des diagrammes pluvio- thermique de Gausсен, qui met en évidence une période sèche (*Fig.21*).

Le diagramme Ombrothermique ci-dessous montre que, la période sèche s'étale sur toute l'année, ce qui nécessite la pratique de l'irrigation toute l'année.

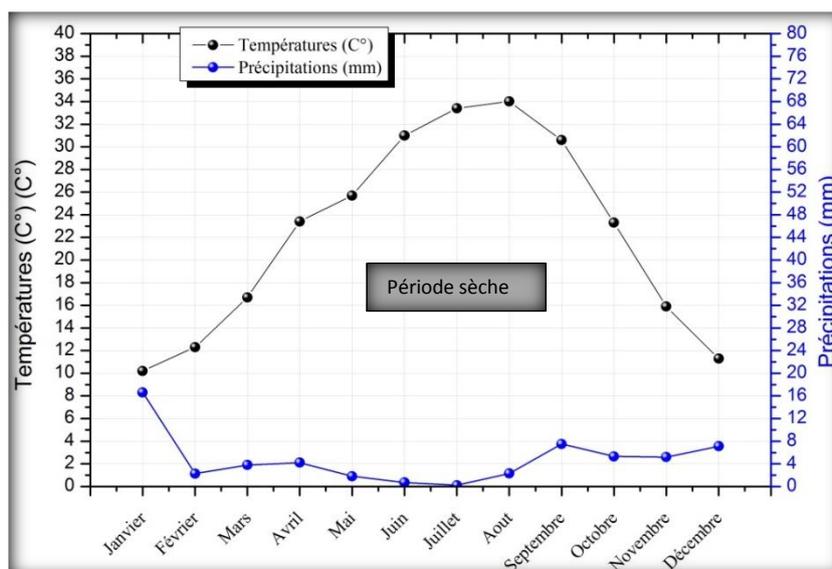


Figure 21: Diagramme pluvio- thermique à la station de Touggourt ; période (1982-2013)

A cette extrême faiblesse des précipitations, s'ajoutent plusieurs phénomènes, l'accroissement de la saison sèche, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. L'analyse des volumes de précipitations connaissent une décroissance annuelle qui ne s'interrompt pas, aggravant davantage les contraintes liées à l'aridité du milieu.

I.3.2.2.2. La contrainte d'aridité

Des indices ont été définis pour classer les zones climatiques en fonction de leur degré d'aridité.

I.3.2.2.2.1. Indice d'Aridité de DEMARTONE

D'après DEMARTONNE l'indice de l'aridité est exprimé comme suit :

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

$$I = \frac{P}{(T + 10)}$$

Avec :

I : indice d'aridité de DEMARTONNE.

P : les précipitations moyennes annuelles.

T : la température moyenne annuelle.

Tableau 7: Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE

Valeur de l'indice	Type de climat
$0 < I < 5$	Hyper-aride
$5 < I < 10$	Aride
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 30$	Semi-humide
$30 < I < 55$	Humide

Pour notre cas $I=0.15$, donc le milieu est hyper-aride (Tableau 7).

Le Sahara est caractérisé par une alternance de deux saisons relativement bien marquées. Un hiver saharien court avec des nuits fraîches voire froides. Et l'été qui dépasse six mois, est la réelle saison d'arrêt de la végétation. Aux températures très élevées peut venir s'ajouter le *sirocco*, vent sec et chaud, dès lors, il n'est pas rare que les températures dépassent largement les 40°C.

I.3.2.2.2. Méthode d'EUVERTE

La méthode d'EUVERTE fait intervenir deux paramètres qui sont la température et la précipitation établies mensuellement (Tableau 8); on effectue le rapport P/T qui nous permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol.

Le rapport P/T permet d'établir quatre types de régimes :

- Un régime très sec où $P/T < 1$;
- Un régime sec où $1 < P/T < 2$;
- Un régime subhumide où $2 < P/T < 3$;
- Un régime humide où $P/T > 3$.

Tableau 8: La relation température précipitation, méthode d'EUVERTE.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
$P_{\text{moy}}(\text{mm})$	7,5	5,3	5,2	7,1	16,6	2,27	3,8	4,2	1,8	0,7	0,2	2,3
$T_{\text{moy}}(\text{C}^\circ)$	30,6	23,3	15,9	11,3	10,2	12,3	16,7	23,4	25,7	31	33,4	34
P/T	0.25	0.23	0.33	0.63	1.63	0.18	0.22	0.18	0.07	0.02	0.005	0.007

A partir du rapport **P/T**, On peut définir le type du régime.

La région est soumise à une période très sèche ($P/T < 1$) pendant toute l'année sauf au mois de Janvier là où la précipitation est supérieur à la température.

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

L'aridité tyrannique de la région d'étude se traduit notamment dans la constitution d'un paysage typique, qui naît d'une quasi-absence de végétation, d'une vie regroupée autour des oasis, et d'un type de culture pouvant supporter les agressions de ce type de climat.

L'aridité conditionne la vie humaine et économique de cet espace, malgré tous les efforts humains et économiques, le climat domine, la nature crée l'espace (Kouzmine, 2003).

I.3.2.3. Humidité relative de l'air

L'humidité relative est le rapport entre la tension de vapeur d'eau « e » et la tension de vapeur saturant « ew » a la même température exprimé en % « $U = e / ew * 100$ ».

Les valeurs de l'humidité relative de la station de Touggourt (Tableau 9) sont relativement homogènes, les moyennes mensuelles varient entre **31%** et **67%**, et la moyenne annuelle de l'ordre de **46.69%** ((Fig.22).

Tableau 9: L'Humidité relative moyenne mensuelle, période (1982-2013).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Humidité en %	45	40,8	58,9	67,7	67	54,9	47,8	40,7	38	34,3	31	34,2

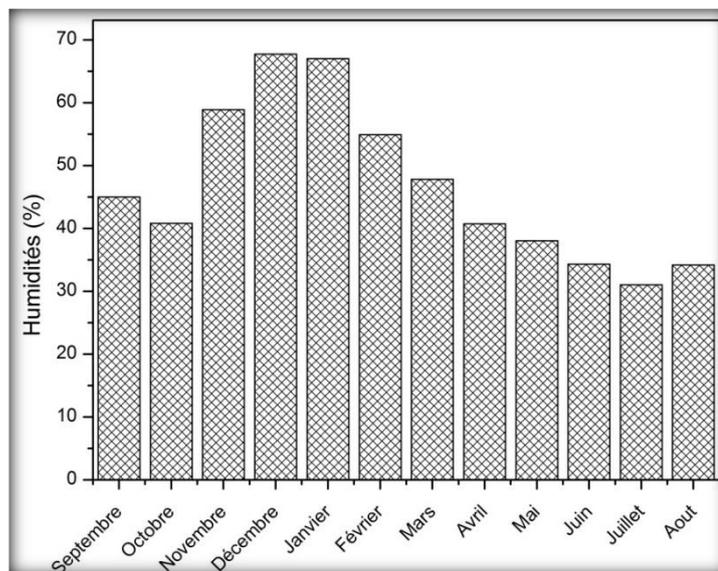


Figure 22: Humidité relative moyenne mensuelle période d'observation (1982-2013) de la station de Touggourt

I.3.2.4. Les Vents

Dans la région de l'oued Righ, les vents soufflent toute l'année mais avec des intensités relativement différentes, de directions dominantes sud-ouest vers le Nord-Est.

La vitesse moyenne est de **4.3 m/s**, cette vitesse n'augmente que d'Avril à Juillet. Le maximum est enregistré au mois d'Avril et Mai (Tableau 10) avec une vitesse de **4.4 m/s** et le minimum en Novembre avec **2.4 m/s** (Fig.23).

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 10: Représentant la vitesse du vent moyenne mensuelle, période (1982-2013)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Vent m/s	3,1	2,8	2,4	2,7	2,9	3,2	3,7	4,4	4,4	4,1	3,5	3,8

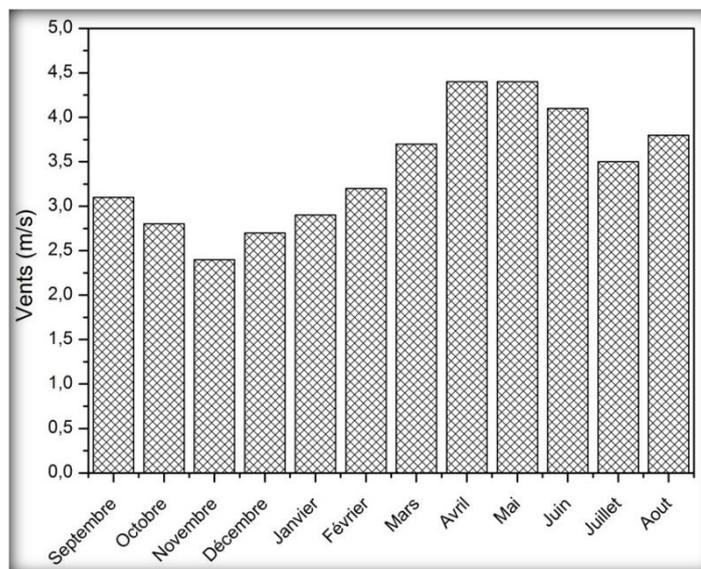


Figure 23: Moyennes mensuelles des vitesses de vent

Pendant cette période, le Siroco souffle violemment ; il représente un danger pour les cultures par l'entraînement des matériaux sableux responsable du modelé dunaire que l'on observe dans le Sahara. Indépendamment de l'action mécanique que le vent exerce sur les végétaux dont il déchire les parties aériennes, il agit surtout en accentuant l'évaporation.

I.3.2.5. Durée d'insolation

Les déserts reçoivent une quantité de lumière solaire relativement très forte. Le nombre d'heures annuelles du soleil observé au Sahara est de 3 000 à 3 500 (*Djidjel, 2008*). Cette forte luminosité est un facteur favorable pour l'assimilation chlorophyllienne, mais elle a en revanche un effet desséchant.

La vallée de l'Oued Righ reçoit une quantité de lumière solaire relativement très forte (*Tableau 11*). La durée moyenne de l'insolation est de 270.83 heures/mois, le maximum est atteint au mois de Juillet avec **359.9 heures** et le minimum au mois de Mars avec une durée d'insolation de **161 heures** (*Fig.24*).

Tableau 11: La durée d'insolation moyenne mensuelle, période (1982-2013).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Insolation en heure	285	261,2	236,4	234	233,7	226,9	161	283,4	315,3	322,6	359,9	330,8

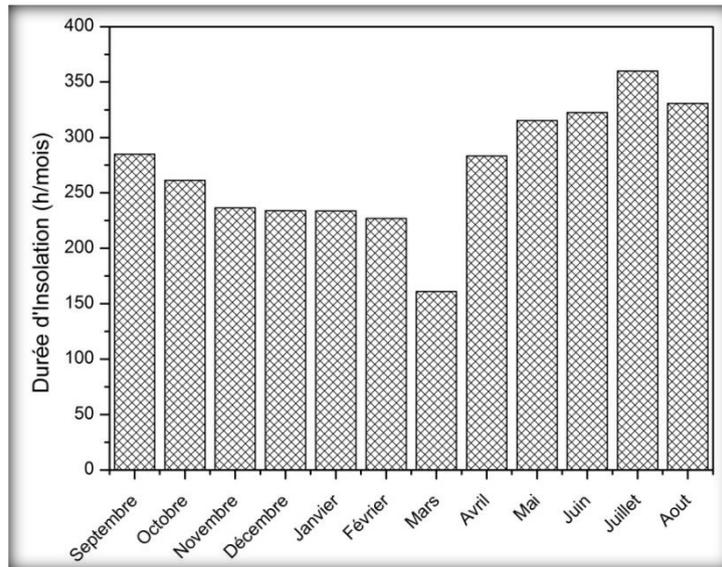


Figure 24: Insolation moyennes mensuelles

I.3.2.6. L'évaporation

Le terme d'évaporation représente la restitution de l'eau de la surface terrestre sous forme de vapeur, à l'atmosphère et sous des conditions climatiques et physiographiques. Ces conditions sont pratiquement toujours remplies au Sahara.

Ce phénomène intervient dans le cycle de l'eau au moment où les précipitations atteignent la surface du sol. Le maximum est enregistré au mois de Juillet (Fig.25) avec **305 mm** et le minimum au mois de Décembre avec une évaporation de **61 mm** (Tableau 12).

Tableau 12: L'évaporation moyenne mensuelle, période (1982-2013).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Evaporation (mm)	197	131	72	61	63	86	141	184	242	286	305	291

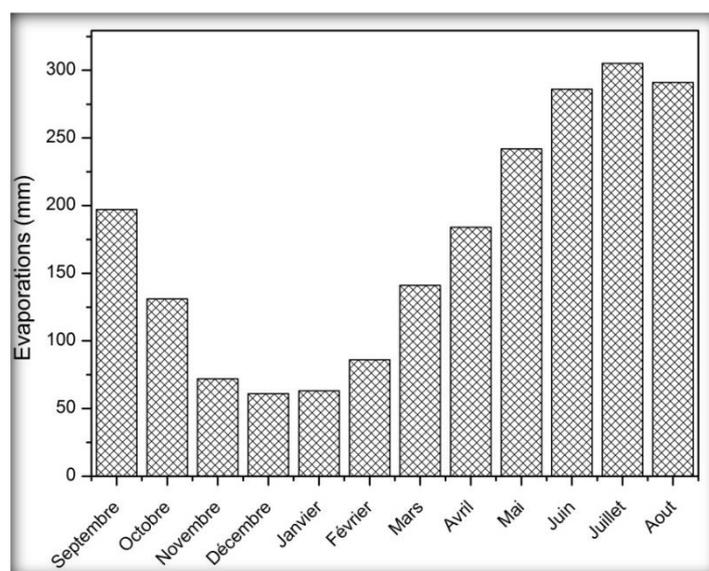


Figure 25: Les évaporations moyennes mensuelles

I.3.3. Estimation des facteurs du bilan hydrique

L'établissement du bilan hydrique d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations reçues sur une surface, entre les différentes composantes suivantes : Evapotranspiration réelle (ETR), Ruissellement (R) et l'infiltration dans le sous-sol et de définir la résultante entre les apports et les pertes d'eau.

L'équation du bilan hydrique s'exprime par la relation : $P = ETR + R + I$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm),

R : ruissellement en (mm),

I : infiltration moyenne en (mm),

ETR : évapotranspiration réelle.

En conséquence, en plus des précipitations et de l'écoulement qui sont mesurés aux stations climatologiques et hydrométriques, l'établissement du bilan hydrique nécessite aussi la connaissance du paramètre " évaporation", dont l'approche est plus complexe. Quant au dernier membre de l'équation, l'infiltration efficace, difficile à estimer directement, il est déduit après la détermination des 3 autres. Les précipitations et l'écoulement étant connus, nous donnons, ci- dessous, une approche de l'évapotranspiration potentielle et réelle, par méthodes empiriques.

I.3.3.1. Evapotranspiration

On appelle évapotranspiration ; l'ensemble des phénomènes qui par un processus physique transforme l'eau en vapeur.

Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Il convient de différencier l'Evapotranspiration potentielle (ETP) et Evapotranspiration réelle (ETR).

I.3.3.1.1. Evapotranspiration réelle « ETR »

On appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou déficit d'écoulement, la somme de l'évapotranspiration et de transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie, elle est conditionnée par la présence d'eau.

On l'estime à partir de la formule de TURC (1961) qui est la suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

L : Pouvoir évaporant, est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

T : Température moyenne annuelle °C

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

A partir de cette méthode, les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (*Tableau13*):

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 13: Résultats de l'ETR par la méthode de Turc

Paramètres	P (mm)	T °C	L	ETR (mm)
Station de Touggourt	68.8	22.31	11962.29	72.52

I.3.3.1.2. Evapotranspiration potentielle « ETP »

C'est la quantité d'eau maximale qui pourrait être transpirée si la quantité d'eau était illimitée. Elle peut être calculée par la formule de **SERRA** (Tableau 14).

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad ; \quad i=0,09T^{3/2} \quad ; \quad a = \left(1,6 \frac{I}{100} + 0,5 \right)$$

Avec :

ETP : évaporation potentielle mensuelle en mm.

T : température moyenne mensuelle en °C.

i : indice thermique mensuel.

Tableau 14: Résultats de l'ETP obtenus par la formule de Serra

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
i	15.23	10.12	5.70	3.42	2.93	3.88	6.14	10.18	11.72	15.53	17.37	17.84
ETP(mm)	153.97	79.61	31.58	13.82	10.78	16.96	35.59	80.44	100.93	158.88	190.30	198.68

$$I = 120.06; \quad a = 2.42$$

I.3.3.2. Détermination du ruissellement « R »

Le coefficient du ruissellement (Tableau 15) est calculé selon la formule de **TEXERONT BERCALOFF**.

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2}$$

Avec :

R : ruissellement en mm.

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

ETP : évapotranspiration potentielle en mm/an.

Remarque : Cette formule est valable pour les stations où les précipitations ne dépassent pas 600 mm, donc cette dernière est applicable dans notre cas.

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 15: Résultats du ruissellement par la formule de TEXERONT BERKALOFF

Paramètres	P (mm)	R (mm)
Station de Touggourt	68.8	0.095

I.3.3.3. Détermination de l'infiltration

On utilise la formule générale :

$$P = ETR + I + R \quad \text{d'où} \quad I = P - (ETR + R)$$

Avec :

I : infiltration en mm.

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

R : ruissellement en mm.

Tableau 16: Résultats de l'infiltration par la formule générale.

Paramètres	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Station de Touggourt	68.8	72.52	0.095	-3.815

I.3.3.4. Calcul du bilan hydrique

Le bilan de THORNTHWAITE permet d'estimer :

- ❖ L'évapotranspiration potentielle (ETP en mm), elle peut être calculée par la formule de C.W. THORNTWAITE :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \times K$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.5} ; I = \sum_{i=1}^{12} i ; a = \left(1.6 \frac{I}{100} + 0,5 \right)$$

- ❖ L'évapotranspiration réelle (ETR en mm).
- ❖ La réserve facilement utilisable (RFU en mm), lorsqu'elle est saturée ; on a un écoulement (R), lorsqu'elle s'abaisse on dit qu'il y a épuisement et lorsque la RFU est nulle, il y a déficit agricole ce qui nécessite l'irrigation.

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 17: Bilan hydrique selon la méthode de C.W. THORNTHWAITE pour la station de Touggourt (1982 – 2013)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
P(mm)	7,5	5,3	5,2	7,1	16,6	2,27	3,8	4,2	1,8	0,7	0,2	2,3	$\sum P=56.97$
T(C°)	30,6	23,3	15,9	11,3	10,2	12,3	16,7	23,4	25,7	31	33,4	34	Moy=22.31
i	15.14	10.06	5.67	3.4	2.91	3.85	6.10	10.12	11.65	15.44	17.26	17.73	I=119.33
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	
ETP	162.53	73.03	23.97	9.82	8.00	13.42	36.69	93.25	134.17	212.42	254.23	247.42	
ETR	7.5	5.3	5.2	7.1	8.00	2.27	3.8	4.2	1.8	0.7	0.2	2.3	
RFU	0	0	0	0	8.6	0	0	0	0	0	0	0	
Déficit	155.03	67.73	18.77	2.72	0	11.15	32.89	89.05	132.37	211.72	254.03	245.12	1220.58
BH	-	-	-	-	8.6	-	-	-	-	-	-	-	
	155.03	67.73	18.77	2.72		19.75	32.89	89.05	132.37	211.72	254.03	245.12	

A savoir : $a= 2.41$

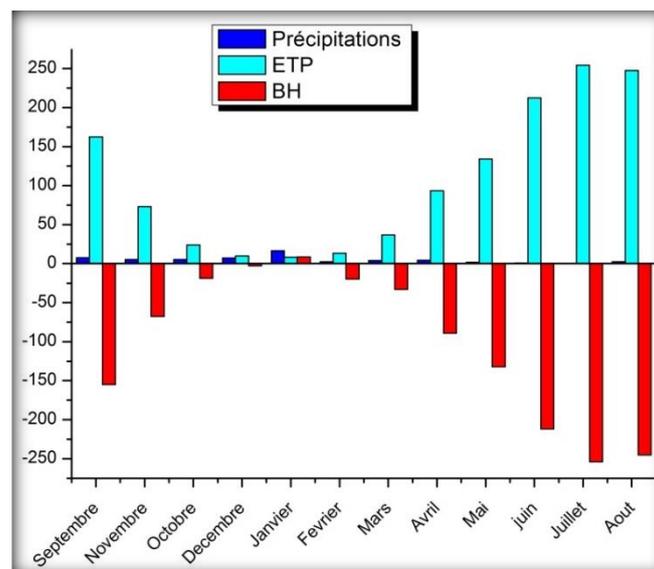


Figure 26: Variation de l'ETP de THORNTHWAITE en fonction des précipitations (mm) de la station de Touggourt.

Le déficit annuel est de **1220.58 mm**, atteint son maximum au mois d'Aout avec **245.12 mm** (Tableau 17). Il donne une approximation des besoins en eau d'irrigation des cultures, vu que la formule de THORNTHWAITE aurait tendance à sous-estimer les fortes ETP (Fig.26), particulièrement en zone aride et semi-aride, où elle ne tient pas compte de l'accroissement de cette dernière due aux phénomènes adventifs.

L'analyse des paramètres étudiés fait ressortir que les eaux des pluies n'ont presque aucune part dans l'alimentation des cultures ; d'ailleurs en dehors de la vallée, la végétation est presque inexistante. Ces différents indices sont responsables de la demande excessivement élevée en eau des cultures.

I.3.4. Hydrologie

L'axe de la vallée est occupé par le grand canal de drainage qui mène les eaux vers les chotts. Le flanc Ouest est parcouru par de petits oueds qui descendent de la dorsale mozabite qui drainent les quelques 70 mm de pluies annuelles par des crues épisodiques.

Les Oueds El Attar, N'oura, Medjeiar, Mellah apportent, par leurs crues relativement fréquentes, des possibilités d'approvisionnement aux nappes de l'Oued Righ.

La nappe phréatique est très proche de la surface, souvent affleurante, ce qui favorise la formation de sol sodique excessivement salin (Boumaraf, 2013).

Une vingtaine de sites de remontée (Tableau 18) ont été recensés dont la plupart sont dispersés de part et d'autre du canal collecteur d'Oued Righ (Bouchahm & al, 2013).

Les plus importants sites de remontée (en nombre et en extension) se localisent dans le Haut et le Moyen Oued Righ, caractérisés par une très faible pente. Les sites les plus importants en superficie sont rencontrés à Blidet Aneur, Sidi Amrane et Tindla. La plupart de ces étendues existent sur toute l'année et dépendent de l'alimentation par les eaux de pluie, de drainage et/ou celles d'assainissement ce qui représente une menace écologique.

Les sebkhas sont des dépressions fermées salées, à régime hydrologique superficiel sous la dépendance des crues des oueds périphériques (principalement les oueds Ittel et Djdie au Nord et le collecteur de l'oued Righ au Sud), Elles offrent toujours une topographie plate caractérisée par un tapis de cristallisation salines.

La vallée d'Oued Righ renferme la sebkha de Mérouane (Fig.27) d'une superficie de 3375 Km² et Mélgbir avec 5515 Km² (Boumaraf, 2013).

La sebkha Melghir est placée sur un axe synclinal bénéficiant d'une situation topographique ou l'écoulement des eaux usées (excès d'eau d'irrigation) est assuré par le canal collecteur. Estimé par HACINI en 2008 à 198 x 106 m³.

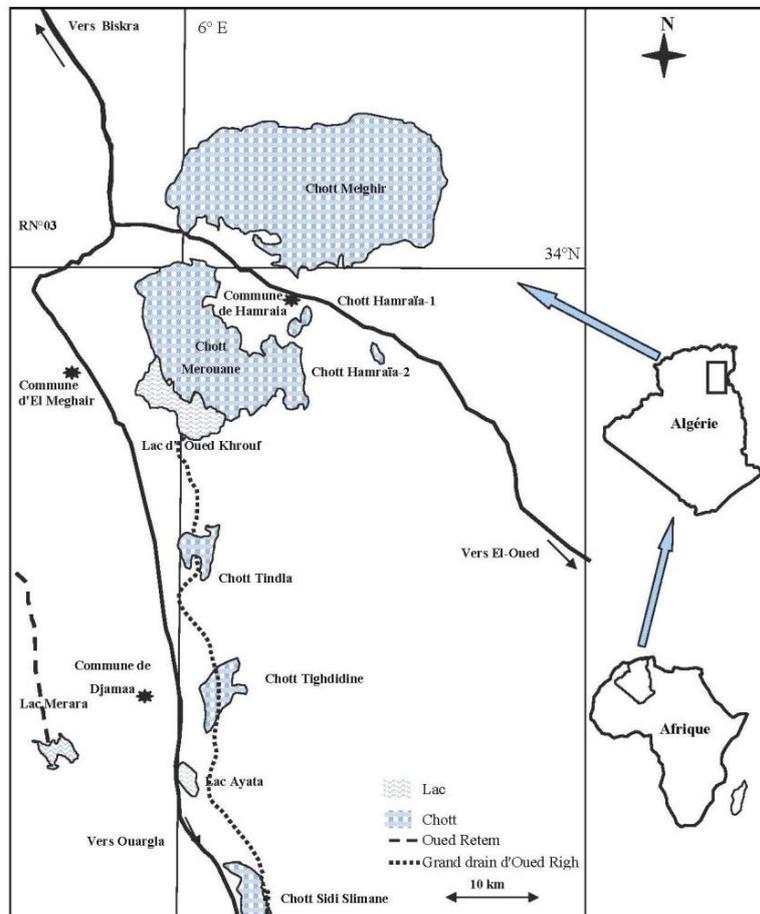


Figure 27: Figure montrant les principaux lacs et chotts de la région d'oued Righ

Chapitre 03 : Contexte hydro climatologique

Tableau 18: caractéristiques des sites de la remontée (CRSTRA, 2011)

Sites	commune	Périmètre(Km)	Superficie (Km ²)	Type d'alimentation	Pérennité
El Goug	Blidet Ameer	3.60353	0.593893	ED+ER	Selon la saison
Lac Témacine	Témacine	0.960574	0.038363	ED +EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Merdjaja 1	Nezla	1.60488	0.0308611	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Merdjaja 2	Nezla	0.535001	0.0171195	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Tataouine	Nezla	0.308227	0.00482274	EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Megarine1	Megarine	1.3354	0.0335897	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Zerzaïne	Megarine	-	-	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac sidi slimane1	sidi slimane	0.238062	0.00426276	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac sidi slimane2	Sidi Slimane	0.703517	0.0332348	ED + EC +ER	Existence sur toute l'année
carrière let 2	Sidi Slimane	0,529102	0,01079286	ER	Existence sur toute l'année
Lac Tamarigh	Sidi Amrane	0.104078	0.000840941	ER	Existence sur toute l'année
Lac Khanana	Sidi Amrane	0.151011	0.00173342	ER	Existence sur toute l'année
Lac El Aryass	Sidi Amrane	0.208439	0.00329252	ER	Existence sur toute l'année
Lac Ghilane	Sidi Amrane	0.166637	0.00217117	ER	Existence sur toute l'année
Lac Ayata	Sidi Amrane	3.15543	0.48249	ED +EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Ain Zerga	Téggidine	0.190032	0.00271672	ER	Existence sur toute l'année
Lac Sidi El Abed	Tindla	0.926515	0.037291	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Tindla	Tindla	36.9023	26.2089	EC+ER	Selon le niveau du Canal
Tindla plan d'eau	Tindla	-	-	ED + ER	Selon la saison
Lac Oued Khrouf	El Mghaïer	-	-	EC	Existence sur toute l'année

EC : Eau du canal principal

ER : Eau issue de la Remontée

ED : Eau de drainage

EU : Eaux usées

Chapitre 04 :

***RESSOURCES EN EAUX, GEOMETRIE ET
GESTION DES AQUIFERES***

I.4. Chapitre 04 : Ressources en eaux, géométrie et gestion des aquifères

Introduction

Généralement les ressources en eau représentent l'une des principales richesses sur lesquelles repose toute action de développement économique et social. Au Sahara les ressources en eau sont surtout et largement dominées par les eaux souterraines et ce en dehors des régions situées dans l'atlas saharien, le Hoggar et le tassili (*khadraoui, 2007*).

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » s'étend sur une vaste zone couvrant une superficie d'environ 1.000.000 de km² (*OSS, 2003*), dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (*Fig.28*).

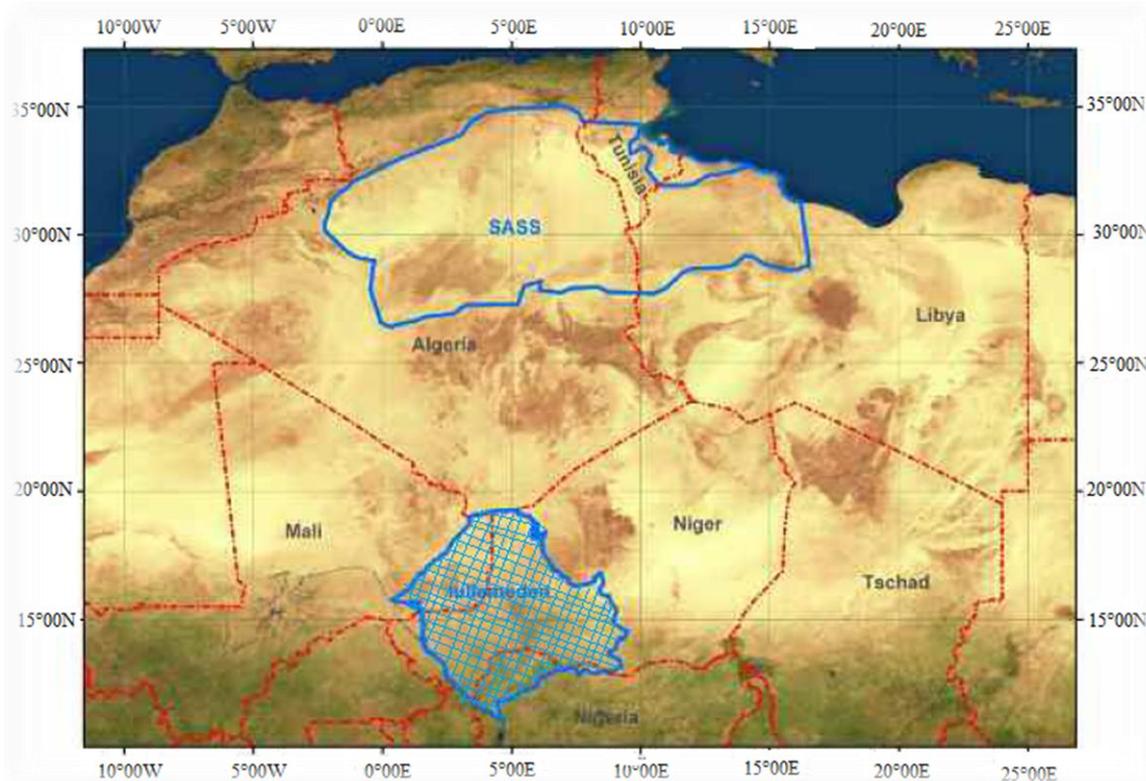


Figure 28: Limite du système aquifère du Sahara Septentrional (Saradeth & al, 2010).

L'exploitation des vastes systèmes hydrauliques (du Sahara) a commencé bien avant qu'ils ne soient reconnus. La structure a été aménagée au 10^{ème} siècle, c'est probablement en Egypt qu'il faut rechercher l'origine des puisatiers de l'oued Righ. Vers le milieu du 19^{ème} siècle ils ont commencés même à creuser et entretenir les puits pour chercher l'eau ce précieux élément « source de toute vie » (*ERESS, 1972*).

En termes de volume stocké, ces ressources souterraines comptent probablement parmi les plus importantes du monde. Ceci a envisagé la possibilité d'un développement important de l'agriculture au Sahara. (*ERESS, 1972*).

L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part, l'existence d'un fossé de subsidence d'autre part, ont favorisé la formation de deux grands systèmes aquifères définis par le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI) (*Fig.29.*)

Ces nappes sont limitées par :

- Au Nord, par les lignes de crêtes de l'Atlas Saharien depuis le Golf de Gabes jusqu'à la région de Bechar ;
- Au Sud par une ligne Reggane- Ain Salah- In Amenas ;
- A l'Est par la limite artificielle constituée des lignes frontières Algéro- libyenne et tuniso- libyenne.

Ces deux grands aquifères d'eaux dites « fossiles » bénéficient en fait d'une certaine alimentation constituée par l'infiltration des eaux de ruissellement en provenance des massifs montagneux de l'Atlas Saharien et de l'Atlas marocains au Nord et les plateaux de Tadmaït et Tiniherth au Sud.

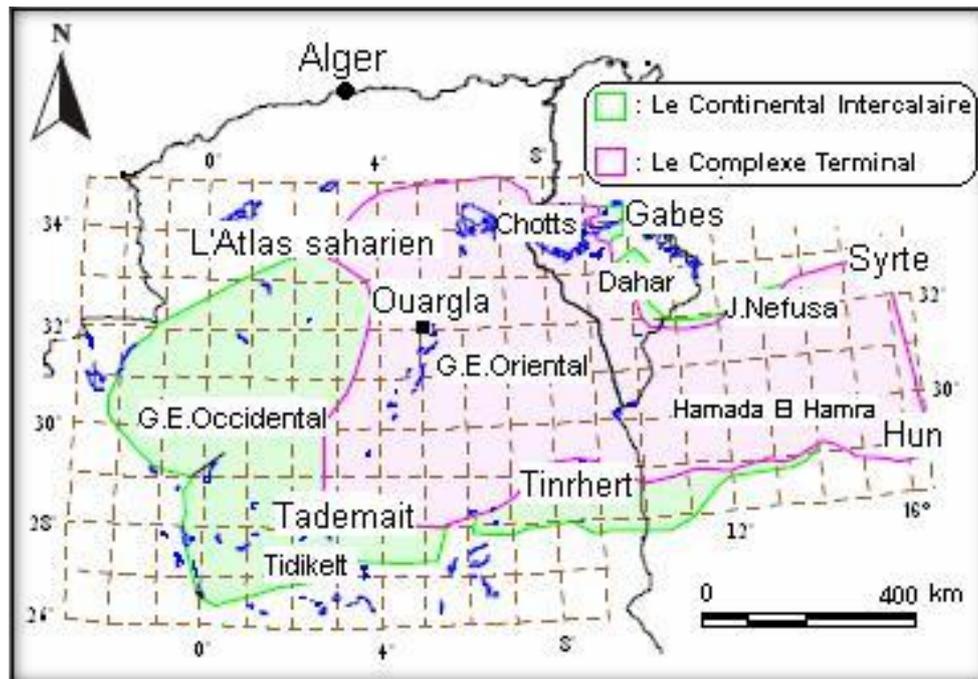


Figure 29: Carte des ressources en eau souterraines des deux Systèmes Aquifères du Sahara septentrional (continental intercalaire et complexe terminal) (OSS-2003)

L'écoulement se fait d'Est en Ouest en provenance de l'Atlas et en direction du Touat Gourara ; du Sud au Nord en provenance de Libye et du Dahar Tunisien (Djennane, 1990).

Ce système a fait l'objet de plusieurs investigations depuis le début des années 1960 à savoir : **Géo pétrole, 1964 ; Cornet, 1964 ; Bel & Demargne, 1966; Unesco, 1972 ; De Marsily & al, 1978 ; Pallas, 1980; Besbes & Zammouri, 1988 ; Mamou, 1990; Salem & Baruni, 1990; Zammouri, 1990 ; Geomath, 1994 ; Besbes & al, 2003**, qui ont contribué à la description des principales formations aquifères et à la délimitation de leurs extensions.

L'hydrogéologie de surface de la vallée de l'oued Righ est très réduite, à cause de la faiblesse des précipitations dans la région. Hors des quelques orages annuels, l'alimentation de l'oued Righ est faite par les écoulements de drainages qui proviennent des palmeraies.

I.4.1. Description des aquifères

I.4.1.1. Les nappes profondes

I.4.1.1.1. Le Continental Intercalaire

Son immensité tant en terme d'extension spatiale qu'en terme de volume, fut découverte, à partir du moment où les techniques de forage en profondeur furent maîtrisées.

Avec près de 800 000 km² le continental Intercalaire est l'un des aquifères les plus étendu de la planète (Fig.30). Dont l'une des particularités est de constituer une ressource en eau souterraine fossile (Burdon, 1977 ; Margat, 1990 ; Margat, 1992 ; Margat & Saad, 1984). Puisque très peu alimenté avec les conditions climatiques actuelles. On se pose la question de savoir si l'on doit mobiliser les réserves de cette ressource en eau non renouvelable, qui est donc limite dans le temps, ou au contraire s'il faut se contenter de prélèvements modestes et laisser ainsi ce capital eau inutilisé.

Au niveau de sa localisation spatiale, cet aquifère, longe au nord le piémont saharien de la côte tunisienne jusqu'aux environs de Béchar, il est limité au sud par une droite qui part de Reggane jusqu'à In-Amenas, pour aboutir partiellement dans le Sud tunisien et le Nord libyen, il est limitée à l'Ouest par la vallée de l'oued Saoura- Messaoud. La nappe du Continental Intercalaire est appelée souvent « nappe albienne », en fait, l'étage Albien ne représente que la partie supérieure de la formation qui comprend tout ou partie des terrains continentaux déposés entre les plissements hercyniens et la transgression cénomaniennne (Cornet, 1964). Il s'agit d'une formation essentiellement continentale à structure plus au moins lenticulaire avec des matériaux meubles sablo-gréseux et argilo-sableux. L'âge va du Trias à l'Albien avec prédominance du Crétacé inférieur. La profondeur de cette nappe passe progressivement de 800 m à Ouargla, à 1 300 m à Touggourt et 2 600 m à Biskra.

L'immensité des ressources est un fait bien réel, mais se pose avec acuité le problème de leur exploitation et de leur traitement, en effet comme nous le développerons ultérieurement, il s'agit d'eau très chaude et à forte salinité, ce qui créer de nombreuses difficultés pour leur usage à titre agricole ou pour la consommation humaine.

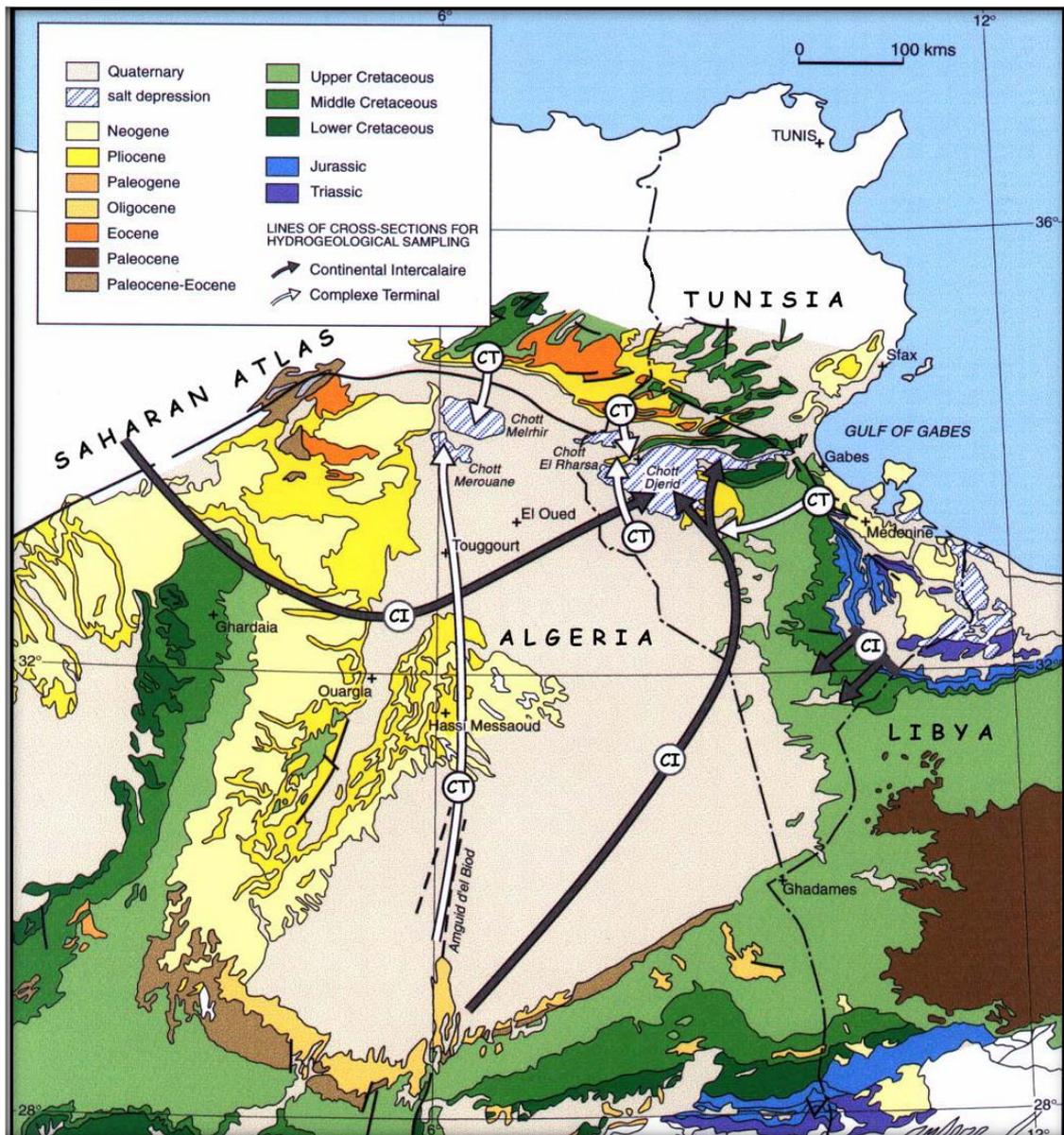


Figure 30: Carte hydrogéologique dans le Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003)

De haut en bas, le CI débute presque toujours au toit de l'Albien. Le mur du CI coïncide avec la discordance hercynienne sous les plateaux de Tademaït et du Tinhert (Fig.31).

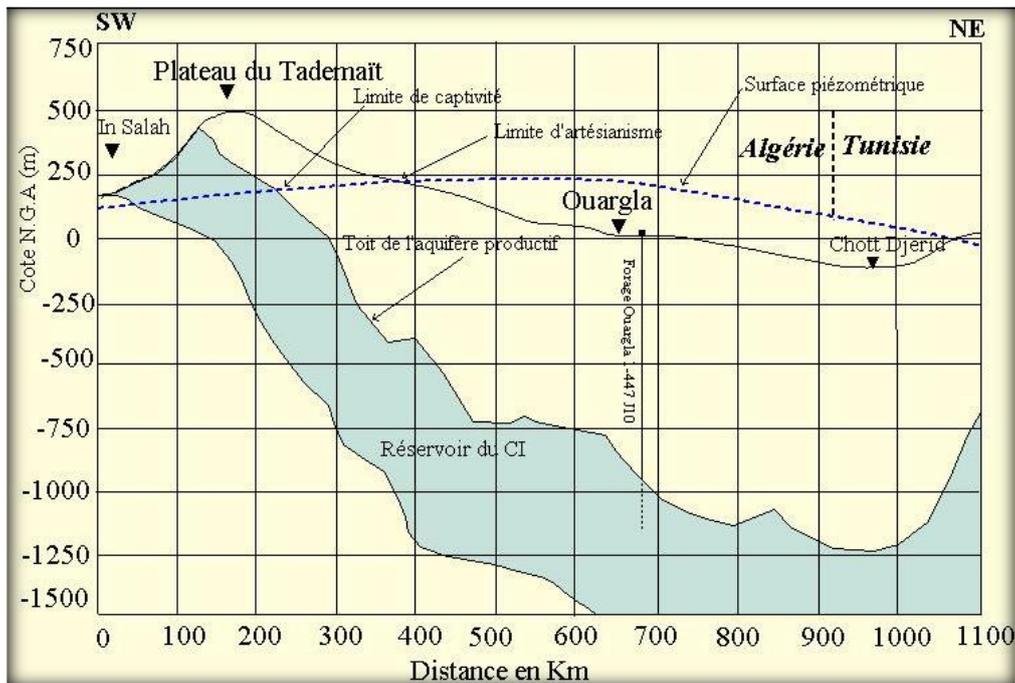


Figure 31: Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI.

Le toit de la nappe du Continental Intercalaire est formé par les argiles à gypse de la transgression marine Cénomaniennne, elle est donc captive. Le mur de la formation aquifère apparaît ainsi très irrégulier. Quelques failles importantes affectent cette dernière, il s'agit des accidents de la dorsale d'Amguid- El Biod Ces failles sont à l'origine de fuites verticales (drainance) vers la nappe du complexe terminal.

Les sables et les grès du Continental Intercalaire offrent aux eaux, sur toute l'étendue du bassin, des possibilités de circulation.

Les eaux du Continental Intercalaire sont caractérisées par une température qui dépasse les 60°C sauf aux endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol.

Plusieurs forages sont en activité : ils sont utilisés pour l'AEP et pour l'irrigation (Sidi Mahdi, Sidi Slimane, M'Rara, ...).

Les eaux de l'albien contiennent généralement moins de 2 g de résidu sec par litre mais elles peuvent être localement plus chargées, surtout dans la région de Ouargla - Hassi Messaoud (6 g de résidu sec l par litre) (Djennane, 1990).

La plus grande partie de l'eau de cette ressource a été remplie pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire. La nappe est ainsi captive, à l'exception des bordures.

Les forages ainsi implantés dans ce système peuvent débiter même 400 l/s (Tesco, 1986).

I.4.1.1.1. Alimentation

Bien qu'il s'agit d'une eau principalement fossile, emmagasinée au cours de périodes pluvieuses du quaternaire, les réserves de cette nappe pourraient permettre l'irrigation de 1 00 000 hectare pendant 200 000 ans.

Cependant, la recharge s'effectue :

- De façon directe par infiltration des ruissellements qui se produisent sur les zones périphériques d'affleurement, notamment dans le piémont de l'Atlas Saharien (secteur Nord-Ouest), dans le massif du Dahar (Tunisie) et sur les rebords Ouest (Touat,

Gourara) et Sud (Tidikelt) du plateau du Tademaït, ainsi que sur le rebord Sud du plateau du Tinhert et sa prolongation en Libye jusqu'au Jebel Fezzan ;

- Indirectement dans le Grand Erg Occidental au travers des sables dunaires et du Complexe Terminal, dans la région où il n'existe pas de séparation imperméable entre les deux réservoirs. (Fig.32).

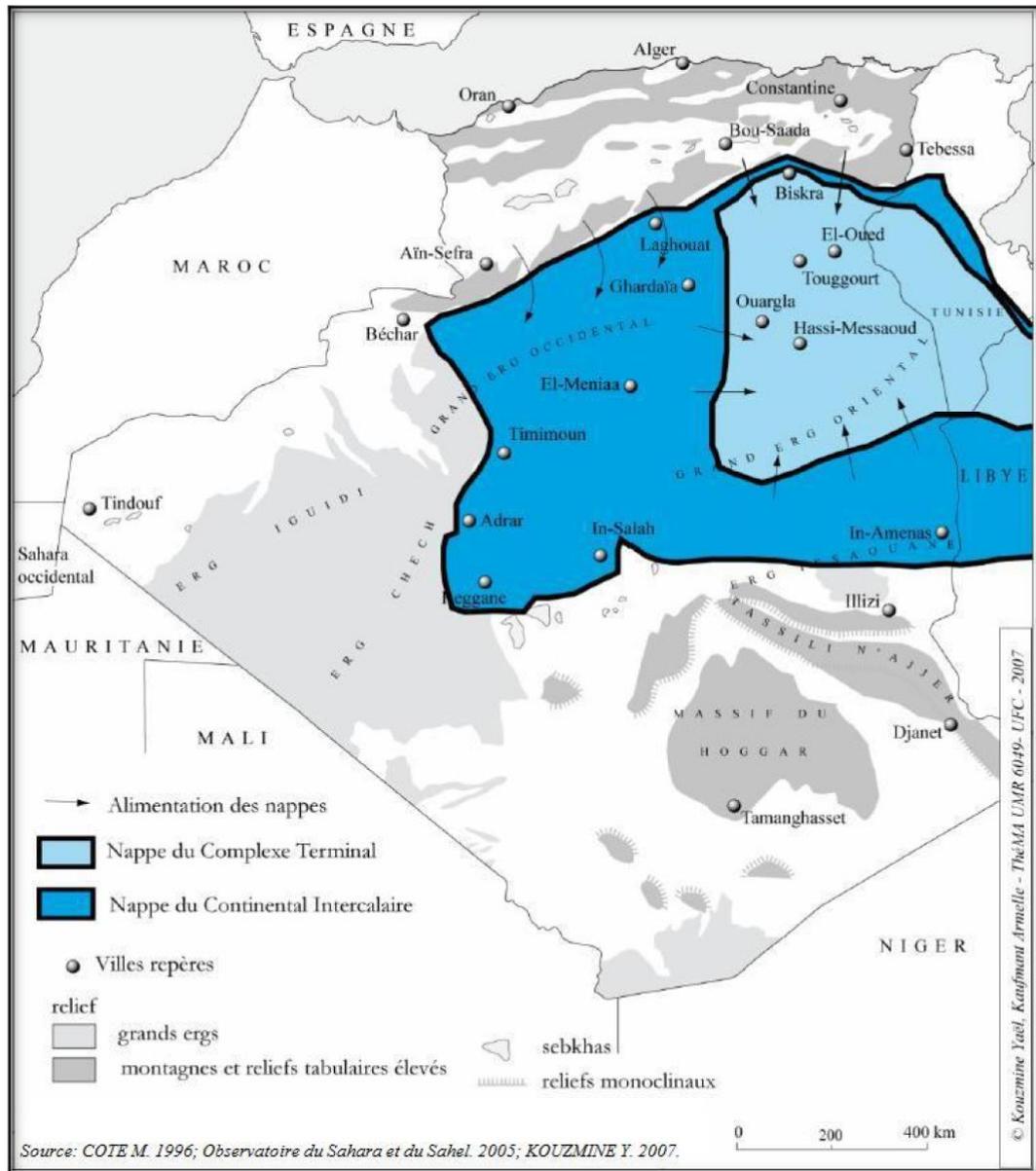


Figure 32: Carte montrant l'alimentation des deux nappes aquifères du Sahara Septentrional (Le CI et Le CT) (Kouzmine, 2007).

I.4.1.1.1.2. Ecoulement

L'écoulement d'ensemble se produit comme suit (Fig.33):

- Dans le sens Nord-Sud, c'est-à-dire du piémont de l'Atlas vers les zones d'affleurement (et d'exutoire) des rebords du plateau du Tademaït à l'Ouest ;
- Dans le sens Sud-Nord, à l'Est du rebord Sud du plateau du Tinhert vers le Grand Erg Oriental et de la Hamada Al Hamra vers le Djebel Nefusa ;

I.4.1.1.1.3. Exutoires

I.4.1.1.1.3.1. Exutoires naturels

Les bordures occidentales et méridionales du Tademaït constituent une zone d'exutoire naturel importante, probablement jalonnée anciennement par des sources, dont les foggaras ont pris la relève. L'eau non captée s'évapore dans un chapelet de sebkhas qui occupent le fond des dépressions du Gourara, du Touat et du Tidikelt.

La seconde grande zone d'exutoire naturel se situe en Tunisie. Elle consiste en des remontées verticales par failles dans la zone du Chott Fedjaj et à un écoulement vers la nappe de la Geffara tunisienne par l'intermédiaire des failles d'El Hamma et de Medenine.

Par ailleurs, des transferts verticaux à partir du Continental Intercalaire vers le Complexe Terminal existent peut-être à la faveur des fractures qui jalonnent la dorsale d'Amguid - El Biod. Sur le reste du domaine, mise à part la zone de communication possible avec le Complexe Terminal sur le Grand Erg Occidental, le toit de la formation, constitué d'une épaisse couche d'argile et d'anhydrite, est parfaitement imperméable et isole complètement les deux réservoirs.

I.4.1.1.1.3.2. Exutoires artificiels

L'exploitation du Continental Intercalaire s'est d'abord effectuée, depuis de longs siècles, par le système traditionnel des foggaras, introduit sur la bordure du plateau du Tademaït dès le X^e siècle.

Le débit total, connu au travers de campagnes de mesures effectuées en 1932-1950 et 1960, est resté invariable jusqu'aux années 1970, de l'ordre de 3,6 m³/s. (EPDGDRS. 1, 1998)

Les premiers forages artésiens ont été réalisés vers la fin du siècle dernier (El Golea, In Salah), mais leur débit est resté faible (250-300 l/s) jusqu'en 1950. La réalisation des premiers grands forages (Zelfana, Guerrara, Ouargla, O. Righ) a ensuite rapidement porté le débit exhauré à 3 m³/s (1970).

Les prélèvements actuels sont de l'ordre de 5 m³/s (Djennane, 1990).

Les caractéristiques connues de salinité et de température ont permis de différencier différentes classes relatives à l'exploitation du CI. Ces classes sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 19: Caractéristiques du Continental Intercalaire (EPDGDRS .1, 1998)

Localisation	Profondeur de forage	Profondeur de pompage	Salinité	Température
Sud-ouest des Ziban, Nord de l'Oued Righ et Centre du Souf	1.500 à 2.500 m	Fortement artésien (piézométrie de 200 m par rapport au niveau du sol)	Entre 2 et 3 g/l	60 à 70 °C
Nord des Tassili, Ouargla, Sud de l'Oued Righ et du Souf, est du M'Zab	1.000 à 1.500 m	Artésien (piézométrie par rapport au niveau du sol variant de 200 à 0 m du nord au sud)	Supérieur à 5g/l au sud d'Hassi Messaoud Entre 3 et 5 g/l à El Borma Entre 1 et 2 g/l au nord de d'Hassi Messaoud et vers Zelfana	40 à 60° C

I.4.1.1.2. Le Complexe Terminal

Il est noté dans l'étude OSS (2003b) que classiquement, et selon la définition de **Kilian (1931)**, le terme « Continental terminal » désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-Pliocène. Mais d'après **Bel & Demargne (1966)** : « La nappe du Continental Terminal, contenue dans les sables du Mio-Pliocène, est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe, la nappe du Continental Terminal, par opposition au Continental Intercalaire ».

C'est avec le projet **ERESS 1972 -c-** qu'apparaît la notion de « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par **Bel & Cuhe (1969)**, ce terme de « nappe du Complexe Terminal » qui regroupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique.

Ce complexe est constitué d'un remplissage de formations continentales sablo-argileuse qui repose en discordance sur les calcaires érodés de l'Eocène inférieur, il s'étend sur une superficie de 350.000 Km². La nappe du Complexe Terminal s'étend sur une superficie de l'ordre de 350.000 km², sa profondeur est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m (Fig.35), et s'étend à l'ouest, de Biskra au nord jusqu'au nord-est d'In Salah, puis rejoint la Tunisie et la Libye à l'est, en passant au nord de Ghadamès. Au nord, elle s'étend de Biskra vers la Tunisie en longeant le piémont saharien. Cette nappe couvre l'ensemble de la cuvette du Bas-Sahara ainsi que le sud-ouest tunisien. Elle est exploitée depuis longtemps dans l'Oued Righ.

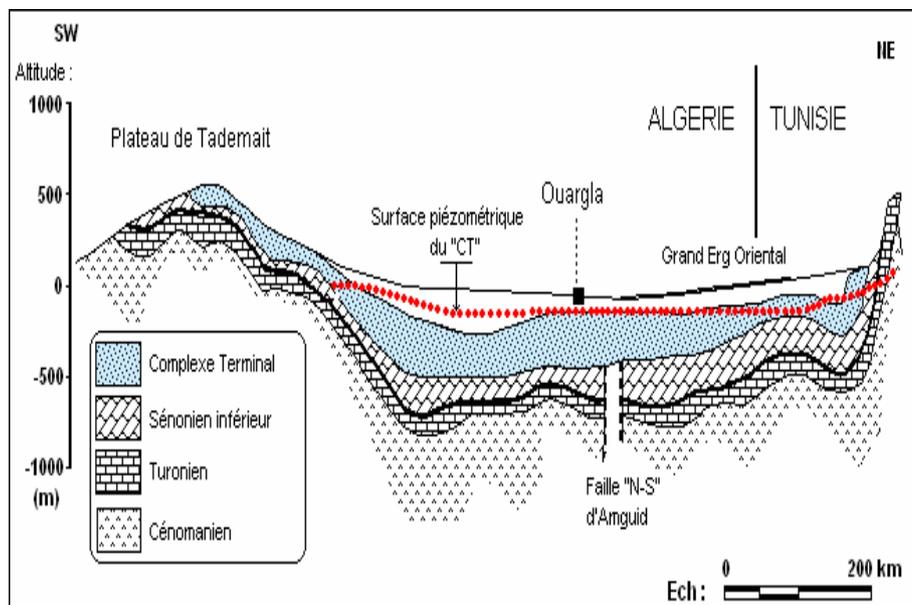


Figure 35: Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (Unesco, 1972)

Ce système couvre l'ensemble de la cuvette du Bas-Sahara ainsi que le Sud-Ouest tunisien.

La nappe captive du Complexe Terminal donnait autrefois des sources nombreuses dans la région de l'Oued Righ. Elle fut, en outre, exploitées par puits et forages depuis longtemps, et elle fournit aujourd'hui encore à cette région d'Oasis l'essentiel de ces ressources.

Le Complexe Terminal est formé de trois nappes superposées bien distinctes :

I.4.1.1.2.1. La première nappe des sables CT1

Dite des sables ; est en réalité un réseau de petites nappes communicantes, elle se situe dans les sables plus au moins argileux du Pliocène. Cette nappe est la moins profonde (50 à 100 m) (*Fig.36*), elle est captive exploitée avec un débit faible à moyen, de l'ordre de 20 à 40 l/s, (le débit global d'exploitation est proche de 6 m³/s). Cependant, à cause de la salinité élevée de l'eau, les forages qui la capent sont actuellement moins utilisés.

I.4.1.1.2.2. La deuxième nappe du sable CT2

Une deuxième nappe, s'est constituée dans les sables Pontiens du Miocène supérieur, beaucoup plus continus et perméable que les précédents. L'épaisseur de la couche aquifère est de 20 à 36 m. Cette nappe captive est très exploitée par des forages moyennement profonds (100 et 165 m), avec un débit variant entre 25 et 45 l/s. Des argiles à niveaux calcaires et des marnes, forment son substratum, alors que son toit est formé d'argiles et d'argiles sableuses.

Les deux nappes (CT1 & CT2) du Mio-pliocène sont alimentées localement par les rares précipitations et les infiltrations d'eaux de surface (de la nappe phréatique et du canal de l'oued Righ), et à partir des percolations des nappes artésiennes sous-jacentes (drainance). Les prélèvements par forages représentent leur seule exhaure.

Les deux nappes surmontent l'autre ensemble du Complexe Terminal, constituant la troisième formation aquifère, formée par les carbonates de l'Eocène inférieur – Sénonien supérieur (*Fig.36*),

La nappe des sables du Complexe Terminal s'enfonce progressivement vers le Nord en direction de l'Atlas Saharien (*Fig.37*). Alors qu'elle se trouve à 40 m de profondeur à Ouargla, elle passe à 125 m à Touggourt, et 200 m à El Mghair. Au Nord des chotts, la profondeur de la nappe s'accroît encore.

Elles sont fortement salées (4 à 7 g/l) (*Djennane, 1990*).

I.4.1.1.2.3. La nappe du Sénonien-Eocène CT3

La troisième nappe dite « nappe des calcaires », est située dans les calcaires fissurés et karstifiés, elle est exploitée par un débit de 25 à 40 l/s et parfois présentant un artésianisme à faible débit (0,3 à 0,6 l/s). A la base, le sénonien lagunaire forme le substratum de cette nappe et au sommet, le toit est surtout argileux. La porosité moyenne de cette nappe est de 20%.

Les deux principales nappes individualisées par les exploitants dans le Mio - pliocène de l'oued Righ sont mises en charge par les niveaux argileux (*Fig.36*), La topographie crée des conditions d'artésianisme.

Elle se trouve à une profondeur comprise entre 200 et 500 m (*Djennane, 1990*).

L'exutoire naturel de cette nappe est la zone des chotts; en Algérie le chott Merouane et Melghir et en Tunisie chott El Jerid et chott El Ghera (*Hacini, 2007*).

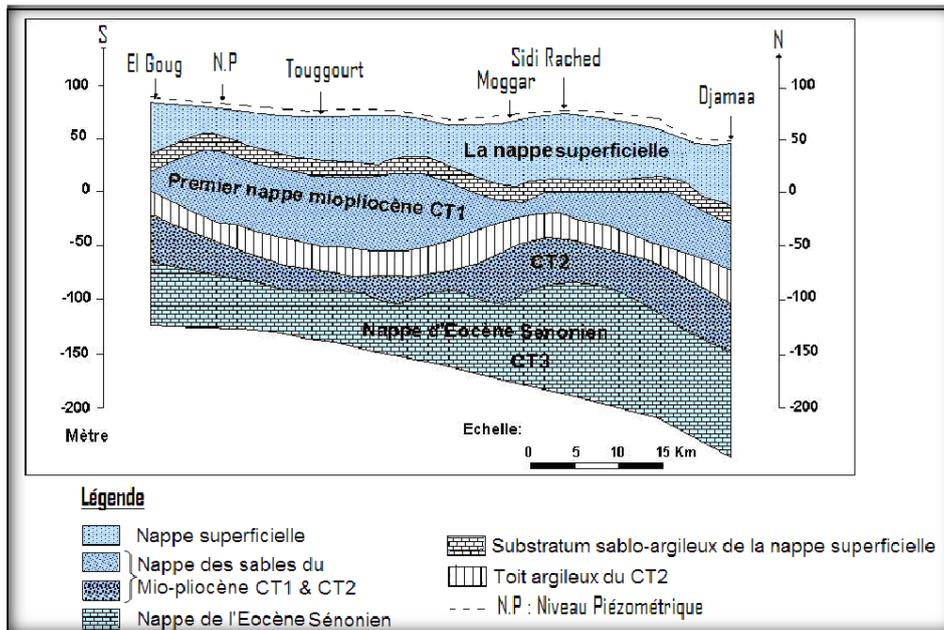


Figure 36: Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région de Touggourt.

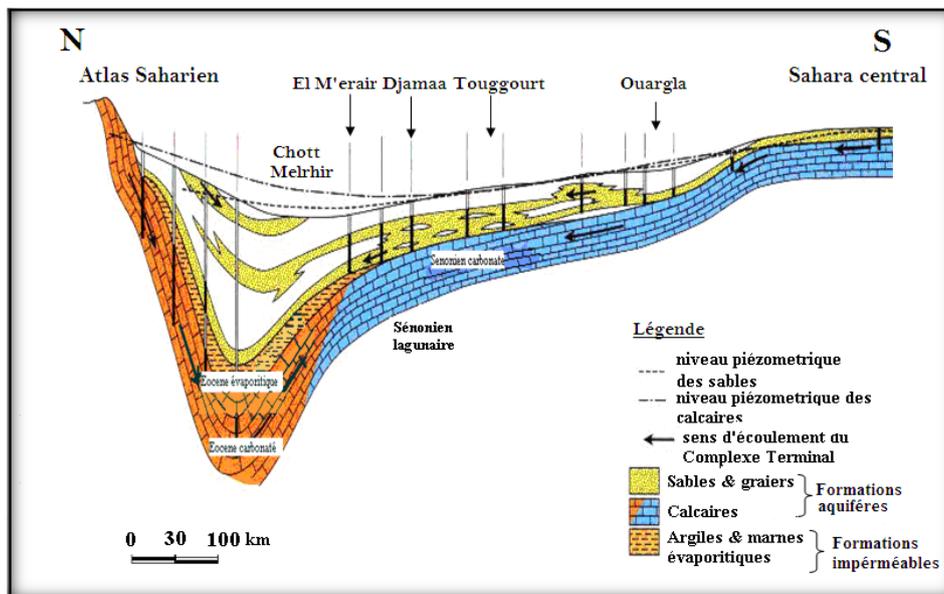


Figure 37: Coupe hydrogéologique schématique Nord Sud du Complexe Termina (Castany, 1982)

I.4.1.1.2.4. Alimentation

Comme pour le Continental Intercalaire, l'essentiel du remplissage du réservoir s'est effectué pendant les périodes pluvieuses du quaternaire. Cependant, la permanence d'une certaine alimentation actuelle est vraisemblable en plusieurs régions :

Sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires (Sénonien, Eocène inférieur, Turonien), ou au travers des nappes d'inféro-flux des oueds : bordure Sud-Atlantique, M'Zab, Djebel Tebaga, Dahar, Djebel Nefusa ;

Dans les deux grands Ergs (Occidental et Oriental), par infiltration de pluies exceptionnelles au travers des formations dunaires perméables.

I.4.1.1.2.5. Direction des écoulements

L'ensemble du système s'écoule du Sud vers le Nord et les niveaux piézométriques passent de **80 m** environ à El Goug à **40 m** en bordure des chotts (Fig.38). La surface piézométrique de la deuxième nappe captive est généralement plus élevée que celle de la première : dans le Nord du bassin la différence peut atteindre une quarantaine de mètres.

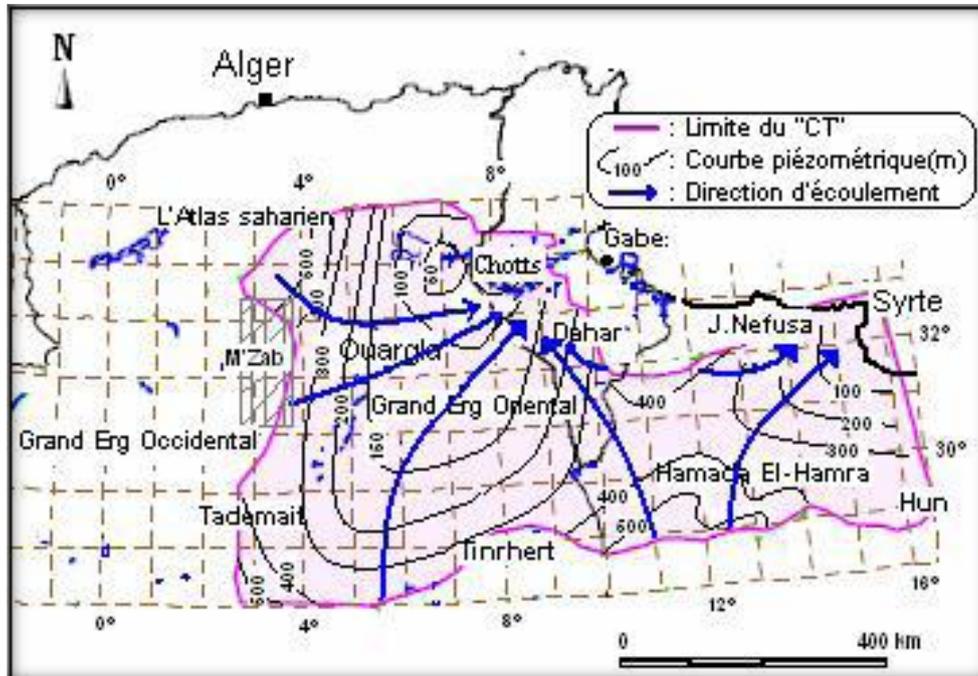


Figure 38: Carte piézométrique de référence du "CT" (OSS, 2003)

En 1970, le Complexe Terminal fournissait $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (ERESS; 1972. c) dont les deux tiers d'eaux jaillissantes, le reste étant pompé, l'essentiel de l'artésianisme est concentré dans la partie Nord du bassin (El Meraier), alors que le pompage domine plus au Sud, de Touggourt à Blidet Amor, bien qu'El Goug, la plus méridionale des palmeraies soit encore totalement alimentée par des eaux artésiennes.

Ce complexe à une profondeur oscillant entre 100 et 500 m. Les eaux de cet aquifère se caractérisent par une température peu élevée allant de 25 à 30°C

La porosité moyenne est de 20 % pour les calcaires et 30 % pour les sables.

L'accroissement du nombre des forages a été à l'origine de baisses spectaculaires du niveau hydrostatique, entraînant le dessèchement de plusieurs palmeraies dont deux, Bram et Sidi Rached, ont dû être abandonnées. La surexploitation des nappes en aval du bassin entre Djamaa et El Meraier provoque la baisse des niveaux en amont, au sud de Touggourt.

La variation de la nature lithologique de l'aquifère d'une zone à l'autre est à l'origine des variations observées dans les valeurs de la transmissivité (Fig.39).

Des essais de pompage ont été réalisés sur les forages d'Oued Righ-Nord, ont donné des valeurs qui s'échelonnent entre 1 et $25. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les plus fortes valeurs de sont obtenues dans la région d'Oued Righ-Sud où les forages captent préférentiellement, les niveaux sableux. Elles varient entre 1 et $130. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (OSS, 2003).

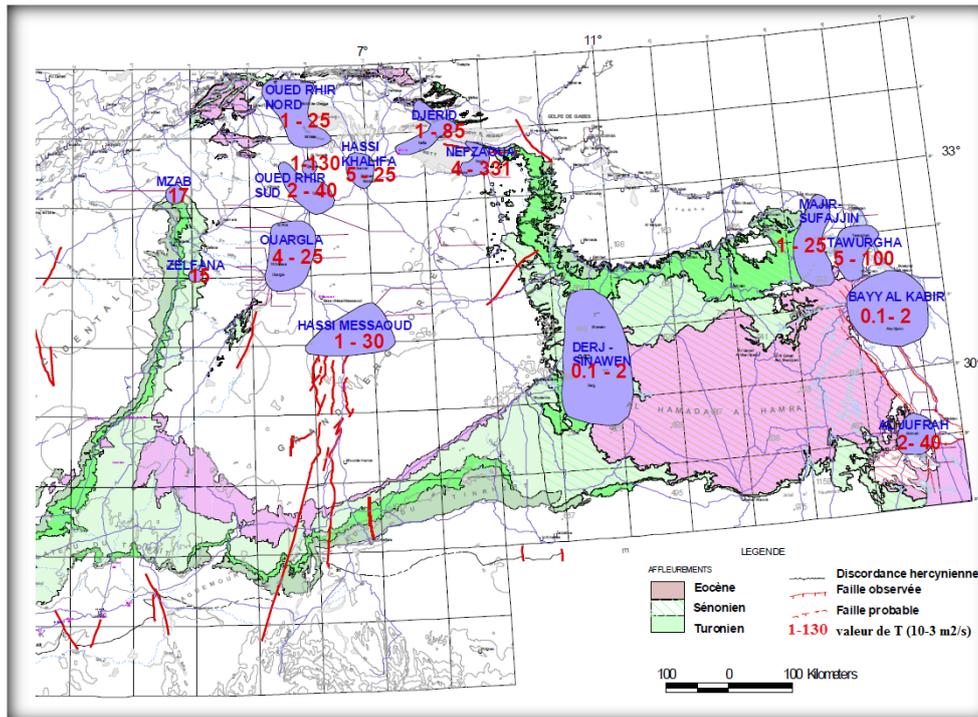


Figure 39: Carte de transmissivités du Complexe terminal (OSS, 2003)

Les coefficients d'emmagasinement ont rarement été déterminés à partir d'essais de débit. Les indications reportées ci-après proviennent d'estimations de l'ERESS suivant une méthodologie différente selon qu'il s'agissait de nappes libres ou de nappes captives.

Dans les zones à nappe libre, la nature lithologique du réservoir aquifère a conduit à distinguer deux cas :

- les roches à porosité inter granulaire pour lesquelles a été adoptée une valeur moyenne de 150.10^{-3}
- les roches fissurées pour lesquelles une valeur légèrement plus faible entre 100 et 150.10^{-3} .

Dans les zones à nappe en charge, l'estimation des valeurs du coefficient d'emmagasinement a été faite sur un certain nombre de forages par l'ERESS, sur la base de l'analyse de leurs coupes lithologiques. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau suivant (Tableau 20).

Tableau 20: Coefficients d'emmagasinement du CT estimés à partir de la lithologie des forages (OSS, 2003)

Régions	Forage	Coefficient d'emmagasinement (10^{-3})
Touggourt	439 I 11	11.1
	474 I 11	8.4
	275 J 11	10.6
Djamaa	439 J 11	4.4
	484 H 11	5.4
	502 H 11	5.4
	402 H 11	5.0

I.4.1.1.2.6. Exutoires

I.4.1.1.2.6.1. Exutoires naturels

Les premiers exutoires naturels de la nappe étaient constitués par des sources, en particulier celles qui ont permis l'implantation humaine dans la vallée de l'Oued Righ et sur le pourtour des Chotts en Tunisie. Les premiers se sont tariés progressivement au fil des siècles (la date de leur tarissement total se situe vers 1900), les seconds étant encore actives, bien qu'en forte récession (le débit total des sources alimentées par le Complexe Terminal en Tunisie serait passé de 5 à 2,5 m³/s de 1900 à 1970 par suite du développement des pompages). Il reste également encore des sources, de débit beaucoup plus modeste, sur les bordures occidentales (vallée de la Saoura) et septentrionale (Ziban). (PDGDRS. 2, 1998)

A côté de ces exutoires ponctuels, la plus importante sortie de la nappe s'effectue de façon diffuse par percolation directe dans les Chotts, où elle se perd par évaporation.

I.4.1.1.2.6.2. Exutoires artificiels

Le débit exploité à partir de puits et forages, creusés à la main suivant des techniques ancestrales dans l'Oued Righ et dans la cuvette d'Ouargla atteignait déjà de l'ordre de 3,5 m³/s en 1900. Ce débit n'a cessé de croître pour atteindre le niveau actuel de 28 m³/s (PDGDRS.2, 1998.)

Par contre, la diminution de la fraction artésienne du débit exploité est spectaculaire. De 100% en 1900, elle est tombée à 58% en 1970 et à quelques % aujourd'hui. Il ne reste en effet plus guère d'artésianisme en Algérie, sauf en quelques secteurs très localisés (Sud-Ouest de Djamaa, Nord-Est d'El Oued) et encore les pressions statiques ne dépassent-elles pas 1 bar. En Tunisie, l'absence de données récentes ne permet pas une bonne vision, mais il est vraisemblable qu'un artésianisme résiduel (1 à 2 bars) subsiste dans le secteur Nefta-Tozeur - El Hamma.

I.4.1.2. La nappe superficielle

Les nappes phréatiques sont partout présentes au Sahara et se situent généralement dans les zones de dépressions ou les vallées, elles sont alimentées par les pluies, les crues, les eaux de drainage et aussi très souvent par les remontées naturelles (sources) en provenance des aquifères plus profondes ou encore par les fuites dans les ouvrages exploitants ces dernières.

Dans la partie supérieure des formations continentales, une nappe non captive peu profonde vient augmenter les réserves hydrauliques. Présente dans les oasis de oued Righ, la nappe superficielle est contenue dans les niveaux sableux et argilo-évaporitique du Quaternaire, pelliculaire par rapport à la nappe des sables qui lui succède en profondeur, dont elle est souvent séparée par un niveau semi-perméable du Mio-Pliocène.

Il s'agit donc d'une unité séparée, alimentée principalement par les précipitations et les écoulements temporaires, de plus par les eaux de drainage des palmeraies et les pertes des réseaux. Il en résulte un niveau de salinité extrêmement élevé, qui tend à croître avec l'augmentation des apports en eau de drainage des palmeraies.

En 1952, PAIX donnait comme profondeur de la nappe entre 1,5 et 2 m actuellement, Celle-ci varie entre 0,5 et 1m sur presque tout le long de la vallée de Oued Righ.

Le niveau le plus proche du sol (0,2 à 0,4m) se situe dans les zones d'El-Mghaier, Sidi Slimane, Zaouia et Mégarine, tandis que le niveau le plus profond de 1,60m est relevé au Nord d'El-Méghaier. Le niveau de la nappe dépasse cette dernière valeur seulement à Sidi Khelil Nord (zone proche du Chott Merouane).

Cette nappe est drainée par le canal collecteur de l'oued Righ.

Le tracer de l'Oued Righ est marqué par l'échelonnement de petits chotts constituant l'exutoire des eaux de la nappe phréatique.

Aux environs des oasis d'Ourir et de El-Meghier, les eaux de la nappe phréatique exhaures dans le chott Merouane et s'évaporent en donnant une croûte gypso saline.

A l'Ouest, la vallée est délimitée par les collines Miocènes sur la moitié de sa longueur, qui forment du Nord au Sud une sorte de chaîne. Derrière cette dernière, s'étend la dépression Dzioua où le Miocène est très peu épais, il s'agit d'une ondulation dont le cœur est formé d'Eocène moyen, qui s'allonge du Nord au Sud entre les Oueds Djellal et Dzioua.

Au Sud de Touggourt, les points d'eau exploitant la nappe phréatique sont nombreux et s'étalent en éventail sur une très large zone.

L'extension des eaux très profondes suit celle de la nappe phréatique.

La limite Ouest des nappes souterraines est suffisamment nette, elle est marquée par les collines Miocènes qui bordent la vallée de l'Oued Righ entre Ourir et Djamaa, correspondant à la remontée du substratum argileux imperméable de l'Eocène moyen.

Dans ces régions, la remontée des eaux superficielles pose un véritable problème, qui est accentuée en premier lieu par la différence de pression hydrostatique importante, conduisant à une alimentation par ascendance de la nappe phréatique à partir de la nappe des sables; ceci existe à l'origine entre la nappe des sables du Mio-pliocène et la nappe superficielle. Le deuxième problème de plus en plus réel par rapport au précédent est celui de la remontée du niveau de la nappe phréatique lié au développement de l'irrigation et l'absence des réseaux d'assainissements (*Benhaddya, 2007*).

I.4.2. Les problèmes rencontrés

L'immensité des ressources est un fait bien réel, mais se pose avec acuité. Le problème de leur exploitation et de leur traitement, en effet comme nous le développerons ultérieurement, il s'agit d'eau très chaude et à forte salinité, ce qui crée de nombreuses difficultés pour leur usage à titre agricole ou pour la consommation humaine.

Actuellement les zones de palmeraies connaissent d'énormes problèmes liés directement aux conditions naturelles de la région (morphologie du terrain, forte évaporation, salinité des eaux et des sols) et la mauvaise exploitation hydro-agricole (travaux culturels et entretien, mode d'irrigation). Ces contraintes conjuguées à une utilisation abusive des eaux profondes pour l'irrigation (submersion) se sont traduites par de graves problèmes.

I.4.2.1. Le problème du grand nombre de forages

Dans cette section, on discute du problème de l'intensité des forages, en suite des débits mobilisés (c.f paragraphe exploitation des nappes).

En premier lieu, au cœur des zones fortement exploitées (Djamaa, El-Mégghaier) les rabattements dans la nappe des sables passe sous celle de la nappe superficielle, il peut alors en résulter une version du flux de drainage vertical à travers l'éponte semi-perméable, et un risque de contamination de la nappe des sables à partir des eaux salées à sur salées de la nappe phréatique. Dans certaines zones, il y a un nombre élevé de forages, parfois à moins de 15 mètres l'un de l'autre. La nappe est alors rabattue d'une façon remarquable (cas de Sidi Slimane).

Ce problème de densité des forages s'accroît d'année en année avec des nouvelles autorisations de forer, surtout pour la réalisation du plan de PNDA (plan national de développement agricole).

I.4.2.2. La remontée du niveau hydrostatique de la nappe superficielle

Le deuxième problème paradoxal par rapport au précédent, mais beaucoup plus réel lié à la forte mobilisation des ressources hydriques exploitées dans la nappe, l'évolution des débits, la multiplication anarchique des forages, la mauvaise gestion des eaux et leurs qualités médiocres ont fortement contribué à l'augmentation du niveau de la nappe superficielle et à la salinisation des sols par remontée capillaire et formation des lacs qui apparaissent à la surface (*Photos.1*).

La nappe phréatique de la vallée de l'oued Righ subit une remontée progressive de son niveau piézométrique et qui semble s'aggraver avec les années. Les nappes profondes contribuent énormément à la remontée de la nappe phréatique, un important volume pompé vient s'ajouter à celui de la nappe phréatique. L'apport d'eau devient de plus en plus important (irrigation, eau usées, forages, etc...), ce qui se traduit par une alimentation excessive de la nappe. Cette situation est davantage aggravée par les mauvaises conditions de fonctionnement du système de drainage agricole et le rejet des eaux domestiques (manque de sensibilisation chez les habitants) (*Photos.2*), ainsi des fuites provenant des conduites anciennes (réseau d'A.E.P détérioré), Elle provoque la dégradation et le dépérissement de plusieurs palmeraies.

Devant cette situation alarmante, des mesures urgentes s'imposent pour juguler le phénomène de la remontée des eaux. D'où la nécessité de la mise en place d'un plan d'aménagement hydro - agricole et une stratégie de gestion des eaux usées, répondant à cette préoccupation urgente.



Photo 1: Photos présentant la remontée des eaux à Temacine & à Sidi Slimane (Boussaâda, 2007)



Photo 2: Rejet d'eaux usées sans traitement directement dans le canal.

I.4.2.3. La salinité des sols

Tous les sols de la région sont plus ou moins affectés de la salure. L'accumulation des sels dans les sols a pour origine divers facteurs, dont les principaux sont la qualité chimique de l'eau des nappes, notamment celle du complexe terminal (relativement chargée), la nature des roches, la très forte évaporation et surtout la concentration des sels dans le temps.

La manifestation la plus apparente est celle des néoformations d'affleurements blanchâtres et parfois des croûtes à la surface du sol (*Photos.3*).

Ce qui a aggravé encore plus le problème de salinité des sols dans cette région c'est l'utilisation des eaux salées pour l'irrigation avec un drainage défectueux.

Un simple calcul permet de voir qu'un hectare de céréales irrigué (600 mm) avec une eau de 2 g/l reçoit 12 tonnes de sels annuellement.

Pour le palmier dattier, entre 40 et 60 tonnes de sels sont déposées par an en fonction de la teneur en sel de l'eau.

La température élevée de l'eau la rend impropre à l'irrigation. La stagnation de l'eau chaude au contact des jeunes plantes détermine très rapidement (en quelques minutes) des brûlures et la destruction de la culture. En cas de contact en plusieurs heures des palmiers adultes peuvent eux-mêmes être détruits.



Photo 3: Formation de croûtes blanchâtres

I.4.2.4. Température, Corrosion et Entartrage

La température joue le rôle d'un agent accélérant les réactions chimiques soit pendant le transfert des eaux (tubage, refroidisseur et canalisations), où elle facilite la corrosion du tubage et des annexes : (vannes, débitmètre...etc.), et en libérant du gaz carbonique, accélère la précipitation du tartre; ce qui pose un grand problème dans les canalisations de cette région (*Photo.4*)

L'augmentation de la température des formations est simultanée à la profondeur. Si la profondeur augmente de 35 mètres la température s'accroît de 1°C. Avec une profondeur avoisinant les 2000 mètres, la température de l'eau peut atteindre les 65°C.

Les forages albiens dégagent des températures aux alentours de 60°C à l'atmosphère ce qui les rend inutilisables directement.

Cette température d'eau va augmenter les contraintes physico-chimiques et donner des conséquences dramatiques, par l'accélération des réactions chimiques, surtout celles qui concernent le tartre et la corrosion.



Photo 4: Vapeur d'eau dégagée par un forage albien.

L'équilibre chimique relatif au carbonate de calcium, dit équilibre calco - carbonique, peut se déplacer sous l'action du CO₂ : c'est ainsi qu'il peut y avoir des réactions de dissolution du carbonate de calcium l'eau est dite agressive, ou de précipitation du carbonate de calcium l'eau est ainsi dite incrustante (*Photos.5*). .

Parmi les problèmes les plus souvent évoqués sont ceux relatifs à des réseaux de distributions.

A cause de la corrosivité des eaux, les tubages des forages présentent fréquemment des perforations, surtout au niveau des couches aquifères, favorisant la communication entre les nappes du CT et du CI (*Photos.6*). Ce problème est d'autant plus grave quand il touche le niveau « salifère ». Il représente alors un danger pour l'environnement et la qualité chimique des eaux des différentes nappes. Les forages abandonnés (débitant des eaux salées) et non bouchés, posent également un problème de pollution de l'environnement et contaminent les autres nappes. L'ANRH se propose de les reconvertir en piézomètres.

Les eaux de la première et la deuxième nappe du Complexe Terminal (nappes des sables) sont caractérisées par le caractère corrosif, quant à l'eau de la troisième nappe elle a la propriété incrustante ceci s'explique par le contact eau – roche (*Boussaâda , 2007*).

La corrosion peut se manifester par la disparition du métal de l'ouvrage mais également par transformation in situ de ce métal et formation de dépôts de corrosion.

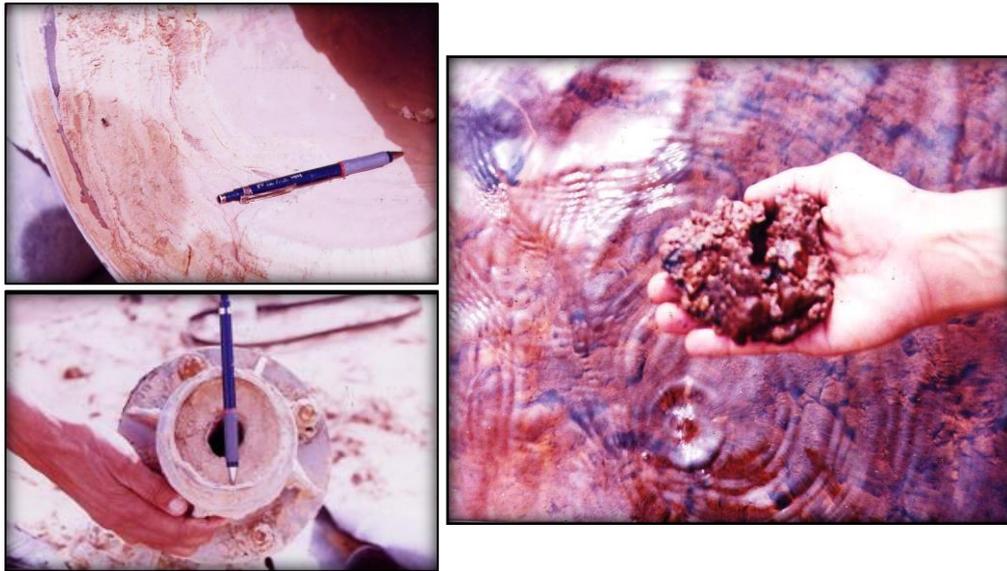


Photo 5: Photos illustrant les dépôts de tartre.

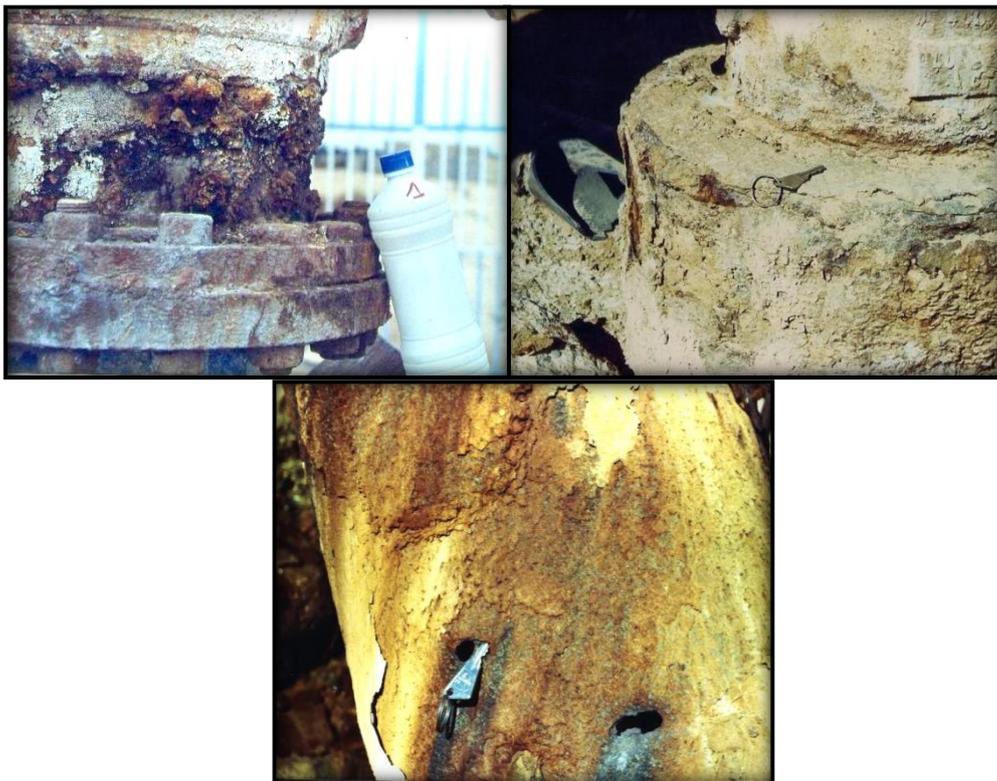


Photo 6: Photos illustrant le caractère agressif des canalisations de la vallée d'Oued Righ.

I.4.3. La potabilité

Une eau potable est une eau qui peut être bue par l'homme sans danger pour sa santé. Elle doit pour cela répondre à certains nombres de normes fixées.

La potabilité et la qualité chimique des eaux sont en fonction de la concentration des différents éléments chimiques dissous. L'état algérien fixe des normes de concentration en éléments chimiques.

Le tableau ci-dessous montre ces normes de potabilités.

Tableau 21: Concentrations des normes Algériennes de potabilités.

Paramètres ou substances	Concentration maximale acceptable
pH	6,5 à 8,5
Conductivité (µmhos/cm)	2800
Résidu sec (mg/l)	2000
Calcium (mg/l)	200
Magnésium (mg/l)	150
Sodium (mg/l)	200
Potassium (mg/l)	20
Sulfates (mg/l)	400
Chlorures (mg/l)	500

Selon ces critères on constate que les forages captant les eaux de la région sont hors normes. L'eau potable de bonne qualité chimique reste un rêve pour le secteur d'étude à cause des teneurs très élevées des résidus sec, (abondance de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^{-}) (C.f hydrochimie). Le critère de bonne qualité (eau potable) dans cette région exige un traitement préalable de l'eau avant de sa distribution à la population.

I.4.4. Exploitation des nappes

Dans un contexte d'aridité constante, d'accroissement des déficits de précipitations, la question de l'exploitation de ces nappes est un véritable pari pour l'avenir.

La question de la maîtrise de l'eau apparaît comme essentielle. L'eau par sa rareté, «passe avant la terre dans la hiérarchie des facteurs de production » (*Bisson, 1994*). Dans notre région d'étude, le bilan en eaux superficielles est très mince et de plus aléatoire, les habitants se sont inévitablement tournés vers l'exploitation des ressources du sous-sol par le biais des forages et des puits artésiens, qui sont, en volume, très importants.

L'immensité du continental intercalaire est un fait bien réel, mais le problème de leur exploitation et de leur traitement se pose avec acuité. En effet, comme nous l'avons vu, il s'agit d'eau très chaude et à forte salinité, ce qui crée de nombreuses difficultés pour leur usage à titre agricole ou pour la consommation humaine. Elle constitue un des trois réservoirs sur lesquels le monde arabe compte tirer ses ressources hydriques dans l'avenir –les deux autres étant l'aquifère des Grès nubiens en Libye et en Egypte, et les aquifères d'Arabie Saoudite (*Mutin, 1995*).

Pendant très longtemps, l'implantation humaine au Sahara a été limitée par la difficulté d'accéder aux réserves souterraines et d'élever cette eau au-delà de quelques mètres pour irriguer. Les oasis dans ces conditions n'ont jamais représenté que quelques dizaines de km^2 .

C'est seulement après la découverte de l'Albien, vers 1950 et l'arrivée des matériels de forages pétroliers que l'accès aux eaux souterraines a été complètement modifié et que de nouvelles oasis ont pu être créés.

L'eau du forage est amenée à la parcelle par un réseau d'adduction pouvant être constitué par des seguias en terre (*Photos.7*) ; des conduites enterrés avec des bornes californiennes, des petits canaux en ciment ou en amiante-ciment et souvent par les trois systèmes. Le très mauvais état des réseaux d'adduction entraîne des pertes pouvant aller jusqu'à 50% de l'eau fournie par les forages.



Photo 7: Photos illustrant les seguias en terre

La nappe du Complexe Terminal est exploitée par un débit de l'ordre de 8 m³/s en 1900 dans l'Oued Righ, la cuvette d'Ouargla, les sources du Djérid et Ain Tawargha.

Ce débit n'a pas cessé d'accroître, pour atteindre 44,5 m³/s, soit 1400 hm³/an en 2000.

Par contre, la diminution de la fraction artésienne du débit exploité est spectaculaire, de 100% en 1900, à 58 % en 1970 pour diminuer à 3 % en 2005

Les simulations effectuées sur le modèle du SASS sont toutes aussi alarmistes:

Le secteur le plus exposé est celui des chotts algéro-tunisiens au CT. C'est sans aucun doute la région où la nappe est plus vulnérable. Dans cette région se trouve les plus fortes densités de population, et c'est là aussi où la pression sur la ressource sera la plus forte. La simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 m sur l'Oued Righ et le Souf.

Le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal en termes de salinité.

La multiplication des forages qui s'est produite d'une manière anarchique (*Tableau 22 & 23*) génère l'accroissement rapide du débit disponible causant l'assèchement de certaines palmeraies, l'engorgement d'autres mal drainées (mort par asphyxie) et un dépôt excessif de sel. En 1997 le débit mobilisé a atteint 1290 000 l/mn pour un nombre de puits de 1297 (1284 CT + 13 CI) (*D.S. A, 1997 in Merrouchi, 2009*).

Tableau 22: Evolution des forages et des débits mobilisés (Merrouchi, 2009)

Années	Nombre de forage	Débits mobilisés en l /mn
1985	450	56767
1905	565	159000
1910	775	194000
1915	1030	256000
1930	1190	270000
1955	970	313000
1960	920	333480
1967	-	480960
1985	-	529980
1990	-	600000
1997	1297	1290000
2004	512	1196400

Chapitre 04 : Ressources en eaux, géométrie et gestion des aquifères

Les débits mobilisés pour les trois zones sont respectivement 46.2, 22.8 et 38.4 l/mn/ha pour le haut, moyen et bas Oued-Righ.

L'eau mobilisée dans la région entraîne un déficit estimé entre 19.24 et 28.45 l/mn/ha pour la zone du haut, entre 42.64 et 51.85 l/mn/ha pour la zone du moyen et entre 27.04 et 36.25 l/mn/ha pour la zone du bas (Fig.40) (Merrouchi, 2009).

Tableau 23: Nombre de forages et débits mobilisés par zone (ANRH 2007 in Merrouchi Lounnes, 2009)

	Complexe terminal (CT)		Continental intercalaire (CI)		Total des débits
	Nombre de forages	Débit en (l/mn)	Nombre de forages	Débit en (l/mn)	
Haut Oued Righ	331	506580	0	0	506580
Moyen Oued Righ	132	332580	6	43800	376380
Bas Oued Righ	39	173640	4	133800	307440
Total	502	1012800	10	177600	1190400

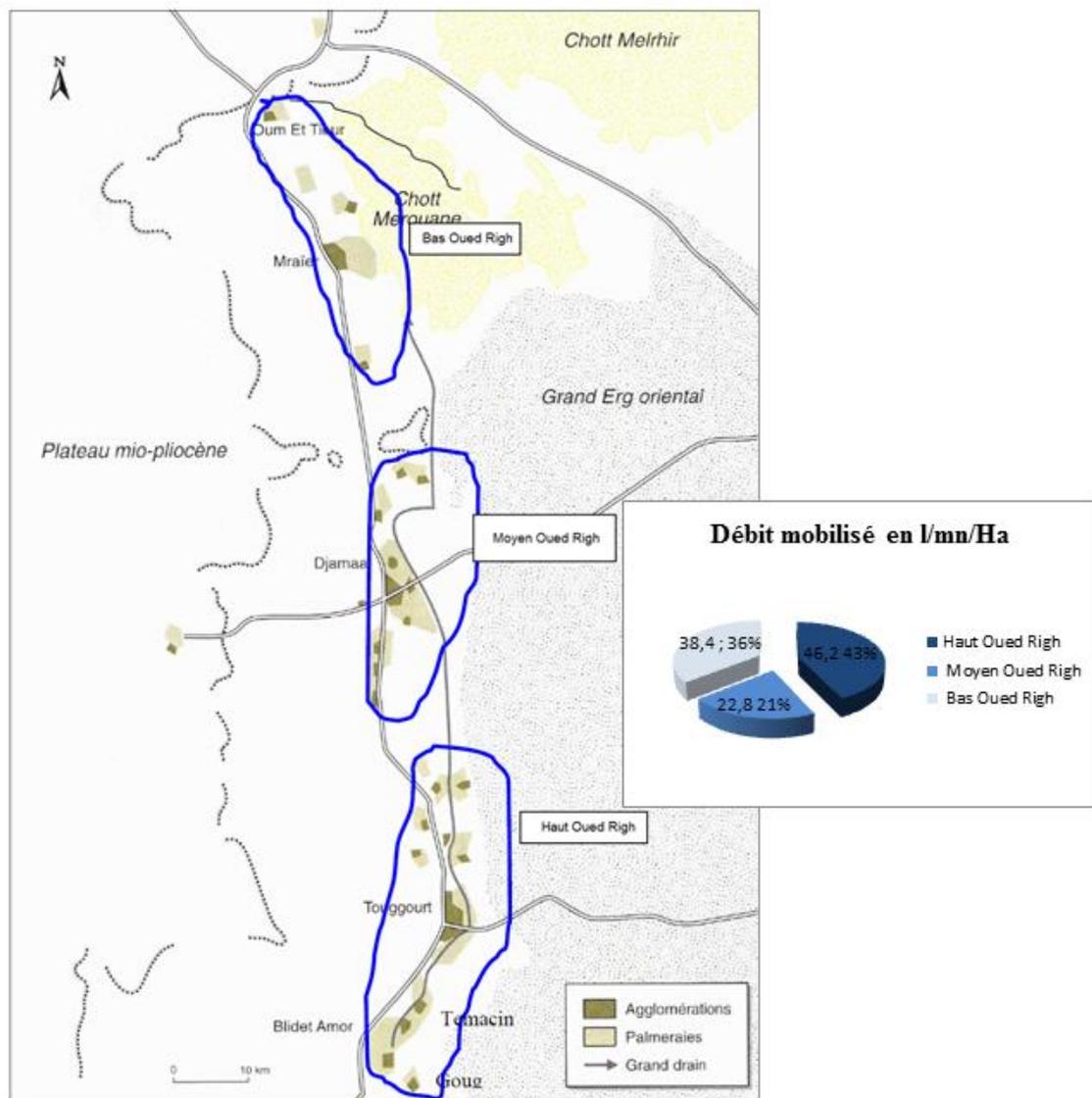


Figure 40: Carte des répartitions des débits mobilisés dans la vallée d'Oued Righ.

I.4.5. Drainage

D'une manière générale, le drainage est une nécessité pour la pérennité et le maintien d'équilibre pour la majorité des oasis sahariennes dont certaines souffrent actuellement d'une remontée catastrophique de la nappe superficielle.

La pratique de drainage pour évacuer l'excédent d'eau d'irrigation et arrêter la remontée du niveau de la nappe superficielle est actuellement opérationnelle dans les oasis de l'oued Righ par le canal principal creusé dans le lit de l'oued. Ce canal débute de la palmeraie d'El Goug située au Sud de Touggourt, et après un parcours d'environ 150 km, il se jette dans le grand chott Marouane après avoir collecté les eaux de drainage et d'assainissement. En 1953, **Capot-Rey** écrivait : «une partie de l'oued Righ est stérilisée, non par le manque d'eau mais par la stagnation des eaux usées» (*Boussaâda, 2007*)

Les canaux secondaires ont une longueur globale de 400 km, se jetant directement dans l'oued Righ, soit dans les chotts.

Pour surveiller les fluctuations des débits du canal, l'ANRH a pris en charge depuis 1993 l'étude hydrologique de ce canal ; des stations de jaugeage ont été implantées le long du canal collecteur depuis El GOUG jusqu'à BOUFEGGOUSSA, l'endroit de contact avec le chott MEROUANE (*Fig.41*).

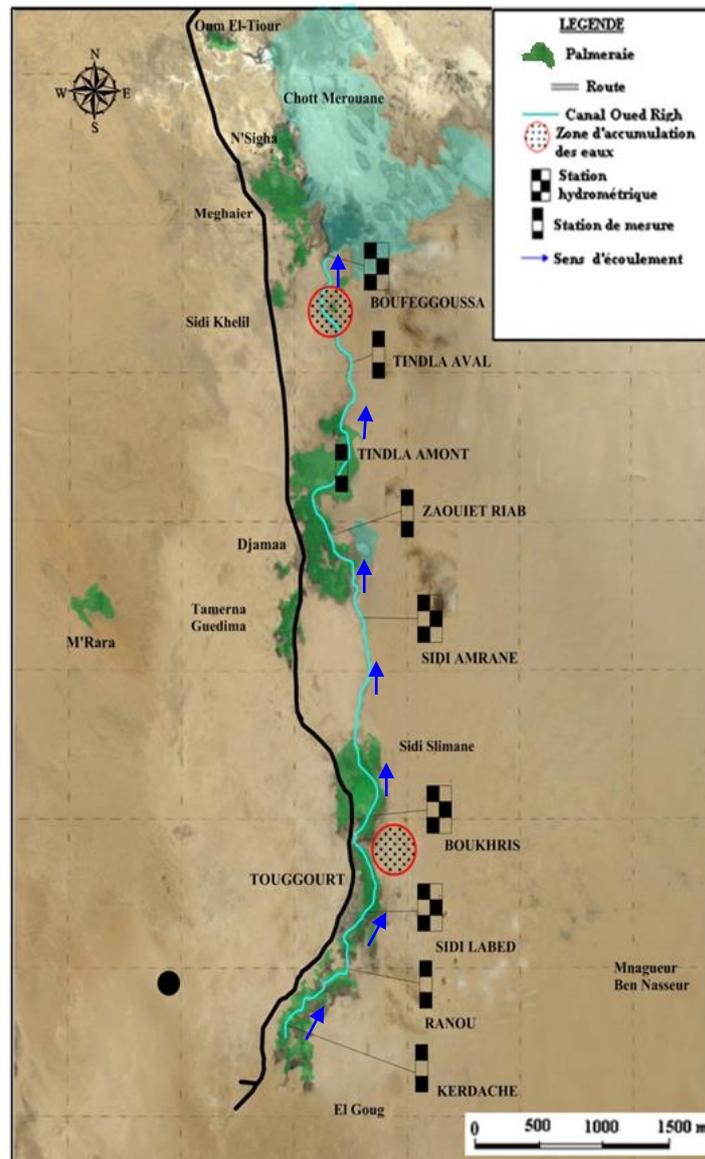


Figure 41: Situation des stations de jaugeage

Des campagnes de jaugeage « Q en (m^3/s) » de 1993 à 2012 a permis de mesurer les débits de l'oued. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant (Tableau 24).

Tableau 24: Variations des débits en fonction du temps dans les stations de jaugeage (ANRH 2012)

Stations Date	Ranou	Z, labidia	Sidi Slimane	Sidi AMRANE	Boufeggoussa
03-10-1993	0,47	1,843	1,758	1,832	2,783
07-02-1994	0,73	2,31	2,55	3,300	3,114
04-04-1995	0,94	1,80	2,26	2,184	2,514
02-12-1996	0,61	1,23	2,00	2,55	4,2
31-03-1998	0,53	1,53	1,98	1,980	-
04-05-1999	0,394	1,283	1,91	-	3,185
29-01-2001	0,813		2,45	2,915	5,075
17-05-2004	0,425		1,54	1,760	-
03-07-2005	0,262	-	-	1,350	1,625
01-03-2006	0,615	-	2,50	2,680	-
04-04-2007	0,950	-	2,060	-	4,260
28-01-2008	0,750	1,530	2,80	2,880	5,350
17-02-2009	0,460	1,920	2,240	1,648	4,380
12-02-2010	0,316	-	1,904	-	-
29-02-2012	0,825	2,160	3,300	1,950	-

Cette série de mesures nous permet de conclure que le canal n'obéit pas à une loi bien déterminée, vu qu'il est exposé à plusieurs facteurs en relation directe avec le régime d'écoulement (*Fig.I-42*).

Le niveau d'eau augmente considérablement lors de la période hivernale (période pluvieuse). La faible profondeur du canal ainsi que la faible pente qui est due à la topographie de la région étudiée ne favorisant guère l'écoulement ce qui aide à la formation de vastes lacs dans certaines zones de la vallée.

La mauvaise gestion du système de drainage (collecteur principal et canaux Secondaires) des palmeraies provoquait une mauvaise évacuation des eaux de drainage par l'Oued Righ vers l'aval et par conséquent la remontée de la nappe dans les palmeraies qui provoque ainsi l'accumulation des sels nuisibles en surface et la dégradation des berges du collecteur.

L'apparition de végétation dans les berges (*Photos.8*) provoque le changement de vitesse et oriente le sens d'écoulement vers la rive et ce qui entraîne la détérioration de cette dernière.

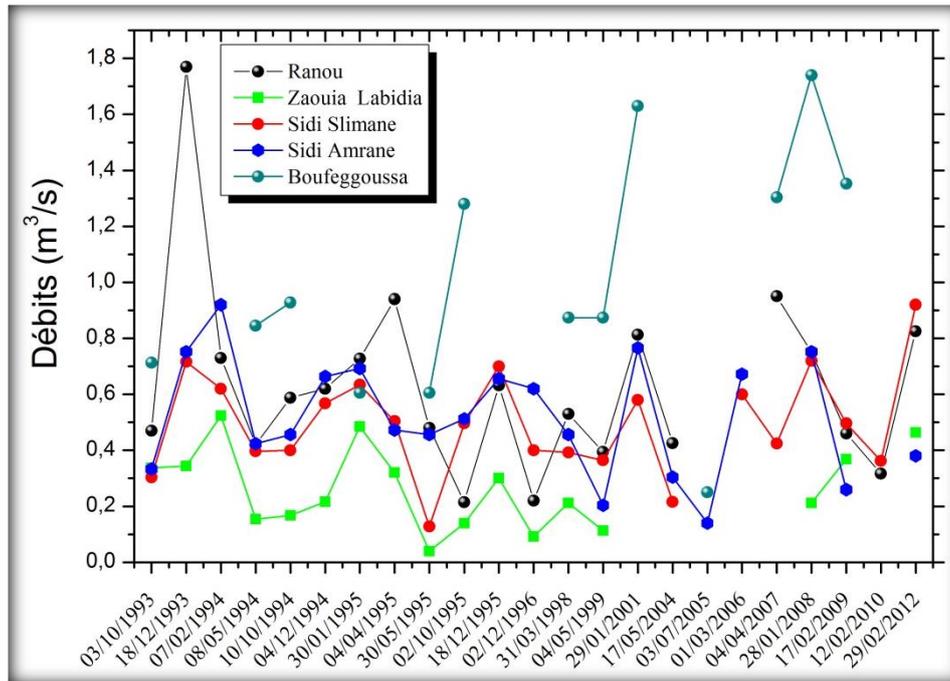


Figure 42: Variation des débits en fonction des stations de jaugeage (période 1993-2012)



Photo 8: Apparition de la végétation sur les berges du canal

Chapitre 05 :

QUALITE DES EAUX

I.5. Chapitre 05 : Qualité des eaux

Introduction

Dans ce chapitre nous étudions la qualité des eaux qui reste un élément important à savoir. Aujourd'hui les méthodes d'interprétations des résultats sont nombreuses et répondent à toutes les questions posées par l'opérateur. Dans un contexte particulièrement difficile la qualité des eaux risque de poser problème, les plus souvent évoqués sont ceux relatifs à des réseaux de distributions. Ce qui explique les méthodes choisies.

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la dissolution et la circulation des composés chimiques des roches ou des lieux lessivés.

Elle a pour objet l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques des eaux ainsi que la définition de leur qualité (importante pour l'utilisateur).

Pour étudier le faciès chimique et la qualité et des eaux superficielles, des échantillons d'eau sont prélevés le long du canal oued Righ à partir des stations de jaugeages. L'évolution s'est faite sur une observation de 04 années à savoir : une campagne en 2004, une au mois d'Aout 2006, une autre au mois de Juin 2007 et enfin au mois de Février 2012. Les analyses physico-chimiques des eaux de la vallée de l'oued Righ ont fait l'objet de mesures partielles, effectuées au laboratoire d'hydraulique à l'université d'Ouargla, au Centre de Recherche et de Développement (CRD) de Hassi Messaoud et au laboratoire de L'ANRH (OUARGLA).

Quant aux 'eaux souterraines, les analyses ont été faites au cours de l'année 2016 pour les eaux du Complexe Terminal et au cours de l'année 2010 pour le Continental Intercalaire.

Tous les échantillons sont prélevés en vue d'analyses chimiques des ions majeurs.

L'utilisation des données en hydrochimie repose parfois sur des outils assez compliqués et lourds d'emploi, mais dans de nombreux cas il est heureusement possible de visualiser simplement des caractéristiques importantes d'un échantillon d'eau ou même d'un groupe de solutions.

Le traitement des données, dans l'aperçu du chapitre a permis l'emploi de méthodes classiques et simples fréquemment utilisées telles que : diagrammes et graphiques.

I.5.1. Chimie des eaux superficielle (eau du canal)

I.5.1.1. Paramètres physiques : pH, résidu sec et conductivité

I.5.1.1.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH est important à connaître; car, connaissant les teneurs de CO₂ dissout, il permet indirectement l'évaluation de l'agressivité chimique des eaux.

A oued Righ, il est généralement supérieur à 7 (*Fig.43*).

Cette faible alcalinité des eaux s'explique par l'abondance du CO₂ dissout. Ces valeurs correspondent à des eaux fortement chlorurées sodiques ce qui est le cas de la majorité des eaux analysées pendant les différentes campagnes.

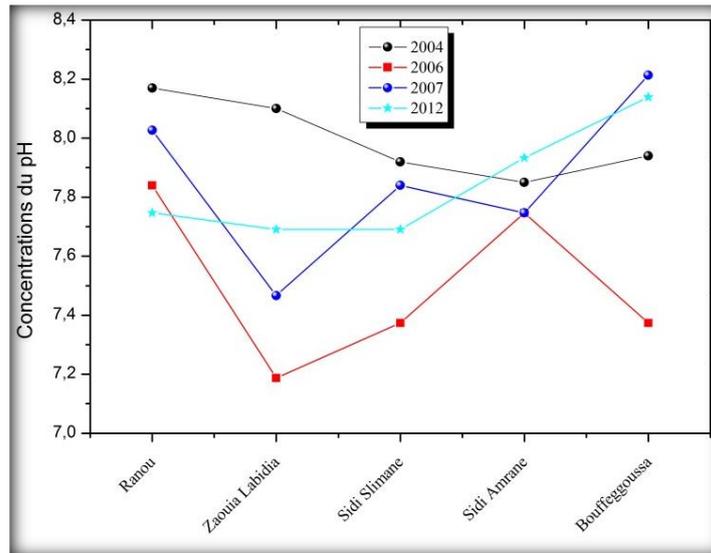


Figure 43: Variation du pH du canal Oued Righ

I.5.1.1.2. La minéralisation

Le résidu sec, exprimé en gramme par litre (**g/l**) ou milligramme par litre (**mg/l**), représente la minéralisation totale de l'eau, c'est-à-dire la totalité des sels dissous. Elle est en relation directe avec la conductivité électrique de la solution.

Dans le cas de la zone étudiée, les valeurs de la minéralisation se situent généralement entre 12.25 g/l en 2012 pour la station de Bouffeggoussa et 19.7 g/l en 2004 enregistré à la station de Ranou (Fig.44). Cependant, cette gamme de valeurs peut être localement dépassée, attribuée à l'effet de la lithologie (nature évaporitique) à la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Chevry et Robert, 1998), et surtout à l'inefficacité du réseau de drainage mal entretenu.

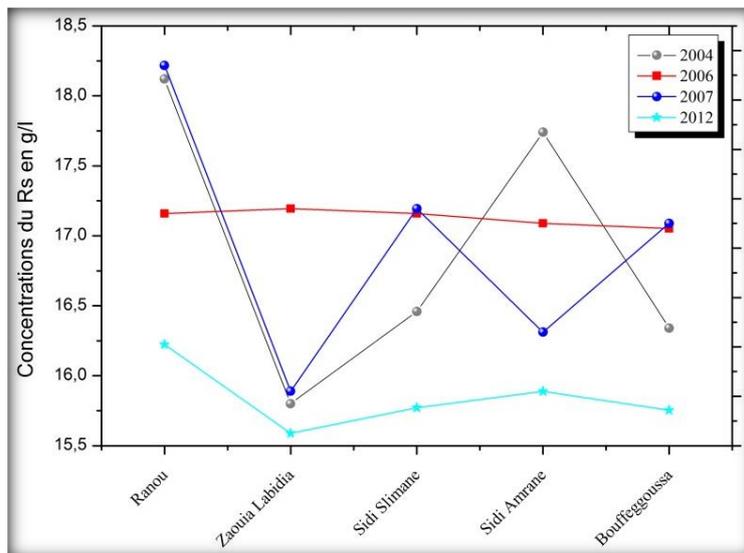


Figure 44: Variation de la salinité en g/l des eaux du canal.

I.5.1.1.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique est un moyen important d'investigation en hydrogéologie. Sa mesure est précise et rapide.

Elle est l'expression de la charge dissoute et rend compte de la minéralisation des eaux par la quantité d'ions en solution. Les valeurs disponibles présentent des variations assez importantes.

En effet, la forte conductivité électrique des eaux du canal (*Fig.45*) provenant des stations est essentiellement influencée par les chlorures et le sodium, ainsi qu'au phénomène d'évaporation.

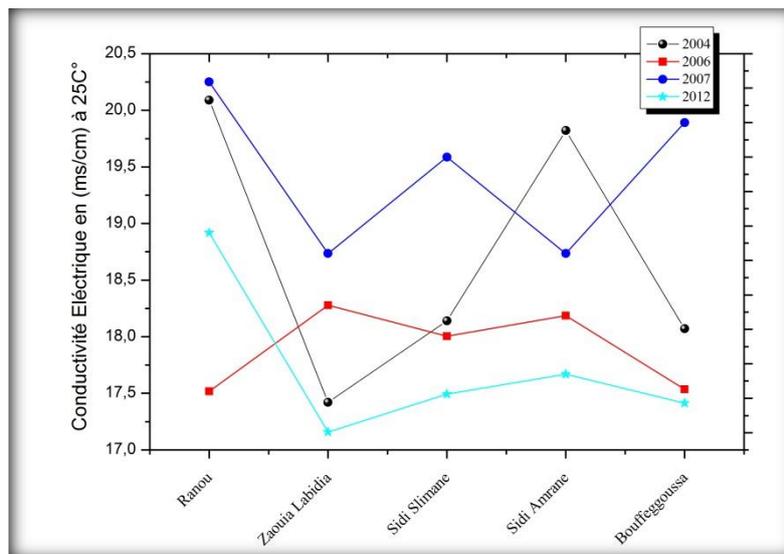


Figure 45: Variation de la conductivité électrique en (ms/cm.).

I.5.1.2. Paramètres chimique

I.5.1.2.1. Variation dans le temps et dans l'espace des cations

Les cations analysés sont le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium.

Sur le plan hydro chimique et d'une manière générale, Les eaux sont fortement minéralisées, très dures (*Fig.46 et Fig.47*). Le caractère dur de ces eaux est en partie dû à la contamination par les eaux d'irrigation et les eaux usées domestiques qui se jettent dans le canal. Par ailleurs, une autre cause probable de cette dureté élevée, serait due au lessivage des roches traversées par les eaux lors de leurs circulations dans les formations aquifères et du temps de séjour qui leur permet de s'enrichir en sels minéraux.

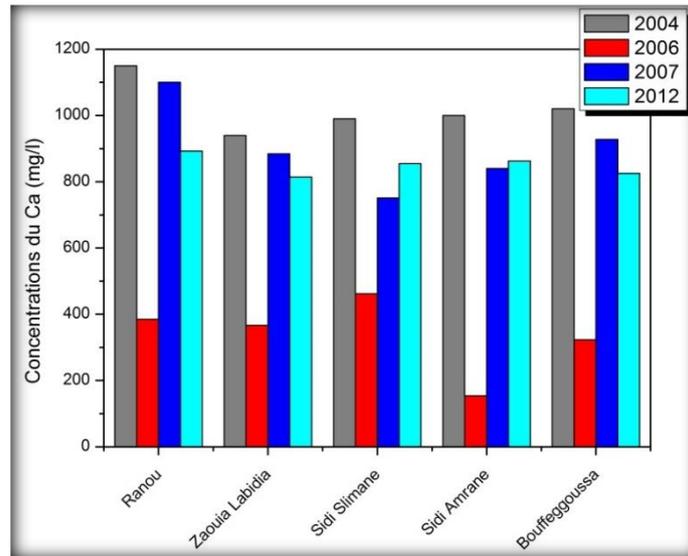


Figure 46: Variation spatio-temporelle du Calcium (Ca) en mg/l.

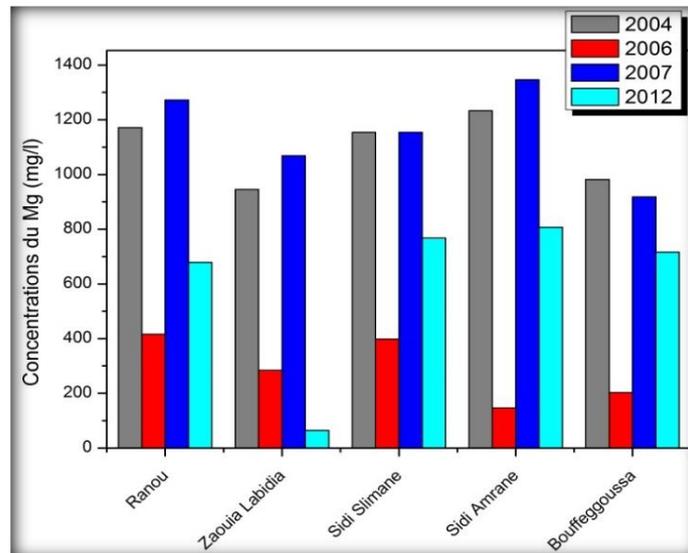


Figure 47: Variation spatio-temporelle du Magnésium (Mg) en mg/l.

Le sodium peut prévenir du lessivage des formations géologiques riches en Na Cl et surtout de l'évaporation. L'augmentation des valeurs (Fig.48) est due aux eaux chargées provenant de la dissolution des sels de la croûte superficielle, par les eaux d'irrigations et les rejets des eaux usées.

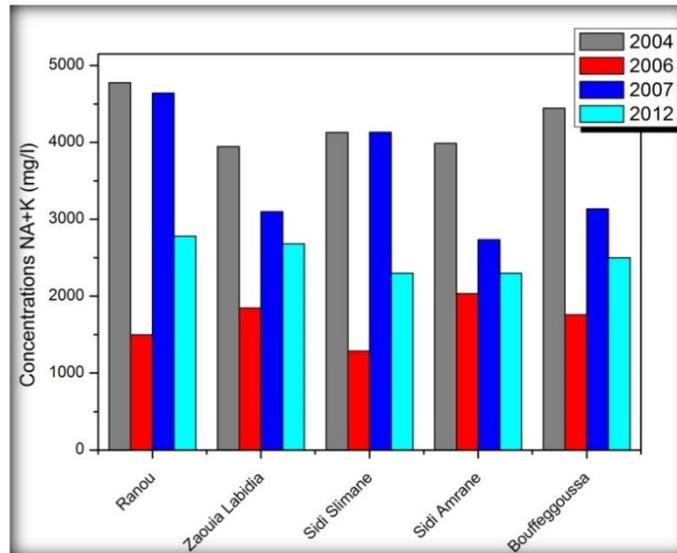


Figure 48: Variation spatio-temporelle du Sodium et Potassium (Na+K) en mg/l.

I.5.1.2.2. Variation dans l'espace et dans le temps des anions

Les anions analysés sont les chlorures, les sulfates et les bicarbonates.

Les résultats des analyses (Fig.49 et Fig.50), ont permis de noter des valeurs élevées en chlorures et en sulfates dans le temps et dans l'espace. Ces éléments peuvent provenir de :

La solubilité des formations gypseuses ou au lessivage des niveaux argileux et marneux ;

- Rejets d'eaux usées et des eaux de drainage.
- L'évapotranspiration intense dans les régions.

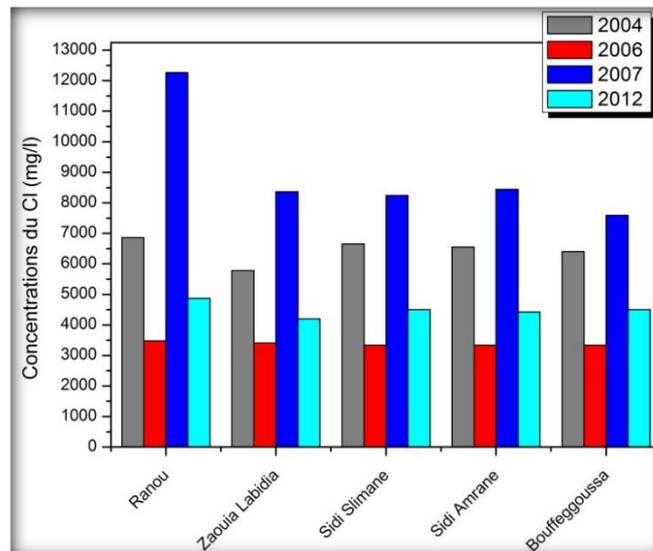


Figure 49: Variation spatio-temporelle des Chlorures (Cl) en mg/l.

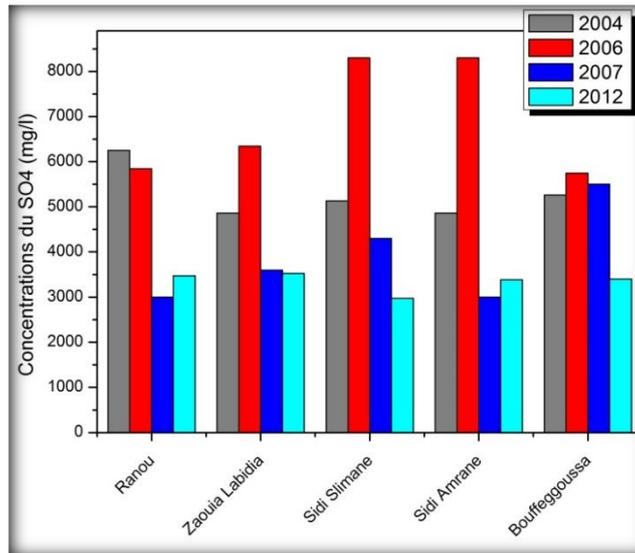
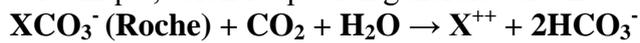


Figure 50: Variation spatio-temporelle des Sulfates (SO4) en mg/l.

Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physicochimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale suivante :



Les bicarbonates (Fig.51) proviennent de la dissolution des roches carbonatées en fonction de la tension en CO₂, de la température, le pH de l'eau et la nature lithologique des terrains traversés.

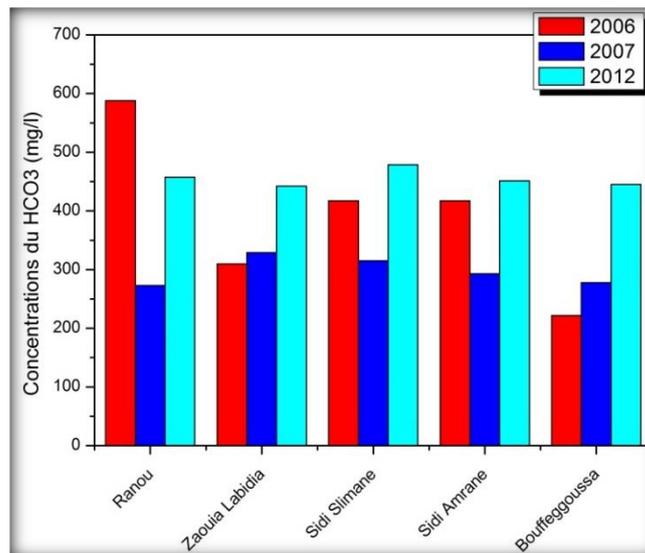


Figure 51: Variation spatio-temporelle des Bicarbonates (HCO3) en (mg/l).

I.5.1.3. Classification des eaux

Plusieurs méthodes de classification des eaux naturelles ont été définies par divers auteurs, on s'intéressera ici uniquement aux plus utilisées, pour déterminer le faciès chimique des eaux.

Chapitre 05 : Qualité des eaux

I.5.1.3.1. Classification de Stabler (formule caractéristique)

La détermination des faciès chimique de l'eau, est déduite par la formule ionique, qui est obtenue en classant de gauche à droite, par ordre décroissant les quantités en réaction des groupes des anions, puis des groupes des cations (*Tableau 25*).

Tableau 25: Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du canal.

Stations	2004		2006		2007		2012	
	Formule ionique	Faciés chimique	Formule ionique	Faciés chimique	Formule ionique	Faciés chimique	Formule ionique	Faciés chimique
Ranou	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté Sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique
Zaouia Labidia	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté Sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique
Sidi Slimane	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté Sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique
Sidi Amrane	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté Sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Mg}^{2+} > r \text{Ca}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique
Bouffeggoussa	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-}, r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{SO}_4^{2-} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Sulfaté Sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique	$r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{2-} > r \text{HCO}_3^-$, $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r \text{Ca}^{2+} > r \text{Mg}^{2+}$	Chloruré sodique

Toutes les eaux présentent un faciès chloruré sodique sauf pour les eaux de l'année 2006 le faciés est sulfaté sodique due à la très forte évaporation (prise de la compagnie au mois d'Aout)

I.5.1.3.2. Classification de Piper

Le diagramme de piper permet de visualiser sur le triangle des anions et des cations les échantillons analysés et de définir non seulement leur faciés grâce aux éléments majeurs, mais de suivre également leur évolution dans le temps (*Fig.52*).

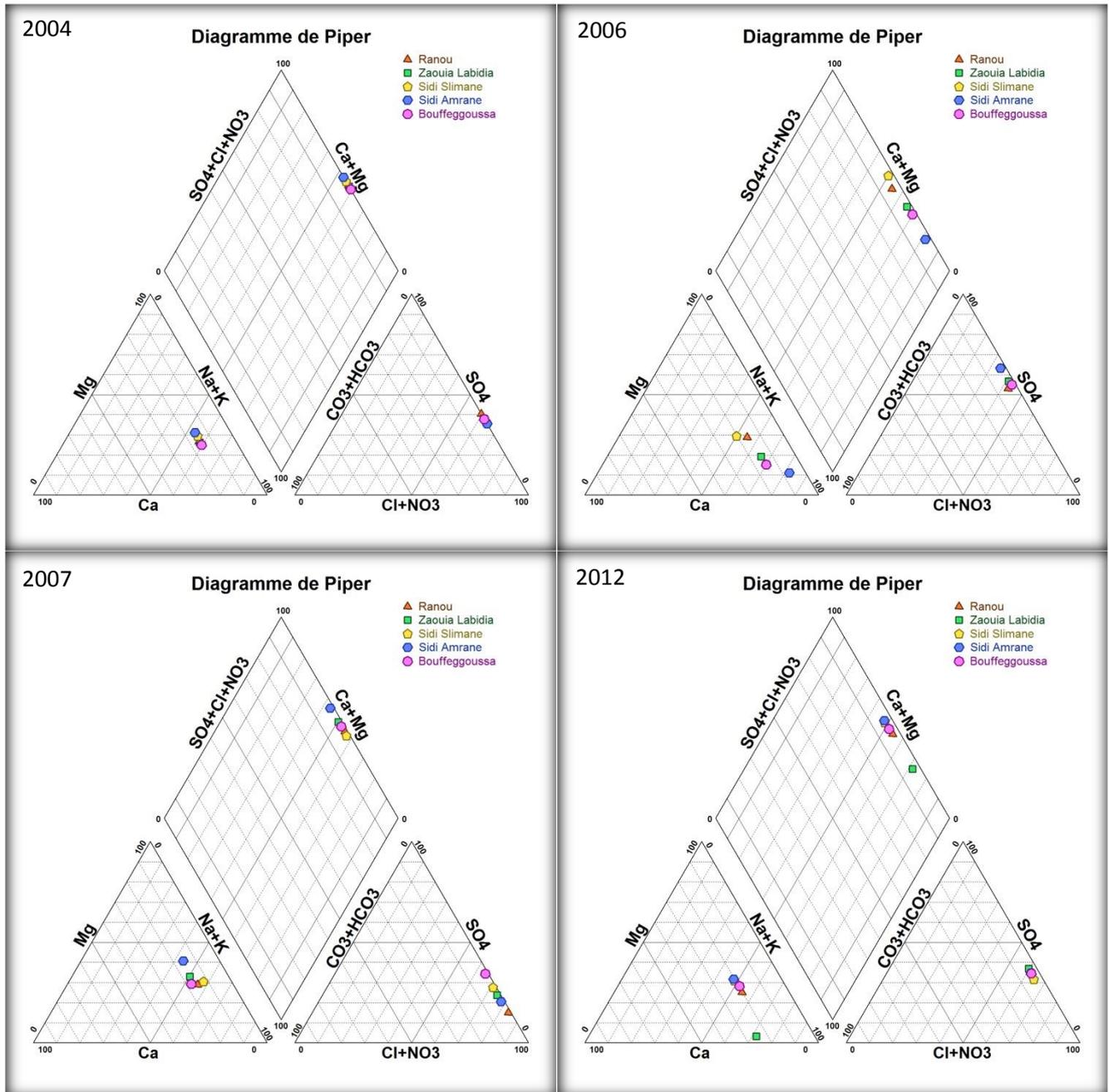


Figure 52: Diagrammes losangiques de Piper des eaux du canal Oued Righ (2004 - 2006 - 2007-2012)

L'examen des représentations graphiques obtenues, permet de déduire les interprétations suivantes :

- Dans le triangle des cations, le sodium est l'élément dominant par rapport au calcium et magnésium, pratiquement pour toutes les compagnes.
- Dans le triangle des anions, ce sont les chlorures et les sulfates qui sont les plus abondants, les bicarbonates sont peu fréquents.

Ainsi, comme pour la formule ionique, les diagrammes de Piper montrent que les échantillons coïncident sur les pôles caractérisant les faciès Chloruré sodique et Sulfaté sodique.

I.5.1.4. Diagramme de Richards

Les analyses chimiques ont révélées des fortes teneurs en chlorure de sodium où la destination des eaux à l'irrigation peut rencontrer le risque de salinité évidemment en climat hyper aride. A ceci s'ajoute la forte conductivité électrique (CE) des eaux de l'Oued Righ.

Un autre risque majeur est celui de l'alcalinisation des sols par suite d'échanges ioniques, concernant surtout le sodium, le calcium et le magnésium, entre l'eau et les argiles du sol. De fortes teneurs en sodium modifient la structure des sols et leur perméabilité. Ainsi, le développement des plantes est très faibles ou nul dans les sols saturé en sodium.

C'est pour cette raison que Richards à établi en 1956 un diagramme qui repose sur le croisement de deux critères :

- ❖ le premier est la conductivité électrique (CE) Ce critère vise à quantifier la charge en sel de la solution et par voie de conséquence le risque de salinisation. Les eaux sont classées de C1 à C5 selon le risque croissant de salinisation.
- ❖ le second est le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau ou bien le taux de sodium échangeable induit par l'eau dans le sol. Ce second critère permet d'évaluer le risque de sodisation du sol par l'eau d'irrigation. Les eaux sont classées de S1 à S4 selon le risque croissant de sodisation.

Le **S.A.R** est calculé à partir de la formule suivante.

$$S.A.R = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{rCa^{++} + rMg^{++}}{2}}}$$

D'après les diagrammes de RIVERSIDE de la classification des eaux d'irrigation (*Fig.53*), les eaux de la région sont situées dans la classe **C₃S₄**, ce qui explique que les eaux sont extrêmement chargées en sel et fortement sodique. La statistique des données des eaux superficielles montre une qualité très mauvaise pour l'irrigation.

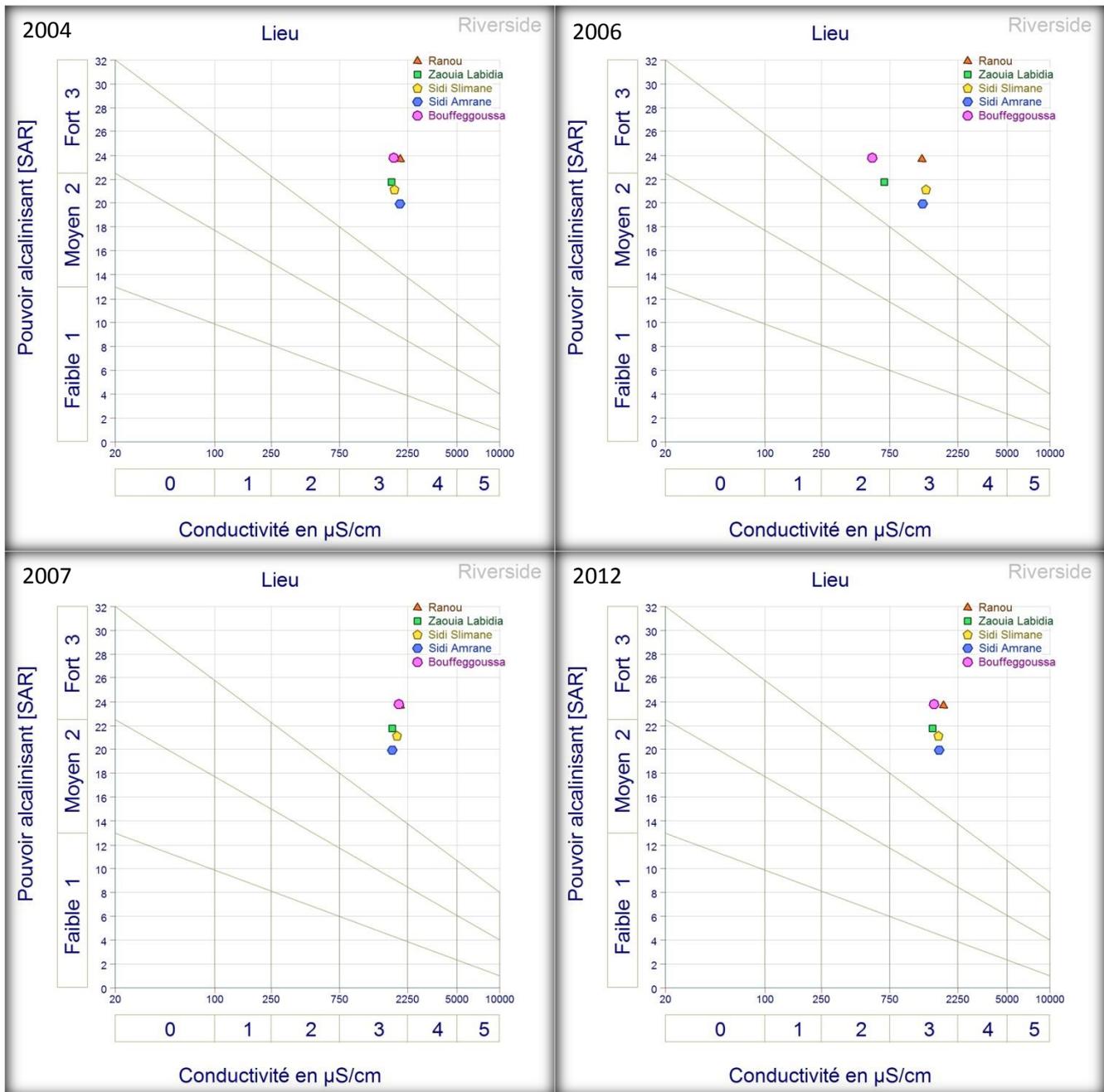


Figure 53: Diagrammes de RIVERSIDE des du canal (2004 - 2006 - 2007- 2012)

I.5.2. Chimie des eaux souterraines

I.5.2.1. Eau du Complexe Terminal (CT)

I.5.2.1.1. Paramètres physiques

Le pH, la conductivité électrique et la salinité, sont des paramètres instables mesurés directement sur le terrain.

I.5.2.1.1.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH représente une action dans la détermination de l'agressivité de l'eau vis à vis des métaux.

Le Complexe Terminal présente un pH alcalin, il dépasse largement la barre neutre (Fig.54).

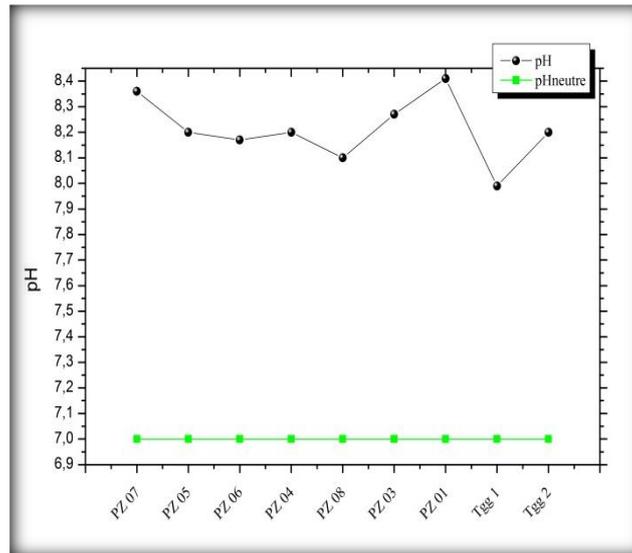


Figure 54: Variation du pH du Complexe Terminal.

I.5.2.1.1.2. Le résidu sec (Rs)

Les concentrations présentées sur la figure ci-dessous (Fig.55) révèlent un résidu sec trop élevé atteignant parfois les 8 g /l.

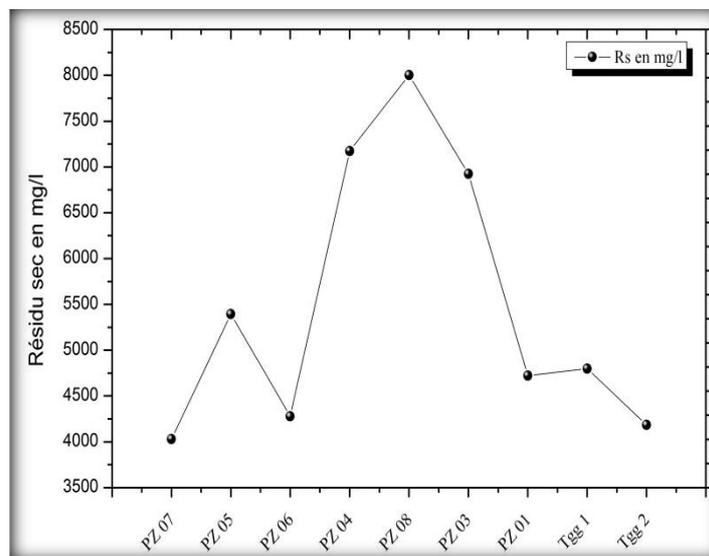


Figure 55: Variation de la salinité en mg/l des eaux du Complexe Terminal.

I.5.2.1.1.3. La Conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité est l'expression de la charge dissoute et permet d'évaluer la minéralisation des eaux par la quantité d'ions en solution. Les valeurs disponibles présentent des variations assez importantes qui oscillent entre 3.81 et 7.51 ms/cm (Fig.56).

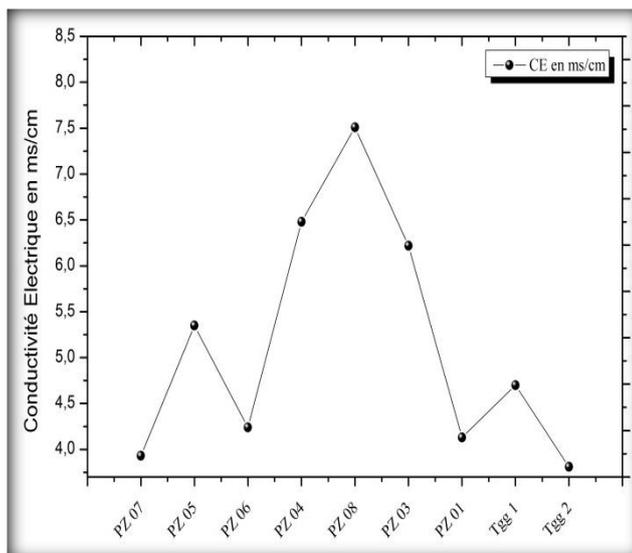


Figure 56: Variation spatiale de la conductivité électrique en (ms/cm.).

I.5.2.1.2. Paramètres chimiques

I.5.2.1.2.1. Les cations

I.5.2.1.2.1.1. Le Calcium (Ca^{2+})

Il provient soit de la dissolution des formations carbonatées CaCO_3 , soit à la dissolution des gypses $\text{CaSO}_4 (\text{H}_2\text{O})_2$. La dissolution qui s'en suit est favorisée par le gaz carbonique provenant de l'atmosphère et du sol.

Les valeurs de la concentration du calcium (Fig.57) montrent que les teneurs varient entre 308,8 et 440 mg/l. ces valeurs sont extrêmement élevées et dépassent largement la norme algérienne fixée à 200 mg/l.

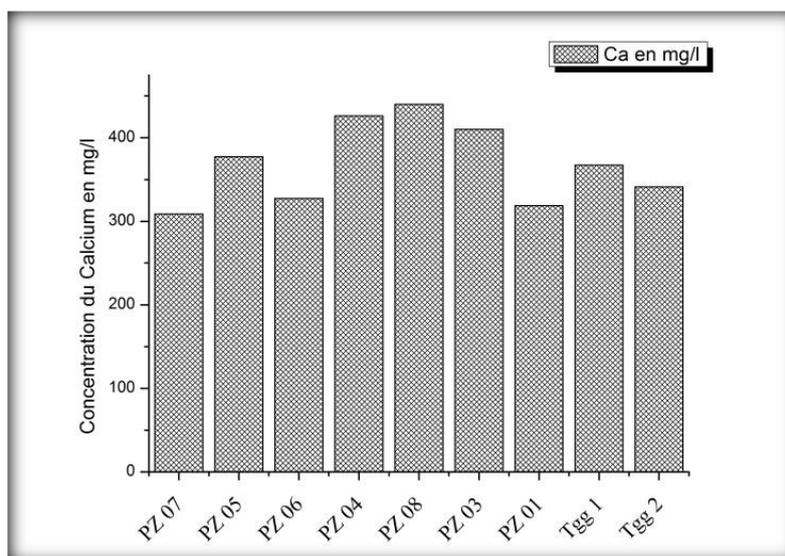


Figure 57: Variation spatio-temporelle du Calcium (Ca) en (mg/l).

I.5.2.1.2.1.2. Le Magnésium (Mg^{2+})

Second élément intervenant dans la dureté totale des eaux, Ces ions proviennent de la dissolution des roches magnésiennes du gypse et des minéraux ferromagnésiens et surtout de

la mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques. Les résultats trouvés enregistrent des valeurs comprises entre 148.5 mg/l (la seule valeur en dessous de la norme) et 389.1 mg/l dépassant la norme fixée à 150 mg/l (Fig.58).

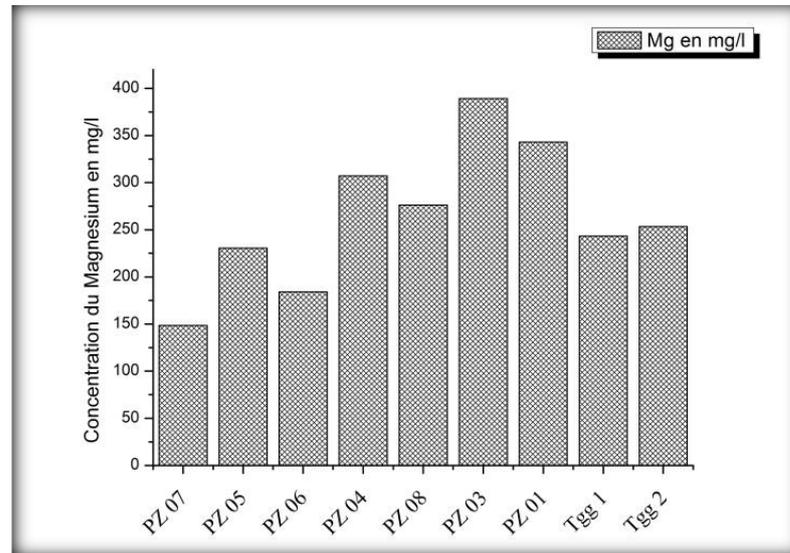


Figure 58: Variation spatio-temporelle du Magnésium (Mg) en (mg/l).

I.5.2.1.2.1.3. Le sodium et le potassium (Na⁺, K⁺)

Sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportion variable. Le sodium peut prévenir du lessivage des formations géologiques riches en Na Cl.

Les concentrations enregistrées (Fig.59) montrent que les teneurs du Na⁺ sont très élevées et dépassent largement la norme qui est de l'ordre 200 mg/l.

Une valeur maximale de 1177.5 mg/l est observée dans le forage PZ08 dans la région de Tindla. L'augmentation de ces valeurs est due aux eaux chargées provenant de la dissolution des sels de la croûte superficielle par les eaux d'irrigations, et les rejets des eaux usées.

Le potassium est beaucoup moins abondant que le sodium, rarement présent dans l'eau (Fig.60).

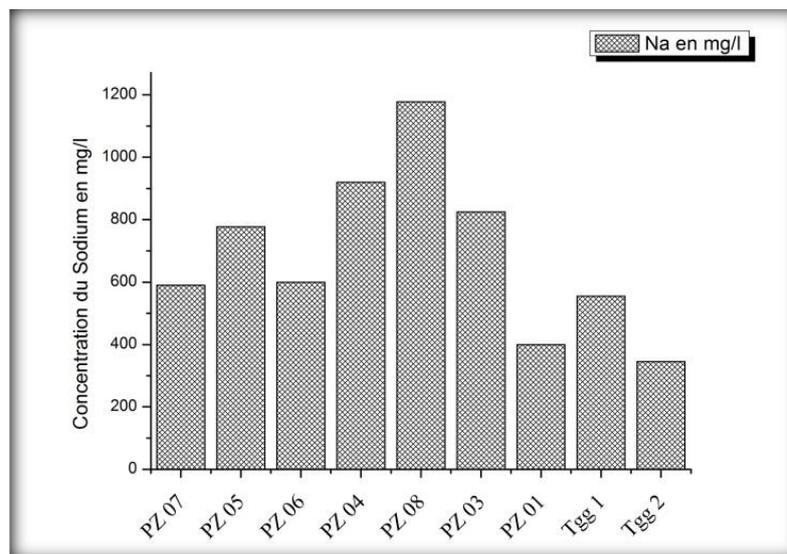


Figure 59: Variation spatio-temporelle du Sodium(Na) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).

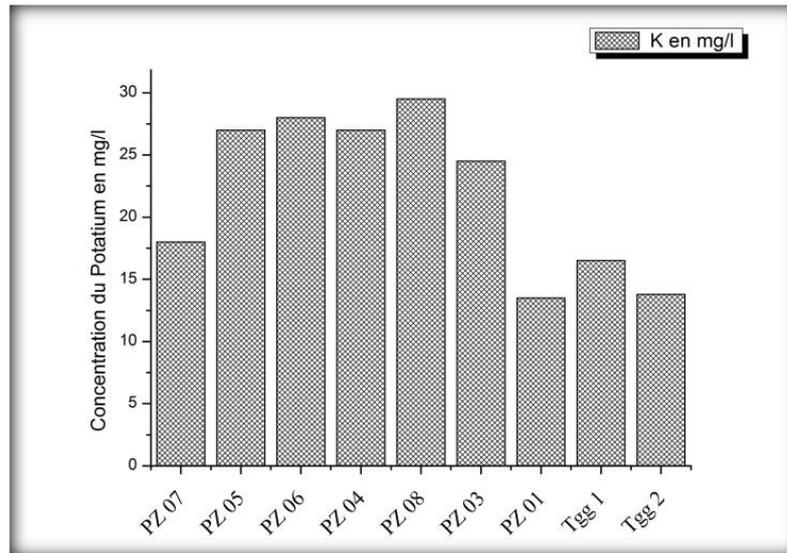


Figure 60: Variation spatio-temporelle du Potassium (K) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).

I.5.2.1.2.2. Les anions

I.5.2.1.2.2.1. Les chlorures Cl⁻

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportions très variables, leur présence dans l'eau résulte de la dissolution des sels naturels par le lessivage de terrains gypseux, marneux ou argileux.

Les valeurs de la concentration du chlore (Fig.61) sont trop élevées par rapport à la norme fixée à 500 mg/l dont un maximum est de l'ordre de 2313 mg/l.

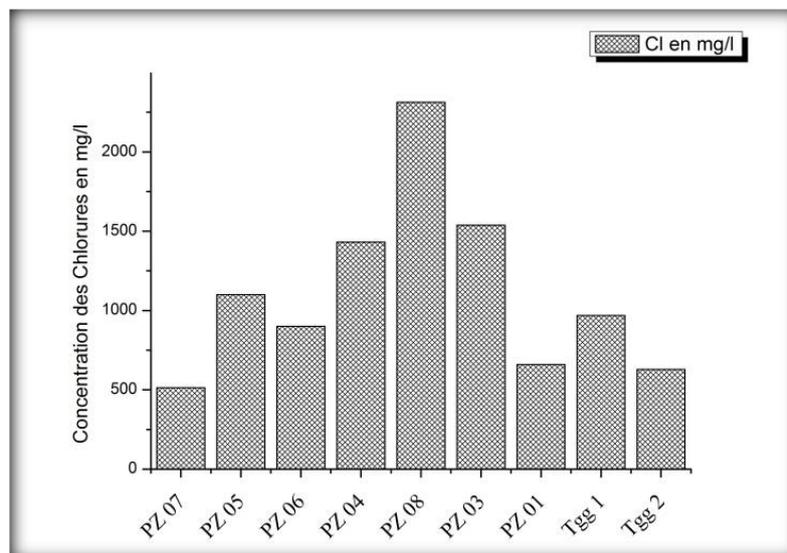


Figure 61: Variation spatio-temporelle des Chlorures (Cl) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).

I.5.2.1.2.2.2. Les sulfates (SO₄³⁻)

Ils proviennent essentiellement de la dissolution des formations gypseuses ainsi que l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en pesticides.

Les résultats des analyses chimiques (Fig.62), donnent des valeurs des sulfates variant entre 1450 mg/l et 2275mg/l. ces valeur dépassent largement la norme qui est 400 mg/ l.

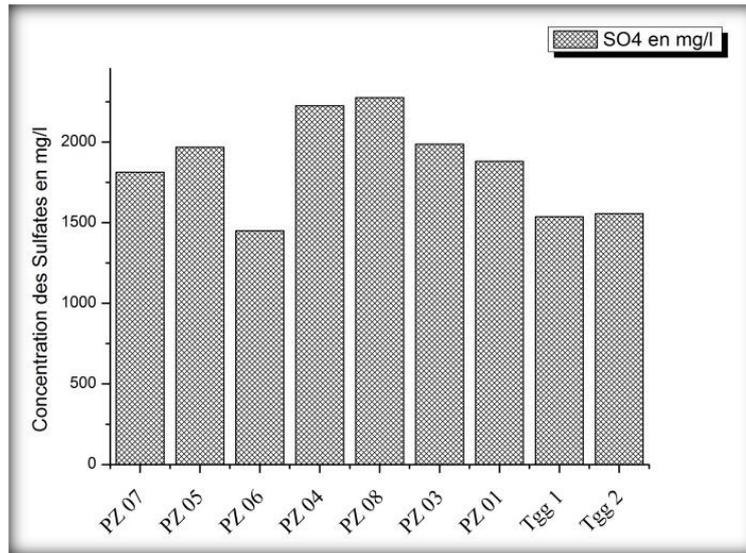


Figure 62: Variation spatio-temporelle des Sulfates (SO₄) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).

I.5.2.1.2.2.3. Les bicarbonates HCO₃⁻

La concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivants :

- ✓ Température de l'eau,
- ✓ Tension du CO₂ dissous,
- ✓ Concentration de l'eau en sels et nature lithologique des terrains traversés.

Les concentrations des bicarbonates ((Fig.63) montrent des valeurs variant entre 164.7 et 201.3 mg/l.

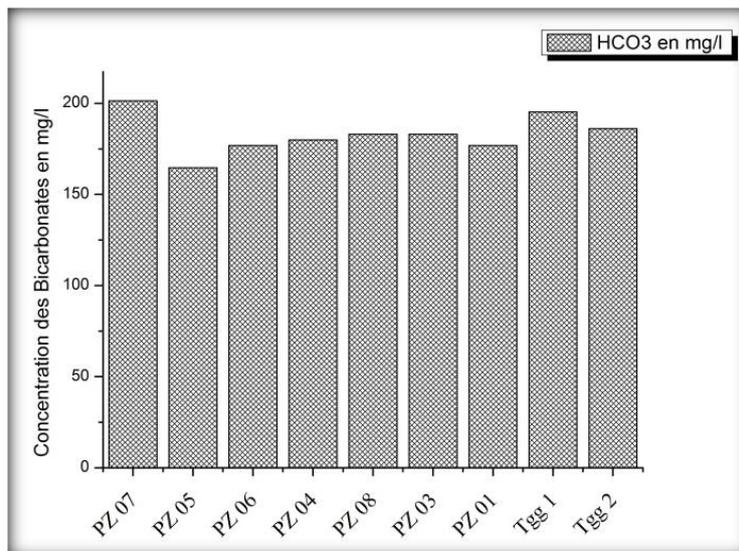


Figure 63: Variation de la concentration des Bicarbonates (HCO₃) en (mg/l) des eaux de la nappe du Complexe Terminal (2016).

I.5.2.1.3. Classification de Piper

D'après les analyses chimiques reportées sur le diagramme de PIPER (Fig.64), on observe une dominance d'un pôle cationique sodique, les anions se distinguent par une famille assez riche en sulfate donnant par la suite un faciès Sulfaté sodique.

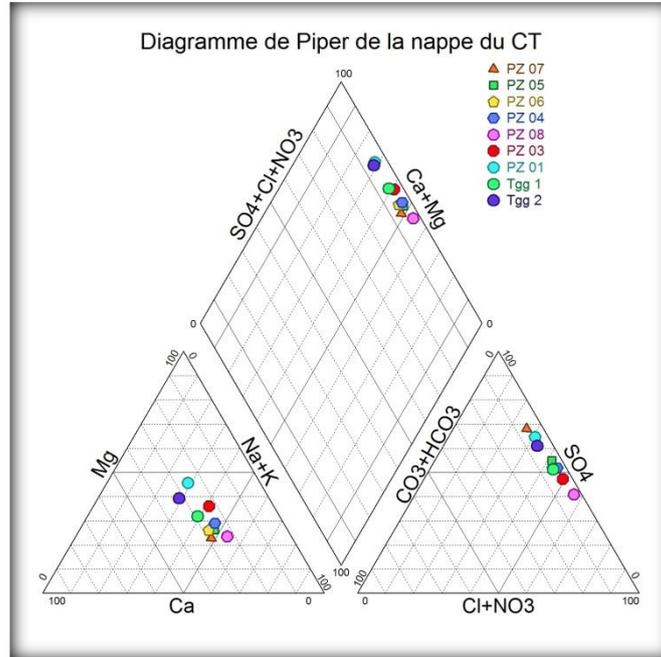


Figure 64: Diagramme de PIPER des eaux du Complexe Terminal (2016)

I.5.2.1.4. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'aptitude des eaux à l'irrigation est liée à son effet sur les sols et les cultures et les êtres humains, cela se fait par la nature des sels dissous dans les eaux destinées à l'irrigation.

Ces sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et sur son aération), affectant directement le développement de la plante.

A partir des analyses placées sur le diagramme de Richarades (Fig.65), on obtient deux classes C2 S1 et C2 S2, ce qui indique que l'eau du CT est de bonne qualité et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation pour des plantes moyennement tolérantes au sel et sur sols ayant une bonne perméabilité.

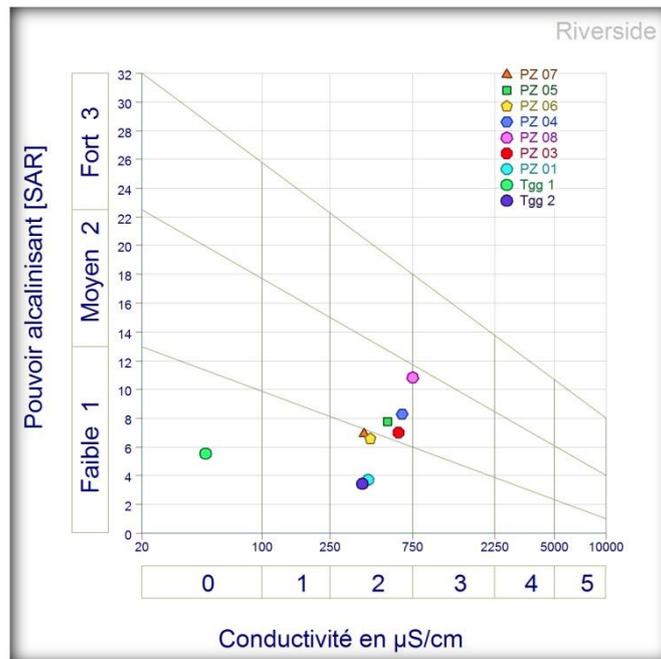


Figure 65: Diagramme de RIVERSIDE des eaux du Complexe Terminal (2016)

I.5.2.2. Eau du Continental Intercalaire (CI)

I.5.2.2.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques des eaux du CI concernent essentiellement le pH, le résidu sec et la conductivité.

L'intervalle du pH des eaux du CI varie entre 6.9 (forage Meggarine) et 7.69 (forage Sidi Silmane) (Fig.66).

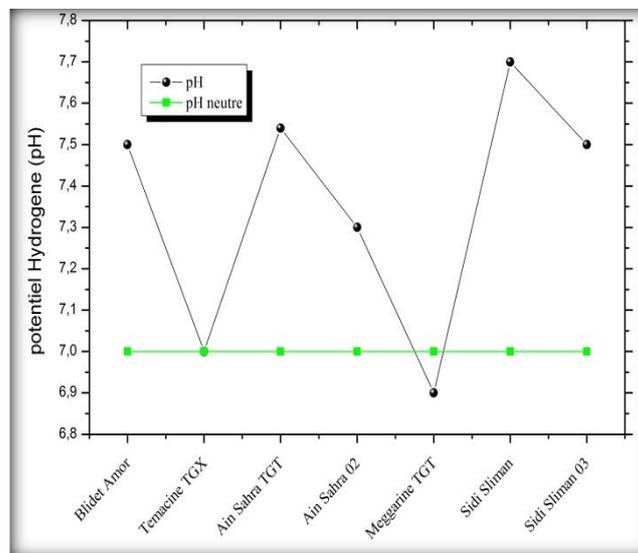


Figure 66: Variation du pH

En ce qui concerne la conductivité électrique les valeurs disponibles présentent des variations assez importantes qui oscillent entre 2240 et 2620 $\mu\text{S/cm}$ (Fig.67).

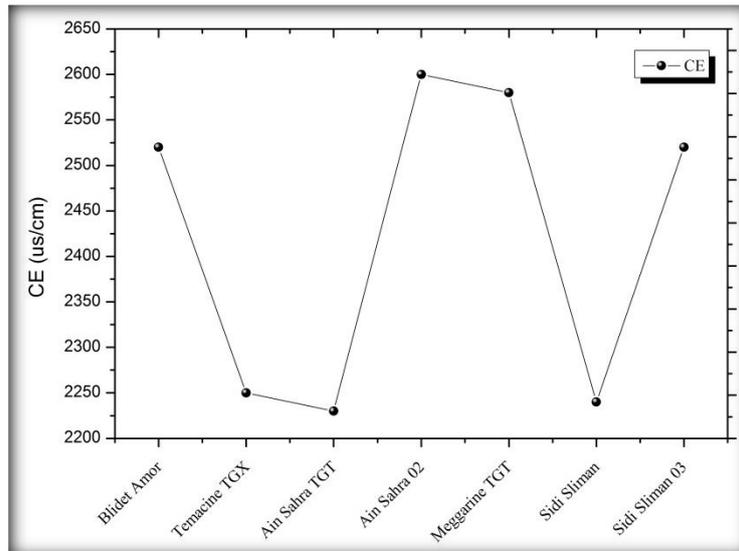


Figure 67: Variation de la conductivité électrique

Il est à signaler que la salinité des eaux du Continental Intercalaire de la région d'Oued Righ présente des concentrations enregistrées peuvent atteindre les 1,4 g/l. La valeur maximale de salinité est enregistrée au niveau du forage de Ain Sahra 02, tandis le minimum est au forage de Sidi Silmane (Fig.68).

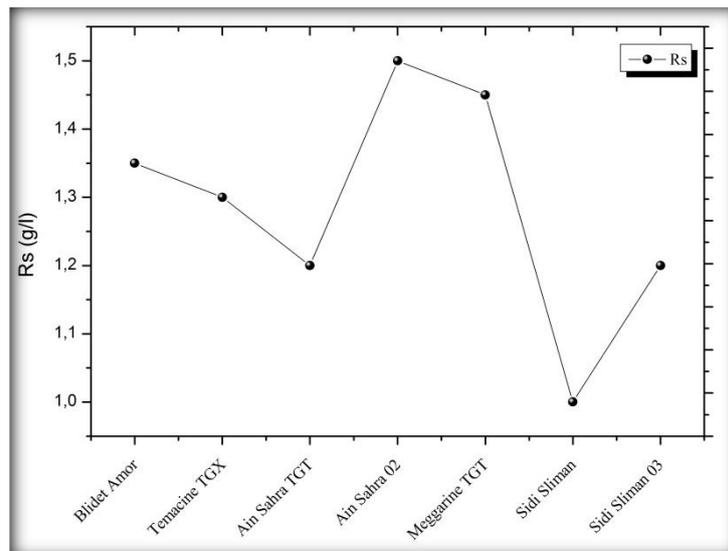


Figure 68: Variation de la salinité en g/l

I.5.2.2.2. Paramètres chimique

I.5.2.2.2.1. Variation des cations

Sur le plan hydro chimique, Les eaux sont très faiblement minéralisées. Les histogrammes ci-dessous montre que : le sodium et le calcium sont les cations dominants (Fig.69).

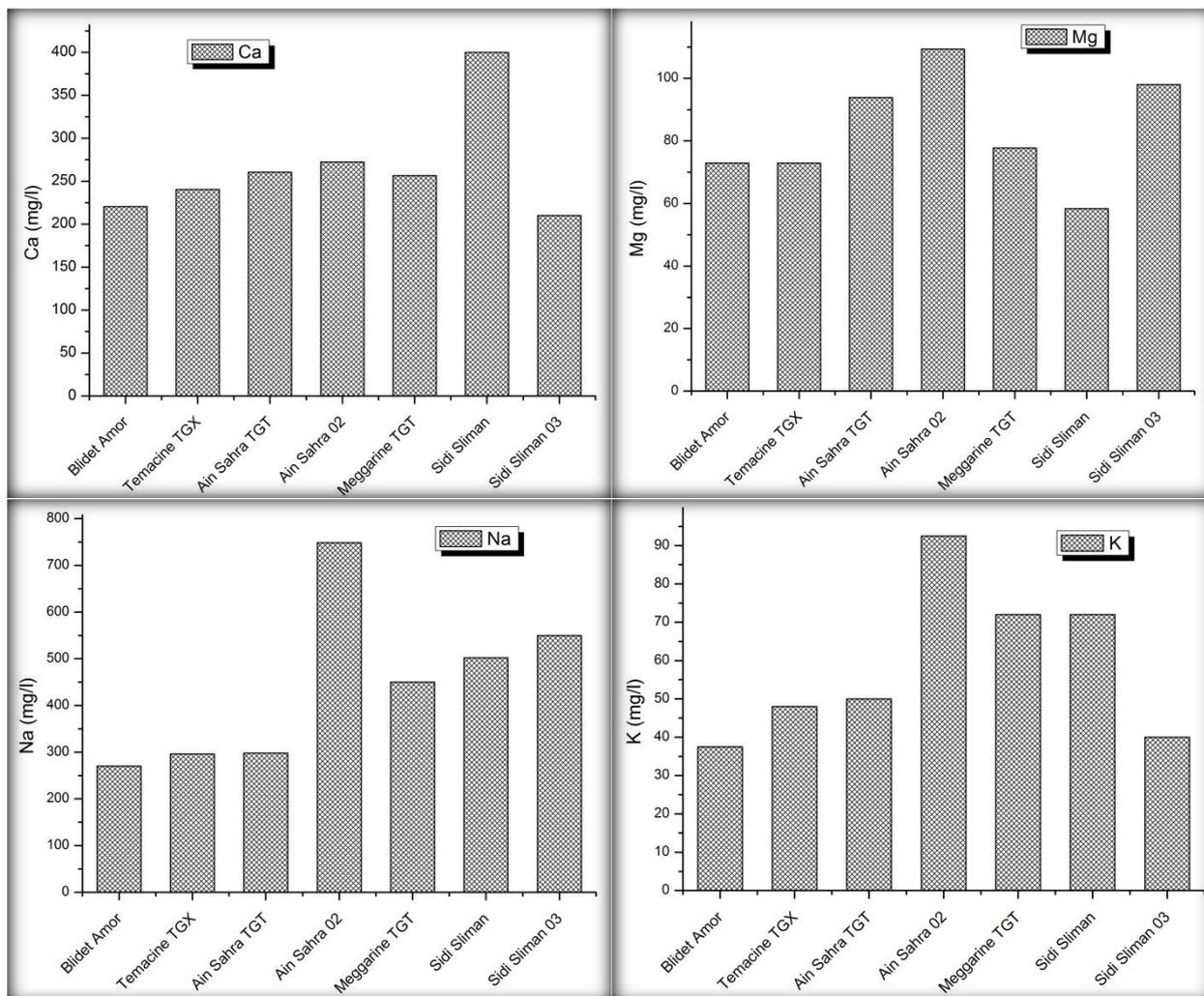


Figure 69: Variation de la concentration des cations en (mg/l) des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (2010).

Apparemment les eaux de Ain Sahra 02 doivent leur conductivité au Sodium (Na), Potassium(K) et Magnésium (Mg).

I.5.2.2.2. Variation des anions

Les eaux présentent des valeurs de sulfates très élevées ; Les maxima peuvent atteindre les 1950 mg/l (Forage de Sidi Slimane) et un minimum de 640 mg/l (Forage de Meggarine TGT) (Fig.70).

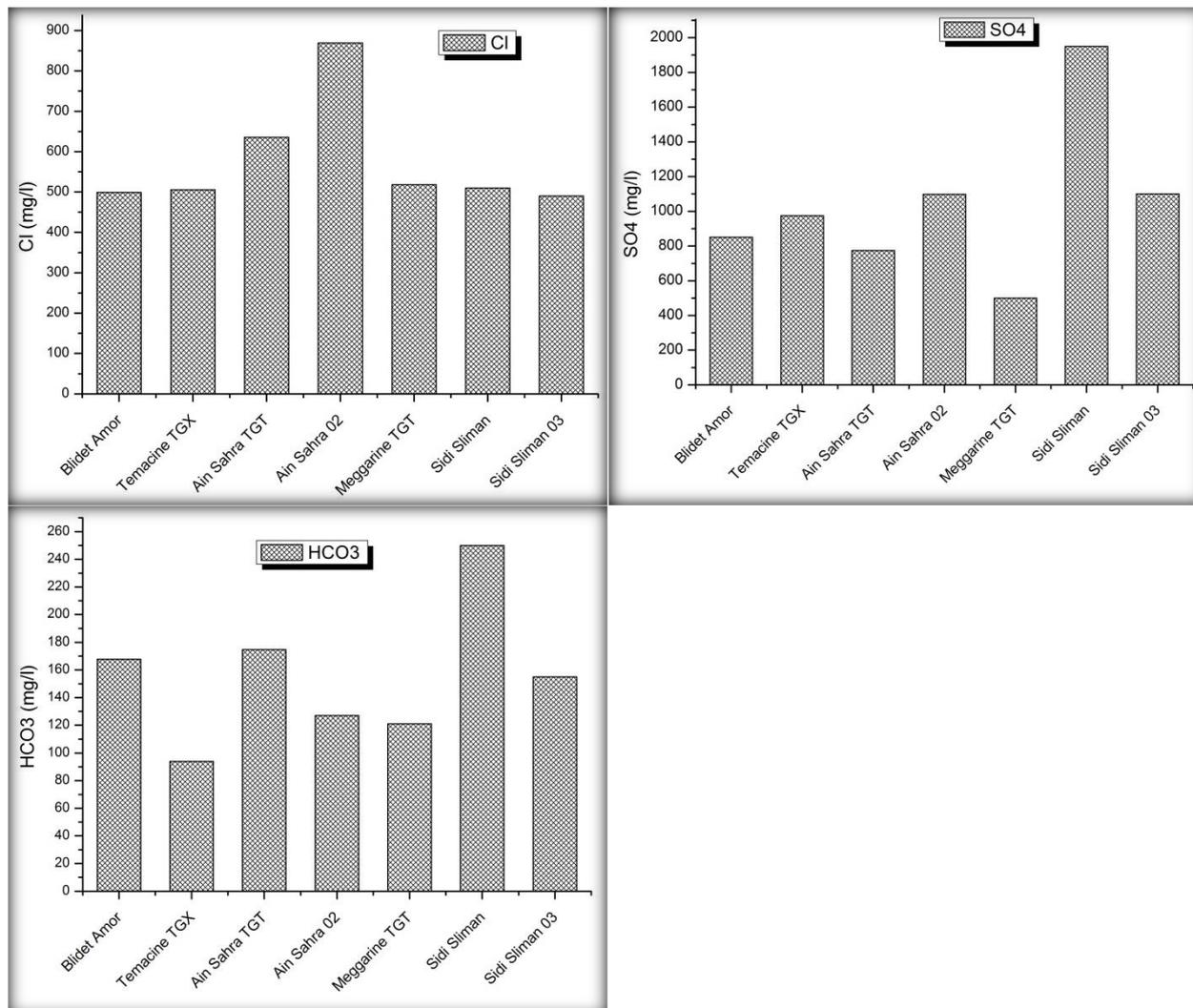


Figure 70: Variation de la concentration des anions en (mg/l) des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (2010).

I.5.2.2.3. Classification de Piper

D'après les analyses chimiques reportées sur le diagramme de PIPER, on observe une dominance d'un pôle anionique sulfaté et d'un pôle cationique sodique (*Fig.71*), donnant par la suite un faciès Sulfaté sodique pour la majorité des forages sauf le forage Meggarine TGT montre un faciès Chloruré sodique.

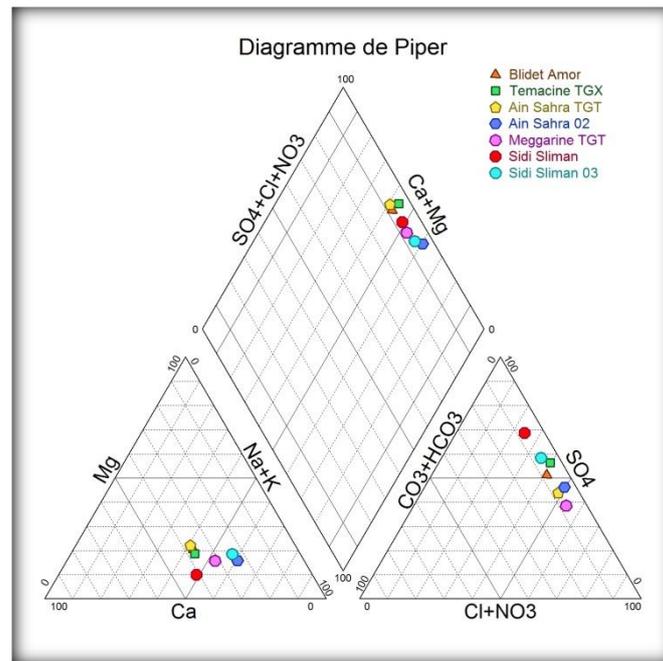


Figure 71: Diagramme de PIPER des eaux du Continental Intercalaire (2010).

Ces facies sont expliqués par les valeurs élevées du Sodium pour les cations ainsi que les Sulfates et les Chlorures pour les anions cela est prouvé par les conductivités.

Conclusion

La zone d'étude « la vallée de l'Oued Righ » appartenant au Bas Sahara (à 600 km au Sud de la capital, Alger), couvre une superficie de 3750 ha. Allongée sur environ 150 km sur un axe Nord Sud, cette vallée est limitée au Nord par le chott Merouane et au Sud par El Goug. Sa topographie est très plane, s'approchant de 1‰. Son étendue couvre plus d'une cinquantaine d'oasis où la culture des dattiers reste la seule et unique ressource socio-économique.

Les sols de la région ont une texture fine limono-argileuse, avec des teneurs élevées en sels au Nord (au-delà d'El Meghair) et grossière à dominance sableuse au Sud, tandis que le fond est comblé par des sédiments sableux entrecoupés de lentilles d'argile salifère.

Le climat est désertique ou hyper aride caractérisé par des précipitations faibles à rares et irrégulières ne dépassant pas les 70 mm/an, suite à des orages violents qui génèrent des ruissellements. Ces dernières sont vite reprises par la forte évaporation résultant des températures élevées (22°C en moyenne annuelle et 34°C au mois le plus chaud) et ne jouent pratiquement aucun rôle dans la recharge directe des nappes. L'évaporation cumulée pour les mois de Juin, Juillet et Août représente près de 50% à l'échelle annuelle. Cette dernière calculée par la méthode Turc est de 1513,22 mm pour la palmeraie de Touggourt, limite Sud de la zone d'étude.

Du point de vue hydrologique l'axe de la vallée est occupé par le grand canal de drainage qui mène les eaux vers les chotts. Le flanc Ouest est parcouru par de petits oueds qui descendent de la dorsale mozabite, causés par des crues épisodiques.

Les Oueds El Attar, N'oura, Medjeiar, Mellah apportent, par leurs crues relativement fréquentes, des possibilités d'approvisionnement aux nappes de la région.

Le bassin versant de l'Oued Righ comblé de terrains Quaternaires (sables, calcaires, grès, argiles et évaporites) siège de la nappe superficielle (niveaux sableux et argilo-évaporitiques).

L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part et l'existence d'un fossé de subsidence d'autre part, ont favorisé la formation de deux grands systèmes aquifères captifs définis par le Complexe Terminal (CT) du Miopliocène et le Continental Intercalaire (CI) formés entre les deux cycles marins du Paléozoïque et du Crétacé Supérieur constituent respectivement les limites inférieures et supérieures. Ces deux horizons se trouvent à des profondeurs relatives de 500 m et plus de 1500 m respectivement pour le CT et le CI.

La variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est liée à la répartition des formations géologiques, à la morphologie et à la topographie de la vallée généralement plane, qui ne facilite pas le drainage des eaux excédentaires. Par contre les variations dans le temps sont dues aux activités de l'Homme ainsi qu'à l'effet de la température (évaporation).

**II. DEUXIEME PARTIE : APPORT DE LA
TELEDETECTION A LA GESTION DES
RESSOURCES EN EAU : APPLICATION A LA
VALLEE D'OUED RIGH**

Chapitre 06 :

TELEDETECTION, PRINCIPES D'ACQUISITION

II.1. Chapitre 06 : Télédétection, Principes d'Acquisition

Introduction

Le chapitre 6 étudie l'apport de la télédétection à l'hydrogéologie, c'est la partie principale de la thèse. D'ailleurs il se compose de trois volets dont le premier présente les principaux aspects essentiels à la compréhension du principe de base de la télédétection. Dans le deuxième volet, nous ferons appel à l'historique de la télédétection ou nous décrivons le Système LANDSAT et ses produits, puis, on introduit la notion de rayonnement électromagnétique.

Enfin dans le troisième volet, nous discutons les comportements spectraux des végétaux et des eaux qui seront comme support d'aide à l'interprétation du comportement de la variabilité des sols.

Qu'elle soit spatiale ou aéroportée, multi ou hyper spectrale, qu'elle fasse appel à des capteurs passifs ou actifs, à des classifications automatiques ou dirigées, la télédétection recouvre à l'heure actuelle un grand nombre de types de vecteurs, de données et de techniques d'analyse et d'interprétation qui permettent de caractériser à distance la surface terrestre (*Mequignon, 2005*)

La localisation géographique de la couverture de base du sol (forêt, marécage, etc...), du drainage et des éléments anthropogéniques (infrastructure urbaine, réseaux de transport, etc...), peuvent être représentés spatialement par rapport à des systèmes de coordonnées connus et peuvent par la suite, être combinés à de l'information thématique (*Ougrine, 2003*).

Les récents développements de la technologie informatique (vitesse, traitement des données numériques et les capacités de stockage), la demande croissante pour les données numériques et les capacités de production cartographique informatisée, ont favorisé l'utilisation de l'information de télédétection comme source de données pour les applications cartographiques.

La cartographie est une composante intégrale du processus de gestion des ressources naturelles.

Avec l'apparition de la télédétection, de nouveaux produits et méthodes d'application cartographique sont apparus à côté des méthodes conventionnelles, pouvant contribuer à combler certain besoin. De nos jours, la cartographie des sols est devenue une utilisation fréquente, elle représente une source précieuse d'informations pour les scientifiques, les décideurs, les gestionnaires et les intervenants dans l'aménagement du territoire. Elles fournissent en temps réel des informations précises permettant de surveiller et de cartographier le terrain. D'ailleurs c'est l'un des principaux objectifs de notre travail.

Les images satellitaires acquises à des dates différentes et archivées au cours des dernières années permettent d'une part, d'établir des études diachroniques et un suivi des phénomènes, notamment l'évolution des terrains agricoles, des plans d'eau, habitations...etc, et d'autre part de surveiller les modifications subies par l'environnement d'une région géographique donnée.

En fin, pour estimer la valeur d'un patrimoine naturel, à travers les différents services qu'ils peuvent produire, une analyse préalable de l'occupation des sols et de son évolution apparaît indispensable (*Oszwald & al ; 2011*).

II.1.1. Généralités

II.1.1.1. Définition de la télédétection

La télédétection dans son acception la plus large désigne, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié.

Plus précisément est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. 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.) ou encore physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc (*Soudani, 2005*).

La télédétection par satellite permet des observations régulières, répétitives, fidèles, de la quasi-totalité de la planète, à divers pas d'espace et de temps, dans plusieurs domaines de longueur d'onde. Ces observations traduisent la nature, l'état, la variation spatiale et temporelle des propriétés des objets présents à la surface terrestre. Elle permet un suivi de l'évolution de l'environnement océanique ou terrestre, la surveillance spatiale des épidémies, approche intégrée des milieux terrestres à l'échelle locale et régionale : les satellites fournissent de plus en plus d'indicateurs environnementaux pour une gestion globale de l'environnement.

Elle apporte des informations utiles, parfois impossibles à acquérir sur le terrain, notamment en termes d'homogénéité, de couverture spatiale et de suivi temporel, pour l'alerte précoce et le suivi de l'évolution des phénomènes (*Ait Brahim & al, 2009*).

Pour enregistrer adéquatement l'énergie réfléchie ou émise par une surface ou une cible donnée, on doit installer le **capteur** sur une **plate-forme** distante de la surface ou de la cible observée.

Ces capteurs sont sensibles à la lumière visible mais aussi à d'autres parties du **spectre électromagnétique** comme l'infrarouge, l'ultraviolet et les micro-ondes.

Une image du sol terrestre, c'est-à-dire la représentation graphique des enregistrements du capteur, est obtenue en attribuant des intensités de gris ou de couleurs aux valeurs numériques enregistrées. L'utilisation de différentes combinaisons de valeurs et des traitements spécifiques permet l'extraction d'informations sur certaines caractéristiques du sol, informations qui peuvent être utiles en agriculture, en foresterie, en géologie, en hydrologie, en océanographie ou en cartographie.

Les plates-formes peuvent être situées près de la surface terrestre, comme par exemple au sol, dans un avion ou un ballon; ou à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, comme par exemple sur un véhicule spatial ou un satellite.

L'histoire et l'évolution de la cartographie sont intimement liées aux techniques employées.

II.1.1.2. Historique de la télédétection

Observer la planète est un vieux rêve. Depuis l'apparition de la photographie aérienne et de la télédétection, les scientifiques ont eu à leur disposition une source d'information irremplaçable. Ces observations traduisent la nature, l'état, la variation spatiale et temporelle des propriétés des objets présents à la surface terrestre.

L'histoire de la télédétection peut se décliner en plusieurs histoires plus ou moins indépendantes, elle peut être découpée en grandes époques :

- ❖ De 1856, date à laquelle, pour la première fois, un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale, se déroule

l'époque des pionniers, pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale permettant le levé des plans topographiques, hydrographiques et cadastraux et devient un outil opérationnel pour la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation.

- ❖ La période qui commence en 1957, marque les débuts de l'exploration de l'Espace et prépare l'arrivée de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. La première application opérationnelle de la télédétection spatiale apparaît dans les années 60 avec les satellites météorologiques de la série ESSA.
- ❖ Le lancement en 1972 du satellite ERTS (renommé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la télédétection moderne. Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.
- ❖ Depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué notamment par la diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique et l'augmentation de leur résolution spatiale.
- ❖ Dans les années 90, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites.

Les capteurs de télédétection sont régulièrement embarqués sur des satellites artificiels en orbite autour de la Terre, couvrant une vaste gamme d'altitudes :

- Des orbites très basses (200 à 400 km) pour des missions de courte durée (typiquement quelques jours) à bord de la Navette Spatiale par exemple;
- Des orbites de 500 à 1500 km, polaires ou quasi-polaires, les plus utilisées en observation de la Terre (SPOT, ERS, LANDSAT, RADARSAT, NOAA...);
- L'orbite géostationnaire, utilisée par des satellites météorologiques comme METEOSAT (européen) ou GOES (américain) (*Polidori, 2008*).

II.1.1.3. Système LANDSAT et ses produits

Le programme Earth Resources Technological Satellite (ERTS) utilisant les satellites ERTS-1 dont le nom a été transformé en LANDSAT (Land Satellite) est dû à la NASA. Depuis 1978 le programme américain de télédétection est exploité par une société privée américaine (EOSAT).

- ❖ Le premier satellite «LANDSAT 1» envoyé le 23 juillet 1972 a été placé sur une orbite assez basse de 917 Km d'altitude. Il emportait à son bord le scanner mécanique MSS (Multi-Spectral Scanner) d'une résolution spatiale de 80 mètres et d'une résolution spectrale couvrant 04 bandes spectrales (longueurs d'ondes du vert et du rouge dans le visible ; le proche et le moyen infrarouge), ainsi que 03 caméras RBV (Return Beam Vidicon) enregistrant l'information dans les longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge. Il a fonctionné jusqu'au 06 janvier 1978.
- ❖ Le 22 janvier 1975, «LANDSAT 2» est lancé. Presque identique à son prédécesseur, il permet de doubler la fréquence de passage au-dessus d'un

même point. Il a fonctionné jusqu'au 27 juillet 1983, puis des anomalies ont affecté ses capteurs.

- ❖ LANDSAT 3, lancé le 05 mars 1978, n'a plus fourni de données après le 07 septembre 1983 à la suite d'une panne dans le dispositif de balayage.
- ❖ Avec le lancement des satellites «LANDSAT 4» le 16 juillet 1982 et «LANDSAT 5» le 1er mars 1984, des changements notables apparaissent : Les caméras RVB sont abandonnées au profit du nouveau Scanner TM à plus haute résolution spatiale (30 mètres), possédant 07 bandes spectrales (du bleu à l'infrarouge lointain). LANDSAT 4, n'émet plus de données TM depuis février 1983.
- ❖ Lancé le 05 octobre 1993 «LANDSAT 6», s'est écrasé en mer lors du lancement.
- ❖ Avec tout succès «LANDSAT 7» a été lancé le 15 avril 1999 et fournit jusqu'à ce jour des données.

Les satellites 1 à 5 n'ayant pas d'enregistreur embarqué, les données sont envoyées en temps réel aux stations de réception, quand il ne peut y avoir de liaison directe. Les informations sont envoyées par des relais en utilisant des satellites de communication TDRS (Tracking and Data Relay Systems). Le tableau ci-après récapitule l'historique du système Landsat.

Tableau 26: Dates de lancement et autres spécificités générales des satellites LANDSAT (Gomèz, 2004)

Système	Date de lancement	Fin d'utilisation du système	Résolution spatiale (m)	Altitude (Km)	Capteurs
LANDSAT 1	23-07-72	01-06-78	80	917	
LANDSAT 2	22-01-75	25-02-82	80	917	RBV et MSS
LANDSAT 3	05-03-78	31-03-83	80	917	
LANDSAT 4	16-07-82	Toujours en cours	80	705	
LANDSAT 5	01-03-84	Toujours en cours	80	705	MSS et TM
LANDSAT 6	05-10-93	05-10-93	30	705	
LANDSAT 7	15-04-99	Toujours en cours	30	705	TM et ETM+

De 1986 jusqu'à récemment les produits étaient commercialisés par la société EOSAT. La diffusion des produits LANDSAT 7 doit être assurée par L'US Geological Survey (USGS).

Actuellement seuls les satellites LANDSAT 4, 5 et 7 de la seconde génération lancés entre 1982 et 1999, sont encore en fonctionnement. Ces satellites placés en orbite héliosynchrone (le plan de l'orbite conserve un angle constant avec la direction Terre-Soleil), fournissent des données d'une même surface à différentes dates, sur toute la surface terrestre exceptée pour les régions polaires (Tableau 27).

Chapitre 06 : Télédétection, Principes d'Acquisition

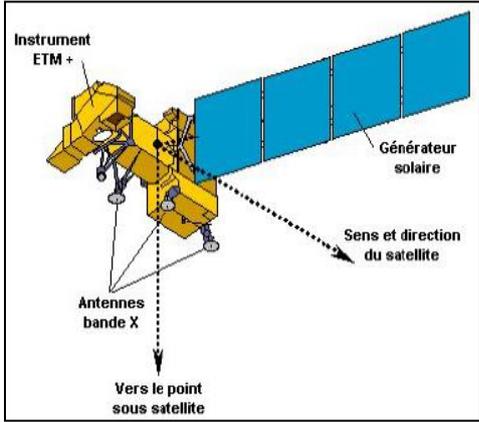
Tableau 27: les caractéristiques des différents capteurs

	RBV	MSS	TM	ETM+
Longueur d'onde des canaux	0,479 - 0,575 μm	4 : 0,5 - 0,6 μm	1 : 0,45 - 0,515 μm	1 : 0,45 - 0,515 μm
	0,580 - 0,680 μm	5 : 0,6 - 0,7 μm	2: 0,525 - 0,605 μm	2:0,525 - 0,605 μm
	0,690 - 0,830 μm	6 : 0,7 - 0,8 μm	3 : 0,63 - 0,690 μm	3 : 0,63 - 0,690 μm
		7 : 0,8 - 1,1 μm	4 : 0,73 - 0,90 μm	4 : 0,73 - 0,90 μm
			5 : 1,55 - 1,75 μm	5 : 1,55 - 1,75 μm
			6 : 10,40 - 12,5 μm	6 : 10,40 - 12,5 μm
			7 : 2,09 - 2,35 μm	7 : 2,09 - 2,35 μm
			P : 0,52 - 0,90 μm	
Angle d'ouverture		11°56	14°8	14°8
		79m x 56m	1 à 7 : 30m	1 à 7 : 30m
Pixel			6 : 120m	6 : 60m
				P : 15m
Taille de scène		170 x 185,2 km	170 x 185,2 km	170 x 185,2 km

Comparativement aux autres capteurs de la série LANDSAT, la mission de LANDSAT 7 présente une nouvelle génération de capteurs qui se distingue par une bande panchromatique (0,5 à 0,9 μm) supplémentaire, assurant une résolution spatiale au sol de 15 m et une amélioration significative de la résolution spatiale du canal thermique qui passe de 120 à 60 m et possède à son bord le capteur multispectral ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>). (Tableau 28)

Les images LANDSAT 7 sont des données matricielles numériques comprenant en plus de la bande panchromatique, six bandes multi spectrales ayant des pixels de 30 mètres et deux bandes infrarouges thermiques ayant une limite de résolution au sol de 60 mètres. Elles ont été produites conformément au système de référence (NAD83) à l'aide de la projection cartographique (UTM).

Tableau 28: Caractéristiques du capteur Landsat 7ETM+ (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

 <p>Instrument ETM +</p> <p>Générateur solaire</p> <p>Sens et direction du satellite</p> <p>Antennes bande X</p> <p>Vers le point sous satellite</p>	lancement	1999
	Altitude	705 Km
	Heure de passage à l'équateur	9 :35 a.m
	Champ de vue	185 Km
	Résolution spatiale	30 m en multi spectral 15 m panchromatique 60 m dans le thermique
	Période de revisite	15 jours
	Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone

La résolution spatiale, ou la dimension spatiale de la Terre couverte par la dimension d'un pixel (distance d'échantillonnage de terrain théorique), varie en fonction de chaque bande spectrale. (Tableau 29)

Tableau 29: Caractéristiques des bandes spectrales du capteur ETM+ Landsat 7 (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

Bande	Emplacement spectral	Longueur d'onde	Résolution spatiale
1	Bleu-vert	0,450 – 0,515	30
2	Vert	0,525 – 0,605	30
3	Rouge	0,630 – 0,690	30
4	Infrarouge (IR)	0,750 – 0,900	30
5	Infrarouge moyen I (IRM I)	1,550 – 1,750	30
6L	Infrarouge thermique (faibles gains)	10,400 – 12,500	60
6H	Infrarouge thermique (gains élevés)	10,400 – 12,500	60
7	Infrarouge moyen II (IRM II)	2,090 – 2,350	30
8	Panchromatique	0,520 – 0,900	15

II.1.1.4. Notion et conception d'une image satellitaire

L'image, pour le Petit Robert, se définit comme la représentation analogique d'un être, d'une chose ou d'objets, ajoutons pour notre propos, d'une scène présents à la surface du sol.

Une image satellite est une représentation graphique, en vue de dessus, d'une zone assez vaste de la Terre. La particularité de cette image est qu'elle est prise par un satellite (par exemple LANDSAT, SPOT.....) placé en orbite autour de la planète. Contrairement aux images obtenues à l'aide d'un appareil photo, ou dessinées sur du papier, une image satellite est une image numérique, traitée par outil informatique, élaborée à partir des signaux transmis par un satellite. L'image numérique est l'image dont la surface est divisée en éléments de taille fixe appelés pixels (représentés par une série de bits), ayant chacun comme caractéristique un niveau de gris ou de couleur prélevé à l'emplacement correspondant dans l'image réelle.

L'image est une représentation spatiale de la réalité. Elle a joué, dès l'invention de la photographie, un rôle prépondérant dans tous les domaines s'intéressant à l'étude de la surface terrestre, car elle est l'une des sources importantes de description, de différenciation spatiale des phénomènes survenant à la surface de la Terre. De plus, elle fournit une perception de la réalité proche de celle de la vision humaine. Elle a exercé un rôle majeur dans les développements de la cartographie (Caloz & Collet, 2001).

II.1.2. Principes de base de la télédétection : www.ccrs.nrcan.gc.ca

La télédétection est une science qui permet de photographier la terre à distance.

Une bonne utilisation des données nécessite la compréhension des principes physiques sur lesquels est fondée la technique de télédétection employée (Kergomard, 2002).

Le principe de base de cette technique est similaire à celui de la vision de l'homme (Habib, 2002), c'est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux : une source d'énergie, une cible et un vecteur (Fig.72).

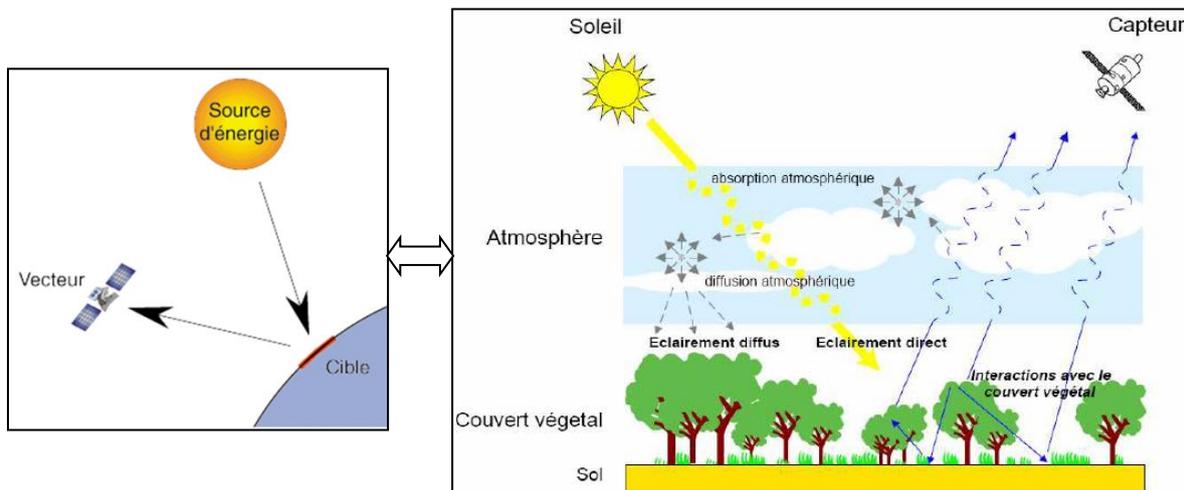


Figure 72: Principe de base de la télédétection (Bacour, 2001 in Benhadj, 2008).

- ❖ La cible : est la portion de la surface terrestre observée par le satellite. sa taille peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de Km^2 .
- ❖ La source d'énergie : dans la majorité des cas la source d'énergie est le soleil. Il éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique.

- ❖ Le vecteur : mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible.

On parle de télédétection passive lorsque le capteur enregistre la partie du rayonnement solaire réfléchi (visible) ou absorbé et retransmis (IR thermique). Le capteur actif produit lui-même un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Il enregistre ensuite la part du rayonnement réfléchi par la cible (Fig.73).

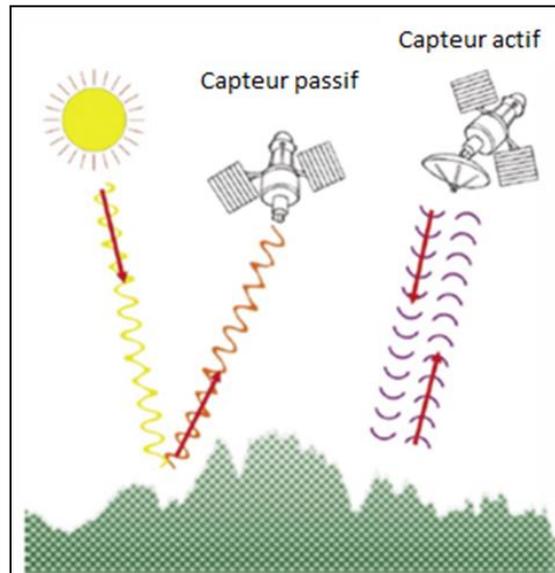


Figure 73: Le capteur passif et actif

D'une manière plus détaillée, on peut schématiser la télédétection en un ensemble de sept étapes (Fig.74):

- **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. Dans la presque totalité des cas la source d'énergie est le soleil. Le satellite peut être source d'énergie, c'est le cas de la télédétection radar.

- **Rayonnement et atmosphère (B) :**

Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

- **Interaction avec la cible (C) :**

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface. Chaque objet géographique émet ou réfléchit un rayonnement dans le spectre électromagnétique, cette caractéristique s'appelle « le comportement spectral » (ou la signature spectrale). C'est en fonction de la longueur d'onde du rayonnement qui est émis ou réfléchi par lui-même

- **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) :**

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

- **Transmission, réception et traitement (E) :**

L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

- **Interprétation et analyse (F) :**

Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

- **Application (G) :**

La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

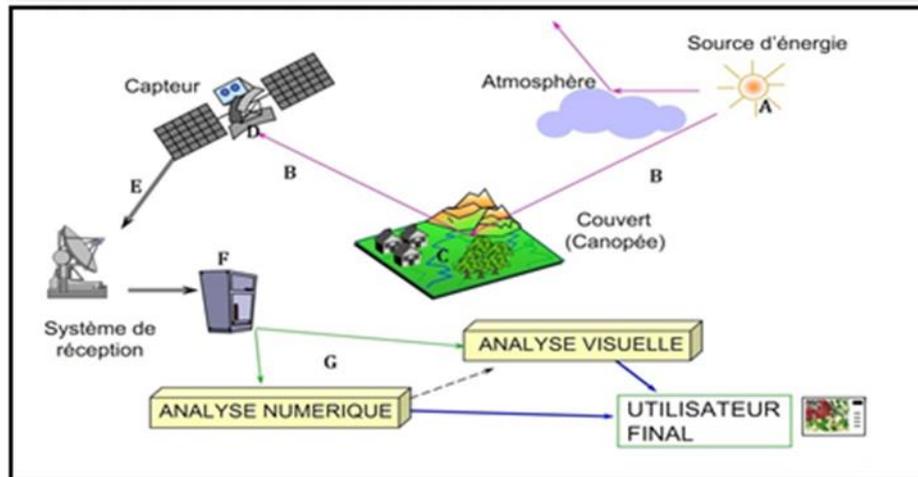


Figure 74: Les sept étapes de la télédétection (d'après TONON M, 2009 in LAOUINI)

Ces étapes couvrent le processus de la télédétection, du début à la fin.

II.1.2.1. Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique, l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques.

Autrement dit c'est une forme de **propagation de l'énergie** dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'œil (Kergomard, 2002).

Il est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M).

Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière (c) (Fig.75) (centre canadien de télédétection).

Le rayonnement a été connu par les physiciens comme un phénomène ondulatoire; cette perspective a permis d'étendre considérablement le champ des connaissances sur le spectre du rayonnement électromagnétique, au-delà de la lumière visible. La physique moderne a montré que le rayonnement électromagnétique pouvait également être considéré comme un déplacement de particules élémentaires représentant une quantité d'énergie (Kergomard, 2002).

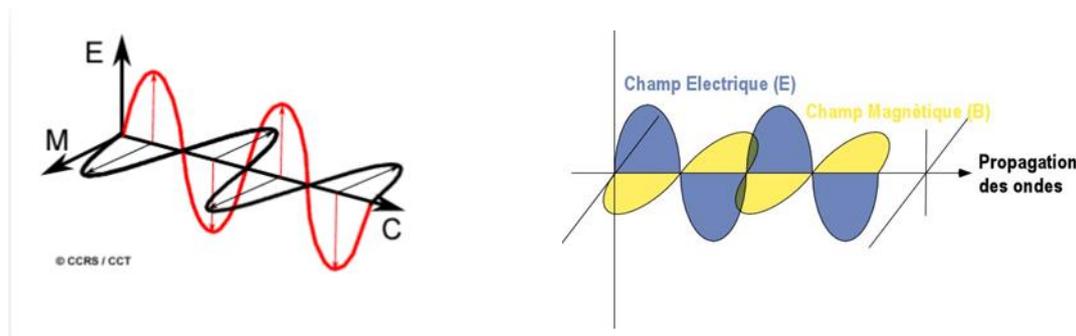


Figure 75: Figure présentant le rayonnement électromagnétique et ces composants

Il est à noter que la fréquence d'un rayonnement électromagnétique est invariable, alors que la vitesse de propagation, et donc la longueur d'onde, peuvent être modifiées lors du passage d'un milieu à un autre (Fig.76). C'est la raison pour laquelle, il faut toujours mieux caractériser le rayonnement électromagnétique par sa fréquence, même si l'utilisation de la longueur d'onde est la plus répandue (Kergomard, 2002)

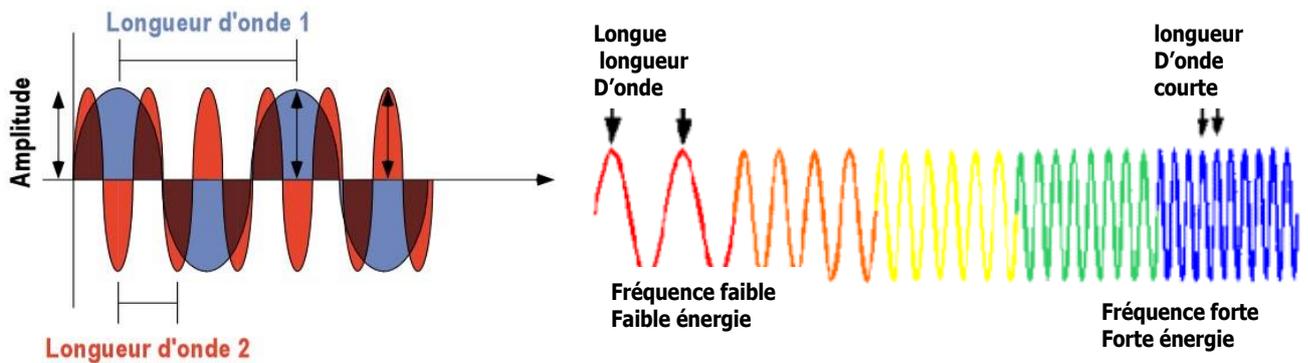


Figure 76: Représentation des ondes électromagnétique et la relation entre la fréquence et la longueur d'onde.

II.1.2.2. Le spectre électromagnétique

Pour acquérir des informations sur la nature des objets, la télédétection exploite les propriétés physiques, et plus spécialement, électromagnétiques de ceux-ci. La lumière est une onde électromagnétique apparaissant selon la fréquence qui la caractérise, sous forme de rayons X, ultra-violet, infrarouge ou de micro-ondes ; l'ensemble de ces états formant son spectre électromagnétique.

Le spectre électromagnétique se définit comme le domaine total des longueurs d'onde ou des fréquences du rayonnement électromagnétique, il s'étend des courtes longueurs d'onde (rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio) (Fig.77). Il représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou encore de leur énergie.

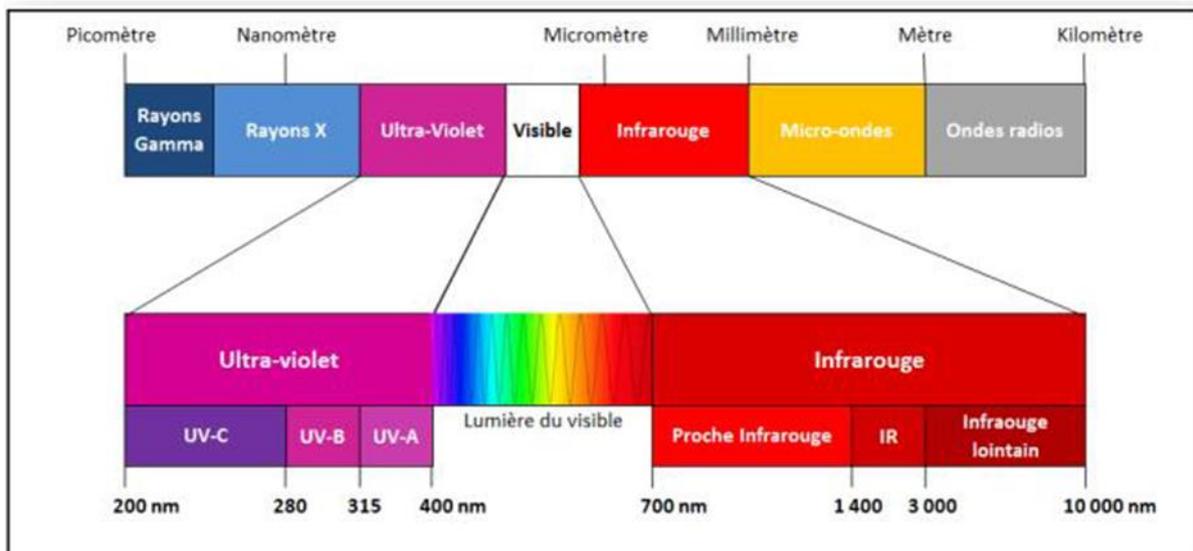


Figure 77: Le spectre électromagnétique

La longueur d'onde est la distance dont une onde a besoin pour effectuer un mouvement. Plus la distance entre deux sommets est courte, plus la longueur d'onde est petite.

Analyser une image n'implique pas automatiquement de travailler sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Etudier un éventail restreint de longueur d'onde est plus commode et, souvent plus efficace. On choisit, pour ce faire, des canaux présentant des réponses spectrales contrastées donnant ainsi, par simple comparaison des objets, une discrimination à la fois rapide et de qualité.

Il est important de constater que le spectre visible représente une petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'œil nu. Cependant, La lumière que nos yeux peuvent déceler n'est qu'une très petite portion du spectre électromagnétique. Les longueurs d'onde visibles s'étendent de 0,4 à 0,7 μm (Fig.78). La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte. Les longueurs d'onde du visible correspondent à la lumière bleue, verte et rouge.

Une image en noir et blanc représente les longueurs situées dans le spectre visible (Fig.79). Sa résolution spectrale est assez grossière, car les différentes longueurs d'onde ne sont pas différenciées. Une image optique multi spectrale est sensible elle aussi à l'ensemble des longueurs d'onde visibles, mais elle possède une résolution spectrale plus élevée puisqu'elle peut distinguer les longueurs d'onde dans le bleu, le vert et le rouge. Cette image peut donc caractériser l'intensité lumineuse détectée selon ces intervalles de longueurs d'onde. (Benkaddour, 2002).

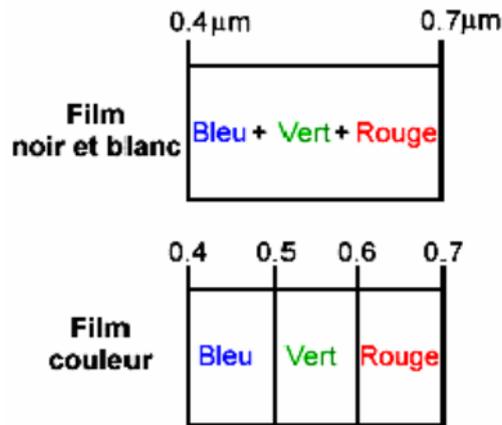


Figure 78: Résolution spectrale (Benkaddour ; 2002)

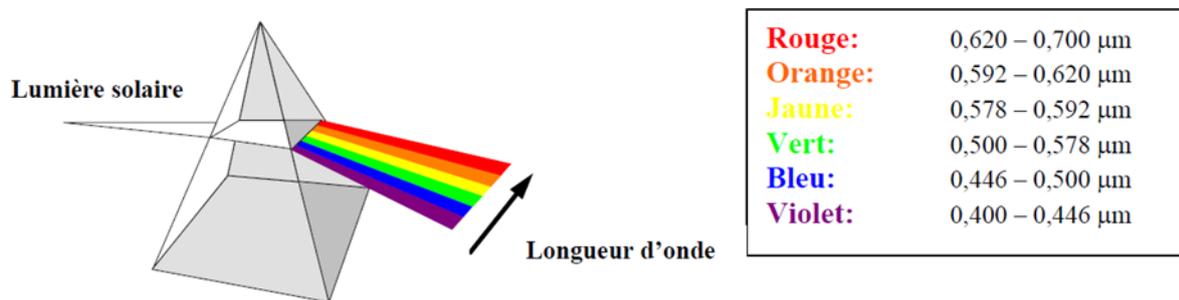


Figure 79: Le domaine du visible dans le spectre électromagnétique.

Les rayonnements doivent en effet traverser l'atmosphère terrestre avant d'atteindre une cible sur Terre. L'atmosphère absorbe certaines longueurs d'onde et en laisse passer d'autres, notamment dans le visible, dans l'infrarouge et dans les hyperfréquences : C'est les fenêtres atmosphériques.

Ce sont les régions du spectre électromagnétique qui ne sont pas absorbées de façon importante par l'atmosphère, et qui sont donc utiles pour la télédétection,

II.1.3. Les comportements spectraux

Plusieurs instruments de télédétection peuvent enregistrer l'énergie reçue selon des intervalles de longueurs d'onde à différentes résolutions spectrales. Ces instruments sont appelés capteurs multi spectraux. Ces capteurs de plus en plus développés sont capables de détecter des centaines de bandes spectrales très fines dans la portion du spectre des ondes électromagnétiques réunissant le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen. La très grande résolution spectrale des capteurs multi spectraux facilite la différenciation des caractéristiques d'une image basée sur la réponse différente dans chacune des bandes spectrales.

Lorsqu'un rayonnement solaire atteint la surface terrestre, il peut être réfléchi, absorbé ou transmis. La modification du signal en fonction de la nature de l'objet permet son identification à distance. En effet, cette modification engendre l'apparition d'une combinaison originale d'intensités variées à des longueurs d'onde distinctes. C'est la signature spectrale ou « la réponse spectrale d'un objet qui correspond à la courbe représentative de l'énergie réfléchie par cet objet, dans les différents domaines de longueur d'onde et en particulier dans ceux correspondant aux canaux des capteurs satellitaires. » (Gilg & Bildgen, 1993). La

résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde.

La signature est une grandeur physique qui permet de caractériser les objets observés, et que l'on peut déduire à partir des images. Une signature peut être obtenue à partir de modèles théoriques (simulations) ou par des mesures réelles, soit en laboratoire soit dans des images acquises sur des sites parfaitement connus (*Polidori, 2008*).

Les surfaces observées, sont caractérisées en télédétection par sept signatures différentes (*Royer, 1991*) :

- ✓ la signature par mesure de l'intensité du signal émis ou réfléchi;
- ✓ la signature spectrale proprement dite;
- ✓ la signature spatiale exprimant la forme des objets et leur arrangement;
- ✓ la signature angulaire, associée à l'anisotropie de la surface de l'atmosphère ;
- ✓ la signature temporelle, associée aux modifications de la surface comme la croissance de la végétation ;
- ✓ la signature par la polarisation du signal, appliquée surtout dans le domaine du radar ;
- ✓ la signature par la mesure de la phase du signal, utilisée aussi dans le domaine du radar.

Les surfaces rencontrées en télédétection peuvent être regroupées en trois ensembles principaux : les surfaces minérales, comme les roches et les sols, les surfaces végétales et les surfaces aquatiques (*Teodoreanu, 2002*).

Il est souvent possible de distinguer des classes de caractéristiques et de détails dans une image en comparant leurs réponses sur un ensemble de longueurs d'onde. Des classes très larges, comme l'eau et la végétation, peuvent être séparées en utilisant un intervalle de longueurs d'onde assez grand (le visible et l'infrarouge par exemple) (*Fig.80*). Des classes plus spécifiques comme par exemple différents types de roches ne sont pas aussi faciles à différencier et nécessitent l'utilisation d'un intervalle de longueurs d'onde beaucoup plus fin (*Baz et al, 2002 in Benkadour, 2002*).

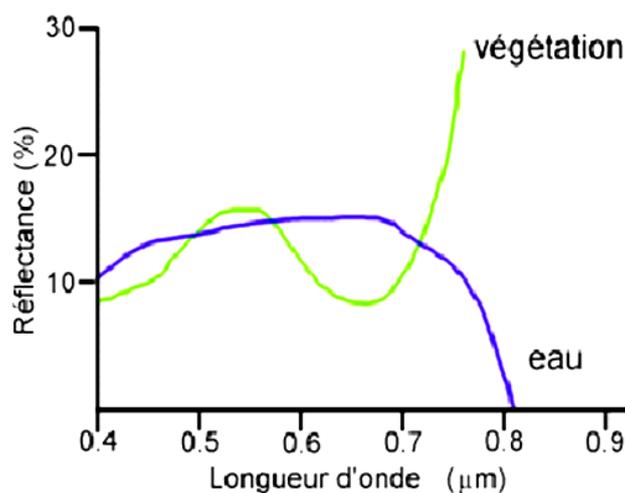


Figure 80: Réflectances comparées de l'eau et d'une végétation

A différentes longueurs d'ondes la végétation reflète plus que l'eau qui a tendance à absorber les radiations. Ceci permet de distinguer la plupart des matériaux présents sur terre (*Lassieur, 2006*).

Le terme de *signature spectrale* est habituellement utilisé. Mais, à présent, certains chercheurs estiment que ce terme est inapproprié, car une *signature* laisse supposer qu'elle est constante. Ils proposent le terme de « *comportement spectral* » d'un objet, à un moment donné, dans une position géographique donnée, vu sous un angle donné et recevant un rayonnement donné (Girard & Girard, 1999).

II.1.3.1. Comportement spectral de l'eau

Qu'elle soit à l'état liquide ou solide l'eau a des propriétés optiques très différentes.

La signature de l'eau est caractérisée par celle des molécules qui la constitue (l'eau pure) et celle des constituants dissous ou en suspension, comme par exemple, les algues ou la matière organique.

Atteignant une surface d'eau libre, une grande partie du rayonnement incident est réfléchi d'une manière spéculaire comme sur un miroir et ceci dans toutes les longueurs d'onde du spectre visible et infrarouge proche et moyen. La partie absorbée est rapidement atténuée dans le volume suite aux phénomènes de diffusion et d'absorption (Bonn & Rochon, 1992).

Une partie du rayonnement solaire qui atteint la surface de l'eau est réfléchi et une autre partie est réfractée et pénètre donc dans la masse d'eau. Cette partie réfractée est ensuite partiellement absorbée et diffusée.

Sur les images de télédétection, les surfaces d'eau apparaissent dans des teintes sombres et se comportent comme si elles étaient des corps noirs qui absorbent tout le rayonnement qu'ils reçoivent.

La courbe de réflectance de l'eau décroît du bleu du visible jusqu'au proche infrarouge (Fig.81), là où elle s'annule (Soudani, 2005).

L'eau voit sa réflectance croître lorsqu'elle est chargée en particules solides mais cela tout en gardant la même allure. La présence d'organismes chlorophylliens (algues, végétations flottantes,...) peut modifier très fortement ses caractéristiques spectrales.

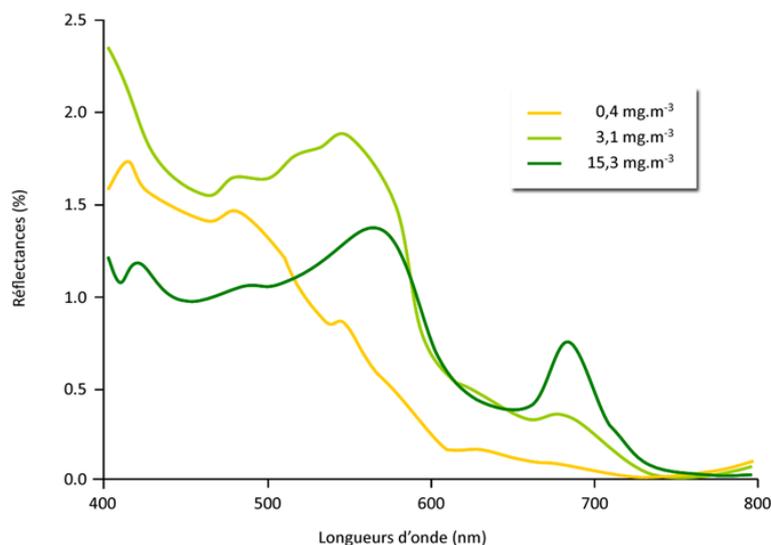


Figure 81: Réflectance de l'eau selon la concentration chlorophyllienne (Bonn & Rochon, 1992)

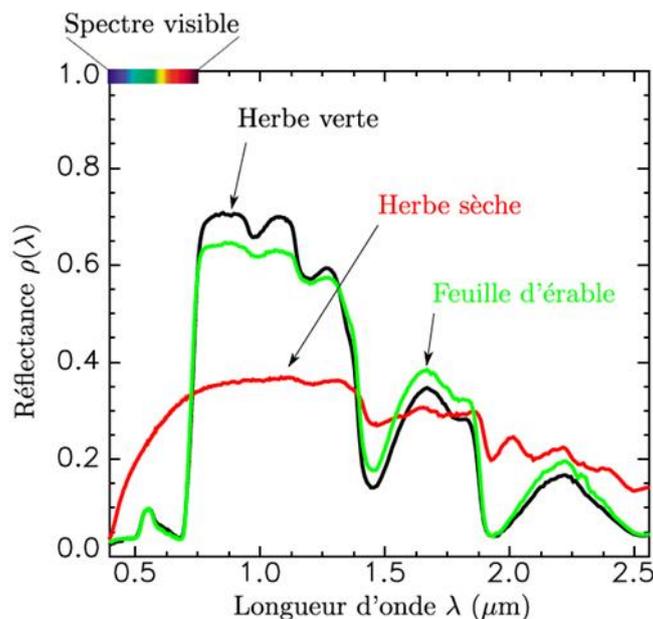
II.1.3.2. Comportement spectral des couverts végétaux

En télédétection, le terme végétation fait référence à la chlorophylle, entre autre, le comportement spectral dépend aussi de la nature de l'espèce, la pigmentation, de la structure physiologique, du contenu en eau de la plante, du stade de développement, du taux de recouvrement et de l'état du peuplement (*Benkrid, 2008.*)

Le comportement spectral de la végétation diffère sensiblement de celui des sols et des roches. La végétation est un milieu complexe et changeant dans le temps, dont les propriétés spectrales varient avec la saison et les phases de croissance (*Bonn & Rochon, 1992.*)

Le flux de rayonnement qui est émis ou réfléchi par un couvert végétal provient à la fois des organes végétaux et du sol sous-jacent. La contribution de réflectance du sol s'estompe au fur et à mesure de l'installation de la culture et est remplacée par celle des feuilles. On assiste ainsi à une diminution de la réflectance dans le visible et l'infrarouge moyen et à son augmentation dans le proche infrarouge. Le phénomène s'inverse durant la phase de sénescence. Au cours de la phase active de la croissance de la végétation, la réflectance du couvert diminue dans le visible et l'infrarouge moyen alors qu'elle augmente dans le proche infrarouge. Il faut distinguer le comportement spectral de feuilles isolées de celui d'un peuplement d'individus appartenant à la même espèce ou à la même variété, ou à la même culture (*Slim, 2012.*)

Par contre, les phénomènes s'inversent durant la phase de sénescence (maturation). La sénescence se manifeste tout d'abord par un accroissement de la réflectance dans le visible, notamment dans le jaune et le rouge suite à la disparition de la chlorophylle (*Fig.II-82*). La réflectance croît alors de manière continue dans le domaine du visible. Dans l'infrarouge et dans l'infrarouge moyen les propriétés optiques ne changent que plus tard lorsque la structure anatomique interne est altérée au cours du dessèchement. On peut noter l'effet très net du dessèchement dans l'infrarouge moyen où l'on voit s'estomper progressivement les bandes d'absorption de l'eau (*INRA, 1983 in Slim, 2012.*)



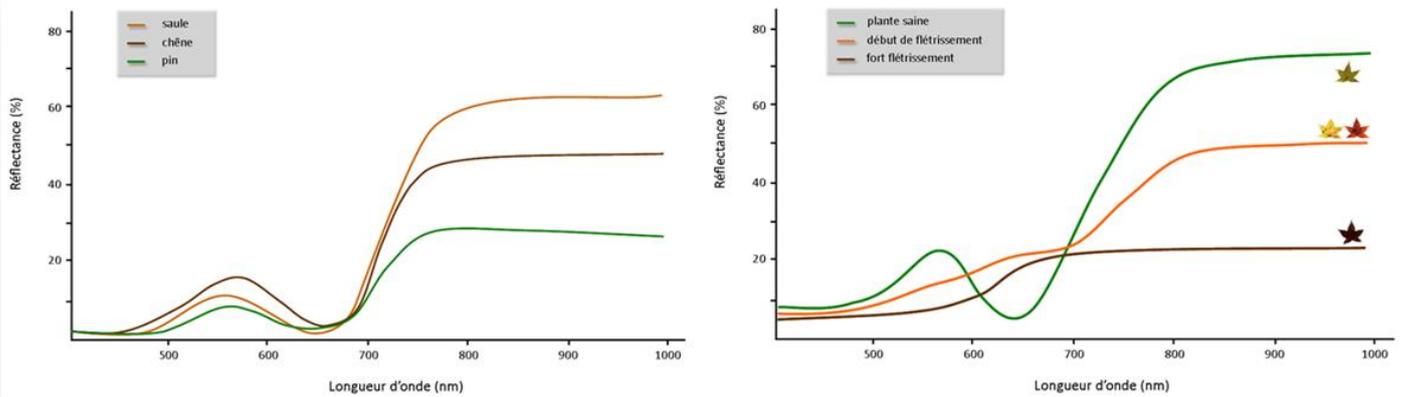


Figure 82: Signature spectrale en réflectance de plusieurs végétaux et selon le degré de flétrissement. (Minet, 2011, Anselme)

Il ressort de cette riche bibliographie que chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchi en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires.

L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques ou les sédiments. Lorsque la couche de surface contient de fortes concentrations en phytoplancton, on observe une augmentation de la réflectance dans les longueurs d'onde du vert et l'eau nous paraît par conséquent plus verte (*cf. chapitre 8*). Plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde.

Les propriétés spectrales des couverts végétaux dépendent à la fois de la nature de la végétation qui les compose, de leur état physiologique, de leur teneur en eau.

Chapitre 07 :

***OBJECTIFS ET DEMARCHE
METHODOLOGIQUE***

II.2. Chapitre 07 : Objectifs et démarche méthodologique

Introduction

Le problème principal de la télédétection en hydrogéologie est la méconnaissance du potentiel des données par les hydrogéologues (*Hoffmann, 2005*).

La télédétection n'est pas le remède pour les problèmes de développement et de gestion des ressources. Néanmoins, elle peut fournir des données qui sont des outils de base pour un inventaire sérieux, une surveillance et une gestion saine de ces ressources (*Bale et al, 1974*).

Dans cette partie, on discute des applications de la télédétection ayant trait avec la thématiques du présent travail. On donne un aperçu des méthodes de cartographie de l'occupation du sol, qui est un préalable aux études permettant de comprendre les interactions homme-environnement et à la gestion des ressources naturelles (*Aspinall & Justice, 2003 ; Lepers & al, 2005 in Benhadj, 2008*).

Dans les régions arides, l'évaluation, le suivi des écosystèmes et une meilleure connaissance de l'état présent, de leurs évolutions et de leurs services sont une priorité (*Hiernaux & Turner, 2002 ; Hountondji & al, 2003 ; Sawadogo, 2008*).

Les images satellitaires sont souvent la seule information crédible pour l'identification, le tracé et la cartographie du sol.

Le terme « Occupation du sol » a fait l'objet de plusieurs études dont celle de la *FAO, 1998*, « L'occupation du sol peut être succinctement défini comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées »

L'espace est sous la double influence du milieu physique et de l'activité humaine dans un environnement socio-économique déterminant. Donc, l'occupation du sol donne une illustration de cette «confrontation continue entre la société et son milieu » (*Burel & Baudry, 1999*), exprimant à un instant donné un état de ces relations qui impliquent des structures changeantes dans l'espace et dans le temps. La cartographie de l'occupation du sol offre un ensemble d'informations relatives à un temps « t » et à un endroit « x » déterminé. Ces informations caractérisent au mieux le milieu physique et son évolution spatio-temporelle. Donc, que ce soit pour l'agronome, le pédologue, le géologue, etc., la connaissance de l'occupation du sol, d'un territoire donné représente une information très importante pour la caractérisation, la gestion et la prévision a posteriori d'un schéma directeur d'aménagement des ressources naturelles.

II.2.1. Objectifs et démarche méthodologique

II.2.1.1. Objectifs

Si nous cherchons à effectuer un suivi multi date d'un phénomène, une analyse de la réponse directionnelle d'une surface quelconque du globe terrestre ou une comparaison entre des paramètres biophysiques et des cartes thématiques, il est généralement nécessaire d'utiliser des données fournies par le capteur LANDSAT 7 (*Bannari & al, 2004*). Nous nous attachons ici à montrer le potentiel de la télédétection pour caractériser l'occupation du sol de la zone d'étude et pour analyser son évolution spatio-temporelle à partir des traitements effectués sur trois images satellitaires de LANDSAT TM et ETM+ datant de 1987-2000 et 2009.

Les objectifs de notre recherche est la détection des changements de l'occupation du sol à partir de données satellitaires multi dates et de l'estimation générale de l'impact de ces changements sur la quantité des ressources en eau dans la zone d'étude.

La complexité des variations spatiales peut avoir d'importantes conséquences pour ceux qui veulent décrire l'environnement à un endroit donné, et plus particulièrement pour ceux qui veulent le contrôler (*Merlin, 2005*).

La méthode de comparaison diachronique de classifications a été utilisée, l'objectif principal est de bien tirer le maximum d'information de l'image et de rendre l'analyse et l'interprétation plus aisées. Ces résultats ont permis d'identifier l'évolution temporelle et spatiale de l'occupation du sol de la vallée pour une période de plus de vingt ans (de 1987 à 2009).

II.2.1.2. Méthodologie

Dans le contexte de gestion régionale, la télédétection est un outil privilégié. Elle permet l'acquisition de données régulièrement distribuées dans l'espace et le temps pour caractériser les surfaces continentales en termes d'occupation du sol.

La gestion des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement.

Les images satellitaires constituent un outil important dans la cartographie de l'occupation du sol ainsi que dans la planification et la gestion des ressources ; elles sont descriptives et apportent une information spatiale, beaucoup plus importante par rapport aux autres sources d'information (*Pouchin, 2001 in Benkrid, 2008*).

D'un point de vue économique, l'utilisation de la télédétection offre la possibilité de réduire les coûts d'obtention de l'information à l'échelle d'une région ou d'un pays.

Le processus d'interprétation, qu'il soit visuel ou automatique, transforme les données contenues dans l'image en éléments d'informations attachés à une localisation géographique.

La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement est l'étude multi-date (*Noyola-Medrano & al, 2013*).

Nous avons eu recours aux scènes LANDSAT TM et ETM+ ; p193r037 (*Fig.83*) des 07/01/1987- 02/11/2000 et 01/04/2009 confrontées a un travail de vérification de la réalité terrain, a fin d'effectuer l'analyse thématique du milieu et visualiser les changements produits.

Les capteurs TM (Thematic Mapper) et ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de LANDSAT5 et LANDSAT7 respectivement fournissent des scènes multispectrales (6 bandes multispectrales: ETM 1, 2, 3, 4, 5, 7, à 30 m) et une bande thermique (ETM 6 à 120 m). Le capteur ETM+ de LANDSAT 7 fourni également une bande panchromatique (la bande ETM 8) à 15 m de résolution spatiale. Ce nombre important de canaux nous a permis d'effectuer de multiples combinaisons trichromiques (compositions colorées) mettant en évidence les différents thèmes (*Sarr, 2009*). Elles permettent d'obtenir la meilleure discrimination visuelle des objets de l'image, laissant à l'analyste le soin d'interpréter les variations des tons et des couleurs qui traduisent des variations de faciès ou des états de surface (*Donnay, 2000*).

Chapitre 07 : Objectifs et démarche méthodologique

Celles-ci ont été choisies parce que dans un pixel d'ETM+, plusieurs catégories d'occupation des terres peuvent souvent être mêlées. (Pham & al, 2007) ainsi qu'elles sont source de données utiles en hydrogéologie (Chalifoux, 2006).

Selon Bardinnet (1994), le choix d'un système de télédétection dans l'étude de l'occupation du sol est crucial, il dépend du nombre et de l'intervalle des bandes spectrales, de la résolution au sol du pixel, du cycle d'enregistrement de données disponibles et de la superficie couverte par une seule image. (Benkrid, 2008).

Le logiciel utilisé pour le traitement numérique des images de télédétection est ENVI 4.7.

Le logiciel ENVI offre une très bonne visualisation des données et l'analyse des images ayant des tailles et des formats différents.

Les développeurs de ce logiciel sont des scientifiques qui participent actuellement aux recherches concernant la télédétection ; ce qui fait de lui un produit en développement perpétuel et qu'il soit ainsi enrichi par des fonctions multiples relatives à des problèmes et des thématiques variés.

En général, le logiciel dispose essentiellement de tous les outils nécessaires au traitement d'images dans différentes disciplines, et permet pour chacun d'implémenter sa propre stratégie d'analyse (Benmessaoud, 2009).

La méthodologie suivie repose sur l'utilisation des données de la télédétection pour une analyse spatiale et temporelle des causes et des facteurs intervenant dans le processus du changement de la surface de la région étudiée (Toumi & al, 2013).

La figure ci-dessous (Fig.84) synthétise notre étude qui s'articule autour de deux principales analyses : une analyse de l'occupation de sol et une analyse du changement à partir des classifications. Les résultats sont validés à travers le calcul d'une matrice de confusion.

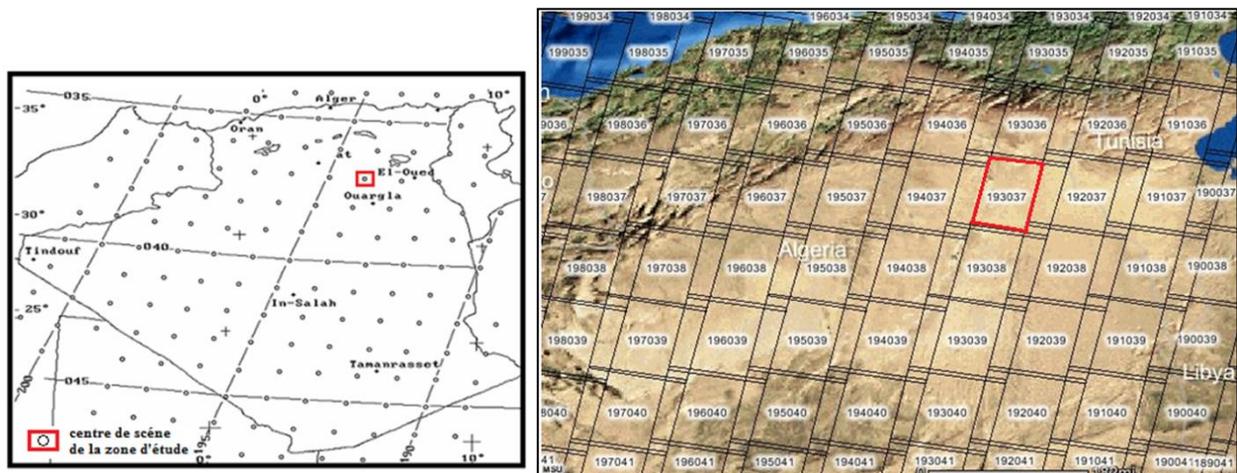


Figure 83: Les scènes ETM+ de LANDSAT (Bensaid, 2006)

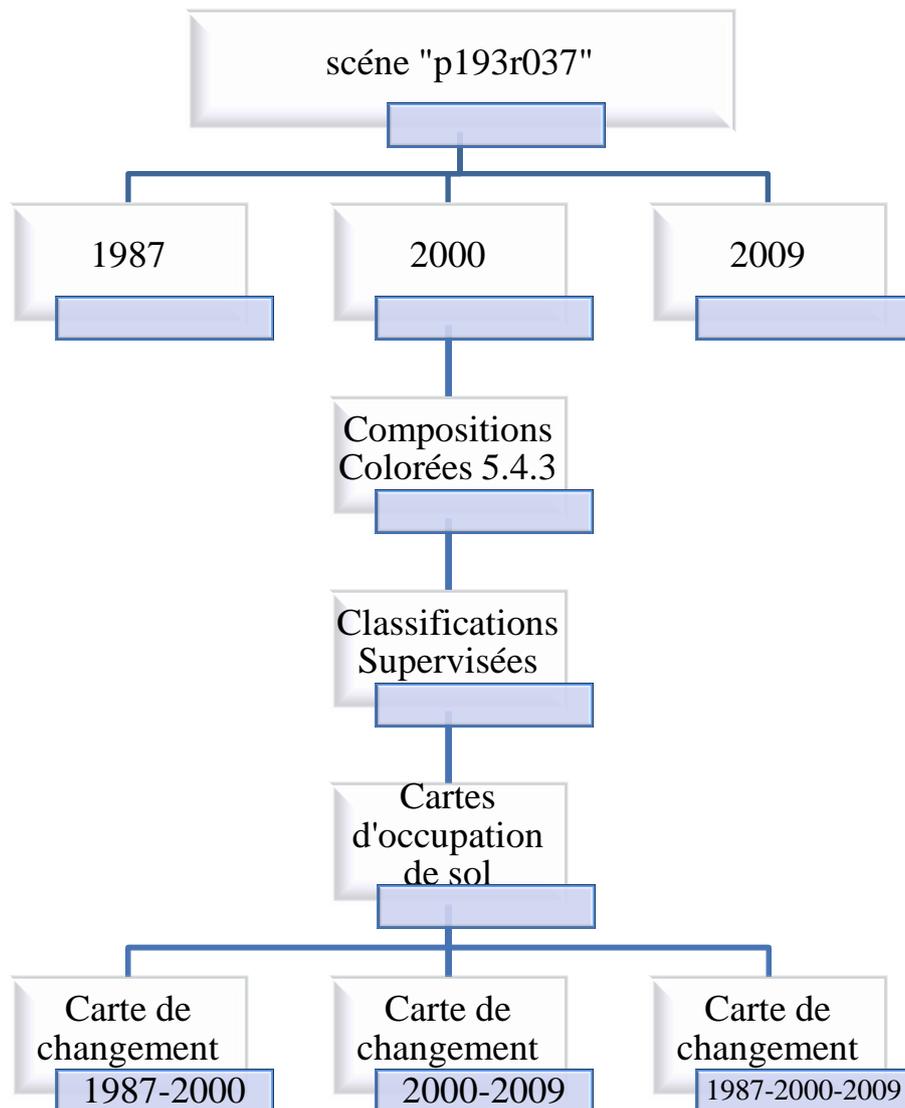


Figure 84: Organigramme global de la méthodologie suivie.

II.2.2. Traitements des images

Les techniques de traitement des images satellitaires permettent l'exploitation des données fournies par les capteurs multi bandes pour l'identification des différents thèmes de la couverture terrestre.

II.2.2.1. Traitements d'amélioration de la qualité ou de rehaussement

Nous avons appliqué des techniques de rehaussement afin de faciliter l'interprétation et l'analyse visuelle et mettant en évidence la plus grande partie de l'occupation des sols.

L'analyse de la signature spectrale des différents objets de l'occupation et de l'utilisation du sol est une étape importante pour le choix des canaux des scènes LANDSAT (Benmessaoud & al, 2009).

Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le filtrage spatial pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

Dans une image brute, les informations utiles sont souvent contenues dans un ensemble restreint de valeurs numériques parmi les valeurs possibles (256 dans le cas de données à 8 bits). Le rehaussement des contrastes se fait en changeant les valeurs initiales de façon à utiliser toutes les valeurs possibles, ce qui permet d'augmenter le contraste entre les cibles et leur environnement (*C.C.T*)

Nous avons préféré un rehaussement linéaire 2% parce qu'il a donné la meilleure qualité visuelle (*Fig.85*).

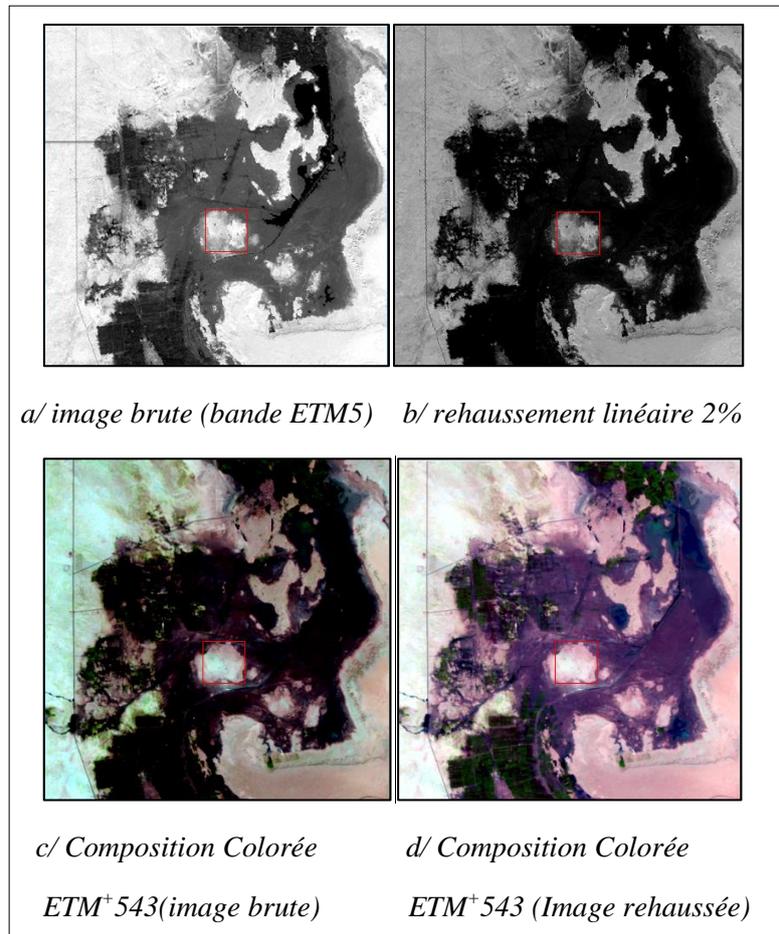


Figure 85: Traitements de rehaussement des images

II.2.2.2. Traitement thématique

II.2.2.2.1. Composition colorée

Les compositions colorées constituent certainement la forme de visualisation des images satellitaires la plus connue et l'une des plus spectaculaires. Conçues selon le même principe de la synthèse des couleurs, rassemblant de ce fait une grande quantité d'informations. Elles laissent cependant à l'observateur le soin d'interpréter visuellement les variations de couleurs, et constituent ainsi, pour l'analyse, un support analogique privilégié, au même titre qu'une photographie en couleurs, et selon une forme très semblable (*Donnay, 2000*).

Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets (*CCT*).

Selon les applications, on peut être amené à effectuer différentes compositions colorées:
- Soit des compositions que l'on appelle « **vraies couleurs** » si l'on veut rendre les images

Chapitre 07 : Objectifs et démarche méthodologique

réalistes. C'est ce que nous observerions si nos yeux étaient à la place du capteur satellitaire. - Soit des compositions « **fausses couleurs** », qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image, à l'instar des images infrarouges fausses couleurs très utilisées pour l'étude de la végétation. Dans tous les cas, les compositions colorées vont générer un très grand nombre de couleurs.

Afin de pouvoir manipuler correctement les couleurs, il est indispensable de disposer de moyens standards pour choisir une couleur parmi toutes celles disponibles (*Tableau 30*).

Tableau 30: Caractéristiques des bandes spectrales ETM+ de LANDSAT (Bensaid, 2006)

Canaux	Caractéristiques et équivalences
1	Bleu-vert, pas d'équivalence avec MSS. Maximum de pénétration d'eau, qui est utilisé pour la cartographie bathymétrique dans les eaux peu profondes et aussi à différencier le sol de la végétation.
2	Vert, coïncidence avec MSS-4. Présence des pics de réflectances vertes de la végétation, utilisé pour la détermination des plantes vigoureuses.
3	Rouge, coïncidence avec MSS5. Il met en évidence la bande d'absorption chlorophyllienne qui est importante pour la discrimination des types de végétations.
4	Proche Infrarouge, coïncidence avec des portions des bandes MSS6 et MSS7. Utilisable pour déterminer la contenance de la biomasse et pour la cartographie littorale.
5	Proche Infrarouge, pas de correspondance avec MSS. Il indique la teneur en humidité du sol et de la végétation. Elle traverse les nuages minces. Un bon contraste entre les types de végétations.
6	Infrarouge thermique. Les images prise de nuit sont utilisées pour la cartographie thermique et pour l'estimation de l'humidité du sol.
7	Proche Infrarouge, coïncidence avec la bande d'absorption causée par les ions hydroxydes des minéraux. Les rapports des canaux 5 et 7 sont utilisés pour la cartographie des roches altérées par le phénomène hydro-thermique ainsi que les dépôts minéraux.

La visualisation des images est une étape importante. Cette étape consiste à faire une synthèse de toutes les informations contenues dans les trois canaux du satellite afin d'obtenir une image visible pour l'œil humain. Cette composition colorée est obtenue par une synthèse chromatique des trois couleurs additives, rouge, bleu, vert, associée à un canal de l'image. Le changement de la combinaison des bandes peut produire une différence significative au niveau de l'apparence et de l'information contenue dans l'image (*Bonne & Rochon, 1992 ; Foody, 2002*).

L'interprétation visuelle des images satellitaires associe l'utilisation des méthodes assistées par ordinateur.

Ces dernières, avec les différents algorithmes dont on dispose dans le logiciel de traitement d'images, permettent de caractériser les principaux objets présents: sols, végétation, eau, par exemple, d'une manière automatique grâce au comportement spectral qui les caractérise (*Girard, 1995*).

Pour notre étude une composition colorée issue de l'association des canaux 5-4-3 a été retenue car elle a donné le maximum d'information.

II.2.2.2.2. Procédure de traitement par classification supervisée

Parmi les principaux avantages de la télédétection satellitaire est la possibilité de fournir des observations de la terre en fonction du temps.

Pour l'extraction de l'information thématique des images, la classification s'avère un outil incontournable. Elle consiste à réaliser une partition de l'image en régions repérées par différentes étiquettes (*Iddir-Zait & Smara, 2005*). C'est le partitionnement de l'image en régions homogènes appelées classes. Le principe général est de faire correspondre les pixels à une classe qui définit le type d'occupation du sol.

Ainsi, à partir d'un espace multidimensionnel représentatif de l'image, une nouvelle représentation de l'information télé détectée, désignée par « carte thématique » est obtenue et sera évaluée par rapport à la réalité de terrain. Les approches de classification peuvent être supervisée ou non supervisée.

Dans la méthode supervisée, des connaissances préalables, ou acquises concernant les éléments de la scène sont nécessaires. Des échantillons de terrains sont utilisés pour estimer et identifier les caractéristiques spectrales de chaque classe. Ceci permettant de se baser sur des parcelles d'entraînement (parcelles servant à déterminer les caractéristiques spectrales des classes d'objet recherchées) et des parcelles vérité (servant à vérifier par comparaison la qualité de la classification effectuée).

Ce type de classification permet de faire apparaître des phénomènes présentant des particularités difficiles à repérer et d'utiliser un nombre de bandes spectrales supérieur à celui figurant sur les compositions colorées. Elle fournit directement une cartographie définitive en couleurs conventionnelles par pixel donnant le maximum d'information. (*Mequignon & al, 2005*). Son but est de simplifier la réalité d'un paysage pour pouvoir l'interpréter plus facilement.

La classification est le noyau essentiel, la plupart des méthodes développées s'articulant autour de la classification des images. Le résultat de la classification, permet d'obtenir le plan d'occupation du sol (*Ducrot, 2005*).

Plusieurs méthodes de classification ont été développées à savoir Mahalanobis, Maximum Likelihood, barycentrique (*Richards, 1990*), Spectral Angle Mapper (*Kruse & al, 1993*) et la classification par réseau neuronaux (*Lippmann, 1987*).

Dans le cadre de notre étude c'est la méthode dite du Support Vector Machine (SVM), initiées par **Cortes & Vapnick en 1995** qui a été la plus fiable. Les récentes recherches dont des études comparatives indiquent un fort potentiel de la classification par Machines à Vecteurs de Support (ou Séparateurs à Vastes Marges) et ont montré que cette méthode pouvait être plus probante que les techniques habituelles (comme la méthode des réseaux neuronaux ou les arbres de décision) et les classificateurs probabilistes traditionnels (tel que le maximum de vraisemblance) (*Hammad, 2016*). Elle fournit directement une cartographie définitive en couleurs conventionnelles par pixel (*Mequignon, 2005*). Des échantillons de terrains sont utilisés pour l'échantillonnage de vérification (des vérités terrain) nécessaire pour valider les résultats de ces classifications par les matrices de confusion.

Il est possible de comparer un paysage à différentes dates, ou d'en suivre l'évolution à plus long terme (*El Garouani & al, 2008*).

Chapitre 07 : Objectifs et démarche méthodologique

Les études sur le changement de l'occupation du sol sont d'une grande importance car ils permettent de connaître les tendances actuelles d'évolution d'un phénomène d'une région déterminée (*Lambin & al, 2001*).

La procédure la plus efficace pour mesurer le degré de changement de l'environnement est l'étude multi-date. C'est pourquoi, dans ce travail, nous proposons d'évaluer le changement à partir de l'analyse diachronique des images.

L'analyse diachronique mesure l'ampleur des modifications du paysage dues à la dégradation des ressources naturelles et met en évidence la localisation des plaques de sols (*Zombre, 2006*).

Une méthode de comparaison des classifications a été choisie pour détecter les changements de l'occupation du sol sur une période de 22 ans ((1987-2000) (2000-2009) & (1987-2000-2009)). Le principe de cette méthode est basé sur la classification des scènes acquises à différentes dates. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite le changement.

Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement (*Yuan & al, 2005*). Elle permet aussi de mieux appréhender l'évolution de l'état de surface et par conséquent de mieux interpréter les phénomènes liés à la modification de l'environnement (*Chitroub, 2004*). Elle fournit en général de bons résultats dans la production des documents cartographiques.

Malheureusement, pendant les dernières décennies, l'être humain est le principal déclencheur de la transformation des écosystèmes (*Vitousek & al, 1997*).

Chapitre 08:

RESULTATS ET DISCUSSION

II.3. Chapitre 08 : Résultats et discussion

II.3.1. Analyse des compositions Colorées

Parmi les méthodes citées au chapitre 6, nous avons retenu celle de la combinaison des bandes ETM+ 5 ETM+ 4 et ETM+3 affichées en rouge, vert et bleu respectivement, fortement conseillée par les ouvrages spécialisés de télédétection (*Girard & Girard, 1999*).

Cette trichromie permet également une bonne séparation des eaux temporaires vis à vis des autres systèmes d'occupation du sol, et une bonne discrimination visible entre les végétaux, les plans d'eau et les principaux systèmes d'occupation du sol de la zone d'étude (*Fig.88(A), (B), (C)*). Ces états de surface ainsi discriminés ont servi pour l'étape décisive d'échantillonnage des classes, essentielle pour la classification supervisée.

La classification supervisée constitue la meilleure méthode d'extraction automatique des états de surface (*Ducrot, 2005*) ce qui la rend un procédé de choix pour répondre au besoin de leur cartographie automatique (*Hammad, 2016*).

L'analyse visuelle des compositions colorées des images LANDSAT TM et ETM+, a permis de repérer les différentes évolutions dans le temps (1987-2000-2009) du nombre des agglomérations.

La figure 87 témoigne la forte demande en eau où on note le nombre de forage augmenté d'une façon exponentielle entre les deux situations. Ce phénomène est engendré par la forte utilisation des eaux pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et en eau industrielle. Cependant l'exploitation anarchique des eaux a provoqué l'augmentation des volumes d'eaux usées rejetées dans la nature

Pour comprendre cette évolution, nous devons revenir sur l'histoire des prélèvements dans les nappes (*cf. chapitre 4*). L'augmentation du nombre de forages (*Fig.86*) et de leur régime d'exploitation indique des croissances vertigineuses en matière de quantité d'eau au cours des vingt dernières années.

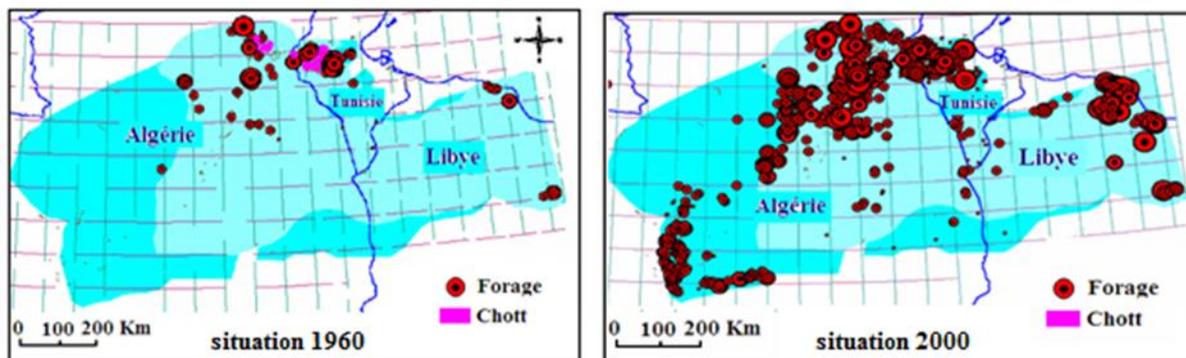


Figure 86: Répartition des forages dans le système aquifère du Sahara septentrional pour les années 1960 et 2000 (*Boussaâda, 2007*)

Au Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye), les prélèvements qui étaient de $0,79.10^9 \text{ m}^3$ en 1970, ont connu une brusque accélération au cours des années 1980 et atteignent $2,5.10^9 \text{ m}^3$ en 2000. Ce qui est conforme aux prévisions du projet **ERESS (1972a)** qui envisageait une croissance des prélèvements de $0,75.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ en 1970 à $1,8$ ou $2,5.10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ en 2000 (d'après les scénarios), soit un déstockage d'environ 30 à 40 milliards de mètres cubes.

Notons, par ailleurs, qu'en maintenant les prélèvements de l'année 2000 jusqu'en 2050, le projet SASS prévoit un déstockage, à l'horizon 2050, d'un volume de 83 milliards de mètres cubes (Oued Baba Sy, 2005).

L'intense évolution de l'exploitation des aquifères (Fig.87) a profondément modifié la vision que l'on peut désormais se faire de cette exploitation, laquelle se trouve confrontée à un certain nombre de risques majeurs, du simple fait de son développement : salinisation des eaux et des sols (confirmé par l'évolution des sols salés dans la zone d'Oued Righ, disparition de l'artésianisme, tarissement des exutoires, hauteurs de pompage excessives...etc).

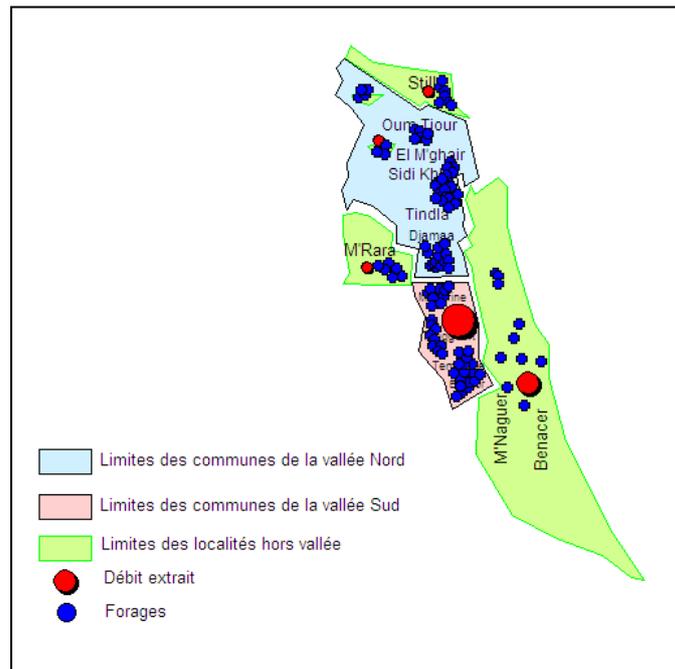


Figure 87: Limites, exploitation et intensité des forages de la vallée d'Oued Righ

D'après les images des compositions colorées on aperçoit que les zones humides ont aussi considérablement évolué (Fig.88(A), (B), (C)), les sols étaient plus au moins humide en 1987 mais à partir de l'an 2000 on remarque l'apparition des plans d'eau à la surface.

Ainsi la végétation apparaît en vert tandis que les sols humides en gris, la présence d'eau est matérialisée par la couleur bleue (plus ou moins foncée ou claire selon que l'eau est en forte ou en faible concentration).

Malheureusement, la visualisation du cours d'eau (canal d'Oued Righ) est moindre dans des endroits de la région puisqu'il s'élargi rarement et est confondu avec les palmeraies (de part et d'autre du canal ainsi que la présence de roseaux sur les berges).

Cependant, les compositions colorées ont été utilisées comme documents d'interprétation visuelle de départ afin de guider les traitements numériques ultérieur.

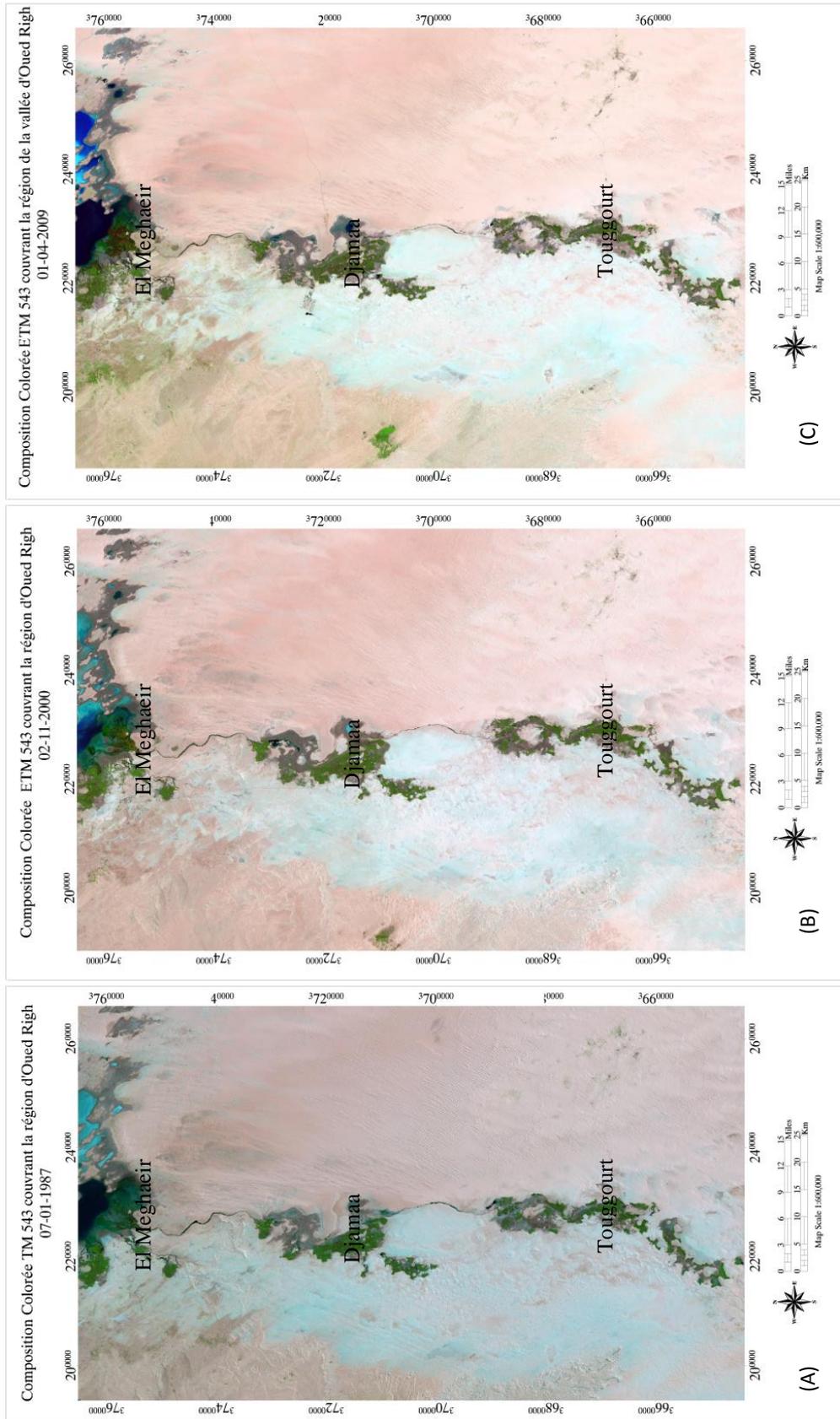


Figure 88: (A), (B), (C)- Compositions colorées 543 de la vallée d'Oued Righ

II.3.2. Analyse des classifications

Les résultats de la classification dépendent largement de la date d'acquisition de l'image, du type d'occupation du sol, de la taille des parcelles et de la topographie du terrain. La précision de cette cartographie est fonction de la procédure d'échantillonnage du terrain et de la façon dont les données de terrain et celles de télédétection sont associées.

Cependant, le nombre d'images satellite et les dates d'acquisition représentent les éléments clé pour mieux cartographier une région donnée (*Bouzaffour & al, 2003*).

II.3.2.1. Validation de la classification

Il s'agit d'une généralisation des résultats en regroupant tous les pixels d'une image qui ont les mêmes caractéristiques spectrales et texturales (*Toumi & al, 2013*).

L'évaluation des résultats obtenus par classification se fait en général par comparaison à des données de terrain. Parmi les indicateurs statistiques les plus utilisés de la performance d'une classification est la matrice de confusion.

La matrice de confusion donne une évaluation de la précision globale de la cartographie et des résultats de classification pour chacune des classes thématiques.

L'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre les résultats obtenus (carte) et la vérité sur le terrain. Il s'étend de 0 à 1 et il se divise en cinq catégories : (*Chalifoux, 2006*).

- ❖ Accord très faible de 0 à 0,20 ;
- ❖ Accord faible de 0,21 à 0,40 ;
- ❖ Accord modéré de 0,41 à 0,60 ;
- ❖ Accord substantiel de 0,61 à 0,80 ;
- ❖ Accord presque parfait de 0,81 à 1.

L'évaluation de nos résultats à partir des matrices de confusion, nous permet de constater que les précisions des classifications sont de bonne qualité avec un accord presque parfait entre le résultat et la vérité sur terrain.

Dans une étude de l'occupation des sols, lorsque l'indice de Kappa évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75 %, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés. Dans la présente étude, l'indice de Kappa est supérieur à 90%. Les différents résultats d'évaluation des images classifiées par la méthode de la classification supervisée sont donc validés. De ce fait, nos classifications qui compte dix classes est acceptable et permet d'évaluer la tendance de changements de l'occupation du sol dans une période de 22 ans (*Soro & al, 2014*).

Ces différents traitements effectués ont abouti à la réalisation de cartes de l'occupation de sols (*Fig.89*), ce qui permet le suivi et l'identification des composants de l'espace.

Les surfaces terrestres évoluent continuellement, soit sous l'action de l'Homme, soit naturellement en fonction du cadre physique constitué par le climat, les sols, la végétation, l'eau, l'air.

II.3.3. Dynamique de l'occupation du sol

Les systèmes d'information mélangent souvent occupation et utilisation des sols. L'occupation du sol (OS) est définie comme une description du couvert biophysique du sol, par exemple la végétation et l'eau (*Di Gregorio & Jansen, 1997 ; Chalifoux, 2006*). Les superficies urbanisées y sont décrites en termes d'utilisation des sols.

L'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (*Foody, 2002*). Elle a des effets sur le cycle biogéochimique (*Penner, 1994*), ainsi que sur le développement durable (*Douglas, 1999*). Cette importance en fait est une thématique incontournable dans la plupart des inventaires cartographiques et de suivi des phénomènes environnementaux (*Ouattara, 2006*). La thématique peut être obtenue par le biais de plusieurs techniques et méthodes, dont la télédétection.

Les classes d'occupation et d'utilisation des sols sont des unités analytiques qui permettent d'établir un premier lien quantitatif entre les activités humaines, leurs répercussions sur l'environnement, et la dimension géographique (spatiale). Les informations concernant l'évolution de l'occupation/utilisation des sols intègrent la dimension temporelle.

Ces données présentent un intérêt majeur pour les scientifiques qui découvre les causes sous-jacentes et les conséquences du changement global (*Lecerf, 2008*).

En règle générale, les évolutions de l'occupation et l'utilisation des sols sont réparties en deux grandes catégories : la conversion et la modification (*Stott & Haines-Young, 1996 ; Alun & Clark, 1997 ; Lecerf ; 2008*) :

- **La conversion** fait référence au basculement de l'une des classes d'occupation ou d'utilisation à une autre (exemple : de la palmeraie à une agglomération).
- **La modification** représente une évolution à l'intérieur d'une classe (exemple : d'une zone sèche à une zone humide).

L'Homme tient actuellement une place prépondérante au niveau des changements d'occupation des sols puisqu'il contrôle la majeure partie des surfaces terrestres. Entre un tiers et la moitié des surfaces terrestres ont été transformées par l'Homme.

II.3.3.1. Occupation du sol

L'organisation de l'espace est sous la double influence du milieu physique et de l'activité humaine dans un environnement socio-économique déterminant. Donc, l'occupation du sol donne une illustration de cette «confrontation continue entre la société et son milieu » (*Burel & Baudry, 1999*), exprimant à un instant donné un état de ces relations qui impliquent des structures changeantes dans l'espace et dans le temps. Pour cela, l'étude et la cartographie de l'occupation du sol sont nécessaires pour la compréhension de cette confrontation ainsi que dans l'étude interdisciplinaire de la dynamique socio-économique et son impact sur le milieu naturel. D'autre part, la cartographie de l'occupation du sol offre un ensemble d'informations relatives à un temps « t » et à un endroit « x ». Ces informations caractérisent au mieux le milieu physique et son évolution spatio-temporelle. Donc, que ce soit pour l'agronome, le pédologue, le géologue, etc..., la connaissance de l'occupation du sol, d'un territoire donné représente une information très importante pour la caractérisation, la gestion et le développement durable des ressources naturelles.

Chapitre 08 : Résultats et discussion

Dans cette étude, la réalisation de la carte d'occupation du sol représente une phase importante dans l'élaboration des cartes de changements.

Dix unités d'occupation des terres ont été retenues à Oued Righ, Il s'agit de : l'eau- eau salée saturé- sols humides- sels- sols salés secs- palmeraies- végétations- sables- grés rouges et agglomérations.

Les classes sont définies à partir des besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image (Ducrot, 2005).

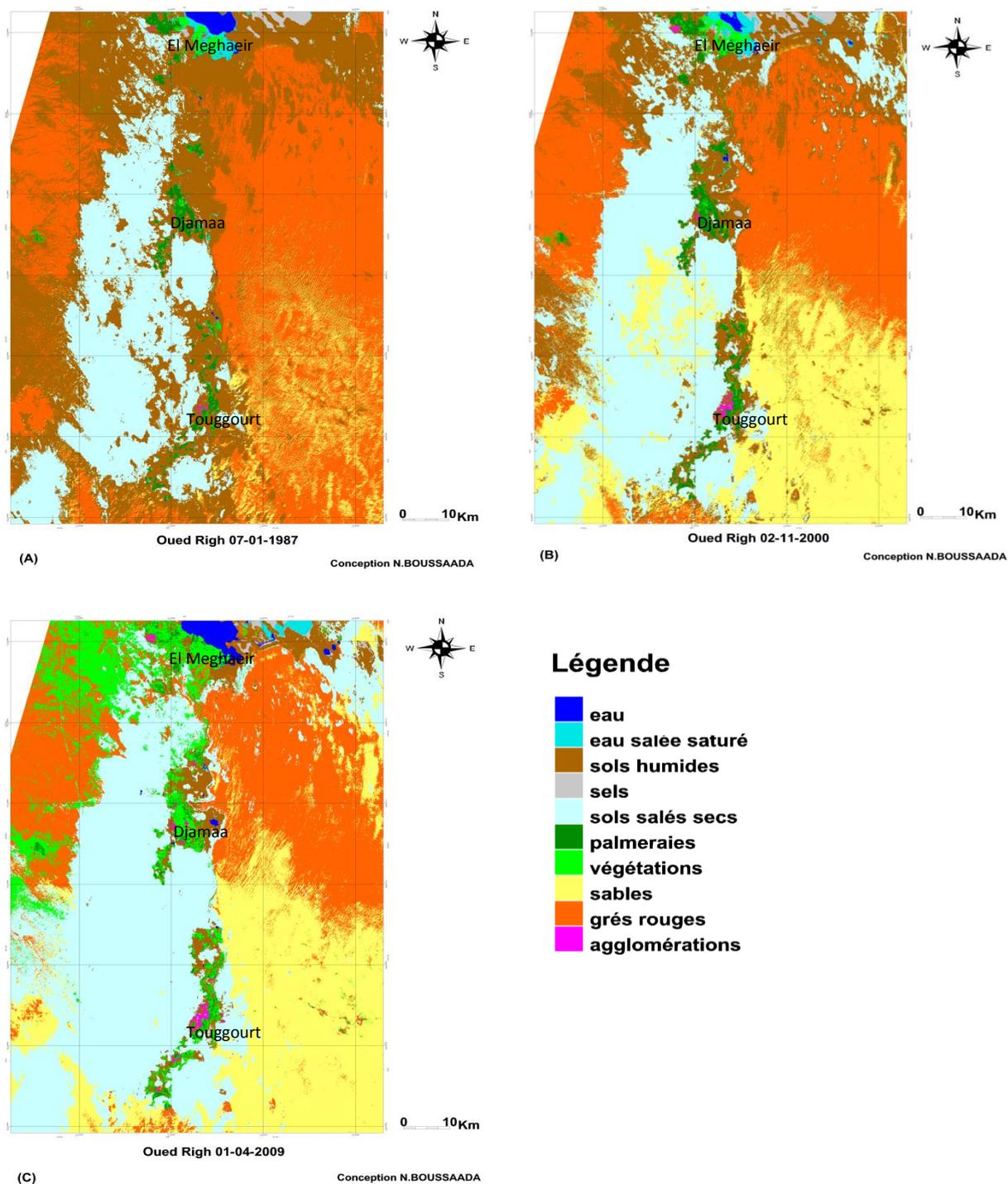


Figure 89: (A), (B), (C)-Cartes d'occupation des sols en 1987-2000 et 2009

II.3.3.2. Quantification du taux de changement

Afin d'exposer l'évolution de chaque classe d'occupation du sol au cours des 23 années (87-2000), nous avons utilisé la variation de la même classe aux différentes dates. Cette transformation nous a permis d'extraire les zones « stables », de « régression » et de « progression » de cette classe.

Considérant T1 l'ensemble de pixels à la date 1 (1987), T2 l'ensemble de pixels pour la date T2 (2000) et T3 l'ensemble de pixels pour la troisième date (2009) (*Tableau 31 & 32*).

Nous avons calculé les taux de changement entre les dates : 1987 – 2000 (T2 – T1), 2000 - 2009 (T3 – T2) et 1987-2009 (T3 – T1) à travers l'équation proposée par la FAO (1996) couramment employée afin de montrer l'évolution des classes entre deux périodes données (*Mama & Oloukoi, 2003 ; Oloukoi & al, 2006 ; Soro, 2014, Kpedenou & al, 2016*).

$$Tc = \frac{T2 - T1}{T1} \times 100$$

Avec :

T1 : Ensemble de pixel correspondant à l'année 1 (dans notre cas 1987)

T2 : Ensemble de pixel correspondant à l'année 2 (correspondant à l'année 2000)

TC : Taux de changement entre deux années d'observation.

II.3.3.2.1. Analyse et évolution spatio-temporelle de l'occupation des sols entre 1987 – 2000

L'analyse diachronique souligne des évolutions contrastées selon les occupations du sol (*Fig.90*).

D'une situation dominante en 1987 (35 % de la superficie du site), les sols humides n'occupent que 18 % en 2000 plus, soit 1913 km². Cette réduction de la superficie d'environ (47 %) serait imputable à la forte évaporation (*Fig.91*).

Autres forts changements, notamment, la classe de l'agglomération (12% en 2000 au lieu de 0.03% en 1987) ; ceci est expliqué par la croissance démographique d'une année à l'autre.

L'extension des palmeraies passe de 113 km² en 1987 à 156 km² en 2000 soit un changement de 38% dans une période de 13 ans.

Par ailleurs, les sols à texture sableuse passent de 563 km² à 2371 km², mis en valeur la mobilisation des éléments fins.

Autres classes qui montrent des forts changements sont la classe des eaux et la classe des sels (*Tableau 31*). Une telle diminution des plans d'eau et l'accroissement du taux des sels à la surface résulte à la fois en réalité à la date de prise de vue (Janvier 1987 –Novembre 2000), à la faiblesse des précipitations et le taux d'évaporation intense.

Les taux de changement entre les surfaces des classes d'occupation du sol entre les deux dates sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Les valeurs positives représentent une progression de la surface de la classe pendant la période analysée et les valeurs négatives indiquent la perte de surface d'une classe entre les

deux dates. Les valeurs proches de zéro nous indiquent que la classe reste relativement stable entre les deux dates.

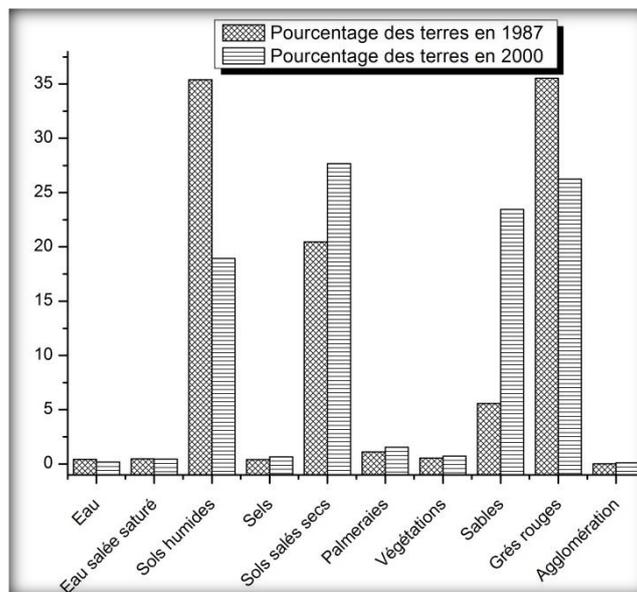


Figure 90: Evolution selon l'occupation de sol entre 1987-2000.

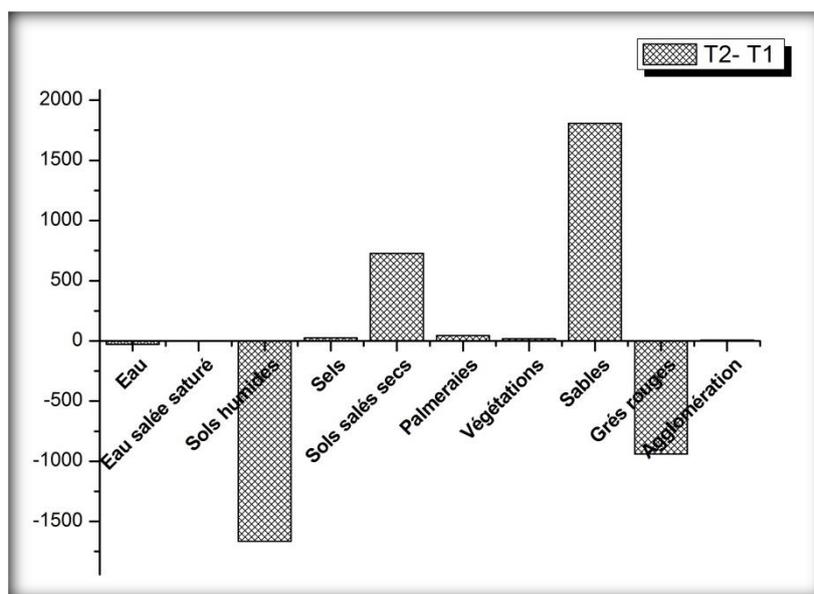


Figure 91: Variation des nombre de pixels entre 1987-2000.

Chapitre 08 : Résultats et discussion

Tableau 31: Changement d'occupation du sol entre 1987 et 2000. T1 = surface à la date 1 ; T2 = surface à la date 2 ; Tc1 = taux de changement entre les dates 1987 et 2000.

classes	1987		2000		T2-T1	Tc1
	Surface en km ²	pourcentage	Surface en km ²	pourcentage		
Eau	44.74	0.44	17.84	0.18	-26.91	-0.60
Eau salée saturé	47.84	0.47	45.84	0.45	-1.71	-0.025
Sols humides	3577.61	35.39	1913.77	18.93	-1663.84	-0.47
Sels	42.05	0.42	67.84	0.67	25.79	0.61
Sols salés secs	2069.10	20.47	2795.80	27.66	726.7	0.35
Palmeraies	113.34	1.12	156.67	1.55	43.33	0.38
Végétations	55.26	0.55	73.65	0.73	18.39	0.33
Sables	563.13	5.57	2371.68	23.46	1808.55	3.21
Grés rouges	3592.94	35.54	2653.92	26.25	-939.02	-0.26
Agglomération	3.58	0.03	11.76	0.12	8.18	2.28
Total	10108.77	100	10108.77	100		

II.3.3.2.2. Evolution de l'occupation des sols entre 2000 – 2009

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2009 (Tableau 32) montre un accroissement des surfaces des agglomérations pendant de 09 ans (soit une progression de 67 %).

La croissance de la population engendre d'importants problèmes environnementaux (rejet d'eaux usées directement dans nature, pollution, salinisation des sols....etc)

Le site est caractérisé par un déclin important des palmeraies (Fig.92) (62km² en 2009 contre 156km² en 2000, soit une diminution de 60 %).

La diminution des palmeraies (Fig.93) est expliquée par la hausse importante de la classe des eaux (soit plus de 64km²), ceci est dû aux rejets domestiques et des eaux de drainage dans la nature, par conséquent la mort du palmier dattier par asphyxie. Dans certaines zones, il y a un nombre élevé de forages, parfois à moins de 15 mètres l'un de l'autre. La nappe est alors rabattue d'une façon remarquable.

Apparaît nettement la progression des sols salés, explicable tout d'abord par le climat hyper aride (la très forte évaporation), ainsi que par la qualité des eaux d'irrigation.

L'irrigation se fait par les eaux de la nappe du complexe terminal (CT) et/ou de complexe intercalaire (CI). La méthode d'irrigation pratiquée est par submersion. Les doses et les fréquences d'irrigation varient d'une exploitation à une autre et dépendent aux divers critères, et ne répondent pas aux besoins des plantes (Palmier dattier et des cultures sous-jacentes), mais restent souvent liées aux disponibilités en eau au niveau des parcelles. La fréquence est d'une fois chaque 15 jours en hiver et une fois par semaine en été.

Chapitre 08 : Résultats et discussion

Le réseau d'irrigation, est constitué de seguias (rigoles); ce qui provoque une perte en eau par infiltration et évaporation importante, estimée presque 30 % du débit total mobilisé (Koull & al, 2013).

Ce qui a aggravé encore plus le problème de salinité des sols dans cette région c'est l'utilisation des eaux salées pour l'irrigation avec un drainage défectueux (apparition de la végétation sur les berges ce qui bloque le drainage des eaux (cf. chapitre 04) qui n'est pas suffisant pour le lessivage des sels solubles en excès dans le sol, car le lessivage se fait avec des eaux trop chargées donc on a un apport des sels au même temps du lessivage.

Cette période est marquée par une baisse des sols humides (Fig.93) (1913.77 Km² en 1987 contre 454.89 en 2000 soit une diminution de 76%), résultat de l'augmentation des plans d'eau.

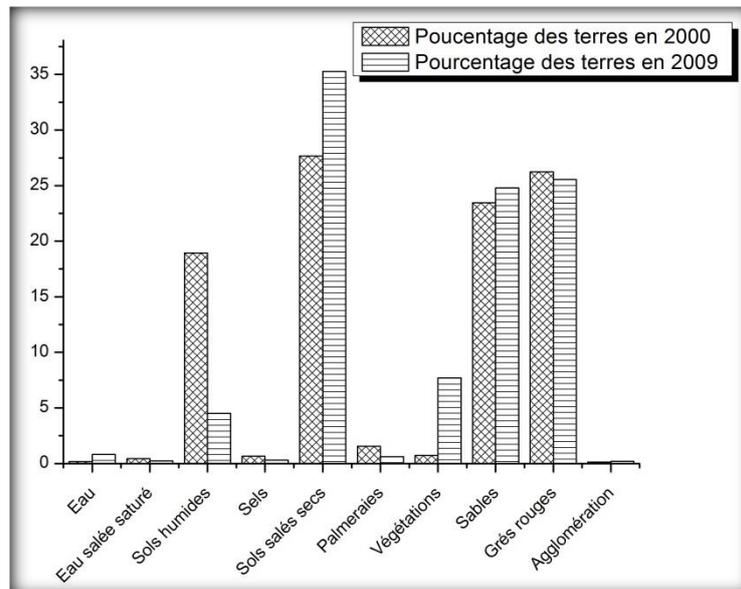


Figure 92: Evolution selon l'occupation de sol entre 2000-2009.

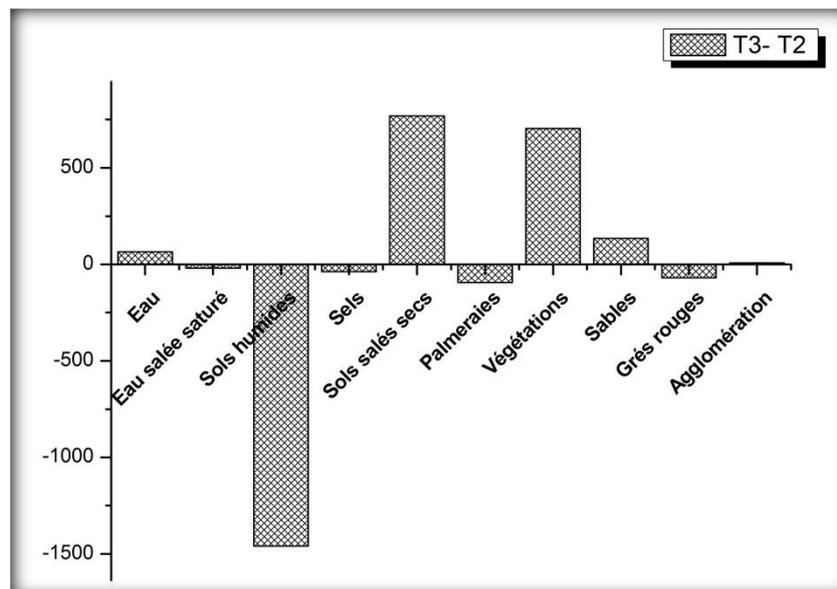


Figure 93: Variation des nombre de pixels entre 2000-2009.

Chapitre 08 : Résultats et discussion

Tableau 32: Changement d'occupation du sol entre 2000 et 2009. T2 = surface à la date 2 ; T3 = surface à la date 3 ; Tc2 = taux de changement entre les dates 2000 et 2009.

classes	2000		2009		T3-T2	Tc2
	Surface en km ²	pourcentage	Surface en km ²	pourcentage		
Eau	17.84	0.18	82.62	0.82	64.78	3.63
Eau salée saturé	45.84	0.45	25.63	0.25	-20.21	-0.44
Sols humides	1913.77	18.93	454.89	4.50	-1458.88	-0.76
Sels	67.84	0.67	29.41	0.30	-38.43	-0.57
Sols salés secs	2795.80	27.66	3565.20	35.27	769.4	0.28
Palmeraies	156.67	1.55	62.82	0.62	-93.85	-0.6
Végétations	73.65	0.73	777.94	7.69	704.29	9.56
Sables	2371.68	23.46	2506.62	24.80	134.94	0.06
Grés rouges	2653.92	26.25	2584.02	25.56	-69.9	-0.03
Agglomération	11.76	0.12	19.62	0.19	7.86	0.67
Total	10108.77	100	10108.77	100		

II.3.3.2.3. Bilan final de l'évolution de l'occupation du sol (1987-2000-2009)

Comme de nombreuses régions arides, la région d'étude, est confronté à une situation de forte pression sur la ressource en eau (démographie croissante, développement socio-économique et extension des périmètres irrigués). La présence de l'eau à la surface est l'indicateur le plus pertinent pour évaluer les changements entre plusieurs dates.

La régression de certaines classes est compensée par une progression dans d'autres. Cette remarque vaut également lorsque l'on établit la synthèse des changements entre les années. L'eau connaît des compensations entre progression et régression, correspondant en réalité à une régression dans la première période et à une progression dans la deuxième période.

La surface de l'eau présente des fluctuations, notamment l'augmentation pour l'année 2009. En 2009 (82.62 km²), il y a à peu près deux fois plus d'eau qu'en 1987 (44.75 km²) et quatre fois plus en 2000, soit un gain de 64.78 km² (Fig.94 (A), (B), (C)). Une explication à ce constat est que la surexploitation, la multiplication des forages, les pompes intensives, les drainages insuffisants et les rejets des eaux usées engendrent certains problèmes particuliers tels que la remontée du niveau hydrostatique de la nappe phréatique.

D'après les témoignages des gens de Touggourt ce phénomène a été observé aussi au niveau des cimetières où l'eau a empêché les gens de creuser dans certaines zones de ces cimetières.

Cela peut être aussi expliqué par le fait que durant cette période (1987) le nombre de la population installée dans la localité n'était pas aussi important qu'il en est de nos jours.

Il est important aussi de signaler que durant les années 80, l'Algérie avait été traversé par une longue vague de sécheresse.

La classe de l'agglomération a connu l'augmentation la plus importante. Cette augmentation paraît excessive (cinq fois de plus par rapport à l'année 1987 et un peu moins de deux fois pour l'année 2000). Le nombre de la population est marqué par une augmentation spectaculaire entre 1987 et les années 2000 (*cf. chapitre 1*). Qui de 203 087 personnes atteint en 1987 et 280 824 personnes en 1998 (*Kouzmine, 2005*), pour dépasser les 356 479 personnes en 2005 (*D.P.A.T, 2005*).

La population, constitue à la fois, l'objet et le but de toute action de gestion des eaux. Sa répartition, sa densité et son évolution déterminent et guident l'action de celle-ci.

Ces importants changements dans le nombre des populations (agglomérations) peuvent être expliqués en réalité par le développement des infrastructures.

On remarque une diminution du territoire occupé par les sols humides (3577.61 km² en 1987 à 1913.77 Km² en 2000 puis 454.89 Km² en 2009).

Ces variations pourraient être attribuables soit à l'intensité de l'évaporation (hausse des températures) ainsi que la transformation de ces sols en flaques d'eau.

En 2000 et 2009, la végétation représentée par un maquis, augmente nettement (*Fig.94 (A) & 94 (B)*). Cette dernière est explicable par le fait que ces végétaux poussent en présence de grandes quantités d'eau. On constate que les activités humaines (rejet des eaux directement dans la nature) contribuent à augmenter notablement leur densité (maquis).

Cependant, l'augmentation de ce milieu peut également être liée à l'incertitude de la classification. La difficulté à discriminer visuellement les classes peut être due à des signatures spectrales similaires. C'est ce qui explique que les eaux se confondent avec la végétation due à la présence conjointe de ces deux états.

La diminution des palmeraies est expliquée

Un des faits marquants dans la dynamique de l'occupation est la diminution des zones des palmeraies à partir de l'année 2000.

Cette régression des zones de palmeraies, est le fait combiné de la mauvaise évacuation des de drainage et d'assainissement. D'autre part, la salinisation des eaux et des sols entraînant une stérilisation des sols.

Les signes les plus visibles de la dégradation des sols sont l'accumulation des sels.

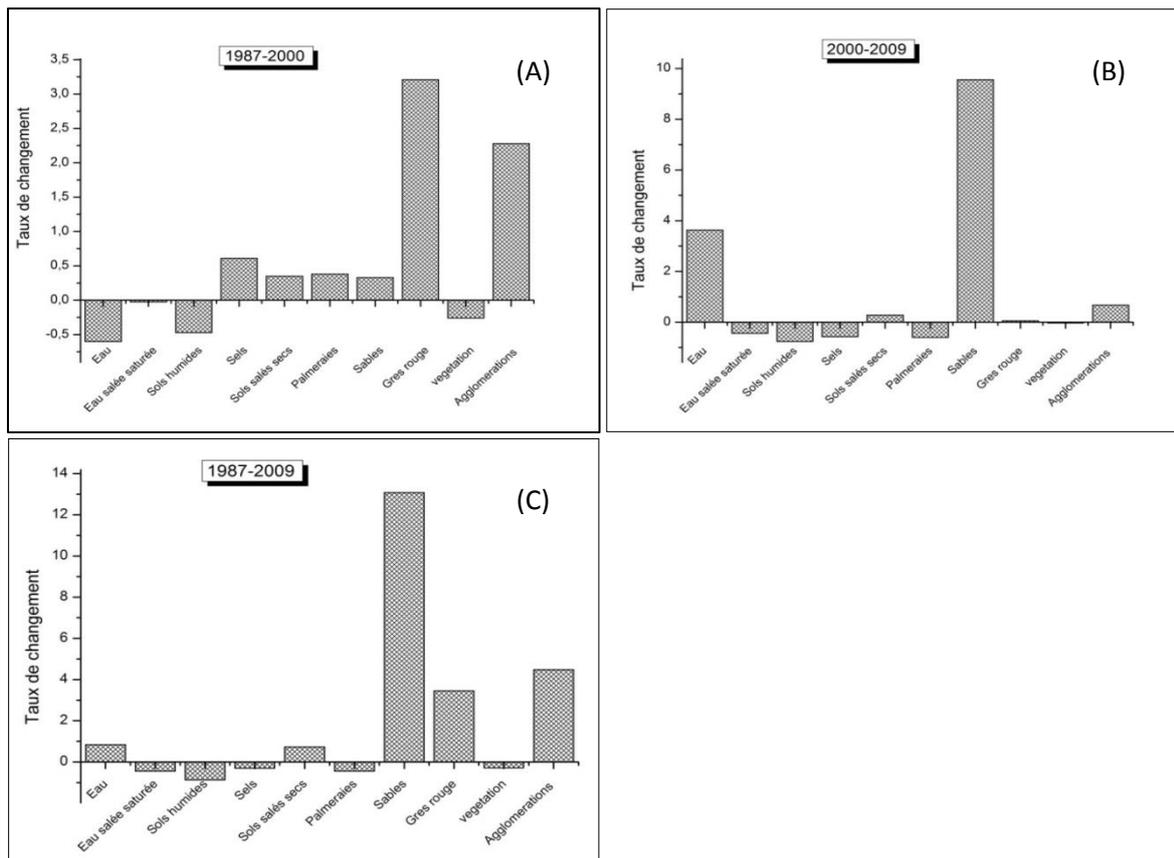


Figure 94: (A), (B), (C)-Bilan final du taux de changement d'occupation de sol (1987-2000 et 2009).

II.3.4. Carte des changements

Après l'étape de spatio-interprétation, on remarque que certains types d'occupation de sol sont représentés par plusieurs classes. Afin d'éviter ces redondances et pour faciliter et synthétiser l'analyse de l'évolution globale, on a combiné (fusionné) certaines classes. Les classes thématiques (dix classes) ont été regroupées en six classes: gains en eau, pertes en eau, gains en palmeraies, gains en agglomération et autres changements.

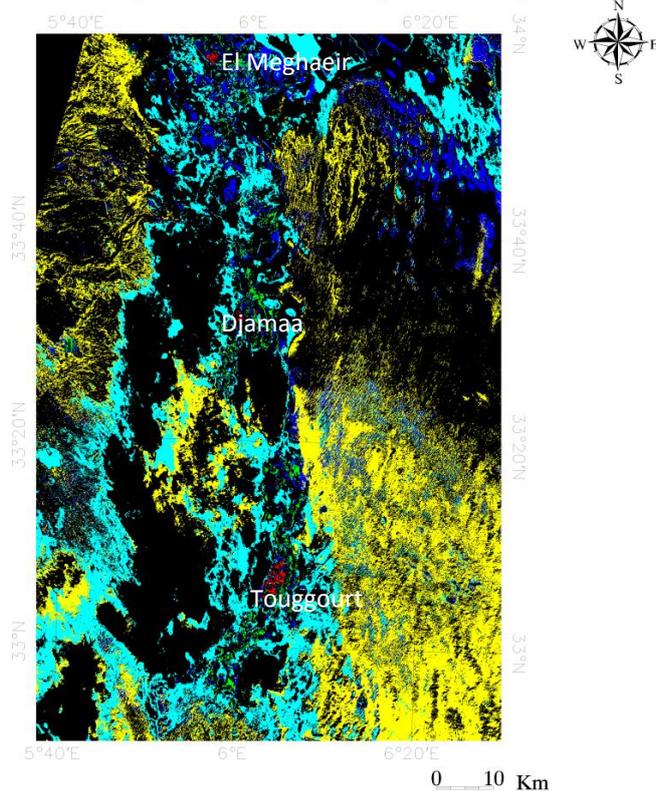
Ces cartes montrent à la fois l'ampleur des gains et des pertes en terres ainsi que leur variabilité dans l'espace.

Les gains sont les changements positifs, où les classes ont été converties en classe eau, végétation et agglomérations. Les pertes sont les changements négatifs lorsque la classe est convertie en d'autres types de couvert du sol.

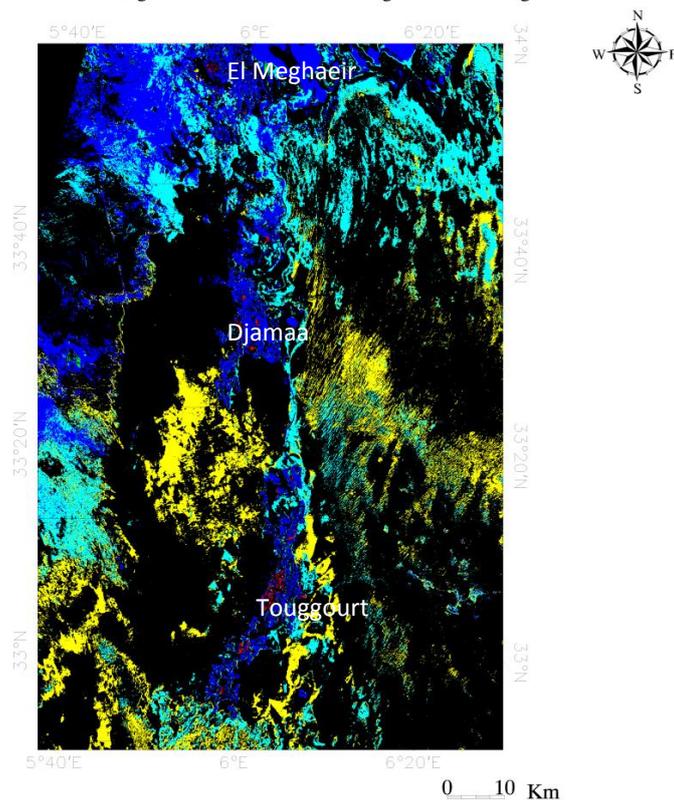
Pour déterminer les changements entre les images prises durant différentes périodes on utilise les classifications effectuées pour la délimitation des zones de changement et de constance.

D'après les résultats obtenus (Fig.95 (A), (B), (C)), on constate que les deux classes « eau » et « agglomération » ont subi un grand changement durant la période 2000–2009 (des gains). Dans la majorité de la zone Sud du bassin une augmentation spectaculaire du nombre de la population (zones bâties). Contrairement, on remarque une amélioration de la superficie des palmeraies dans des zones éparpillées pour les années 2000-2009 en comparant cette période par la période 1987-2000 (Fig.95 (A)), . Cette classe est remplacée par la classe des eaux et cette amélioration est probablement due à l'augmentation des activités agricoles (rejet des eaux de drainage) ainsi que les eaux domestiques.

Carte des changements 1987-2000 de la région d'Oued Righ



Carte des changements 2000-2009 de la région d'Oued Righ



Carte des changements 1987-2000-2009 de la région d'Oued Righ

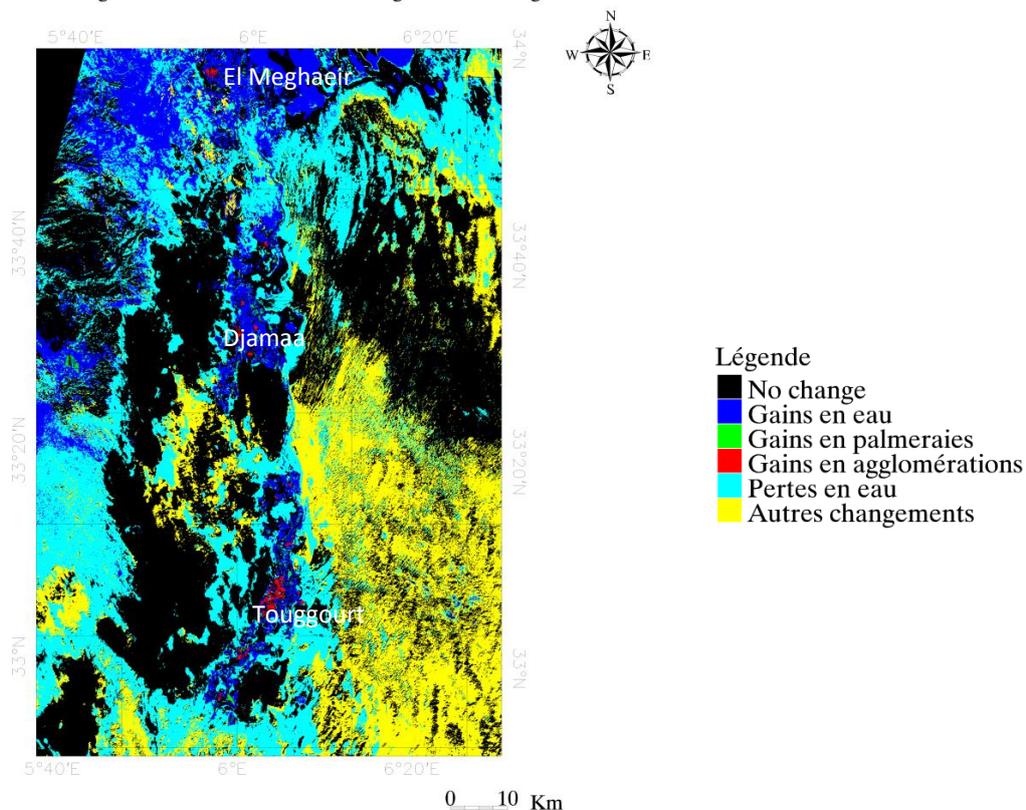


Figure 95: (A), (B), (C)-Cartes de changements entre les années 1987-2000/ 2000-2009 et 1987-2000-2009. Dont (A) carte des années 1987-2000, (B) carte des années 2000-2009 et (C) carte de changement des années 1987-2000-2009.

Conclusion

La dynamique des écosystèmes est en relation directe avec le climat et les causes anthropiques (*Sawadogo & al, 2008*). Les causes anthropiques sont liées aux activités humaines à savoir ; la croissance démographique et le développement agricole sont les plus importants facteurs agissant le plus rudement sur l'évolution du nombre des forages ; ce qui traduit par l'accroissement des besoins en eau, l'augmentation des rejets des eaux usées et l'excès de l'eau d'irrigation. Ces différents facteurs amènent à un état instable des ressources en eau, traduits par la remontée de la nappe phréatique, la chute de l'artésianisme, la dégradation du canal d'Oued Righ et le problème de salinité des eaux et des sols.

Cette étude dans la vallée d'Oued Righ, a montré l'intérêt des outils de télédétection dans l'analyse de la dynamique des ressources naturelles.

A la suite de cette analyse diachronique des images TM (1987) et ETM+ (2000 et 2009), on remarque qu'en vingt-deux ans, les modifications de l'occupation du sol sont assez nettes et se traduisent de façon qualitative et quantitative par les changements dans l'espace géographique et l'évolution des superficies.

Il reste que toute cette dynamique ne peut être soutenue sans une organisation efficace en vue de gérer leurs ressources. L'équilibre écologique reste encore fragile car nous pensons que l'élaboration de plans locaux de développement où tous les groupes d'intérêt (organisme, agriculteurs, citoyens) constituent un véritable gage de succès dans la gestion des ressources naturelles.

***CONCLUSION GENERALE ET
RECOMMANDATIONS***

Conclusion générale et recommandations

A la lumière de cette thèse qui a pour but principal le suivi de la gestion des ressources en eaux en utilisant la télédétection dans une région hyper aride peuvent être tirées certaines conclusions:

La zone d'étude « la vallée de l'Oued Righ » appartenant au Bas Sahara (à 600 km au Sud de la capital, Alger), couvre une superficie de 3750 ha. Allongée sur environ 150 km sur un axe Nord Sud. Cette vallée est limitée au Nord par le chott Merouane et au Sud par El Goug. Sa topographie est très plane, s'approchant de 1%. Son étendue couvre plus d'une cinquantaine d'oasis où la culture des dattiers reste la seule et unique ressource socio-économique.

Les sols de la région ont une texture fine limono-argileuse, avec des teneurs élevées en sels au Nord (au-delà d'El Meghair) et grossière à dominance sableuse au Sud, tandis que le fond est comblé par des sédiments sableux entrecoupés de lentilles d'argile salifère.

Le climat est désertique ou hyper aride caractérisé par des précipitations faibles à rares et irrégulières ne dépassant pas les 70 mm/an, suite à des orages violents qui génèrent des ruissellements. Ces dernières sont vite reprises par la forte évaporation résultant des températures élevées (**22°C** en moyenne annuelle et **34°C** au mois le plus chaud) et ne jouent pratiquement aucun rôle dans la recharge directe des nappes. L'évaporation cumulée pour les mois de Juin, Juillet et Août représente près de 50% à l'échelle annuelle. Cette dernière calculée par la méthode Turc est de **1513.22 mm** pour la palmeraie de Touggourt, limite Sud de la vallée d'Oued Righ.

Du point de vue hydrologique l'axe de la vallée est occupé par le grand canal de drainage qui mène les eaux vers les chotts. Le flanc Ouest est parcouru par de petits oueds qui descendent de la dorsale mozabite, causés par des crues épisodiques.

Les Oueds El Attar, N'oura, Medjeiar, Mellah apportent, par leurs crues relativement fréquentes, des possibilités d'approvisionnement aux nappes de l'Oued Righ.

Le bassin versant de l'Oued Righ comblé de terrains Quaternaires (sables, calcaires, grès, argiles et évaporites) siège de la nappe superficielle (niveaux sableux et argilo-évaporitiques).

La vallée apparaît ainsi particulièrement pourvue en eaux souterraines mais l'étude hydrogéologique montre que la zone renferme d'énormes réserves d'eaux souterraines. Elles constituent la richesse hydraulique de la région.

L'alternance de couches imperméables et perméables d'une part et l'existence d'un fossé de subsidence d'autre part, ont favorisé la formation de deux grands systèmes aquifères captifs définis par le Complexe Terminal (CT) du Miopliocène et le Continental Intercalaire (CI) formés entre les deux cycles marins du Paléozoïque et du Crétacé Supérieur constituent respectivement les limites inférieures et supérieures. Ces deux horizons se trouvent à des profondeurs relatives de 500 m et plus de 1500 m respectivement pour le CT et le CI.

Au cours, des vingt dernières années, le niveau de la nappe phréatique, qui n'a cessé de monter, pose de graves problèmes écologiques dans les zones urbaines et agricoles.

La multiplication des forages est la cause d'une chute importante des niveaux piézométriques entraînant la disparition de l'artésianisme du Complexe Terminal, elle provoque la remontée des eaux.

Conclusion générale et recommandations

La qualité des eaux de la région (chaudes et minéralisées) pose des problèmes techniques à partir de sa sortie jusqu'à son rejet, notamment le dépôt de tartre, les maladies à transmission hydrique, la corrosion, et la salinité des sols. Cependant la grande part de ces eaux est destinée pour l'agriculture qui consomme plus de **90%** du total.

La variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est liée à la répartition des formations géologiques, à la morphologie et à la topographie de la vallée généralement plane, qui ne facilite pas le drainage des eaux excédentaires. Par contre les variations dans le temps sont dues à l'effet de la température (évaporation).

La salinité des eaux, dont une partie est d'origine géologique s'accroît continuellement par une mauvaise gestion de la ressource en eau. Cette salinisation de la ressource est aggravée le plus souvent par les rejets domestiques (eaux d'assainissements) et les eaux de drainages, ce qui la rend impropre à l'irrigation. La teneur en sels dépasse largement les normes.

Toutes les eaux excédentaires de drainage issues de l'irrigation des palmeraies et celles des eaux usées des régions proches et limitrophes se déversent, sans aucun traitement préalable, dans l'Oued Righ, qui à son tour, se déverse dans le Chott MEROUANE.

On déduit que dans cette région il n'y a pas un problème de quantité mais plutôt de qualité, pour cela il faut exiger des rigoureux critères pour améliorer la qualité chimique de l'eau et garantir la potabilité de l'eau dans les normes internationales, avant de la mobiliser aux consommateurs particulièrement humains.

L'augmentation de la demande en eau, place la bonne gestion de cette ressource au centre des préoccupations mondiales, et lui confère une attention particulière. Depuis longtemps, dirigeants et chercheurs concourent à trouver un moyen adéquat de gestion des eaux notamment dans les zones arides où le renouvellement et l'alimentation des nappes deviennent de plus en plus rarissimes et où tous les moyens de supervision sont difficiles.

Le traitement classique des données devient limité et très lourd à manipuler, d'où la nécessité d'une nouvelle technologie d'acquisition et de traitement de l'information plus adéquate pour une vision globale c'est la télédétection. Cette dernière montre son apport dans les aspects de cartographie, de prospection, de suivi qualitatif et de gestion et constitue un moyen pour remédier aux problèmes de l'hydrogéologue et/ou du gestionnaire.

Cette technique admet d'analyser le milieu d'une manière exhaustive et surtout plus dynamique sur de grandes surfaces pour arriver à une meilleure approche de l'espace au lieu d'une mesure ponctuelle

La comparaison entre différentes périodes permet d'apprécier la dynamique de l'occupation des sols. Elle traduit la variation des situations et la diversité d'occupation des terres.

La présente étude confirme le potentiel des images satellites qui s'avèrent très efficaces pour l'appréhension des transformations globales de l'occupation du sol et leurs conséquences présentant ainsi une source de données qui devient de plus en plus indispensable en hydrogéologie.

L'imagerie satellitaire LANDSAT se révèle donc comme étant un système de génération de l'information spatio-temporelle, et aussi comme outil essentiel dans les systèmes interactifs d'aide à la décision.

Conclusion générale et recommandations

Trois images landsat ont été classifiées. Les résultats obtenus à partir des classifications des images satellitaires et la vérification de terrain ont permis d'obtenir des informations quantitatives sur les changements de l'occupation du sol en 1987, 2000 et 2009 tout en considérant la répartition spatiale de ces changements. Il ressort en premier lieu une expansion importante des agglomérations associée à une hausse des plans d'eau.

En effet, ces dernières tentent à mettre en évidence la relation entre l'homme et son milieu.

L'analyse des résultats obtenus à partir des différentes cartes thématiques montre montrent à la fois l'ampleur des pertes et gains en terres dans la zone étudiée ainsi que leur variabilité dans l'espace.

Les ressources naturelles subissent des pressions anthropiques croissantes qui entraînent des dysfonctionnements des écosystèmes terrestres et des pertes de biodiversité. Ces changements, qui sont amplifiés par des pressions démographiques ainsi que des modes et systèmes inappropriés d'exploitation des ressources disponibles, ont des répercussions directes sur l'occupation du sol et sur la configuration du paysage. Donc l'homme à travers ses différentes activités en est depuis un certain moment, le principal déclencheur de la transformation dont font actuellement objet les écosystèmes.

Recommandations

- ❖ *Il est nécessaire de soutenir la télédétection au Sahara de façon suivie afin de maintenir les programmes existants et de développer de nouvelles applications adaptées à cette région.*
- ❖ *Un programme de surveillance à long terme et l'acquisition systématique des données satellitaires et de terrain sont indispensables si l'on veut estimer l'étendue de la gravité des dégradations subies par l'environnement.*
- ❖ *La contribution que peut apporter la télédétection à la gestion des ressources nationales et régionales doit être mieux comprise au plus haut niveau gouvernemental afin de mieux intégrer les techniques adéquates.*
- ❖ *Il est nécessaire d'établir des liens étroits entre les utilisateurs de la télédétection et les instituts de recherche situés dans la région ou à l'extérieur. Un programme de jumelage entre institutions pourrait permettre le suivi nécessaire autant à la formation de base et à l'amélioration des techniques qu'à la recherche et au développement.*
- ❖ *La capacité à utiliser de nouvelles technologies pour le suivi de l'évolution des sols reste un moyen encore limité et peu répandu, à l'échelle nationale. Tel est le cas la vallée de l'oued Righ où l'agriculture évolue dans l'espace et dans le temps. Pour pallier ce phénomène, des technologies innovantes sont nécessaires pour renforcer les capacités nationales dans une perspective de gestion intégrée et développement durable.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- ABHS. (2006) : Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional, mission II: alimentation en eau potable et industrielle, pp. 3- 4.
- ABHS. (2006) : Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional, mission IV: assainissement urbain, 6p.
- ABHS. (2006) : Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional, mission I: ressources en eau et en sols et infrastructure de mobilisation, pp.46 - 53p.
- Abid, F. (1995) : Caractérisation des sels des sols de l'Oued Righ. Mémoire d'ingénieur en Agronomie. Université de Batna, 47 p.
- Açourene, S; Ben Abd El-Kader, F ; Bouzegag, B. (1994): Y a-t-il crise ou renouveau de la phoeniciculture de l'Oued-Righ ? Rapport de synthèse réalisé dans le cadre des études en première année de post-graduation en écodéveloppement des régions arides, INFSAS Ouargla, 60p.
- Ait Brahim, L & Mansour, M. (2009) : les technologies spatiales un outil pour la gestion des catastrophes naturelles et environnementales ; Publications de l'Organisation islamique pour l'Education, les Sciences et la Culture-ISESCO- 1430H/2009, Dépôt légal : 2009MO2382 ISBN 78-9981-26-465-2 ; 122 p
- Alun, J & Clark, J. (1997): Driving forces behind European land use change: an overview. CLAUDE Resource Paper n° 1.
- Andrieu, J & Mering, C. (2008): Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale Ouest-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Gêba (Guinée-Bissau), *Revue Télédétection*, vol. 8, n° 2, pp. 93-118.
- Anselme, B : introduction à la télédétection spatiale, UMR CNRS 8586, Paris 1, Paris IV, Paris 7, EPHE, 23p.
- Bale, J. B; Conte, D; Goehring, D; Simonet, D. S. (1974): Remote sensing applications to resource management problems in the Sahel. US agency for International development, Department of State, Washington, DC.
- Ballais, J.L. (2010) : Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara Algérien. *Physio-géo* .vol 4, pp.107-127
- Bannari, A ; Teillet, Ph. M ; Landry, R. (2004) : Comparaison des réflectances de surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de LANDSAT-5 et ETM+ DE LANDSAT-7 *Télédétection*, vol. 4, n°3, p. 263–275.
- Bel, F & Cuhe, D. (1969) : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.
- Bel, F & Demargne, F. (1966) : Etude géologique du Continental Terminal, ANRH, Alger, Algérie, 22p.
- Benhaddya, M. L. (2007) : Contribution à l'inventaire des éléments traces dans les sols et dans les eaux souterraines dans la région de l'oued Righ : leurs origines et leur impact sur l'environnement. Mémoire de Magister, option: génie de l'environnement. Univ. Oum el Bouaghi.
- Benhadj, I. (2008) : Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech. Thèse de doctorat université Paul Sabatier III Toulouse, 296 p.
- Benkaddour, M. (2002) : intégration des données radar et optiques dans un processus classificatoire : mémoire de magister ; 98p
- Benkrid, El .H. (2008) : Etude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chélif (Algérie) ; mémoire de master BGAE 2ème année Recherche Eau et Environnement (R2E) 45p.
- Benlamoudi, M.S. (1995) : Touggourt capitale de l'Oued-Righ, N° 131 première édition, 31 p.
- Benmessaoud, H. (2009) : étude de la vulnérabilité a la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie) ; thèse de Doctorat, 227p.
- Benmessaoud, H; Kalla, M; Driddi, H. (2009) : Evolution de l'occupation des sols et désertification dans le Sud des Aurès (Algérie) ; *m@ppemonde* 94 (2009. 2), 11p.
- Bensaid, A. (2006) : SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (Algérie) thèse de doctorat, 299p.
- Benziouche, S.E. (2005) : Les Impacts Socioéconomiques du PNDA dans la vallée de Oued Righ, pp. 01-05.
- Besbes, M; Latrech, D; Mamou, A; Kadri, S; Abdous, B; Babasy, M. L; Jouini, W; Othman, O. (2013): Système Aquifère du Sahara Septentrional- Gestion commune d'un bassin transfrontière, rapport de synthèse, 1 ère édition, 129p.
- Besbes, A & Zammouri, M. (1988) : Extension en Libye du modèle du CI Algéro-tunisien. *Methods and water resources*, Int. Conf. Morocco, vol 1. Ed. ouazar & Brebbia, Comput Rabat.
- Bisson, J. (1994) : Développement et mutations au Sahara maghrébin, Tours, CRDP Orléans, 172p.
- Bouchahm, N ; Chaib, W ; Drouiche, A ; Zahi, F; Hamzaoui, W ; N. Salemkour, N ; Fekraoui, F ; Djabri, L. (2013) : Caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'oued Righ (Bas Sahara algérien), *Journal Algérien des Régions Arides*, pp.76-88.

Bibliographie

- Boumaraf, B. (2013) : Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara Nord Oriental, Algérie, thèse de Doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, 97p.
- Boumaraf, B; Bensaid, R; Marre, A. (2014): Paysages et sols dans la vallée d'oued Righ, Sahara Nord oriental, Algérie, *Courrier du Savoir*, N°18, pp.103-110.
- Bonn, F ; Rochon, G. (1992) : Précis de Télédétection ; Volume 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec et AUPELF, ISBN 2-7605-0613-4, 512p.
- Boussaâda, N. (2007) : Évaluation des ressources en eau et modes de gestion dans la vallée d'oued Righ (Sud-est Algérien), mémoire de magister, 160p.
- Bouzaffour, S; Essaji, A; Merdas, M. (2003) : Application de la télédétection aux statistiques agricoles. Rapport du Projet AGRIMA ; 51p.
- Braimoh, A. K & Vlek. P. L. G. (2005): Land-cover change trajectories in northern Ghana. *Environmental Management* 36, pp. 356-373.
- Burdon, D.J. (1977): Flow of fossil groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 10, no. 2, pp. 97-124.
- Burel, F ; Baudry, J. (1999) : Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications, Ed. Tec & Doc, 362p.
- Busson, G. (1970) : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse de Doctorat, Paris, 464p.
- Caloz, R & Collet, C. (2001) : Précis de télédétection, volume 3, traitements numériques d'images de télédétection ; Presses de l'Université de Québec, ISBN2-7605-6'D1145N ; 386p.
- Castany, G. (1982) : Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie Tunisie). Aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal. *Bull. BRGM 2 III (2)*, 127-167
- Castany, G. (1998) : Hydrogéologie. Principes et méthodes, 236p.
- Capot-Rey, R. (1953) : la Sahara français. Paris: PUF, 558p.
- Centre Canadien de Télédétection : Notions fondamentales de télédétection, 266p.
- Chalifoux, S ; Nastev, M ; Lamontagne, C ; Latifovic, R ; Fernandes, R. (2005) : La télédétection en hydrogéologie, vers une approche intégrée. *Compte rendu du 12e Congrès de l'AQT, Chicoutimi, 10-12 Mai 2005, Association québécoise de télédétection, Canada, Compte rendu numérique*, 8 p
- Chalifoux, S ; Nastev, M ; Lamontagne, C ; Latifovic, R ; Fernandes, R. (2006) : cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire LANDSAT en hydrogéologie ; *Télédétection*, 2006, Vol. 6, n° 1, p. 9-17.
- Chaouche- Bencherif, M. (2007): La Micro-urbanisation et la ville-oasis; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable CAS du Bas-Sahara, thèse de Doctorat en Sciences, 416p.
- Chaouche- Bencherif, M. (2008): Touggourt ou la dynamique d'une ville aux sept ksour. *Sciences & Technologie D*, N°28, pp.9- 18.
- Chenchouni, H. (2012): Diversité floristique d'un lac du bas-Sahara algérien ; *Acta Botanica Malacitana* 37, pp. 33- 44.
- Chevry, C.L ; Robert, M. (1998) : La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. *Etude et Gestion des Sols*, 5, 4, pp. 217-226.
- Chitroub, S. (2004) : Combinaison de classifieurs : une approche pour l'amélioration de la classification d'images multi sources/ multi dates de télédétection, *Télédétection*, 2004, vo l. 4, n°3, p. 289-301.
- Clauzel, C. (2008) : Complémentarité des données de télédétection pour l'analyse des transformations de l'occupation du sol dans des zones humides urbaines. Application aux hortillonnages d'Amiens et aux chinampas de Mexico. *Photo-Interprétation*, n°1, pp.21-28
- Cornet, A. (1961) : Initiation à l'hydrogéologie saharienne. *Hydraulique et équipement rural. Service des études scientifiques. Rapport*, Alger, Algérie, 108p.
- Cornet, A. (1964) : Introduction à l'hydrogéologie saharienne ; volume. VI, fasc. 1, pp. 5-72.
- Cortes C & Vapnik V. (1995): Support-Vector networks. *Machine Learning*, 20 (3), pp 273-297.
- De Marsily, G; Ledoux, E; Levassor, A; Poitrial, D; Salem, A. (1978): Modeling of large multilayered aquifer system, theory and applications, *Journal of Hydrology* volume 36,issues1-2: 1- 33.
- DI Gregorio, A; Jansen, L JM. (1997): A new concept for a Land Cover Classification System. *Earth observation and evolution classification, Compte rendu de la conférence des 13-16 octobre 1997 à Alexandrie, Égypte*, 10 p.
- Djennane, A. (1990) : Constat de situation des zones Sud des oasis algériennes, Montpellier : CIHEAM Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 11, pp 29- 40.
- Djidel, M. (2008): Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie), thèse de doctorat, 165p.
- Donnay, J.P. (2000) : les spatio-cartes en composition colorée *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 38, 2000/1, pp. 43-61.

Bibliographie

- Douglas, I. (1999): Hydrological investigations of forest disturbance and land cover impacts in South- East Asia: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, pp. 1725-1738.
- D.P.A.T. (2005) : Annuaire statistique de la wilaya d'Ouargla. Direction de la planification et de l'aménagement du territoire de la wilaya d'Ouargla, 2006, pp.192.
- D.P.A.T. (2005) : Annuaire statistique 2005 de la wilaya d'El-Oued. Edition : Direction de la planification et de l'aménagement du territoire de la wilaya d'El-Oued, 156 p.
- Dubost, D. (1991) : Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Thèse de doctorat, université de Tours, 550p.
- Ducrot, D. (2005) : Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources. Extraction de caractéristiques de paysage. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, CESBIO Toulouse, 210p.
- El Garouani, A; Chen, H; Lewis, L; Tribak, A; Abahrour, M. (2008): Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du Sig Idrisi au nord-est du Maroc ; *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 3, pp. 193-201.
- El Hadani, D. (1997) : Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau, *Remote Sensing and Geographic information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems (Proceedings of Rabat Symposium S3)*. IAHS Publ. no. 242, pp. 197-204.
- Eklundh, L & Olsson, L. (2003): Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 10. 1029/ 2002 GL 016772.
- Elliott, D.C. (1996): A conceptual framework for geoenvironmental indicators. In: *Geoinicators – Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Berger, A.R. et Iams, W.J. eds., A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 337-349.
- ERESS (1972a) : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final, Tunisie, 78p.
- ERESS (1972b) : Nappe du Continental intercalaire. Modèle mathématique. Plaquette 2, Tunisie, 46p.
- ERESS (1972c) : Nappe du Complexe terminal. Appendices. Plaquette 3, Tunisie, 59p.
- Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, « EPDGDRS 1 ». (1998) : modélisation du Continental Intercalaire, Volume II, 50 p.
- Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, « EPDGDRS 2 ». (1998) : modélisation du Complexe Terminal, Volume III, 145 p.
- Fabre J. (1976) : Introduction à la géologie du Sahara algérien. SNED, Alger, Algérie, 422p.
- FAO. (1990): Forest resources assessment. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Forestry Paper, 130, Roma, 152 p.
- Foody, G.M. (2002): Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol 80, pp. 185-201.
- Foody, G.M. (2003): Geographical weighting as a further refinement to regression modeling: an example focused on the NDVI rainfall relationship. *Remote Sensing of Environment*, vol 88, pp 283-293.
- Franklin, S.E; Lavigne, M. B; Wulder, M. A; Stenhouse, G.B. (2002): Change detection and landscape structure mapping using remote sensing. *The Forestry Chronicle* 78, pp. 618-625.
- Furon, R. (1968) : Géologie de l'Afrique. Paris, Payot, 374 p.
- Geopétrole. (1964) : Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien. Mise en valeur sous-sol saharien. Direction Générale des Ressources en Eau. Tunis
- Géomath. (1994): Western Jamahiry a System; Hydrogeological Modelling of aquifers & well fields; Final Report; Text & palettes. General Water Authority. Ref: AW-MI-579, Tripoli, Libye.
- Gilg, J.P & Bildgen, P. (1993): Les signatures spectrales des objets, leur interprétation géochimique et leur contrôle en télédétection spatiale. Formation permanente du CNRS.
- Girard, M.C. (1995) : Apport de l'interprétation visuelle des images satellitaires pour l'analyse spatiale des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 2 (1), 7–24. http://www.afes.fr/afes/egs/EGS_2_1_GIRARD.pdf [accédé le 8 juillet 2013]
- Girard, M.C ; Girard, C.M. (1999) : La télédétection appliquée, zones tropicales et intertropicales, Paris, 529p.
- Gomèz, C. (2004) : potentiels des données de télédétection multi sources pour la cartographie géologique : application à la région Reheboth (Namibie), Thèse de doctorat, ENS Lyon-UCB Lyon 1, 210p.
- Griffith, J. A; Stehman, S. V; Sohl, T. L; Loveland, T. R. (2003): Detecting trends in landscape pattern metrics over a 20-year period using a sampling-based monitoring programme. *International Journal of Remote Sensing* 24, pp. 175-81.
- Guendouz, A; Moullas, A; Edmunds, W.M; Zouar, i k; Shands, P; Mamou, A. (2003): Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal*. 11. 483-495.
- Gueye, M. et Ozer, A. (2000). Apport de la télédétection à l'étude de la transformation de l'agriculture et de l'environnement dans le département de Bignona (Sénégal méridional). In : *La télédétection en Francophonie: analyse critique et perspectives*. Dubois, J.M.M., Caloz, R. et Gagnon, P. eds. AUPELF-UREF, pp. 141-151.

Bibliographie

- Habib, A. (2002) : cours d'initiation au traitement des données de télédétection ; fondement de l'analyse des images numériques ; 19p.
- Hacini, M. (2006) : Géochimie des sels et des saumures du Chott Merouane et calcul des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques, thèse de doctorat, 200p.
- Hamidi, M. (2014) : Hydrogéologie du continental intercalaire et du Complexe Terminal en domaine aride (Atlas saharien occidental), 348 p.
- Hammad, N. (2016) : Cartographie géologique et analyse linéamentaire de la région d'El Kseibat (Sahara du sud-ouest) à partir des images spatiales. Incidence sur l'exploration minière. Thèse Doctorat es Science, Université Ouargla, Algérie, 188p.
- Hiernaux, P & Turner, M.D. (2002): The influence of farmer and pastoralist management practices on desertification processes in the Sahel. In: Global desertification: Do humans cause deserts? Reynolds, J.F. et Stafford Smith, D.M. eds., Dalhem University Press, pp. 135-148.
- Hoang, K.H. (2007) : Les changements de l'occupation du sol et ses impacts sur les eaux de surface du bassin versant de la rivière Càu (Viêt-Nam). Mémoire de maîtrise, 127p.
- Hoang, K.H. (2008) : les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Càu (Viêt-Nam). Essai sur une approche diachronique, Revue Télédétection, vol. 8, n° 4, pp. 227-236
- Hoffman, J. (2005): The Future of Satellite Remote Sensing in Hydrogeology. Hydrogeology Journal, vol. 13, n° 1, pp. 247-250.
- Hountondji, Y.C; Ozer, P; Tychon, B. (2003) : Etude des modifications environnementales à partir des données pluviométriques et NDVI de NOAA-AVHRR en Afrique de l'Ouest. In: Les Journées des Géographes Belges, Tome 1: Evaluer la capacité du milieu, Schmitz, S. et Meert, H. Editions BEVAS/SOBEG: pp. 19-24.
- Hulme, M. (1996): Recent climatic change in the world's dry lands. Geophysical Research Letters, 23, pp. 61-64.
- Iddir-Zait, M ; Smara, Y. (2005) : Modèle variationnel pour la classification des images satellitaires multi bandes : application à la région de Blida (Algérie), Télédétection, vol. 5, n° 1-2-3, pp. 215-225.
- Karpoff, R. (1952): Les cratères de météorites. Bulletin liaison Saharienne, Alger, t.3, n°10, pp. 2-5
- Kergomard, C. (2002): la télédétection aérospatiale : une introduction, cours, Ecole Normale Supérieure Paris ; 74p.
- Khadraoui, A. (2007): Eaux et impact environnemental dans le Sahara algérien ; Définition-Evaluation et Perspectives de Développement, Dépôt légal : 1059-2007 - ISBN : 978 -9961-797-05-0, 293p.
- Kilian, C. (1931): Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris.
- Kintz, D. B; Young, K.R; Crews-Meyer, K.A. (2006): Implications of land use/land cover change in the buffer zone of a national park in the tropical Andes. Environmental Management 38, pp 238-252.
- Koull, K ; Kherraz, M.H ; Lakhdari, K ; Benzaoui, T ; Helimi, S ; Laouissat, M S ; Kherfi, Y ; Bougafla, A ; Mimouni, F ; Lakhdari, K ; Mezrag, M ; Benazzouz, M. T. (2013) : Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigués dans la vallée de l'oued Righ. Journal Algérien des Régions Arides N° Spécial 2013, pp. 97-102.
- Kouzmine, Y. (2003). L'espace saharien algérien, dynamiques démographiques et migratoires. Mémoire de maîtrise, université de Franche-Comté, 201p.
- Kouzmine, Y. (2005) : Les villes sahariennes algériennes et le développement urbain durable, ville réelle et ville normative, in Bulletin de la Société neuchâteloise de Géographie, n°49, pp.85-103.
- Kouzmine, Y. (2009) : L'action publique et les réseaux de transport au Sahara algérien, étapes d'une intégration territoriale pour un développement régional; HAL archives ouvertes, pp. 1- 13. Id: halshs-00389861
- Kpedenou, K.D; Boukpepsi, T ; Tchamie, Thiou. T.K. (2016) : Quantification des changements de l'occupation du sol dans la préfecture de Yoto (Sud-est Togo) à l'aide de l'imagerie satellitaire landsat, Revue Scientifique Environnement. Univ., Lomé (Togo), n° 13, pp. 137- 156.
- Kruse, F. A; Lefkoff, A ; Boardman, J. B; Heidebrecht, K. B; Shapiro, A. T; Barloon, P. J; Goetz, A. F. H. (1993): The Spectral Image Processing System (SIPS) Interactive visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote sensing of the Environment, vol. 44, pp.145- 163.
- Kupfer, J.A. (2006): National assessments of forest fragmentation in the US. Global Environmental Change 16, pp0 73-82.
- Laborde, J.P. (2003) : Hydrologie de surface, 204p.
- Lambin, E. (1988) : Apport de la télédétection satellitaire pour l'étude des systèmes agraires et la gestion des terroirs en Afrique occidentale. Exemple au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, 239p.
- Lambin, E. F; Turner, B.L; Geist, H.J; Agbola, S.B; Angelsen, A; Bruce, J.W; Coomes, O. T; Dirzo, R; Fischer, G; Folke, C; George, P. S; Homewood, K; Imbrnon, J; leemans, R; Li, X; Moran, E. F; Mortimore, M ; Ramakrishnan, P.S ; Richards, J. F ; Skanes, H ; Steffen, W ; Stone, G. D ; Svedin, U ; Veldkomp, T. A ;

Bibliographie

- Vogel, C; Xu, J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11 (4), pp. 261–269.
- Laouini, H. (2012) : Caractérisation géochimique des zones humides entre deux climats, méditerranéen et aride par image satellitaire : cas des lacs d'el-Taref et les chott et sebkhas de Ouargla, mémoire de magister, 107 p.
- Lassieur, S. (2006) : utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales, mémoire de master 2 SIG et Gestion de l'Espace Université Jean Monnet, 54p.
- Lecerf, R. (2008) : suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropiques et climatiques à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne). Thèse de doctorat ; université de Rennes 2, 306p.
- Lippmann R. (1987): An introduction to computing with neural nets, *IEEE Assp magazine*, vol. 4, issue 2, pp 9-22.
- Liu, J ; Liu, M ; Tian, H ; Zhuang, D ; Zhang, Z ; Zhang, W ; Tang, X; Deng, X. (2005): Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: an analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 98, pp0 442-456.
- Mama, V. J. & Oloukoi, J. (2003) : Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection*, 3 (5), pp. 429-441.
- Mamou, A. (1990) : Caractéristiques et évaluation et gestion des ressources en eau du Sud tunisien. Thèse es-Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, 426 p.
- Margat, J. (1985) : Hydrologie et ressources en eau des zones arides. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. 1, n°7, pp. 1009 - 1020.
- Margat, J. (1990) : Les eaux souterraines dans le monde, BRGM, services sol et sous-sol, département eau, 42p.
- Margat, J. (1992) : Quelles ressources en eau les grands aquifères offrent-ils? *Observatoire du Sahara et du Sahel*, Le Caire, 14p.
- Margat J. & Saad K. F. (1984) : Les nappes souterraines profondes : des mines d'eau sous les déserts ? UNESCO; *Nature et Ressources*, Vol. XX, n°2. pp. 7-13.
- Mequignon, L ; Croisille, G ; Lejeune, V. (2005) : Application de la télédétection à l'étude des zones humides : identification des prairies, des roselières, des peupleraies et des gravières, document technique), 134p.
- Merlin, O. (2005) : Synergie des observations multi spectrales : application en hydrologie ; thèse de doctorat 151p.
- Merrouchi, L. (2009) : caractérisation d'un agrosystème oasien, évolution et perspectives de développement- cas de la vallée de l'oued-Righ, mémoire de magistère, 87p.
- Minet, J. (2011) : Imagerie multi spectrale, vers une conception adaptée à la détection de cibles, thèse de doctorat en Physique, 124p.
- Moufaddal, W. M. (2005): Use of satellite imagery as environmental impact assessment tool: a case study from the NW Egyptian Red Sea coastal zone. *Environmental Monitoring and Assessment* 107, pp. 427-452.
- Mutin, G. (1995). *Géographie Universelle. Afrique du Nord, Moyen-Orient, Monde indien: 1- Afrique du Nord, Moyen-Orient*, BELIN-RECLUS, ISBN 2 7011 1671 6
- Nesson, C. (1978) : L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In : *Recherche sur l'Algérie*, (ed. CNRS), Paris, pp. 7-100.
- Niox, G. L. (1890) : *Géographie militaire. Algérie et Tunisie*, 2^{ème} édition, 437 p.
- Nonguierma, A. (2005) : Evaluation et suivi par télédétection des zones humides au Sahel. *Centre Agrhymet, CILSS*, 15p.
- Noyola-Medrano, C ; Mering, C ; Rojas-Beltrán, M.A. (2013) : Evaluation du changement de l'occupation du sol à l'aide des images LANDSAT et SPOT : champ volcanique de la sierra chichinautzin (MEXIQUE). *Actes du 26eme colloque international ; cartographique conférence, Allemagne du 25 au 30 Aout 2013*, pp.1-12.
- Observatoire du Sahara et du Sahel, OSS, (2002) : *Système Aquifère du Sahara Septentrional- une conscience de bassin- hydrogéologie*, volume 2, 275p.
- Observatoire du Sahara et du Sahel, OSS, (2003) : *Système Aquifère du Sahara Septentrional- une conscience de bassin- modèle mathématique*, volume iv, 245p.
- Oloukoi J., Mama V. J. & Agbo F. B. (2006): Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. *Télédétection*, vol 6, n°4, pp. 305-323.
- Omrane, M. N. (1977)- *Photo-interprétation et cartographie de la morphologie des activités de Hammam-lif ; Thèse de 3ème cycle, Paris VII*, 245 p.
- Oszwald, J; Gond, V; Dolédec, S; Lavelle, P. (2011) : Identification d'indicateurs de changement d'occupation du sol pour le suivi des mosaïques paysagères ; bois et forêts des tropiques, n° 3 0 7 (1) dynamiques paysagères, pp.7-21.

Bibliographie

- Ouattara, T ; Dubois, J.M ; Gwyn, Q. H. J. (2006) : Méthode de cartographie de l'occupation des terres en milieu aride à l'aide de données multi sources et de l'indice de végétation tsavi, *Téledétection*, vol, 6, n° 4, pp. 291-304
- Ougrine, M. (2003): Contribution des images ETM+ de Landsat7 à la mise à jour Cartographique à 1/200 000 ; Cas de la feuille de M'SILA (Hauts plateaux, Algérie) étude au Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française (CRASTE-LF), 80p.
- Oueld Baba Sy, M. (2005) : Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara Septentrional, Thèse de doctorat, 261p.
- Paix, F. (1956) : Les nappes artésiennes de l'Oued Righ. Thèse de doctorat, 258 p.
- Pallas, P. (1980): Water Resources of the Socialist People's Arab Libyan Republic. In Salem & Busrewille. The Geology of Libya; Ac. Press, Vol. II
- Penner, J. E. (1994): Atmospheric chemistry air quality. In W.B. Meyer, B.L. Turner II (éd.) Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 175-209.
- Petersen, J. O. (2014) : Traçage isotopique (36Cl, 4He, 234U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional, Application à la recharge Quaternaire du Continental Intercalaire, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Sciences de l'Environnement, Aix Marseille Université, 329p.
- Pham. Thi, T.H ; Bonn, F ; Dubois, J.M. (2007) : Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution spatiale : application à une région littorale au viêt-nam ; *Revue Téledétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 303-323.
- Perennes, J.J. (1979) : Structures agraires et décolonisation. Les Oasis de l'Oued-Righ (Algérie). Edition OPU, 372 p.
- Podaire, A. (2003) : Informations sur le projet Changement d'Utilisation et de Couverture des Sols (Land-Use and Land-Cover Change : LUCC) ; *Revue Electronique CYBERGEO*, n° 180, 6p.
- Polidori, L. (2008): introduction à la télédétection spatiale, cours, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 60p.
- Poschlod, P; Bakker, J.P; Kahmen, S. (2005): Changing land use and its impact on biodiversity. *Basic and Applied Ecology* 6, pp 93-98.
- Reidsma, P; Tekelenburg, T; Van der Berg, M; Alkemade, R. (2006): Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114, pp 86-102.
- Richards J.F. (1990): Land transformation. The earth as transformed by human action. Ed. by Turner B.L. II, Clark W.C, Kates R.W, Richards J.F, Mathews J.T, Meyer W. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 163-178.
- Risser, D ; Flageollet, J.C ; Tholey, N. (1998) : Occupation du sol et réponse hydrologique : utilisation de la télédétection, centre européen sur les risques géomorphologiques, 29p.
- Salem, O & El Baruni, SS. (1990): Hydrogeology of the Kiklah Aquifer in NW Libya. International Conference on Groundwater in Large Sedimentary Basins; Perth-Australia, 20 p.
- Samaali, H. (2011) : étude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques, thèse de doctorat, 390 p.
- Saradeth, S; Dodo, A.K; Latrech, D. (2010): Earth Observation in support of Management of Internationally Shared Groundwater Resources in Africa: the AQUIFER Project, Technical Documents in Hydrology | N° 85 UNESCO, Paris, 145p.
- Sarr, M.A. (2009) : Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. Article 472 Paru dans *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 16p.
- Savornin, J. (1931) : La géologie algérienne et nord-africaine depuis 1830, paris, Alger, Masson et Cie- J. Crbonel.
- Sawadogo, H ; Zombre, N. P ; Bock, L ; Lacroix, D. (2008) : Evolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir de photographies aériennes. *Revue Téledétection*, n° 8, vol 1, pp.59-73.
- Sawadogo, H ; Zombre, N.P ; Bock, L ; Lacroix, D. (2009) : Evolution de l'occupation du sol de Ziga dans le Yatenga (Burkina Faso) à partir de photographies aériennes. *Téledétection*, Editions scientifiques GB, vol 8 n°1, pp.59-73.
- Slim, S. (2012) : Les systèmes fourragers des zones montagneuses: contraintes et intérêts des fabacées dans la fixation des sols et l'accroissement des ressources herbagères des petites exploitations, thèse de doctorat en sciences agronomiques. INAT. 183p.
- Sogreah, S. (1970) : participation à la mise en valeur de l'Oued-Righ. Rapport : étude agro-pédologique. Ed. Ministère travaux publics construction, servi. Ét. Sci., Algérie, pp7-36.
- Soro, G; Ahoussi, E. K; Kouadio, E. K; Soro, T. D; Oulare, S; Saley, M. B; Soro, N; Biemi, J. (2014) : Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire), *Afrique SCIENCE*, n°10, vol 3, pp. 146 – 160.

Bibliographie

- Soudani, K. (2005): introduction générale à la télédétection, Cours, Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux (Version 1.0), 26p.
- Stott, A & Haines –Young, R. (1996): Linking land cover, intensity of use and botanical diversity in an accounting framework in the UK. Environmental Accounting in Theory and Practice, Volume 11 of the series Economy & Environment, pp. 245-260
- Teodoreanu, S.L. (2002) : Approche géographique de la dynamique des paysages du Plateau de Falticeni (Roumanie) par télédétection, deuxième partie, outils et méthodes pour une approche paysagère multi-sources, multi dates, thèse de doctorat, pp72-208.
- Tesco – Viziterv. (1986): Etude de réaménagement et de l'extension des palmeraies de l'Oued R'HIR, 74p.
- Tesco – Viziterv. (1989) : Etude du réaménagement et de l'extension des palmeraies de l'Oued Righ, 359 p.
- Tombre, I. M; Tømmervik, H; Madsen, J. (2005): Land use changes and goose habitats, assessed by remote sensing techniques, and corresponding goose distribution, in Vesterålen, Northern Norway. Agriculture Ecosystems and Environment 109, pp 284-296.
- Toumi, S ; Meddi, M ; Mahé, G ; Télesphore Brou, Y. (2013) : Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG, Journal des Sciences Hydrologiques, n° 58 vol 7, pp 1542- 1558. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Unesco. (1972) : Projet ERESS. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris, 100 p.
- Vitousek, P. M; Mooney, H. A; Lubchenco, J; Melillo, J.M. (1997): Human domination of Earth's ecosystems. Science, 277, pp. 494- 499.
- Yuan, F; Sawaya, K. E; Loeffelholz, B. C.; Bauer, M. E. (2005): Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. Remote Sensing of Environment 98, pp 317-328.
- Zammouri, M. (1990) : Contribution à une révision des modèles hydrogéologiques du sud tunisien, Thèse de Doctorat, Université Tunis II, Tunisie.
- Zombre, P.N. (2006) : évolution de l'occupation des terres et localisation des sols nus dans le centre Nord du Burkina Faso ; Télédétection, 2006, vol. 5, n°4, pp. 285-297.

Sites internet

- <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- www.ccrs.nrcan.gc.ca
- <http://mappemonde.mgm.fr/num22/articles/art09206.html>
- www.bsglg.be

ANNEXES

Annexes

Annexe 1 : Pédologie des sols

Description morphologique de la zone d'El Mghair :

0 – 25 cm : sol frais à humide de couleur brune, de texture sableuse à sablo – limoneuse, consistance et cohésion faible, moyennement poreux, avec quelques affleurements blanchâtres de sels.

25 – 60 cm : plus humide et mouillé, de texture sableuse à structure fondue avec des taches ocres et rouille d'hydromorphie, vive effervescence à HCl. Ces sols appartiennent à la classe des sols hydromorphes.

Granulométrie :

Horizon (cm)	0 - 25	25 - 60
Argile %	0	0
Limon fin%	18	8
Limon grossier %	5	5
Sable fin %	42	47
Sable grossier %	22	25
Matières organiques		
Matières organiques %	0.87	0.20
Carbone %	4.10	3.50
Azote %	0.30	0.14

Description morphologique de la zone de Djamaa :

Du point de vue classification pédologique, les sols de la région sont surtout regroupés dans deux classes, qui sont celles des sols hydromorphes et halomorphes. La description morphologique permet de donner une idée sur les sols de la région de Djamaa.

Granulométrie :

Horizon (cm)	0 -32	32 - 70	70 - 120
Argile %	0	0	0
Limon fin%	8	10	36
Limon grossier %	3	3	1
Sable fin %	48	46	18
Sable grossier %	9	8	4
Matières organiques			
Matières organiques %	0.87	0.70	0.32
Carbone %	5.10	4.50	1.90
Azote %	0.35	0.39	-

Description morphologique de la région de Touggourt :

0 – 20 cm : sol frais, couleur brune jaunâtre, de texture sableuse grossière, structure fine, beaucoup de taches blanchâtres de sels.

22 – 57 cm : humide, couleur jaune foncé, de texture grossière, présence de taches blanches de sel et de gypse, taches ocres de rouilles.

Annexes

57 – 75 cm : horizon mouillé, de couleur brun jaunâtre, de texture grossière avec quelques débris de grés, faiblement poreux, beaucoup de taches ocre et rouille d'hydromorphie.

Granulométrie:

Horizon (cm)	0 -22	22 - 57	57 - 75
Argile %	2	0	0
Limon fin%	2	8	15
Limon grossier %	2	1	1
Sable fin %	68	55	61
Sable grossier %	26	11	15
Matières organiques			
Matières organiques %			
Carbone %	0.15	0.36	0.34
Azote %	2.7	2.6	2.4
	0.31	0.32	0.3

Classification des sols:

Classe: Sols hydromorphes

Sous classe : Sols peu humifères.

Sous-groupe : Sols salin.

Famille : Alluvions et apport éolien.

Série : Peu profond la nappe à 75 cm.

Annexe 2 : Problèmes rencontrés dans la région



Rejets des eaux directement dans le canal



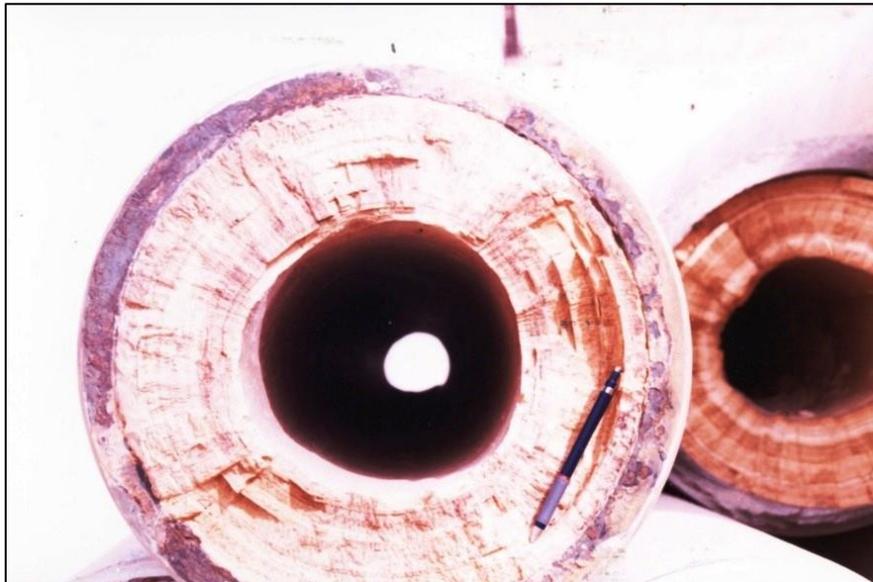
Dépôt de tartre dans les refroidisseurs.



Remontée des eaux



Endommagement des vannes à cause de la qualité des eaux.



Obstruction des canalisations par le dépôt de tartre.

Annexe 3 : inventaire des forages et données chimiques

Inventaire des forages et analyse chimiques de la zone d'étude en 2010

N° Ord	N° code	NOM DE FORAGE	PH	Chlorures Cl (mg/l)	Chlorures de sodium Na cl (mg/l)	Sulfates SO4 (mg/l)	Calcium Ca (mg/l)	Magnésium Mg (mg/l)	Bicarbonate HCO3 (mg/l)	TAC (F°)	TH (F°)
1	,	blidet amor	7,25	976,25	1608,75	1375,40	400,80	194,40	82,00	6,61	180,20
2	,	Temacine	6,62	976,25	1608,75	1439,60	408,82	228,42	85,00	6,85	196,21
3	D36F73	Nezla	7,53	1225,00	2047,50	1477,46	440,88	179,82	78,00	6,29	184,22
4	D34F109	Touggourt	7,42	1437,75	2369,25	1502,56	492,98	187,11	76,00	6,13	200,25
5	D33F97	Tebesbeste	7,31	1775,00	2925,00	1508,33	496,99	106,62	79,00	6,37	168,12
6	D33F99	Tebesbeste	7,80	1739,50	2866,50	1539,19	496,99	106,92	64,00	5,16	168,25
7	D32F62	Zaouia el Abidia	7,23	1810,50	2983,50	1792,30	621,24	216,27	80,00	6,45	244,31
8	D32F134	Zaouia el Abidia	7,65	1477,46	2047,50	1051,92	296,59	111,78	80,00	6,45	120,15
9	,	Meggarine (Ain safra)	7,24	1331,25	2193,75	1395,97	440,88	150,66	15,00	1,21	172,22
10	,	Sidi Slimane (bram21)	7,20	852,00	1404,00	1099,66	308,62	120,50	95,00	7,66	126,74

N° Ord	N° code	NOM DE FORAGE			PROF (m)	ANNEE REAL	DEBIT (L/S)	NS (m)
			X	Z				
1	,	blidet amor	5,954	80	134	2010	20	15,6
2	,	Temacine	5,999	73	150	2010	17	14,7
3	D36F73	Nezla	6,054	70	166	2010	23	23
4	D34F109	Touggourt	6,060	61	147	2010	17	22,5
5	D33F97	Tebesbeste	6,097	67	162	2010	18	17,2
6	D33F99	Tebesbeste	6,101	57	151	2010	20	12,3
7	D32F62	Zaouia el Abidia	6,084	59	120	2010	16	26,3
8	D32F134	Zaouia el Abidia	6,079	63	122	2010	19	22,75
9	,	Meggarine (Ain safra)	6,101	55	165	2010	20	18,17
10	,	Sidi Slimane (bram21)	6,040	49	165	2010	25	16,7

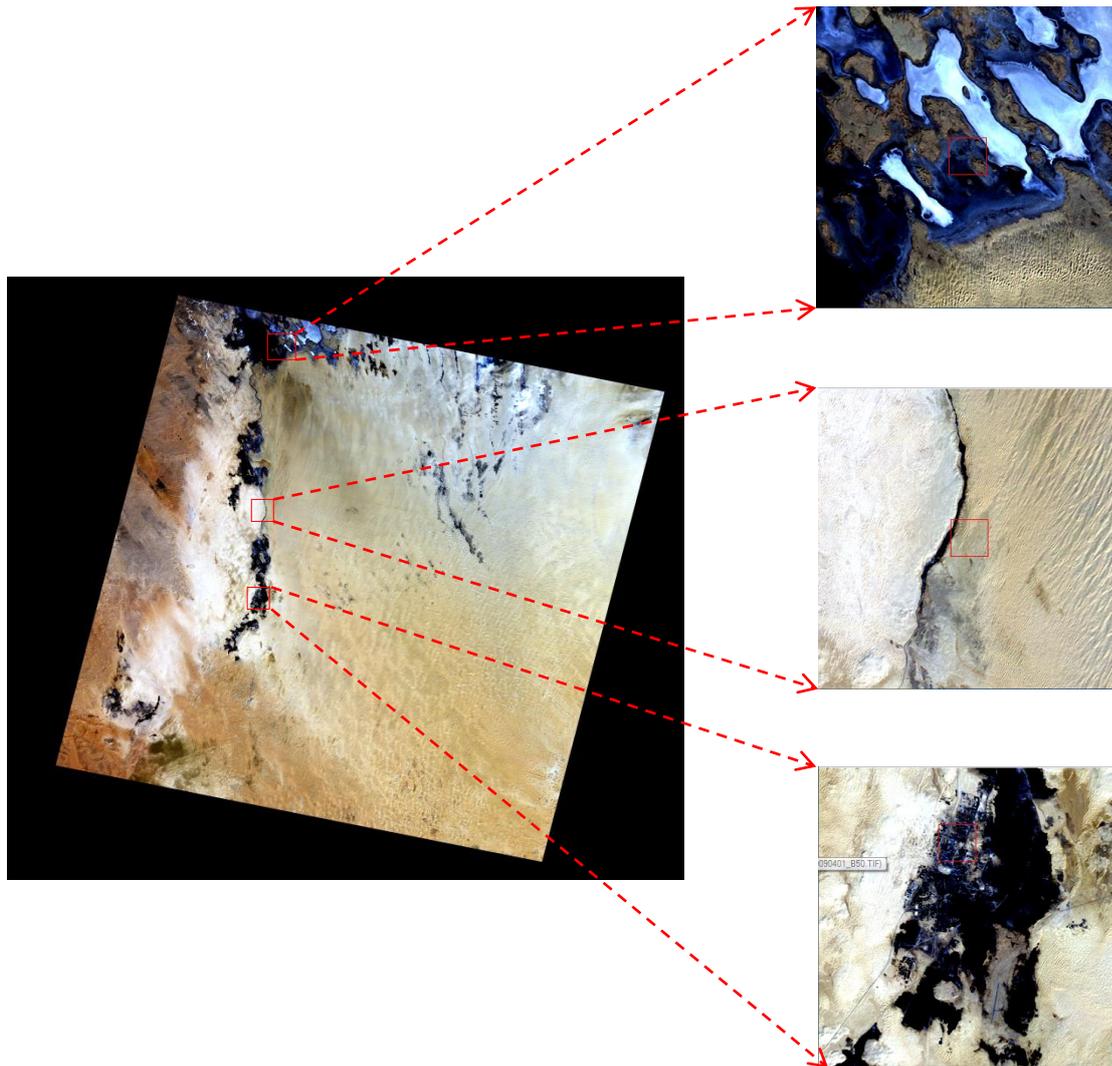
Inventaire des forages et analyse chimiques de la zone d'étude en 2012

Nom	Nappe	Region	Longit	Latitu	usage	Altitu	Ca	Mg	K	Na	CL	So4	Co3	HCo3	No3	TH	Turbi- dité	pH	Cond (ms/c m)	Résidu_ Sec
Ain Naga I (MV) D46 F84	MIO- PLIOCENE	BLIDET AMOR	05°57'45"	32°54'52"	IRR	77,5	197,5	225,68	44	632	1025	1350	0	167,7	54	142,2	0	8,17	5,25	4570
MZARA (MV) D44 F22	MIO- PLIOCENE	BLIDET AMOR	05°57'01"	32°57'30"	IRR	70,4	230	220,46	40	584	975	1475	0	170,8	49	148,2	1	8,17	5,08	4532
Ain Masbah Med D29 F91	MIO- PLIOCENE	MEGARINE	06°06'51"	32°51'44"	IRR		202,5	202,34	27	700	1300	1075	0	134,2	57,5	133,8	0	7,99	5,76	4974
Ain Benhmida Ali (Djouad) D33 F92	MIO- PLIOCENE	TEBESBEST	06°05'57"	33°06'23"	IRR	63	207,7	225,44	33	880	1513	1300	0	143,35	51,5	144,6	0	8,02	6,57	5454
Ain Hadj Hmida D45 F68	MIO- PLIOCENE	BLIDET AMOR	05°57'08"	32°55'57"	IRR		195	225,68	34	608	980	1338	0	176,9	52	141,6	0	8,12	5,07	4472
Ain Moulati Sayah II D40 F32	MIO- PLIOCENE	TEMACINE	06°02'54"	33°00'44"	IRR		207,5	214,9	45	934	1550	1388	0	164,7	59,5	140,3	0	8,11	6,34	5192
LAKHDARI Lakhdar D41 F	MIO- PLIOCENE	TEMACINE	05°59'16"	32°59'42"	IRR	150	185	223,13	43	556	1013	1213	0	167,75	54	138	6	8,15	4,91	4204
MERDJADJA NEZLA 1 D36 F82	MIO- PLIOCENE	NEZLA	06°03'24"	33°03'21"	IRR	73,5	225	306,06	38	757	1538	1113	0	167,75	54	182,1	0	8,11	6,73	6128
Ain Hadj Brahim(Naoui) D35 F16	MIO- PLIOCENE	NEZLA	06°03'02"	33°05'31"	IRR	78,7														5534
NOUHA HMIDA D46 F85	MIO- PLIOCENE	BLIDET AMOR	05°59'17"	32°55'44"	IRR	103	192,5	171,21	26	756	1225	1163	0	176,9	60	118,5	0	8,18	5,36	4448
Bouaroua A/aziz D8 F	MIO- PLIOCENE	Oued Ghir	06°03'32"	33°42'53"	IRR	13	150	141,25	23	490	750	1450		118,95	22	136,7		7,58		3148
NOUHA HMIDA D46 F85	MIO- PLIOCENE	BLIDET AMOR	05°59'17"	32°55'44"	IRR		158,8	300,11	34,3	1117,5	1437,5	1650		48,8	45,8	163,1				4626
Ain Hadj Messaoud D30 F22	MIO- PLIOCENE	MEGARINE	06°04'24"	33°11'46"	IRR	177	198,8	121,6	22,5	457,5	690	912,5		100	37,2	99,7		7,81		2582

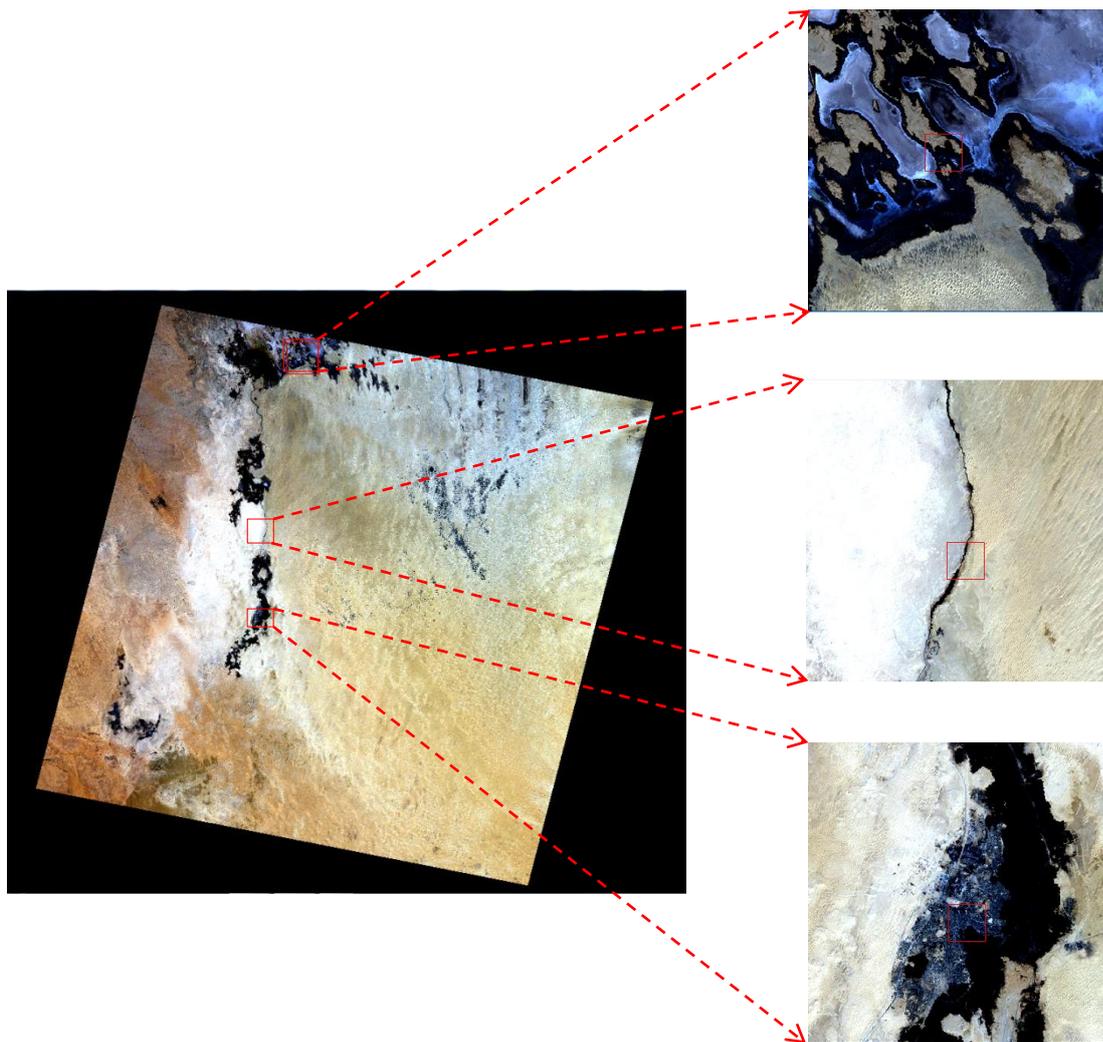
Inventaire des forages et analyse chimiques de la zone d'étude en 2016

N°PZ	APPELATION	Commune	X	Y	Z	NS (m)	Ca	Mg	K	Na	CL	So4	HCo3	TH	pH	Cond (ms/cm)	Résidu_Sec
PZ 12	MOUIH OUENSA	M.OUENSA	6° 32' 38"	33° 11' 30"	84	38,73	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 22	TALEB LARBI	TALEB LARBI	7° 30' 12"	33° 43' 52"	30	17,1	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 10	BEN GUECHA	BEN GUECHA	7° 37' 25"	34° 12' 18"	30	14,63	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 15	ELARFDJI	REGUIBA	6° 40' 04"	33° 39' 32"		48,1	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 23	MOUIH CHIKH	DOUAR EL MAE	7° 37' 34"	33° 32' 12"	39	0	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 24	DOUAR EL MAE	DOUAR EL MAE	7° 42' 51"	33° 21' 26"	39	0	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 11	ROBBAH	ROBBAH	6° 51' 53"	33° 09' 49"	92	34,76	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 16	SHANE BERRY	HASSI KHALIFA	7° 05' 24"	33° 34' 53"	50	37	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 14	UNIVERSITE	EL-OUED	6° 51' 34"	33° 23' 35"	72	45,85	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 09	STILL	STILL	5° 55' 07"	34° 16' 27"	14	32,3	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 07	OUM TIOUR	OUM TIOUR	5° 48' 29"	34° 09' 17"	20	44,9	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 05	BARKADJIA	EL-MEGHAIER	5° 46' 48"	33° 57' 14"	31	44,3	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 06	EL-MEGHAIER	EL-MEGHAIER	5° 55' 58"	33° 56' 43"	-2	23,2	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 04	SIDI KHLIL	SIDI KHLIL	5° 55' 47"	33° 50' 37"	21	38,2	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 08	EL-BARED	TENDLA	6° 00' 05"	33° 41' 21"	18	18,63	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 03	DJAMAA	DJAMAA	5° 58' 56"	33° 32' 53"	41	24,27	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
PZ 17	ROUTE EL-OUED	DJAMAA	6° 18' 40"	33° 38' 11"	59	30,45	341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
PZ 02	SIDI AMRANE	SIDI AMRANE	6° 03' 18"	33° 29' 17"	41	18,53	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138
PZ 01	CHOUCHA	SIDI AMRANE	5° 58' 11"	33° 23' 59"	55	23,3	367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
	Concession 1 El Annet Touggourt		5° 53' 46"	33° 08' 12"	79		367,5	243,2	16,5	555	969	1538	195,2	191,9	7,99	4,7	4798
	Station Chaib		5° 35' 46"	33° 08' 28"	135		341,3	253,4	13,8	345	628	1556	186,05	189,5	8,2	3,81	4184
	Forage Parcours		5° 29' 52"	33° 09' 30"	145	150	331,4	294,4	13,8	327,5	560	1663	195,2	203,9	8,06	3,71	4138

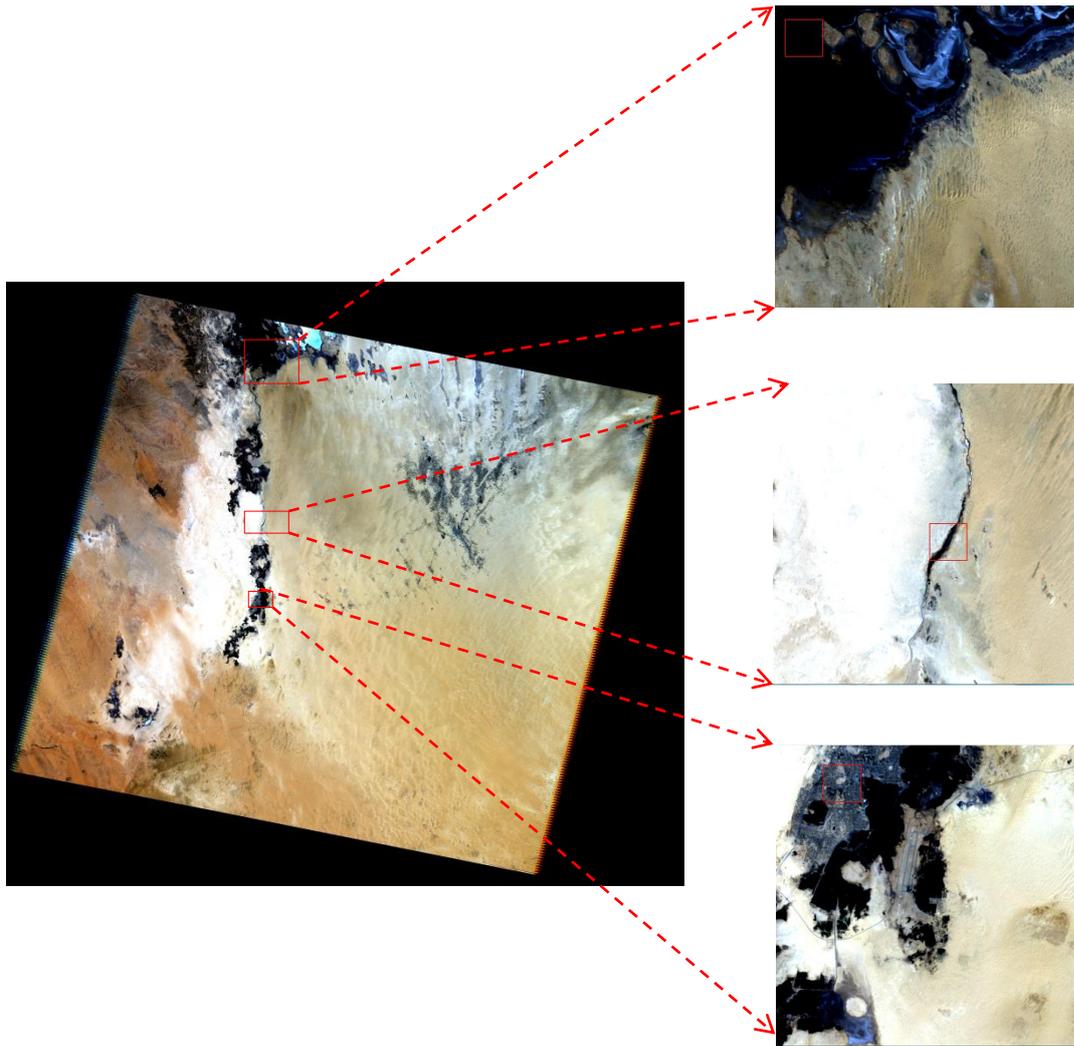
Annexe 4: Les Compositions colorées



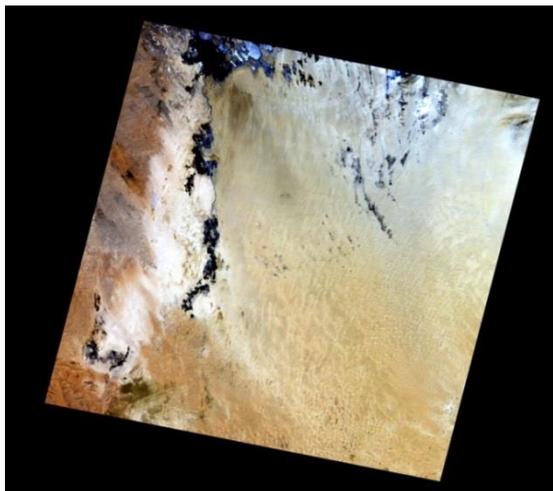
Composition colorée 321 (vraie couleurs) brute de l'année 1987.



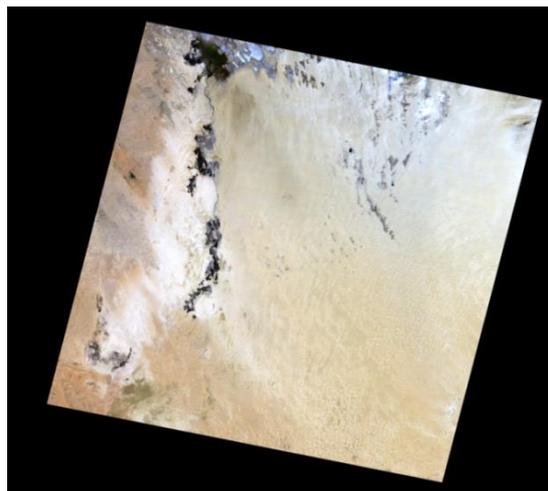
Composition colorée 321 (vraie couleurs) brute de l'année 2000.



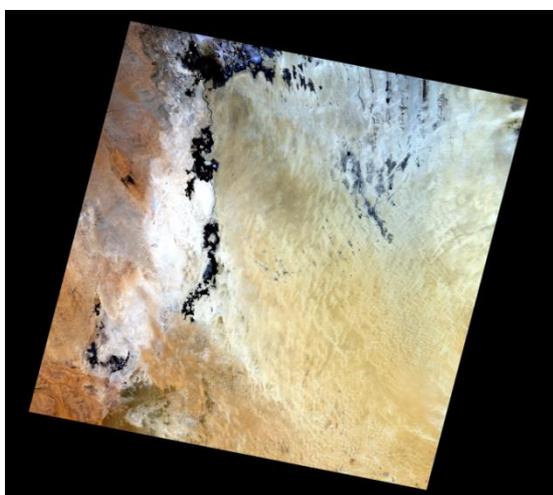
Composition colorée 321 (vraie couleurs) brute de l'année 2009.



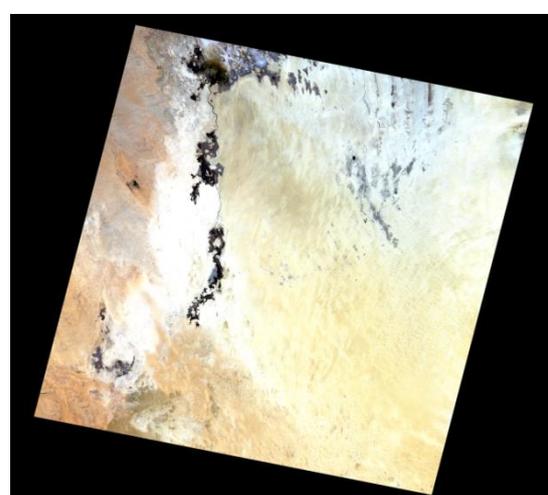
CC 321 année 1987 brute



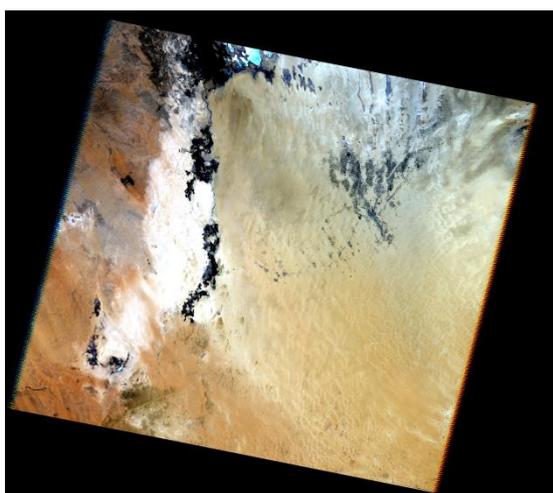
CC 321 année 1987 rehaussée



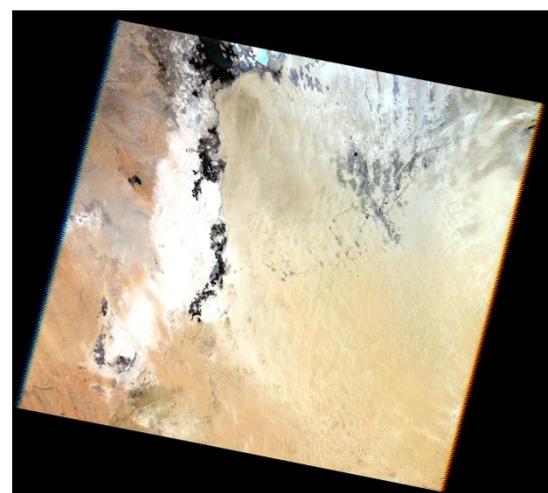
CC 321 année 2000 brute



CC 321 année 2000 rehaussée



CC 321 année 2009 brute



CC 321 année 2009 rehaussée

Compositions colorées 321 de la scène p193r037 couvrant la région d'Oued Righ