RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIIERSITÉ DE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

THESE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT 3ème CYCLE

Domaine : Science de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Présenté par :

M. OUKBA KOUNTA Habib

THÈME

Étude hydrogéologique des ressources en eau en zones arides du monde Arabe Application à la région de Ouargla en Algérie et Al-Qassim en Arabie Saoudite

Soutenu publiquement le : 07 Janvier 2021

Devant le jury d'examen :

M. DJIDEL Mohamed	**Pr. Université de Ouargla**	**Président**
M. HACINI Messaoud	**Pr. Université de Ouargla**	**Directeur de thèse**
M. NEZLI Imed Eddine	**Pr. Université de Ouargla**	**Co-encadreur**
M. GOUAIDIA Layachi	**Pr. Université de Tébessa**	**Examinateur**
M. BRINIS Nafaa	**MCA. Université de Batna 2**	**Examinateur**
M. BELKSIER Mohamed Salah	**MCA. Université de Ouargla**	**Examinateur**

Année Universitaire : 2020/2021

DÉDICACE

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL

A MA MÈRE QUE DIEU LA CONSERVE.
A MON PÈRE QUE DIEU LE CONSERVE AUSSI

A LA MÉMOIRE DE MA GRAND-MÈRE

A MA PETITE FAMILLE

A MES FRÈRES ET SŒURS

A MON COUSIN OUKBA KOUNTA SIDI MOHAMED

A MA PROF DE SCIENCES NATURELLES AU LYCÉE MADAME SHAABANE NADIA

A MES AMIS ASHEGGA MOHAMED ALI, LANSARI OTHMAN, BEL KHAIRE ABD ERAHMANE, SAIDATE YOUSSEF ET IDDA BOUCHA

QUI M'ONT TOUJOURS ENCOURAGÉ POUR TERMINER MES ÉTUDES.

Remerciements

Ce travail a été dirigé par Mr **HACINI Messaoud**, Professeur à l'université de Ouargla. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude pour ces conseils, ces remarques et sa disponibilité tout au long de cette étude. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour la patience et la bienveillance dont il a fait preuve.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur **NEZLI Imad Eddine**, Professeur à l'université de Ouargla. Remerciements particuliers aussi à Mr **Mohamed DJIDEL**, Professeur à l'université de Ouargla pour m'avoir accompagné de maîtriser les logiciels de cartographie et télédétection. Je remercie aussi Dr Sultan ben Hassan Al Sultan, professeur à l'université de Qassim (Buraydah, Arabie Saoudite).

Mes remerciements s'adressent aussi les membres de jury de soutenance : Mr **BELKSIER Mohamed Salah**, maître de conférences à l'université de Ouargla, Mr **GOUAIDIA Layachi**, Professeur à l'université de Tébessa et Mr **BRINIS Nafaa**, maître de conférences à l'université de Batna 2 pour accepter la participation à l'évaluation de ce travail.

Je suis très enchanté à l'égard de Mr **Zeddouri Aziez**, Professeur à l'université de Ouargla, pour ces conseils, et tous les enseignants de département des Sciences de la Terre et de l'Univers de Ouargla. Sans oublier de remercier Mr **Slimane Abdeldjabbare Ben Hamida**, membre de ANRH de Ouargla.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel du laboratoire des analyses physico-chimiques de ANRH de la région Ouargla, et plus particulièrement à Madame Zina, Mr BACHIR, Mr Arife.

Mes remerciements à tous mes amis qui m'ont constamment été d'un immense soutien tout au long de ce travail et j'adresse une pensée particulière, et une parfaite reconnaissance à Dr **AZIZI Yacine**, Dr **NEFIS Mouloud**, Dr **BOUKOFA Machati** et Dr **BOUCENNA Fatih**, Maîtres de conférences à l'université de Tamanrasset.

Résumé

Étude hydrogéologique des ressources en eau en zones arides du monde Arabe. Application à la région de Ouargla en Algérie et Al-Qassim en Arabie Saoudite

Dans le monde Arabe, l'eau est un sujet sur lequel de nombreux spécialistes ont écrit et publié de nombreux ouvrages et études. Ces dernières années, ce sujet est devenu une préoccupation à l'échelle mondiale.

L'objectif de ce travail est de faire une comparaison entre deux régions arides, qui sont Al Qassim et Ouargla, cette comparaison est à différents échelles ; climatique, géologique, hydrogéologique et hydro chimique, avec une étude cartographique des zones humides (Sebkhas et Chotts) par l'utilisation de l'outil télédétection.

Les deux régions sont des oasis sahariennes, qui se situent dans un milieu désertique aride, il existe entre eux des nombreuses caractéristiques similaires. Le climat dans les deux régions est aride caractériser par des températures élevés et intensive évaporation, la précipitation est plus intensive à Al Qassim, ce qui permet l'écoulement de Wadi Al Rummah. Géologiquement les deux régions se situent dans des bassins sédimentaires ; Ouargla se trouve à la plateforme Saharien et Al Qassim à la plateforme Arabe. Ces bassins sédimentaires contiennent des ressources en eau considérable, représenté au SASS en Algérie et prolongé à la Tunisie et la Libye et le système aquifère multicouches de la zone Saq au nord-est de l'Arabie Saoudite et se prolonge vers les frontières Irakiennes à l'est. La qualité des eaux peut être classée de bonne, moyenne à mauvaise et varie également d'un endroit à l'autre, cela est dû à la minéralisation très élevée, en générale les eaux de Saq à Al Qassim et l'Albien à Ouargla est de qualité moyenne à bonne.

Les résultats des analyses physicochimiques des eaux phréatiques de Ouargla, montre que ces eaux sont très salées avec une conductivité électrique très élevée, le pH est généralement alcalin. On distingue trois faciès chimiques ; chloruré sodique, sulfaté sodique et sulfaté magnésien.

Les travaux de cartographie par télédétection ont montré une évolution importante aux différentes surfaces des Sebkhas étudier, on a observé une augmentation de surface d'eau, sol humide dans les deux Sebkhas, la végétation a enregistré une diminution à Atarafiyah, par contre au Ouargla a vu une augmentation. Ces changements sont principalement le résultat de facteurs climatiques, ainsi que l'intervention du facteur humain.

Mots clé : Al Qassim, Ouargla, Hydrogéologie, Ressources en eau, Télédétection.

Abstract

Hydrogeological study of water resources in arid areas of the Arab world

Application on Ouargla in Algeria and Al Qassim in Kingdom of Saudi Arabia.

Water in the Arab world is a subject on which many specialists have written and many books and studies have been published on this subject. In recent years, this issue has become a source of global concern.

The objective of this work is to make a comparison between two arid regions, this comparison is on different scales; climatic, geological, hydrogeological and hydrochemical, with a cartographic study of Sebkhas and Chotts by the use of the remote sensing tool. The two regions Ouargla and Al Qassim are Saharan oases, found in an arid desert environment, between them there are many similar characteristics. The climate in the two regions is arid characterized by hot temperatures and intensive evaporation, the precipitation is more in Al Qassim than in Ouargla, which allowing the valleys to flow. Geologically, the two regions are located in sedimentary platforms, which are the Saharan platform and the Arab platform. These sedimentary basins contain considerable water resources, represented to the SASS in Algeria and extended to Tunisia and Libya, and the aquifer system of the Saq zone in the northeast of Saudi Arabia and extends towards the Iraqi borders to the East. The quality of these waters can be classified from good, average to poor, and this varies from place to place, this is due to the very high mineralization, in general the waters of Saq aquifer in Al Qassim and Albien aquifer in Ouargla is of medium to good quality.

The results of the physicochemical analyzes of the phreatic waters of Ouargla, show that these waters have very high salinity with a high electrical conductivity, the pH is generally alkaline. There are three chemical facies; sodium chloride, sodium sulfate and magnesium sulfate. The cartography's results by remote sensing showed an important evolution of the different surfaces in the studied Sabkhas, it shows the increase of water surface, wet soil in the two Sabkhas, the vegetation recorded a decrease in Atarafiyah but on the other hand in region of Ouargla, it was seen an increase. These changes are primarily the result of climatic factors, as well as the intervention of the human factor.

Keywords: Al Qassim, Ouargla, Hydrogeology, Water resources, Remote sensing.

Étude hydrogéologique des ressources en eau en zones arides du monde Arabe. Application à la région de Ouargla en Algérie et Al-Qassim en Arabie Saoudite

ملخص

دراسة هيد وجيولوجية للموارد المائية في المناطق الجافة للوطن العربي

دراسة تطبيقية على منطقة ورقلة بالجزائر ومنطقة القصيم بالمملكة العربية السعودية

تعتبر قضية المياه في العالم العربي موضوع كتب عنه الكثير من المختصين، وصدرت العديد من الكتب والدراسات في هذا الصدد، فقد أصبحت هذه القضية في السنوات الأخيرة مصدر قلق على الصعيد العالمي.

الهدف من هذه العمل هو دراسة مقارنة بين منطقتين قاحلتين، هما القصيم وورقلة. هذه المقارنة على عدة اصعدة سواء كانت مناخية، جيولوجية، هيد وجيولوجيا، وكذألك هيدروكميائية. هذا بالإضافة الى انتاج خرائط لمكونات السطح لمناطق السباخ والشطوط باستعمال تقنيات الاستشعار عن بعد في كلتا المنطقتين.

تعتبر كل من منطقة القصيم وورقلة مناطق واحات، تقع في مناطق صحراوية قاحلة. تتشابه هذه الواحتين في عدة خصائص. فمن الناحية المناخية يسود كل من الواحتين مناخ صحراوي جاف، يمتاز بارتفاع درجة الحرارة وشدة التبخر. اما بالنسبة للأمطار فتزيد نسبة التساقط في القصيم عن ورقلة، مما يسمح بجريان وادي الرمة خلال الفترات المطيرة. جيولوجيا تقع كل من المنطقين في احواض رسوبية: هما الهضبة الصحراوية والرصيف العربي. تمتاز هذه الاحواض الرسوبية باحتوائها على مخزونات هامة من المياه الجوفية، تتمثل في نظام المياه الجوفية للصحراء الشمالية الشرقية في الجزائر وصولا الى تونس وليبيا، ونظام طبقات المياه الجوفية لمنطقة الساق في الشمال الشرقي للمملكة العربية السعودية وصولا الى الحدود العراقية شرقا. يمكن تصنيف نوعية هذه المياه من جيدة، متوسطة الى رديئة، وتختف من مكان الى آخر ويرجع ذألك الى ارتفاع نسبة الملوحة لهذه المياه، بصفة عامة تصنف نوعية المياه لكل من طبقة الساق وطبقة الأبيا ضمن التصنيف من جيدة الى متوسطة.

أظهرت نتائج التحاليل الفزيوكميائية لمياه الطبقة الحرة في منطقة ورقلة، ان هذه المياه ذات ملوحة عالية تمتاز بدرجة ناقلية مرتفعة. كما نلاحظ ارتفاع نسبة كل من الاملاح التالية: الكلور، الصوديوم والمغنيزيوم. أظهرت الخرائط المنتجة من تحليل صورالأقمارالصناعية بواسطة الاستشعار عن بعد من ملاحظة التطورات الكبيرة التي طرأت على السباخ والشطوط، حيث لاحظنا زيادة في مساحة المياه والسطح الرطب، اما المساحة النباتية فسجلت زيادة في ورقلة بينما تقلصت مساحتها في الطرفية. هذه التغيرات هي نتيجة للعوامل المناخية بالإضافة الى تدخل العامل البشري

الكلمات المفتاحية: القصيم، ورقلة، هيدروجيولوجيا، الموارد المائية، الاستشعار عن بعد.

SOMMAIRE

DÉDICACE I

REMERCIEMENT II

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS III

RÉSUMÉ EN ENGELAIS IV

RÉSUMÉ EN ARABE V

SOMMAIRE VI

LISTE DES FIGURES X

LISTE DE TABLEAUX XIV

Introduction générale **14**

Problématique de la thèse **16**

I. GÉNÉRALITÉ SUR LA ZONE D'ÉTUDE **4**

1. Localisation géographique **4**

1.1. La région de Al Qassim **4**

1.2. La région de Ouargla **5**

2. Généralité sur les oasis **7**

2.1. Les caractéristiques générales de l'espace oasien **8**

2.2. Les différents types d'oasis dans le monde **8**

2.3. Les fonctions de l'oasis **9**

2.3.1. La production 9

2.3.2. La résidence 10

2.3.3. Le passage 10

2.3.4. Le point de départ des conquêtes 10

2.4. La bioclimatologie des oasis **10**

2.4.1. L'effet de l'oasis 10

2.4.2. L'effet brise-vent de l'oasis 11

2.5. Les oasis et leurs systèmes hydrauliques traditionnels **11**

3. Présentation des Sebkhas et des chotts (zones humides) **13**

3.1. Cuvette d'Ouargla **14**

3.1.1. Sebkha Oum Erranebe 14

3.1.2. Sebkha Safioune 15

3.1.3. Chott Ain Beida 15

3.2. La région de Al Qassim **17**

3.2.1. Le lac salé Al Aushaziyah 17
3.2.2. Sebkha Gawaymid 18
3.2.3. Sabkhat Atarafiyah 18
4. Cadre socio-économique de la zone d'étude 20
4.1. Croissance démographique et évolution de la population de la zone d'étude 20
4.2. Les d'activités agricoles 22
II. MATÉRIELS ET MÉTHODES 23
1. Hydrochimie 23
1.1. Travail sur terrain 24
1.1.1. Echantillonnage 24
1.1.2. Matériels d'échantillonnage 24
1.1.3. Les mesures in site 24
1.2. Travail au laboratoire 25
1.2.1 Par spectrophotométrie 25
1.2.2. Par spectrophotométrie à absorption atomique 25
1.2.3. Par photométrie de flamme 25
1.2.4. Par titrimétrie 26
1.2.5 Par complexométrie 26
1.2.6. Par potentiométrie 27
1.2.7. Préparation des solutions 27
1.2.8. Mesures des potentiels 27
1.2.9. Établissement de la courbe d'étalonnage et expression des résultats 28
2. La cartographie des Sebkhas et des chotts 29
2.1. Principe et base physique de la télédétection 29
2.1.1. Principe et domaine d'application 29
2.1.2. Les bases physiques de la télédétection 31
2.2. Les données satellitaires utilisées 34
2.2.1. La région de Ouargla 34
2.2.2. La région de Al Qassim 34
2.3. Analyse des données satellitaires 36
2.3.1. Les prétraitements d'image 36
2.3.2 Photo-interprétation 37
2.4. Post classification 42
2.4.1. Matrice de confusion 42
2.4.2. Analyse majoritaire et minoritaire (Majority /Minority Analysis) 43
2.4.3. La détection des changements (Change detection) 43

2.4.4. Cartographie par ArcGIS 10.3 44
3. Logiciels utilisés 44
3.1. ENVI 5.1 44
3.2. ILWIS 3.8 44
3.3. ArcGIS 10.3 45
3.4. Google Earth 45
3.5. Diagramme 45
3.6. Phreeqc Version 3.3.7 45
PARTIE III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 47
III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 46
1- Hydro climatologie 46
1.1. Aperçu sur quelques composantes du climat 46
1.1.1. Les précipitations 47
1.1.2. Température : 48
1.1.3. Evaporation 49
1.1.4. Les vents 50
1.2. Classification climatique 51
1.2.1. Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls 51
1.2.2. Le diagramme pluviothermique de Pouget 51
1.2.3. Indice d'Aridité De Martonne 52
1.2.4. Le bilan d'eau 53
1.3. Conclusion : 55
2- Le contexte géologique 55
2.1. La géologie régionale 55
2.2. La géologie locale 61
2.3. La litho- stratigraphie 63
2.4. Discussion 68
3. La tectonique : 69
4. Contexte hydrogéologique 71
4.1. La région de Al Qassim 71
4.1.1. L'aquifère de grès Saq 73
4.1.2. L'aquifère de grès Kahfah 75
4.1.3. L'aquifère de grès Quwarah-Sarah 75
4.1.4. Les aquifère de grès et de calcaire Jauf, grès de Jubah et Barwath 76
4.1.5. L'aquifère de calcaire Khuff 76
4.1.6. Le système aquifère STQ 77

4.2. La région de Ouargla 80
4.2.1. Le Continental Intercalaire 80
4.2.2. Le Complexe Terminal 83
3.2.3 Le contexte hydrogéologique local 85
4.3. Discussion 88
5. Contexte hydrochimique 89
5.1. Hydrochimie des eaux des aquifères profonds 89
5.1.1. La région Al Qassim 89
5.1.2. La région de Ouargla 92
5.1.3. Discussion 95
5.2. Hydrochimie des eaux de la nappe phréatique de Ouargla 95
5.2.1. Les paramètres physicochimique (mesurer in site) 96
5.2.2. Les paramètres chimiques mesuré au laboratoire 98
5.2.3. Détermination des faciès chimique 102
5.2.4. Présentation graphique sur le diagramme de Piper 102
5.3. Utilisation des eaux phréatique pour l'irrigation 103
5.4. Indices de saturations (IS) des eaux phréatiques 105
6. La cartographie de Sebkhas et des Chotts 106
6.1.1. Validation de classification 106
6.1.2. Matrice de changement 110
6.1.3. Cartographie de changement 112
6.1.4. Conclusion : 114
6.2. Représentation d'évolution saisonnière de Sabkhat Atarafiyah au cours des année 1986, 2000 et 2016, et au Sebkha Oum Erranebe au cours des années 1987, 2000 et 2016. 116
6.2.1. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sabkhat Atarafiyah 116
6.2.2. Représentation d'évolution saisonnière de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Beida au cours des année 1987, 2000 et 2016. 123
6.3. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sabkhat Atarafiyah et Sebkha Oum Erranebe 129
6.3.1. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sabkhat Atarafiyah (1986, 2000 et 2016)... 129
6.3.2. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sebkha Oum Erranebe (1987,2000 et 2016)133
6.4. Conclusion 136
Conclusion générale 138
Références Bibliographiques 140

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Situation géographique de la région Al Qassim ……..……..…...04

Figure 02 : Localisation de zone d'étude ……..…….....05

Figure 03 : **:** Situation géographique de la zone d'étude……..……06

Figure 04 : Localisation de zone d'étude (la ville de Ouargla et ses alentours)……..……..07

Figure 05 : **:** Zones arides et systèmes d'oasis dans le monde……...……....09

Figure 06 : Situation géographique de sebkha Oum Erranebe……..……15

Figure 07 : Situation géographique de sebkha Safioune…….……16

Figure 08 : Situation géographique de chott de Ain El-Beida …….……...16

Figure 09 : Situation Géographique des zones de Sebkhas et le lac de la région Al Qassim …...……17

Figure 10 : Situation géographique du lac salé Al Aushaziyah …….……18

Figure.11 : Situation géographique de Sebkha Gawaymid ……..……...19

Figure 12 : Situation géographique du Sabkhat Atarafiyah…….……20

Figure 13 : Localisation des points d'eau échantillonnés …….……...23

Figure .14 : Courbe d'étalonnage du sodium…….……..25

Figure 15 : Courbe d'étalonnage du potassium…….……...26

Figure 16 : Courbe d'étalonnage de l'électrode spécifique du potentiel E vs log [F^-]……...……28

Figure .17 : Principe de la télédétection (Source : http://www.alertes-meteo.com).....31

Figure 18 : Représentation de l'onde électromagnétique…….……32

Figure 19 **:** Détails des domaines spectraux…….……32

Figure 20 : Signatures spectrales de quelques minéraux et roches……..……..…33

Figure 21 : Les signatures spectrales des classes humides en 2016 au lac salé Al Aushaziyah……...…..……..…35

Figure 22 : Augmentation de la résolution spatiale des images de Landsat (image sharpening) .....…….……37

Figure 23 : Augmentation du contraste dans une image avant et après un rehaussement linéaire ……..…....38

Figure 24 : Choix des zones d'intérêt (Regions Of Interest -ROI-)……..…….42

Figure 25 : Précipitation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015……..……...47

Figure 26 : Température moyenne mensuelle (°C) de la période 1996-2015 ……..……..48

Figure 27 : Evaporation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015 ……..…...49

Figure 28 : Vitesse moyenne mensuelle de vents (mm) de la période 1996-2015 ……..…….50

Figure 29 : Diagramme Ombrothermique de la zone d'étude 1996-2015 ……..…….51

Figure 30 : Diagramme pluviothermique et bioclimatique, inspiré de Pouget (1980)…….……52

Figure 31 : Carte géologique de la péninsule arabique (D'après Le-Nindre et al. (2003)).)….…..…56

Figure 32 : coupe géologique transversale de la plateforme Arabe à l'Arabie Saoudite vers Qatar (D'après Le-Nindre et al. (2003))…….…….…...57

Figure. 33 : A : Le découpage de l'espace saharien (Brule et al, 2003).B : Coupe géostructurale transversale régionale (WEC, 2007)……58

Figure 34 : Carte géologique du SASS (OSS, 2003)……..…….…60

Figure 35 : Carte géologique de la zone du Projet Saq (BRGM/ATC, 2008a)……..……...61

Figure 36 : Relief géologique de la région d'Ouargla Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT……...…….62

Figure 37 : Log des forages hydraulique à l'aquifère Saq ……..…….64

Figure 38 : Colonne stratigraphique de la formation Unayzah à la ville de Unayzah (Al Qassim) (Al-Laboun, 1987)……65

Figure 39 **:** Colonne stratigraphique de la formation Khuff **(**D'après Vaslet et al, 2005)……..……..66

Figure 40 : Logs stratigraphiques des forages d'eau à l'Albien (ANRH, 2004)…….……..…67

Figure 41 : Carte structurale de Péninsule Arabe (Fox et Ahlbrandt, 2002)…….……...…69

Figure 42 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara …….……..……..70

Figure.43 : Carte des principaux aquifères de la platform Arabe ……..……..72

Figure 44 : Carte hydrogéologique de l'aquifère Saq ……..……73

Figure 45 : L'évolution de volume des eaux exploité dans la zone Saq et Al Qassim……..……...72

Figure 46 : Carte de la profondeur du toit de l'aquifère Saq (en mètres sous le niveau du sol) ……..…….74

Figure 47 : Carte piézométrique estimée de l'aquifère Saq en 2005 (BRGM/ATC, 2008a)……..……...74

Figure 48 : A : Log stratigraphique des puits hydrauliques à la région de Al Qassim B : Coupe transversale des formations STQ …….…….…….79

Figure 49 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)…….……81

Figure 50 : Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)……..……..82

Figure 51 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)……..……..82

Figure. 52 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)……..…….84

Figure 53 : Courbe d'étalonnage de l'électrode Logs stratigraphiques des forages d'eau à l'Albien (ANRH,2004)…….…….……85

Figure 54 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique Dans la cuvette de Ouargla, période 1992-2002 (BG, 2004) ……87

Figure 55 : Schéma illustratif pour résoudre le problème de la remontée des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla d'après BG (2004)……..88

Figure 56 : la profondeur et de l'aquifère Saq et la conductivité électronique des eaux à l'échelle régional (BRGM 2008)……..……...…..91

Figure 57 : Diagramme de Piper. Classification des faciès chimique des eaux de Saq au nord- ouest de l'Arabie Saoudite (Yousef Nazzal et al, 2014)…….…….……92

Figure 58 : Diagramme de Piper. Classification des faciès chimique des eaux de Moi-pliocène du Sahara septentrional (HOUARI Idir Menad 2011)…….…….94

Figure 59 : Variation du Température des eaux de nappe phréatique de Ouargla……..…..…96

Figure 60 : Variation du Ph des eaux de nappe phréatique de la cuvette de Ouargla……..…….97

Figure 61 : Variation de la concentration de CE des eaux phréatique de la cuvette de Ouargla ……97

Figure 62 : Variation de la concentration Ca^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla……...98

Figure 63 : Variation de la concentration Mg^{2+} au niveau de la cuvette de Ouargla ……99

Figure 64 : Variation de la concentration Na^{+} au niveau de la cuvette de Ouargla ……99

Figure 65 : Variation de la concentration K^{+} au niveau de la cuvette de Ouargla……..……100

Figure 66 : Variation de la concentration SO_4^{2-} au niveau de la cuvette de Ouargla……101

Figure. 67 : Variation de la concentration Cl^{-} au niveau de la cuvette de Ouargla ……101

Figure. 68 : Variation de la concentration HCO_3^{-} au niveau de la cuvette de Ouargla ……102

Figure. 69 : Diagramme de Piper des eaux de la nappe phréatique de Ouargla ……..…...103

Figure.70 : Diagramme de Richards des eaux de la nappe phréatique …….…….104

Figure.71 : Indice de saturation des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla ……105

Figure. 72 : Evolution des états de surface au Sebkha Safioune au cours de 2016……..……...107

Figure. 73 : Evolution des états de surface au Lac salé Al Aushaziyah au cours de 2016…….……108

Figure. 74 : Evolution de l'occupation de sol du lac salé Al Aushaziyah (au cours 2016)…….……...110

Figure. 75 : Evolution de l'occupation de sol de Sebkha Safioune (au cours 2016)…….…….111

Figure. 76 : Cartographie du changement de l'occupation du sol au lac salé Al Aushaziyah (Janvier à Aout 2016) ……...113

Figure. 77 : Cartographie du changement de l'occupation du sol au Sebkha entre Janvier et Aout 2016……..…115

Figure. 78 : Evolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 1986……..….116

Figure. 79 : Cartographie de l'évolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 1986……...117

Figure. 80 : Evolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2000……..118

Figure. 81 : Cartographie de changement des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2000……...120

Figure. 82 Evolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2016…….….……121

Figure. 83 : Cartographie de changement des états de surface au Sabkhat Atarafiyah (Février – Aout 2016)……..……122

Figure. 84 : Evolution des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 1987……...123

Figure.85 : Cartographie de changement des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 1987)…….……..124

Figure.86 : Evolution des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 2000……...125

Figure.87 : Cartographie de changement des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 2000)…….……..126

Figure.88 : Evolution des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Beida au cours de l'année 2016……...127

Figure.89 : Cartographie de changement des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 2016) …….……..128

Figure 90 : Carte d'évolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah entre 1986 et 2016…….…….……132

Figure.91 : Carte d'évolution des états de surface Sebkha Oum Erranebe entre 1987 et 2016……..……136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Les données d'étalonnage de l'électrode spécifique…….……..28
Tableau 02 : Bandes spectrales de Landsat 5 TM et Landsat-8 OLI……..……..35
Tableau 03 : Coordonnées des deux stations météorologiques des régions étudier……..……...46
Tableau. 04 : Précipitation mensuelle moyenne (mm), période 1996-2015……..……...47
Tableau. 05 : Température moyen mensuelle (°C) de la période 1996-2015……..…….48
Tableau. 06 : Evaporation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015……..……....49
Tableau. 07 : Vitesse moyenne mensuelle de vent (m/s) de la période 1996-2015……..……50
Tableau. 08 : Bilan Hydrique de la région de Al Qassim……54
Tableau. 09 : Bilan Hydrique de la région de Ouargla……54
Tableau. 10 : Variation des paramètres physicochimique des eaux de la nappe phréatique……..….…..93
Tableau. 11 : Faciès chimiques et formules ioniques des échantillons……...……100
Tableau. 12 : Caractéristiques du lac salé Al Aushaziyah et sebkha Safioune……..….…106
Tableau 13 : Récapitulatif de la précision des classifications du lac salé Al Aushaziyah…….….….…107
Tableau 14 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Safioune…….….…..107
Tableau 15 : Récapitulatif de la précision des classifications de Oum Erranebe……..….….121
Tableau 15 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Oum Erranebe (Février-Aout 2000)…….123
Tableau.17 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sabkhat Atarafiyah (1986,2000, 2016)…….126
Tableau 18 : Matrices de changement entre 1986 et 2000 de Sabkhat Atarafiyah……..….…...127
Tableau 19 : Matrices de changement entre 2000 et 2016 de Sabkhat Atarafiyah……..….…...128
Tableau 20 : Matrices de changement entre 1986 et 2016 de Sabkhat Atarafiyah……..……....128
Tableau 21 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Oum Erranebe (1987,2000 et 2016)…….129
Tableau 22 : Matrices de changement entre 1987 et 2000 de Sebkha Oum Erranebe…….……..….131
Tableau 23 : Matrices de changement entre 2000 et 2016 de Sebkha Oum Erranebe…….…..…….132
Tableau 24 : Matrices de changement entre 1987 et 2016 de Sebkha Oum Erranebe……...…….133

Introduction générale

Les oasis jouent un rôle primordial dans le développement de civilisation humaines, avec notamment les immenses oasis d'Égypte et de Mésopotamie. Les oasis du Moyen Orient ont été ainsi, pendant des millénaires, des centres de rayonnement universel, de qualité supérieure, et leur modèle a été adapté et généralisé dans monde. Elles ont eu un caractère structurant pour l'ensemble de la démarche des civilisations humaines, c'est le modèle fondamental de la durabilité (Fassi D. 2017).

Le mot Oasis a été toujours lié au l'eau, palmeraie et déserte. C'est une zone de végétation isolée dans un désert, créée et entretenue par l'homme. On le trouve à proximité d'une source d'eau, lorsque l'eau phréatique est suffisamment proche de la surface du sol ou encore parfois sur le lit d'une rivière venant se perdre dans les dunes de désert où se jettent dans des dépressions fermé, c'est le cas de notre zone d'étude, l'oasis de Ouargla s'occupe le bas lit de oued M'ya dans le bas Sahara Algérienne, alors que l'oasis de Al Qassim se trouve au lit de Wadi Al Rummah au plateau Nedjed dans le centre de l'Arabie Saoudite. Les deux oasis sont connues dans le monde Arabe depuis longtemps, par leurs productions de dattes luxe, et des autres produit agricole, En plus de cela les deux régions connus par leurs bonnes qualités de sel qui est extrait de Sebkhas, où on a le sel de Ashaqqa à Al Qassim, et le Sel de Chott de Ain Beida à Ouargla (dans les années 1970). Les Sebkhas sont des zones humides d'une importante richesse, ces zones humides salifères ont connu une grande détérioration, ils caractérisent les zones arides, on les trouve sauvant proche des oasis, joue le rôle de l'exutoires naturels. Ces oasis ont joué un rôle important dans le passé. Ils ont représenté en étant un espace de stabilisation, production agricole et culturelle, un rôle vital dans le domaine du divertissement, car à sa localisation stratégique au centre des grands espaces désertiques.

La gestion des ressources en eau et la protection des écosystèmes dans les oasis, considéré les conditions climatiques et le développement démographique et industriels actuel, c'est un grand défi qui nous oblige à déployer de grands efforts et à utiliser des méthodes et technologies modernes tel que la télédétection comme exemple, pour arriver à détecter les changements et trouvé les solutions aux problèmes pour sauvegarder et assurer la durabilité de cet espace vitale.

La thèse proposée est structurée en trois parties principales :

La première partie **Généralité sur la zone d'étude** : est consacré à la description de la situation géographique notre région d'étude, généralité sur les oasis, présentation des zones humide de la zone d'étude et aussi étude socioéconomique.

La deuxième partie - **Matériels et méthodes** : nous présentons les conditions et les modalités d'échantillonnage, les techniques de mesure et d'analyse des échantillons ainsi que les outils informatiques utilisés pour le traitement de nos résultats, et aussi les différentes étapes et méthodes des traitements et d'analyse des images satellitaires.

La troisième partie - **Résultats et discussion** : cette partie est consacrée aux éléments de la comparaison entre les deux régions d'étude (climatique, géologique, hydrogéologique et hydro chimique). Elle contient une discussion sur la comparaison entre les deux régions d'études, afin d'identifier les différences et les similitudes caractéristiques. L'interprétation et la discussion des résultats des analyses physicochimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (en déterminant les faciès chimiques, les indices de saturation et classer ces eaux pour connaitre leurs aptitudes à l'irrigation), et aussi pour le travail de la cartographie par l'outil télédétection avec une interprétation et discussion des résultats de différents traitements multispectrales des images satellitaire.

A la fin une **conclusion générale** synthétise les résultats de cette étude et quelques recommandations.

Problématique de la thèse

La zone d'étude fait partie de monde Arabe, elle est représentée aux deux régions, qui se trouvent au nord du tropique du Cancer, à une latitude rapprochée. Le premier se trouve en Asie, qui est la région Al Qassim dans le plateau Nedjd au centre de l'Arabie Saoudite, et le deuxième se trouve en Afrique, qui est la région Ouargla dans le bas Sahara septentrionale Algérienne. Les deux régions sont des oasis sahariennes dans un milieu désertique aride.

Les zones Sahariens soit au nord de l'Afrique où au péninsule Arabique sont caractérisé par un climat aride, chaud et sec, ces conditions climatiques influent directement sur les écoulements. Il existe dans le Monde Arabe d'immenses territoires où aucun écoulement n'est organisé. C'est le cas des régions sahariennes Algériennes dans le bas Sahara, où l'endoréisme domine : les Oueds intermittents se jettent dans des dépressions fermées (Sebkhas). La faiblesse des précipitations se conjugue avec l'importance de l'évaporation pour rendre compte de cette situation. Ce n'est que dans la faible frange humide que se forment des réseaux hydrographiques mais le relief, morcelé, fractionné, montagnard n'autorise pas la constitution de réseaux hydrographiques de grande ampleur et bien structurés. Les montagnes mieux arrosées assurent des écoulements permanents mais les régimes des cours d'eau sont très irréguliers : de très fortes crues, extrêmement brutales, soudaines s'opposent à des étiages très creusés en été comme il a été constaté en Arabie Saoudite, avec l'exemple de Wadi Al Rummah à Al Qassim. Malgré ces contraintes naturelles sévères, il existe dans le sous-sol désertique d'immenses aquifères dans le matériel sédimentaire qui recouvre le vieux socle sur d'énormes épaisseurs. Le système aquifère du Sahara septentrional en Algérie, Tunisie et prolonge à l'ouest de la Libye, ainsi que le système aquifère multicouche de la plateforme Arabe en Arabie saoudite.

Ces caractéristique géographique, astronomique et climatique similaires aux deux régions, qui nous a incités à faire une étude comparative entre les deux Oasis. Cette comparaison à différentes échelles ; climatique, géologique, hydrogéologique, hydro chimique et au niveau de surface ; une comparaison de l'évolution des sebkhas par l'utilisation de l'outil télédétection, pour connaitre l'évolution de ces zone humide salifères dans le temps et dans l'espace et l'effet des conditions climatiques, afin de cartographie leurs changement. Enfin nous allons essayer d'extraire les points de forces et des faiblesses les plus importantes, afin de limiter les risques et les défis qui conduisent à la dégradation de l'écosystème oasien et assurer la promotion de la durabilité de ces espaces. Cela va contribuer au développement des systèmes d'exploitation rationnelle des ressources et des ressources durables dans les deux zones et instauré un système commun de gestion de ces écosystèmes environnementales fragile.

PARTIE I.

GÉNÉRALITÉ SUR LA ZONE D'ÉTUDE

I. GÉNÉRALITÉ SUR LA ZONE D'ÉTUDE

1. Localisation géographique

La zone d'étude fait partie de monde Arabe, elle est représentée en deux régions, le premier se trouve en Asie, qui est la région Al Qassim au centre de l'Arabie Saoudite, et le deuxième se trouve en Afrique, qui est la région Ouargla au bas Sahara dans le sud-est de l'Algérie, ces sont des Oasis vert dans un milieu saharien aride.

1.1. La région de Al Qassim

La première région d'étude est Al Qassim qui se trouve au centre de l'Arabie Saoudite à 300 km, De capitale de paye (Riyadh), Comprise entre 24° 30\ et 27° 15\ de latitude, et 41° 50\ et 44° 50\ E de longitude. Elle s'étend sur une superficie de **79 296 km²** (Ministère d'enseignement supérieur, 1999**)** et une altitude de 600 à 750 m au-dessus du niveau de la mer, avec une population de 1 215 858 habitants (Villes saoudiens, 2012).

Elle est limitée par :

- La région de Ryiadh au sud et est
- La région de Ha'il au nord
- La région de Al Madinah à l'ouest

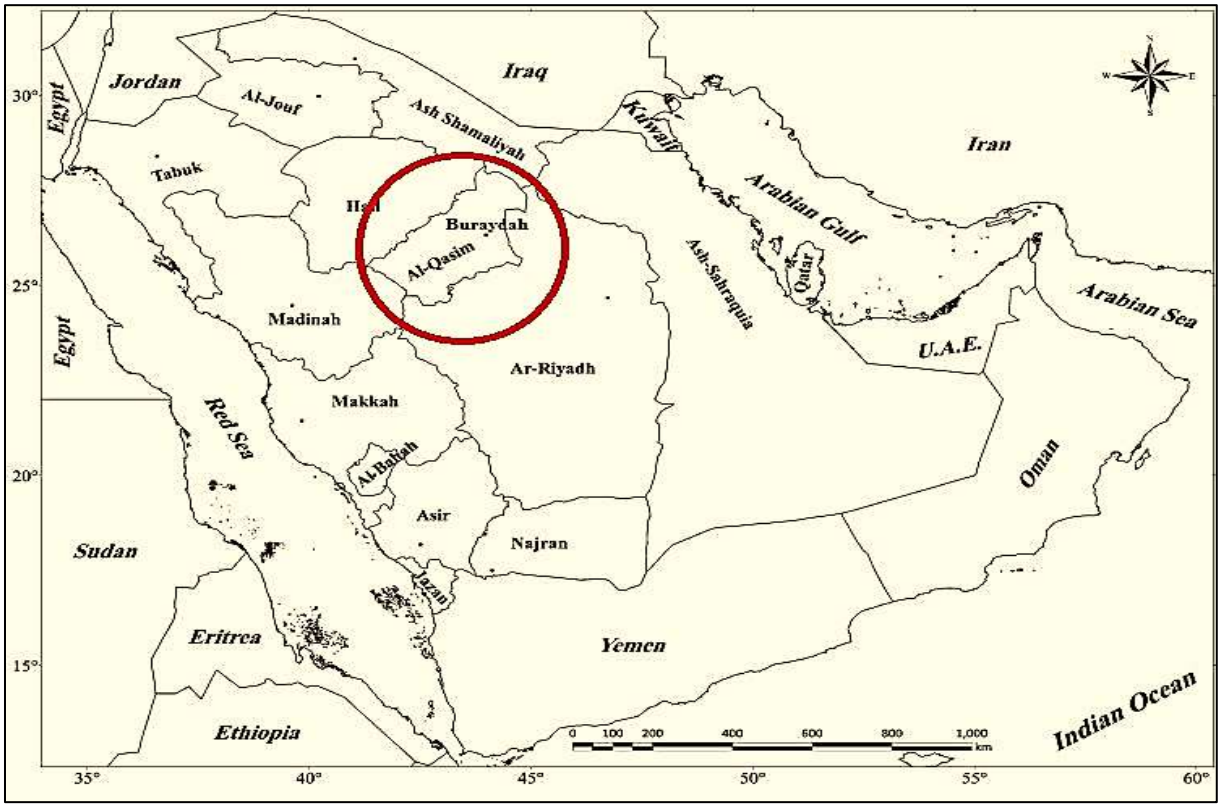


Figure 01 : Situation géographique de la région Al Qassim

La région de Al Qassim, globalement divisée par la vallée de **Al-Rummah**, qui traverse toute la région de l'ouest au nord-est. C'est la plus longue vallée de toute la péninsule arabique, sur environ de 600 km de longueur (370 miles), qui descend du l'ouest à l'est depuis les montages de l'est de la région de Médina et se termine aux dunes de **Thuayrat**, au nord-est de la région. Al Qassim est l'une de petite région parmi les 14 régions administratives à l'Arabie Saoudite, la ville principale de la région est Buraydah qui se site à 350 km de la capitale de paye (Riyad).

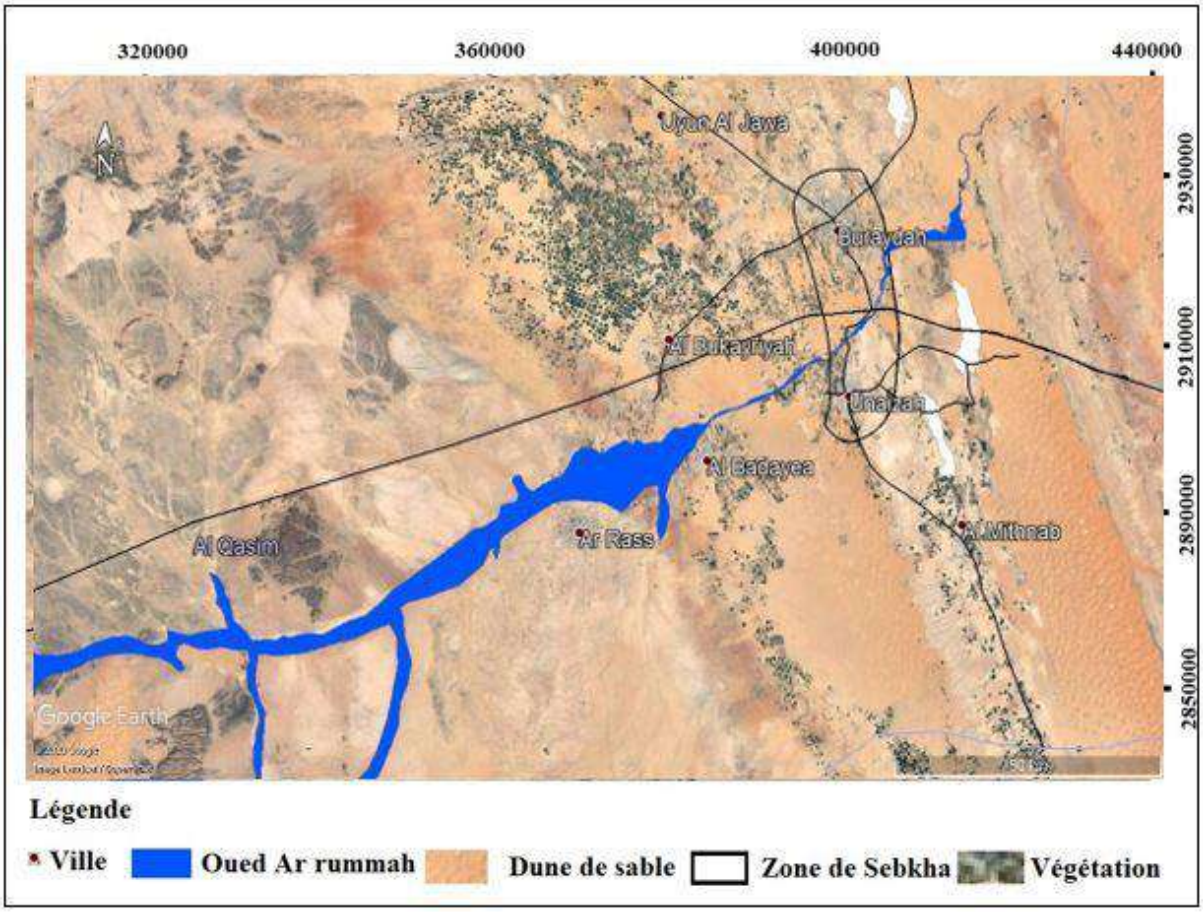


Figure 02 : Localisation de la région d'étude Al Qassim (Image de google Earth géoréférencée avec ArcGIS)

1.2. La région de Ouargla

La deuxième zone d'étude est la région de Ouargla qui est par sa position géographique centrale et de sa proximité avec les bassins pétroliers et gaziers s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien. Elle se situe dans le Sud-est de l'Algérie, elle est distante de 850 Km de la capitale Alger (Figure 03). Elle se trouve limitée au Nord par la wilaya de Biskra, au Sud par la wilaya de Tamanrasset, au Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa, à l'Est par la wilaya d'El Oued, et au Sud-est par la wilaya d'Illizi.

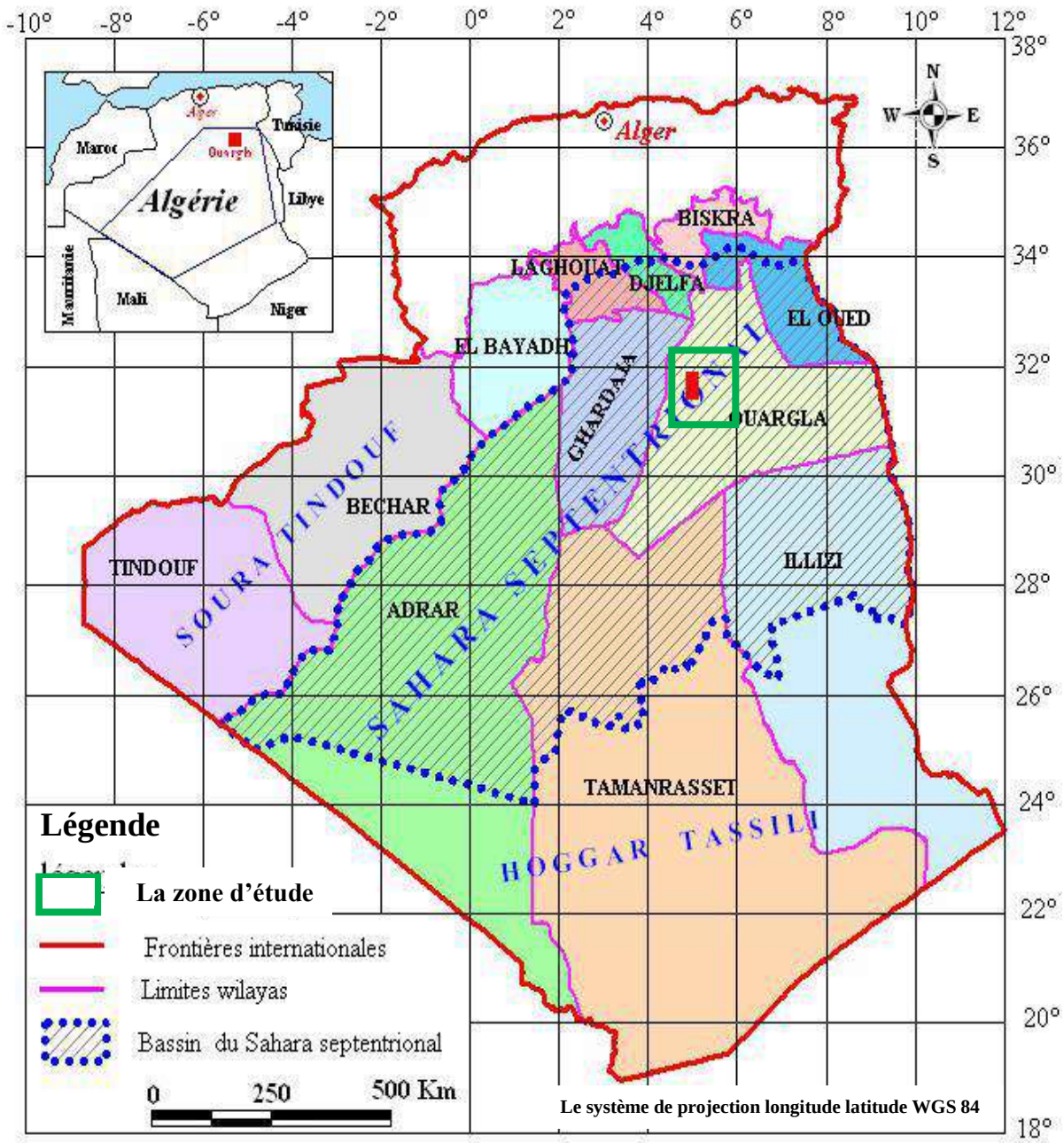


Figure 03 : Situation géographique de la région de Ouargla

La ville de Ouargla et ses alentours se trouve à une altitude moyenne de 164 m. Elle occupe le bas fond de la vallée de l'oued M'ya qui draine le versant Nord du plateau de Tademaït et s'achève à Sebkha Safioune, 20 km au Nord de Ouargla.

La région se trouve encaissée au fond d'une cuvette très large de la basse vallée de l'Oued M'ya. Cette dernière est caractérisée par une dissymétrie marquée par la présence d'une falaise occidentale particulièrement nette et continue, tandis que la limite orientale est imprécise.

* A l'Ouest : Un plateau calcareux surplombe la cuvette d'Ouargla à environ 230m d'Altitude en confluence avec Oued Mzab et Oued N'sa.

* A l'Est : On constate un plateau, dont les limites ne sont pas nettes, avec une altitude ne dépassant pas 160 m. les rebords de ce plateau disparaissent souvent sous les sables (Erg Touil, Erg Boukhezana, Erg Arifdji).

* Au Sud : un massif dunaire recouvre les ruines de Sedrata, son altitude dépasse 155 m.

* Au Nord : Zabret Bouaroua constitue au même temps la limite supérieure de Sebkha Safioune et de la grande cuvette d'Ouargla.

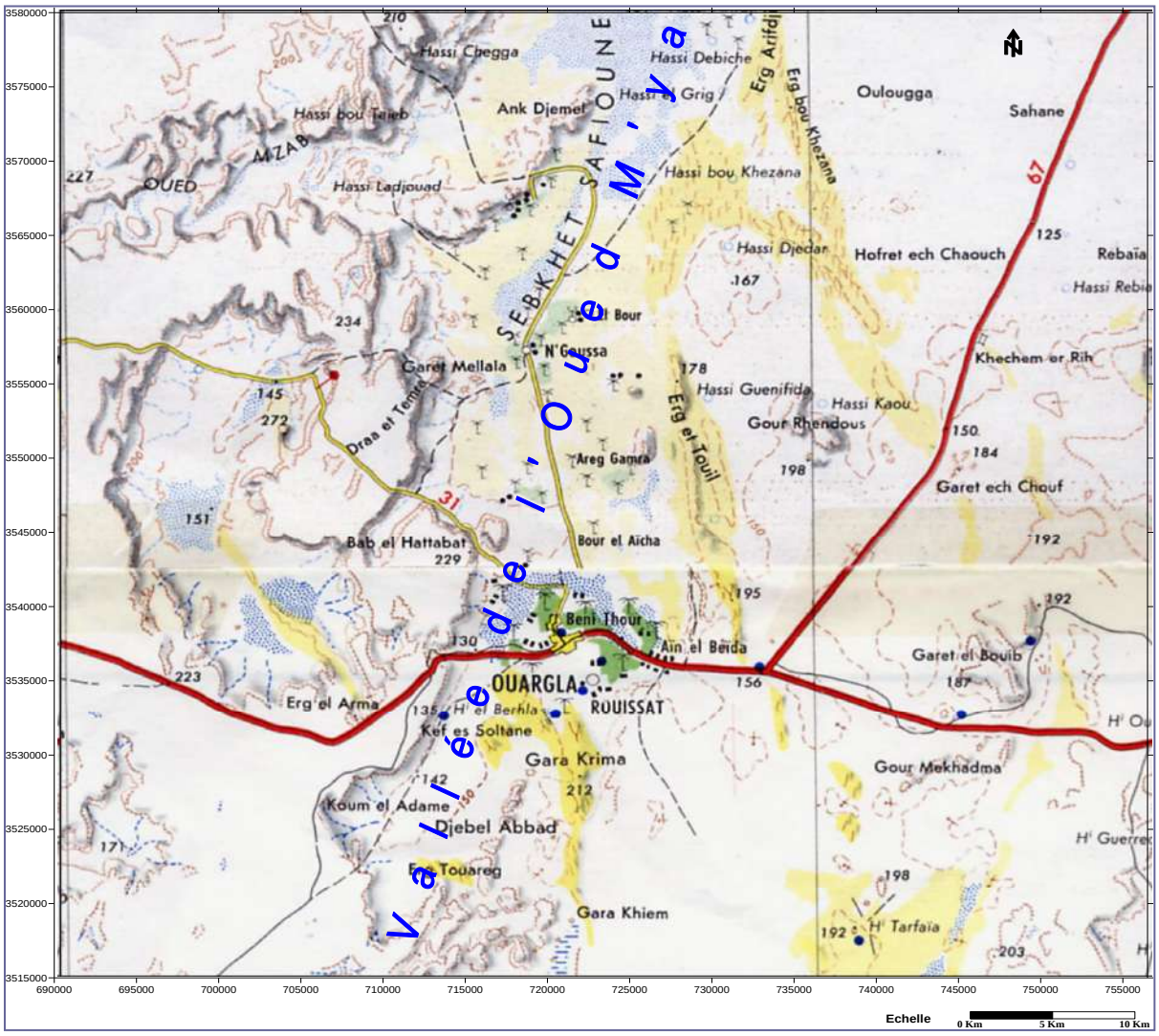


Figure 04 : Localisation de zone d'étude (la ville de Ouargla et ses alentours) (INC, 1960)

2. Généralité sur les oasis

Introduction

En termes étymologique, l'oasis est un : « îlot de terrain apte à les plantes et l'habitation humaine, perdu aux milieux d'espaces désertiques. Une zone fertile dans une étendue de terrain aride. Un lieu qui offre une détente, un repos, qui se présente comme une exception au milieu de tout ce qui est désordre ». Au sens anthropologique et archéologique, c'est un terroir créé

par la main de l'homme, son maintien implique une présence humaine et un apport continu de travail (**Litnhouvongs et Ricaud, 2013).** Les oasis et les systèmes agricoles oasiens ont été définis et caractérisés suivant différentes approches : géographiques, agronomiques et socio-économiques, bioclimatiques **(Skouri, 1990).**

Sur le plan géographique, l'oasis est définie comme un îlot de survie (ou de prospérité) dans un milieu aride. S**ur le plan agronomique,** il s'agit d'un agrosystème intensifié établi, dans un espace isolé situé en milieu désertique. **Sur le plan socio-économique,** il s'agit d'un lieu de sédentarisation et d'intenses activités économiques et socio-culturelles dans un environnement désertique. S**ur le plan bioclimatique,** l'oasis est un microclimat créé par l'homme en milieu aride et induit par l'étagement des cultures

2.1. Les caractéristiques générales de l'espace oasien

L'écosystème oasien est un écosystème très fragile, confronté à un sérieux problème de raréfaction des pluies et de désertification. Dans ce milieu, l'activité de production agricole (Agriculture et élevage) est dépendante essentiellement de la disponibilité de l'eau de l'irrigation (eau de surface ou souterraine). En outre, les terrains affectés aux cultures sont confrontés à des problèmes d'ensablement et de salinité. Ces caractéristiques du milieu naturel rendent les conditions de vie très difficiles. Ces conditions, auxquelles s'ajoute l'isolement géographique, font qu'il existe peu de perspectives de revenus stables, d'où le phénomène de migration des populations des oasis vers les villes **(Michel et al., 2002).**

2.2. Les différents types d'oasis dans le monde

Les oasis à palmiers dattiers s'étendent sur environ 800 000 ha et font vivre une population oasienne d'environ 10 Millions d'habitants dont 7 à 8 millions d'oasiens. L'effectif palmicole est estimé à environ 105 Millions de palmiers dont 16% (27 Millions) en Afrique du Nord y compris l'Egypte **(Sghaier, 1995**). La production mondiale des dattes totalise environ 2.1 Millions de tonnes dont 35% sont offerts par les oasis d'Afrique du Nord. L'Iraq, l'Iran et l'Arabie Saoudite se placent parmi les plus grands producteurs des dattes dans le monde **(Sghaier, 1995).** Selon **Jean et Edmond (2001)**, il existe plusieurs types d'oasis selon la situation géographique. A partir de la figure 5 les oasis intra-désertiques en Afrique sont de petite taille, contrôlent d'immenses espaces. Grâce à des aménagements hydrauliques complexes, elles subissent de multiples contraintes, l'eau y étant rare, tant sur le plan hydraulique que social. La terre est cultivée de manière intensive par de nombreux producteurs, avec des cultures étagées, palmiers, fruitiers, céréales ou légumes). Les oasis de piémont (pourtour méditerranéen, Yémen, Afghanistan, Takla-Makan) sont plus grandes que les précédentes. Elles utilisent l'eau issue des montagnes ; l'irrigation se fait par gravité dans des

canaux jusqu'aux champs cultivés. Les oasis de plaines (Pendjab, Sind, Irak, Égypte, Arabie Saoudite) sont irriguées par des barrages qui distribuaient en saison sèche l'eau stockée : elles étaient traditionnellement productrices de cultures vivrières ; elles s'orientent maintenant vers la production de produits commerciaux (dattes, canne à sucre, fruits.) **(Jean et Edmond, 2001).**

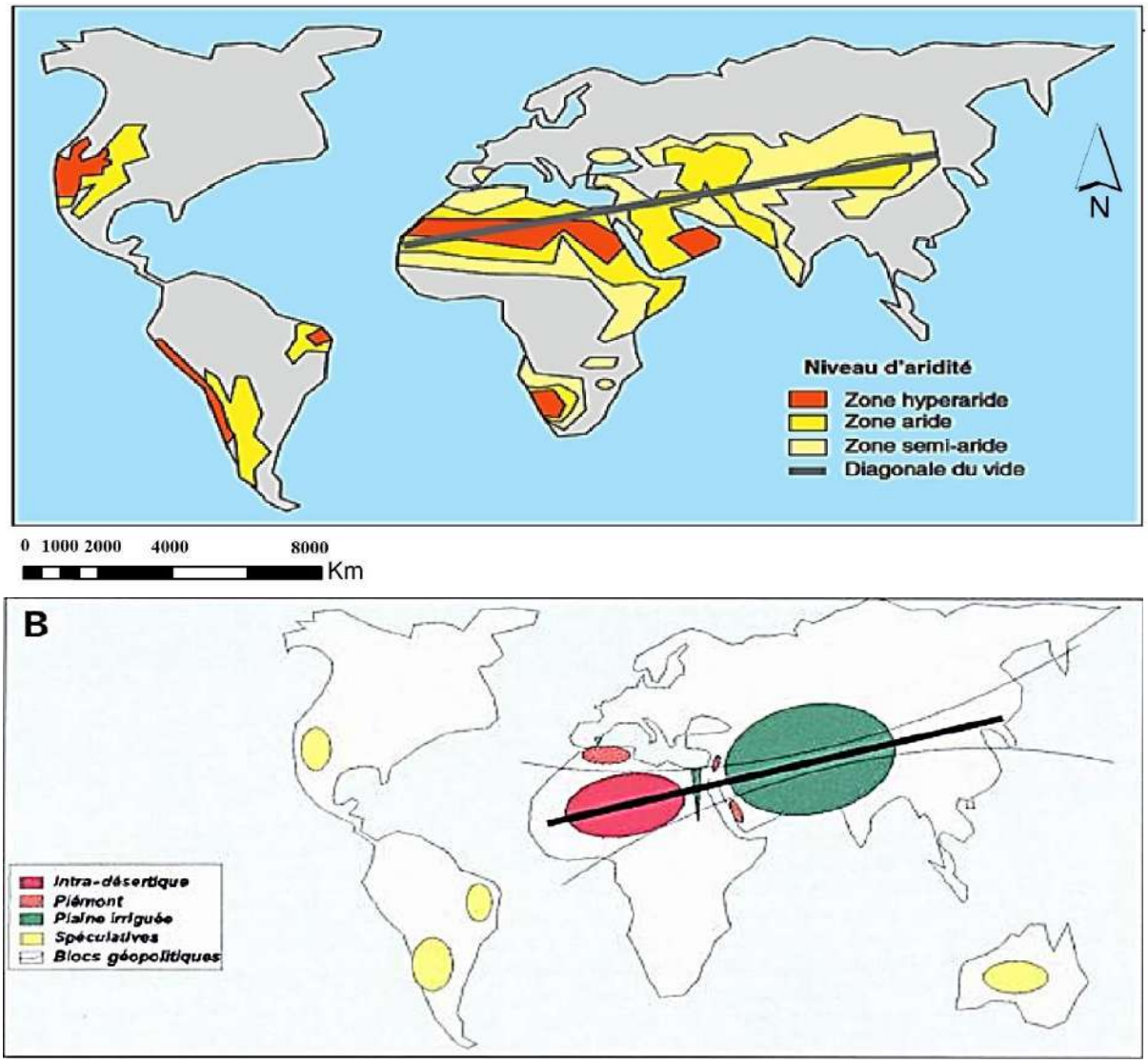


Figure 05 : Zones arides et systèmes d'Oasis dans le monde (Clouet et Dollé, 1998)

2.3. Les fonctions de l'oasis

2.3.1. La production

L'oasis pour les agronomes est un lieu de production où s'organise et se concentre l'activité agricole **(Toutain et *al.*, 1998).** De plus, l'oasis est structurée en végétation multi-strates composée de plantes sauvages et cultivées, et dans laquelle la strate inférieure de la végétation renferme une grande Biodiversité d'espèces animales et végétales **(Guezoul et al., 2013).**

2.3.2. La résidence

L'oasis est un lieu habité ou fréquenté, lié à l'eau, mais la seule présence de l'eau ne suffit pas pour expliquer la création, le maintien ou la disparition de l'oasis. La constitution d'une oasis implique, au moment de sa création et au cours de son développement, une organisation humaine volontaire, susceptible de maintenir loin des régions peuplées, une main d'œuvre importante qui construit et entretient les systèmes d'irrigation, une population sédentarisée dans un milieu environnant hostile. En plus de ça, l'oasis représente un refuge pour plusieurs espèces animales, et un lieu de nidification des oiseaux et d'autres animaux **(Toutain et al., 1998)**.

2.3.3. Le passage

Souvent l'oasis est considérée comme une escale nécessaire lors de trafics caravaniers sur de grands axes de circulation entre la Méditerranée et le Niger, comme sur la route de la soie entre la Chine et l'Asie Centrale (Toutain et al., 1998), et la route du pèlerin de l'Irak à la Mecque, en passant par Qassim (Salah ben Sliman 1994).

2.3.4. Le point de départ des conquêtes

L'oasis, lieu d'identification des groupes sociaux qui s'y retrouvent peut devenir une base d'appui pour maîtriser de plus vastes espaces. II en est ainsi des Oasis du Hoggar en Algérie, de l'Aïr au Niger, du Fezzan en Libye et du Tibesti au Tchad (Toutain et al., 1998), et l'oasis de Asir en Arabie Saoudite.

2.4. La bioclimatologie des oasis

Selon Riou, 1990 l'oasis modifie en fait trois éléments qui sont :

- La teneur en eau à la surface du sol est plus élevée en raison de la nappe d'eau proche ou de l'irrigation.
- La rugosité dynamique (ou la force de frottement du vent) augmentée par la présence des arbres et parfois de plusieurs niveaux de végétation.
- La répartition verticale de l'énergie rayonnante qui est distribuée dans l'oasis en fonction des strates végétales.

Le climat d'oasis (microclimat) dépondra non seulement de la dimension spatiale de l'hétérogénéité ainsi crée au sien de déserte, mais aussi de la densité de la végétation ; on admettra de même que ce climat variera horizontalement et verticalement.

2.4.1. L'effet de l'oasis

La définition climatique de « l'effet oasien » du désert est expliquée par le phénomène de refroidissement provoqué par la présence de végétation, une source d'humidité isolée se trouve

toujours plus froide que son environnement dans une région par ailleurs aride, en raison du refroidissement par évaporation. L'oasis du désert est l'exemple le plus évident de cette situation. En effet, c'est un refroidissement se développera principalement en raison de l'ombrage fourni par les arbres dans une zone bien végétalisée. Le phénomène d'effet d'oasis est défini comme un refroidissement par évaporation due aux différences d'équilibre énergétique entre l'oasis et le désert (POTCHTER et al., 2008).

2.4.2. L'effet brise-vent de l'oasis

L'installation de brise-vent vivants entraîne une compétition pour l'eau ; mais cette servitude est destinée à protéger du dessèchement les espèces cultivées. La consommation en eau des brise-vent est partiellement compensée par la réduction de I" Evapotranspiration (ETP) de l'espace agricole. Un équilibre est à trouver entre la puissance du brise-vent et la rigueur du climat local pour gérer au mieux les ressources en eau disponibles. Dans l'oasis, le palmier dattier joue lui-même un rôle protecteur contre les effets du vent. Mais ce rôle est limité car la densité de plantation, qui doit respecter l'espace suffisant dévolu aux cultures associées, est, à cet égard, souvent trop faible. Dans les palmeraies aérées, l'adjonction de brise-vent végétaux recoupant les parcelles cultivées permet une meilleure protection des cultures sous-jacentes ; toutefois, selon les espèces utilisées, ils peuvent devenir concurrentiels de ces dernières et des palmiers dattiers (Ferry et Toutain, 1990).

2.5. Les oasis et leurs systèmes hydrauliques traditionnels

La création des oasis impliquait le développement d'une agriculture oasienne, qui a représenté pendant des siècles «la seule source de création de richesses et de subsistances » des oasiens (Vincent Bisson, 2012). Le terme oasis désigne l'assemblage du ksar (village fortifié) et de son terroir cultivé (Côte, 2005). La mise en place d'une agriculture, nécessairement irriguée dans un milieu aussi hostile que le Sahara, nécessitait la mobilisation d'une eau qui n'était pas forcément mise à disposition par le milieu (Bisson, 2003). À l'exception de l'eau des oueds descendus de l'Atlas Saharien et les sources d'eau et certains lacs (le lac Ubaru en Libye, par exemple) partout ailleurs dans le Sahara l'eau était enfouie dans le sous-sol (Bensaâd, 2011). Pour l'intérêt commun, les communautés oasiennes devaient « prospecter, extraire et acheminer l'eau en forçant le milieu ». En parallèle, ces communautés avaient sutirer profit du milieu, notamment en ce qui concerne le choix d'implantation des oasis, souvent à partir des noyaux de végétation naturelle. Selon Bisson (2003), historiquement, les oasis ont été créées dans des dépressions topographiques, dans le but de bénéficier : i) d'une irrigation par gravité ii) d'un accès facilité à l'eau de la nappe phréatique soit par des puits peu profonds, ou bien par une «

excavation » permettant aux palmiers de puiser l'eau directement de la nappe, et iii) d'un drainage naturel du surplus de l'eau d'irrigation vers des sebkhas (exutoires naturels de l'eau dans le Sahara). De plus, les différentes formes de mobilisation ancestrale de l'eau dans le Sahara et sa distribution dans l'espace avaient façonné différentes structures agraires oasiennes. **Kouzmine (2012)** a mobilisé dans sa thèse d'anciens textes de Bernard Augustin sur l'Afrique septentrionale et occidentale datant de 1939, pour présenter la typologie des agrosystèmes oasiens existants en Algérie en fonction de la ressource en eau mobilisée.

Certains systèmes hydrauliques ont attiré l'attention des chercheurs plus que 'autres, à l'instar des foggaras ou des ghouts du Souf (Bisson, 1957 ; Despois, 1958 ; Grandguillaume, 1973 ; Guillermou, 1993 ; Otmane et Kouzmine, 2013 et d'autre). Ces systèmes reflétant l'ingéniosité hydraulique traditionnelle et dépendant des nappes souterraines sont les plus vulnérables vis-à-vis de l'irruption des pompages de l'eau souterraine autour d'eux (Côte, 2005). A contrario, les oasis exploitant antérieurement les eaux de crues des oueds descendant de la chaîne montagneuse de l'Atlas Saharien ont été peu étudiées jusqu'à présent. Les raisons de ce désintéressement résident peut-être dans le fait que : i) l'ancien système irrigué par épandage de crue a disparu avec la construction de barrages sur les principaux oueds (e.g. barrage de Foum El Gherza en 1950 à Biskra et celui de Djorf Torba en 1969 à Béchar), et ii) l'absence d'infrastructures d'irrigation pérennes qui permettraient de reconstituer l'histoire hydraulique. Ces anciens systèmes irrigués communautaires ont en effet connu une transformation radicale à travers la modernisation hydraulique, d'abord avec l'implantation des barrages -Côte (2002) parle de « verrouillage des cours d'eau » -, puis avec l'irruption des forages équipés en pompes immergées, que l'on appellera « déverrouillage » des nappes souterraines profondes, à partir des années 1980 (Hamamouche et al., 2015). Ces systèmes hydrauliques d'épandage de crue ont été étudiés dans différents contextes, par exempleen Bolivie (Zimmerer, 2011), en Éthiopie et en Érythrée (Mehari et al., 2005) au Maroc (Bouaziz et al., 2004), au Pakistan (Van Steenbergen, 1997) en Tanzanie (Komakech et al., 2011) et au Yémen (Mehari et al., 2007) où ils continuent à fonctionner. La lecture du système irrigué contemporain de Sidi Okba a nécessité un retour en arrière pour comprendre ce système hydraulique ancien dont il restait un certain nombre d'éléments, en particulier dans les anciennes palmeraies. Dans le Sahara algérien, la plupart des terres où se pratiquait collectivement la céréaliculture par épandage des eaux de crue ont été reconverties en irrigation privée à partir de l'eau souterraine profonde plus propice à l'intensification culturale (Bisson, 1993). L'irruption de technologies modernes d'exploitation de l'eau souterraine des aquifères peu renouvelables dans ces territoires agricoles anciens a bouleversé les hiérarchies sociales et le développement territorial (Kouzmine, 2012).

L'accès à l'eau souterraine a changé l'organisation hydraulique, sociétale et territoriale, ainsi que les pratiques et les cultures sociales de l'eau dans les anciennes 22 palmeraies (Bensaâd, 2011) et a favorisé l'émergence de nouveaux systèmes de production agricole autour des anciennes palmeraies (Côte, 2002).

3. Présentation des Sebkhas et des chotts (zones humides)

Les zones humides sont des milieux d'une importante richesse, elles fournissent l'eau et les aliments à d'innombrables espèces de plantes et d'animaux (M.E.A., 2005). Ces milieux, très différents de par leur nature exceptionnel et leur fonctionnement, jouent un rôle important dans la préservation de la biodiversité et la gestion des ressources en eau. Depuis l'année 1900, plus de la moitié des zones humides mondiales ont disparu, dont le sol et l'eau de ces zones ont été utilisé pour l'agriculture ou les infrastructures (Schuyt, 2005). Au cours du 20ème siècle, les pays méditerranéens auraient perdu de 50 à 70% de leurs zones humides (Bonnet et al., 2005). Dans ce cadre, Rappe et Hammee (1986) signalent qu'une disparition progressive des biotopes humides peut être qualifiée de catastrophes pour l'avifaune. L'Algérie ne fait pas exception, ce pays au cours de ces dernières décennies a été exposé à une érosion marquée des zones humides précieuses (Samraoui et al., 1992 ; 2011, De Bélair et Samraoui, 1994).

Wanzie (2002), rapporte que la destruction des zones humides conduit non seulement à la disparition des espèces qui en dépendent, mais aussi à la perte des bénéfices sociaux et économiques des populations locales dont leur vie dépend. Pour Mathevet et al. (2002), les zones humides sont des espaces à multi- usage où chaque activité tend à spécialiser la gestion vers son seul objet, souvent pas ou peu compatible avec les autres. Les enjeux du devenir d'une zone humide ne se réduisent pas à la gestion des espaces naturels ou à la qualité de l'eau, ils révèlent surtout d'une réflexion, d'une part sur les rapports que l'homme entretient avec son territoire et les ressources dont il assure la gestion, et d'autre part l'entrelacs des rapports qui nouent les hommes à propos de ces ressources (Mathevet, 2000). La conservation des zones humides implique la coopération entre acteurs, institutions et usagés. Ceci traduit le processus d'une gestion intégrée, qui est basée sur la mise en valeur économique et l'équité intra et inter-génération par l'application de principe durable (Bonnet et al., 2005). L'Algérie et L'Arabie Saoudite recèle un grand nombre de zones humides, qui sont représentées sous forme de marais d'eaux douces ou marines, les oueds, les barrages et les retenues. La majorité de ces plans d'eau est composée d'immenses lacs salés continentales, ils s'étalent des Côtes jusqu'au Sahara. Ces zones sont considérées comme zones humides de l'intérieure. La formation des lacs salés est généralement contrôlée en grande partie par les changements temporels des précipitations à l'intérieur du bassin (Bryant, 1999). En effet les eaux qui forment ces lacs peuvent parvenir de

deux sources principales : les précipitations directs (incluant les rivières et les apports de surface) et l'eau souterraine (Bryant et Rainey, 2002). Ces lacs salés ont une taille et une profondeur variable, de petits à très vastes et de peu profond à profond. Le terme Chott est employé volontiers en Afrique du nord, alors qu'en Afrique du sud on le désigne par Trémies et en Amérique du Nord par Salines (Direy, 1960). Au Sahara septentrional sous le climat aride, on compte également un nombre conséquent de Chotts. Dans le grand Erg Oriental, au nord-est du Sahara, on y rencontre les lacs salés les plus impressionnants de point de vue superficie tels que, le chott Melghir et le chott Merouane. Ces chotts constituent une vaste bande qui s'étale du sud tunisien jusqu'au mont de l'Atlas au nord algérien (Mahowald et al., 2003). Ces zones sont des écosystèmes aquatiques au Sahara algérien et de l'Arabie saoudite, il y a parmi eux qui sont classées selon la convention de Ramsar des zones humides, d'importance internationale. Ces milieux humides ont une importance économique représenté par la présence des réserves considérables en miné rares comme le lithium (hacini et al 2008) servent comme exutoires aux eaux de drainage des palmerais, d'écoulements de surface ou souterrain des Oueds ainsi qu'aux rejets d'eau usée. Ces actions anthropiques influent directement sur l'état quantitatif et qualitatif de ces surfaces d'eau.

Les zones humides étudier sont réparties aux zones suivantes :

- A la cuvette de Ouargla, on a les zones humides suivantes : Sebkha, Safioune, sebkha Oum Erranebe et chott Ain Beida.
- La région de Al Qassim englobe : le lac salé de Al Aushaziyah, Sabkhat Atarafiyah et Sebkha Gawaymed,

3.1. Cuvette d'Ouargla

L'oasis de Ouargla correspond à une grande dépression d'une superficie de 750 Km^2 environ. Elle est située dans le lit de la basse vallée fossile de l'oued M'ya qui prend origine du plateau de Tademaït (région d'In Salah, Tamanrasset) au Sud jusqu'à Sebkha Safioune.

3.1.1. Sebkha Oum Erranebe

C'est une zone humide d'une surface totale d'ordre (1085.99ha), située loin de 12 km à la ville de Ouargla. Elle est même classée comme zone humide d'importance internationale par la convention de Ramsar (Costa et al. 1996). Cette convention est un traité intergouvernemental qui sert de cadre à l'action nationale et à la coopération internationale pour la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources.

La sebkha Oum Erranebe est entourée par des formations dunaires au Nord, à l'Est et au Sud. Elle est alimentée par les eaux usées de la ville d'Ouargla et les eaux de drainage agricole.

3.1.2. Sebkha Safioune

Est une zone dépressionnaire d'une surface totale de (14505.41ha) représentant l'exutoire de la cuvette d'Ouargla. Elle est alimentée essentiellement par le lit majeur de l'oued Mya et deux affluents, oud N'sa au nord et oued M'zab au sud-est. A partir de 2011 elle reçoit les eaux épurées de la STEP de Ouargla par un canal, cela a contribué à la présence d'une continue de surface d'eau dans la sebkha même en été. Cette nouvelle situation va créer un nouvel écosystème humide dans la zone, ce dernier va conduire à la stabilité de plusieurs types d'oiseaux migrateurs et augmentera la couverture végétale au milieu.

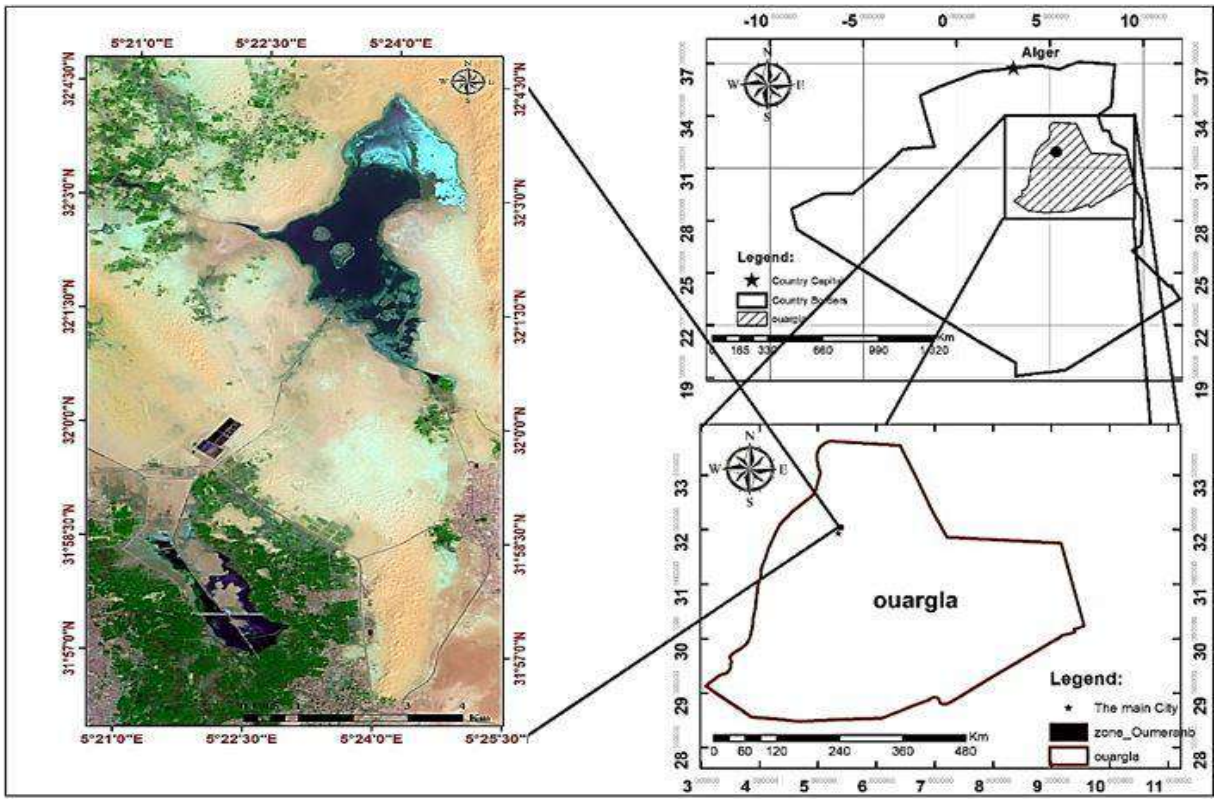


Figure 06 : Situation géographique de sebkha Oum Erranebe

3.1.3. Chott Ain Beida

La région d'Ouargla recèle d'importants biotopes humides tels que le chott d'Ain El-Beida qui est classé comme une zone humide d'importance internationale selon la convention de Ramsar**.** Le chott d'Ain El-Beida est une dépression saline d'une surface totale de (442.63ha), située au milieu des palmeraies de la cuvette d'Ouargla (loin de 5 km). Il est compris entre la palmeraie d'Ouargla à l'Ouest et au Sud, et la palmeraie d'Ain El-Beida à l'Est (T.A.D, 2002). Allongé en direction Nord - ouest, Sud - est sur une longueur de 5,3 Km, sa largeur varie de 1 à 1,5 km (D.G.F, 2004).

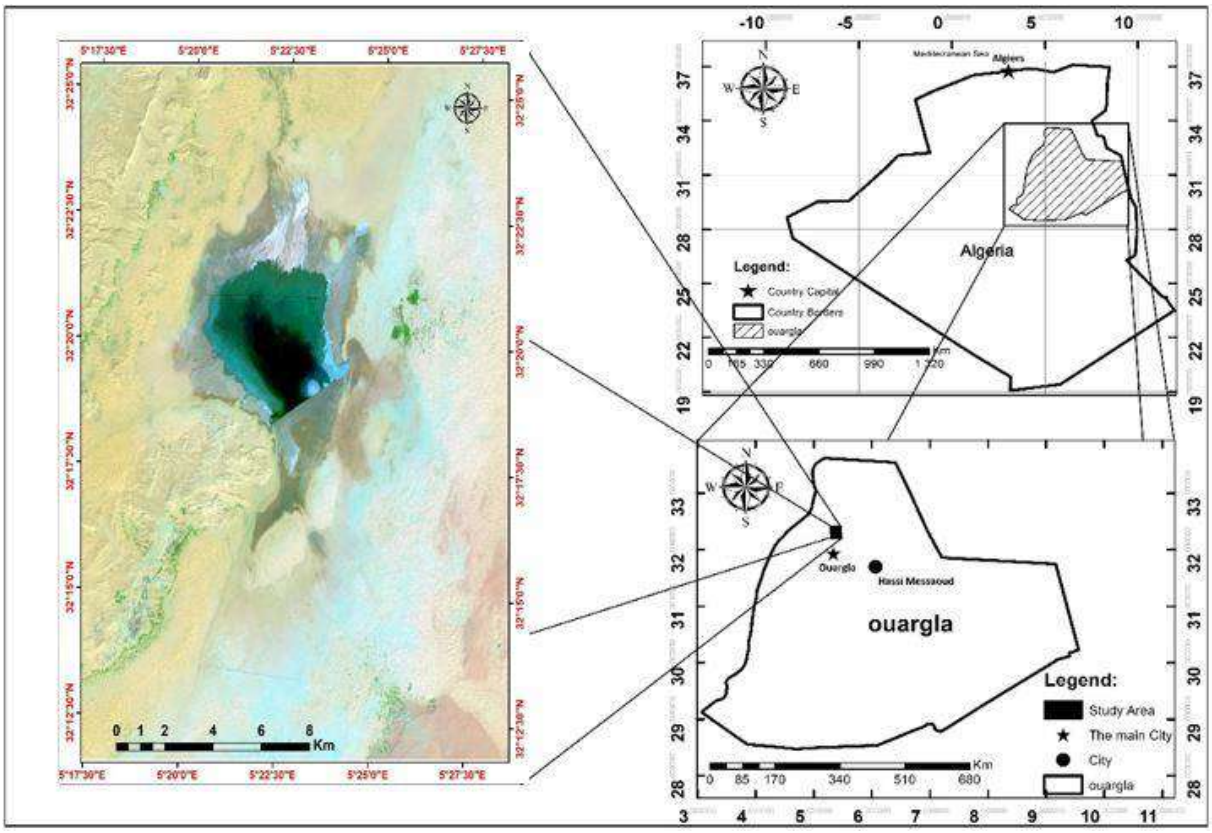


Figure 07 : Situation géographique de sebkha Safioune.

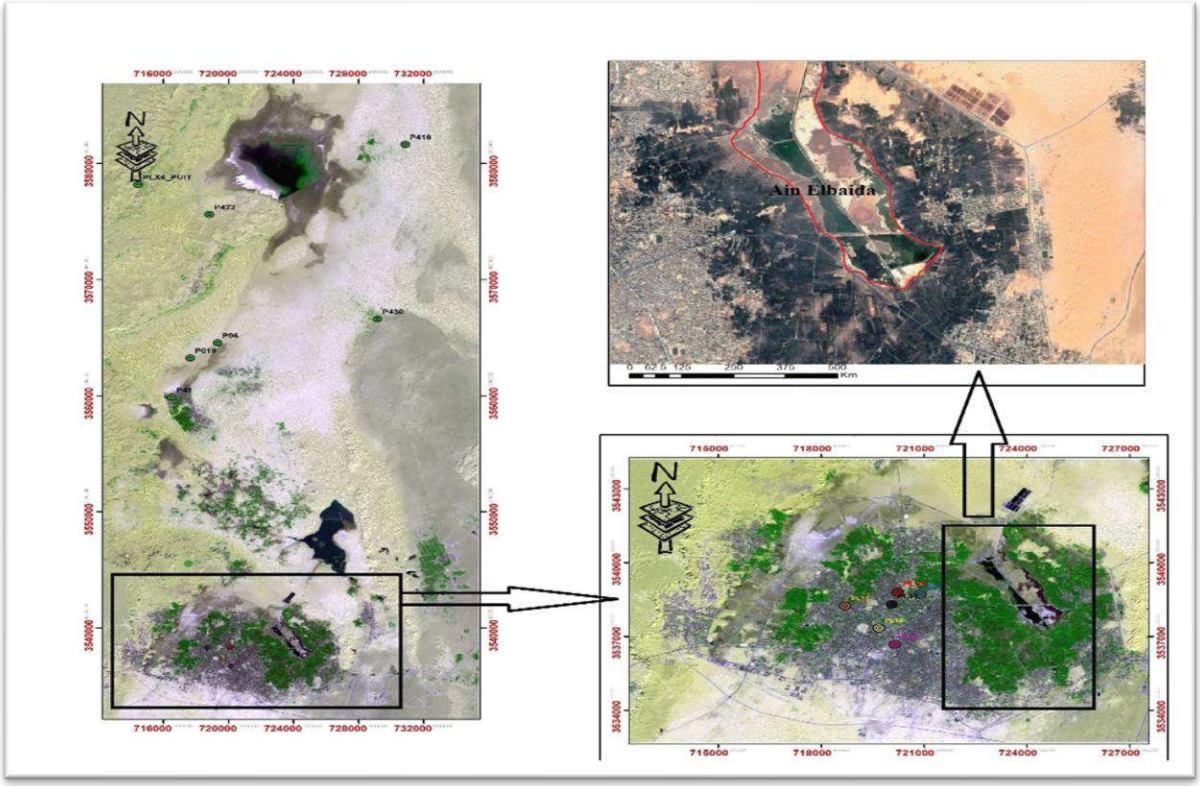


Figure 08 : Situation géographique de chott de Ain El-Beida

3.2. La région de Al Qassim

La région se situe au centre de l'Arabie Saoudite dans le nord du plateau Nedjed, elle occupe le lit de la vallée Al Rummah, qui s'écoule du l'ouest à l'est, depuis les montages de l'est de la région de Al Médina et se termine aux dunes de Thuayrat, au nord-est de Buraydah.

3.2.1. Le lac salé Al Aushaziyah

Le lac salé Al Aushaziyah, situé à 20 km de l'est de Unayzah, le dernier se trouve au sud de Buraydah (350 km de la capitale du pays Riyad) le siège de la province d'Al Qassim au centre d'Arabie saoudite (figure 10). Cette région a été le centre des activités agricoles sur le pays pendant des décennies. La ville de Unayzah et ses environs sont à une altitude moyenne variant entre 615 m et 590 m (sur le lac salé). La superficie totale du lac est de 4500 ha. Le premier début de la formation du bassin d'Al Aushaziyah, ce fut après le mouvement du sol, qui atteignit le plateau du Nedjed au cours des époques du temps géologique tertiaire, qui a entraîné la séparation du cours du bassin, qui était un sud extension de la vallée Al Rummah. Avec l'achèvement du processus de séparation, cette partie du cours d'eau a été transformée en un bassin rectangulaire avec un drainage interne, puis elle a commencé à attirer les cours d'eau venant de Unayzah et de Khartam.

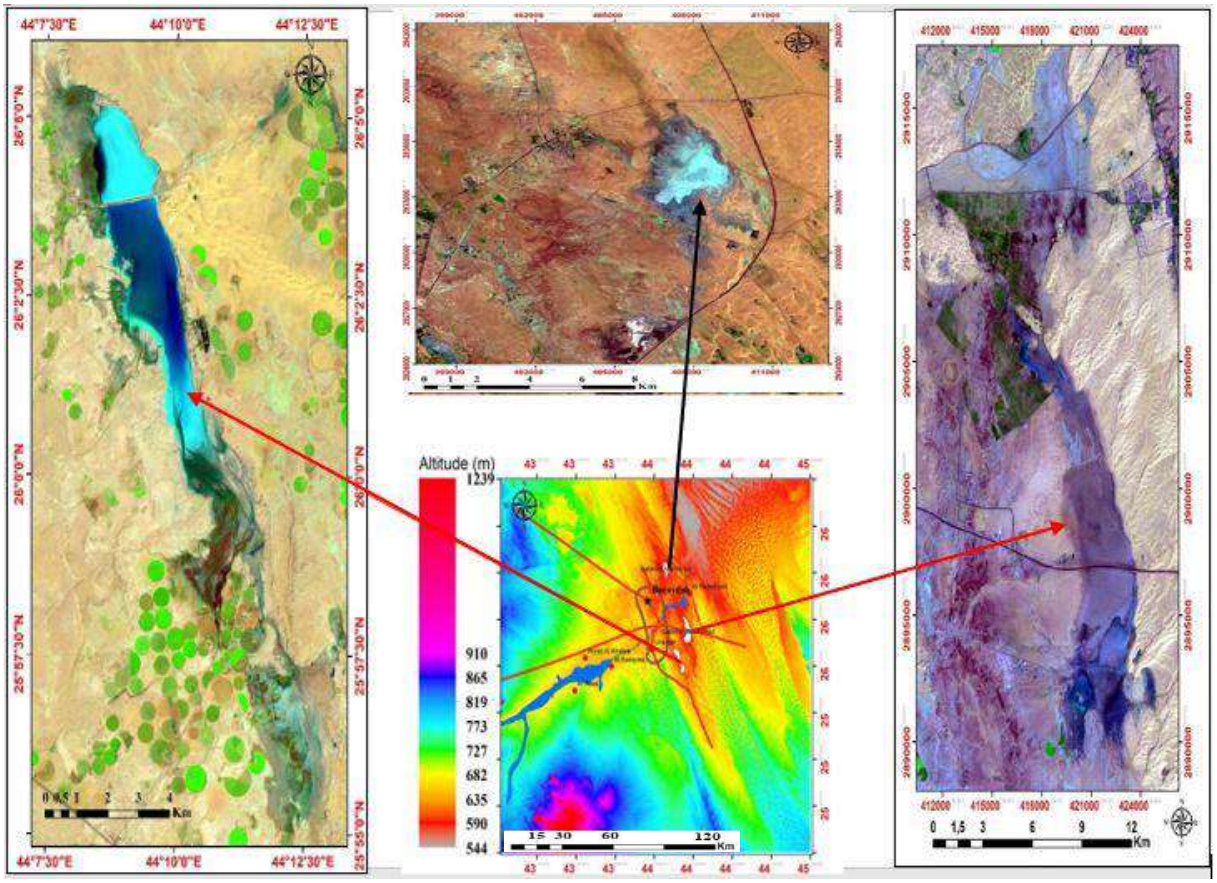


Figure 09 : Situation Géographique des zones de Sebkhas et le lac de la région Al Qassim

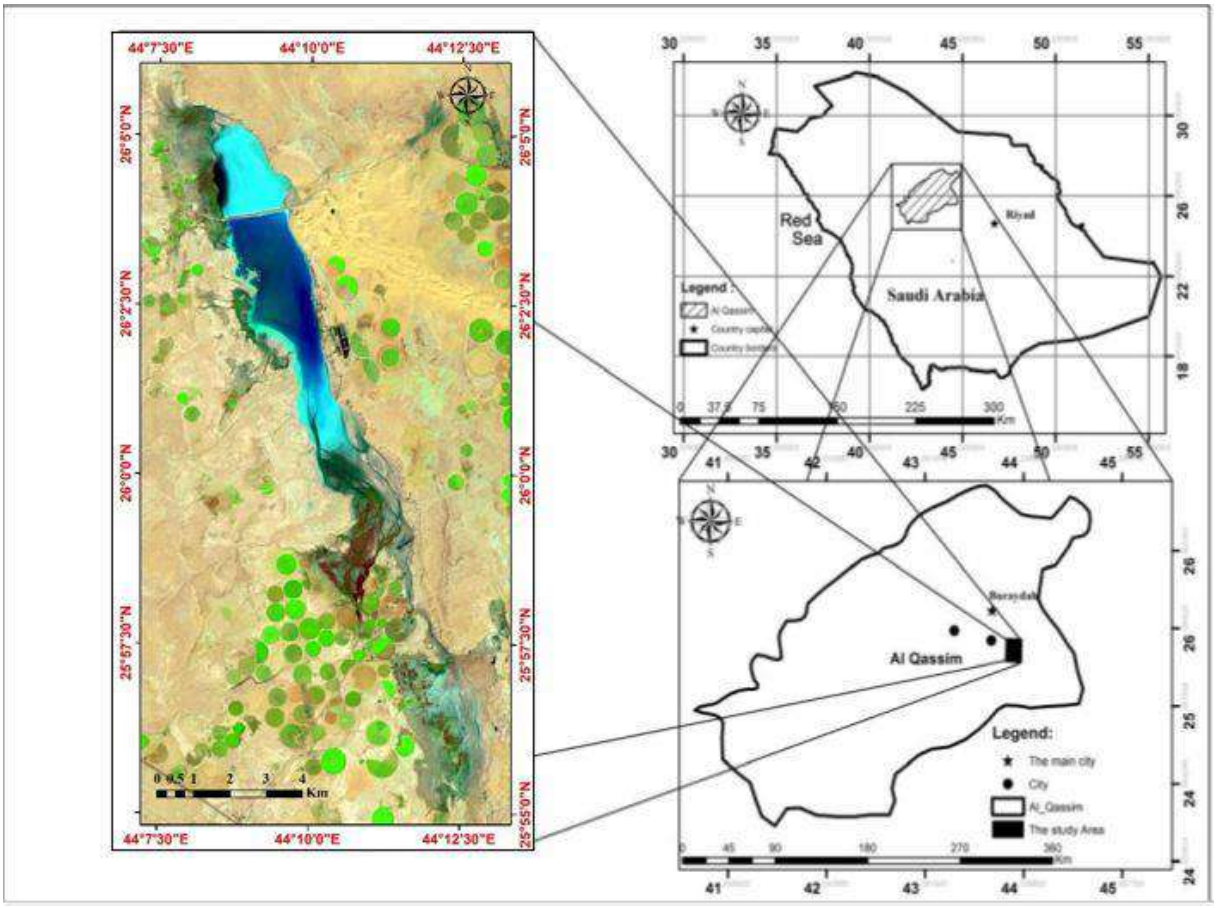


Figure 10 : Situation géographique du lac salé Al Aushaziyah

3.2.2. Sebkha Gawaymed

Le Sebkha Gawaymed s'appelle aussi Sabkhat Adolaime se trouve au sud-est de Buraydah à 20 km. Elle occupe une superficie d'environ de 5000 ha (Figure 11). Sebkha Gawaymed se trouve dans l'affolement de formation Khuff, qui est d'Age permien supérieur, qui se constitue de calcaire. Les eaux de surfaces observent dans la sebkha au période de crue de Wadi Al Rummah, ou leur des précipitations en hiver.

3.2.3. Sabkhat Atarafiyah

Sabkhat Atarafiyah est située à 4 km d'est du village d'Atarafiyah (figure 12), la dernière est au nord-est de Buraydah le siège de la province d'Al Qassim. Le village d'Atarafiyah et ses environs se trouve à une altitude moyenne variant entre 640 m à 600 m, l'altitude le plus bas se trouve à la zone de Sebkha avec une valeur de 577 mètres.

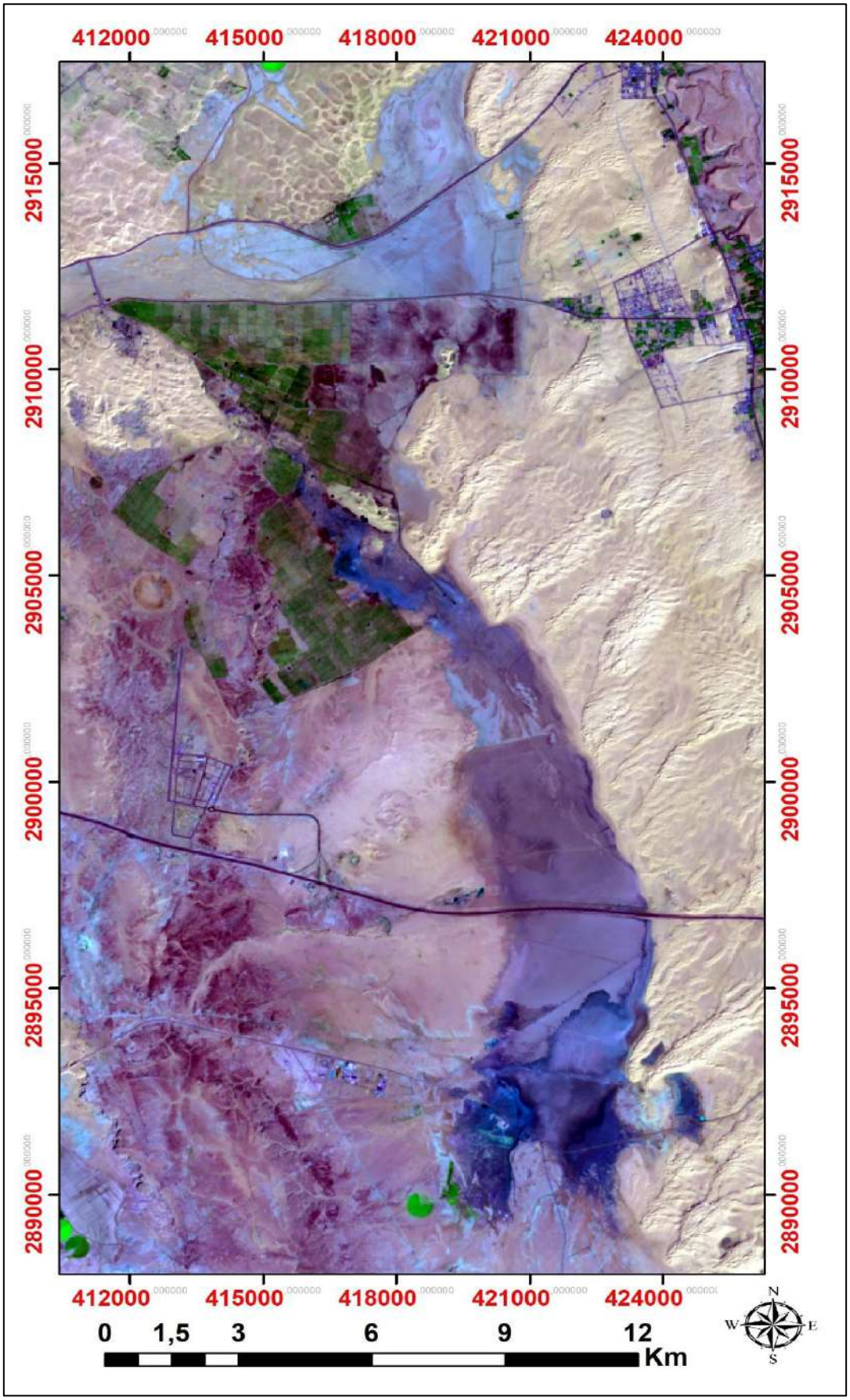


Figure 11 : Situation géographique de Sebkha Gawaymed

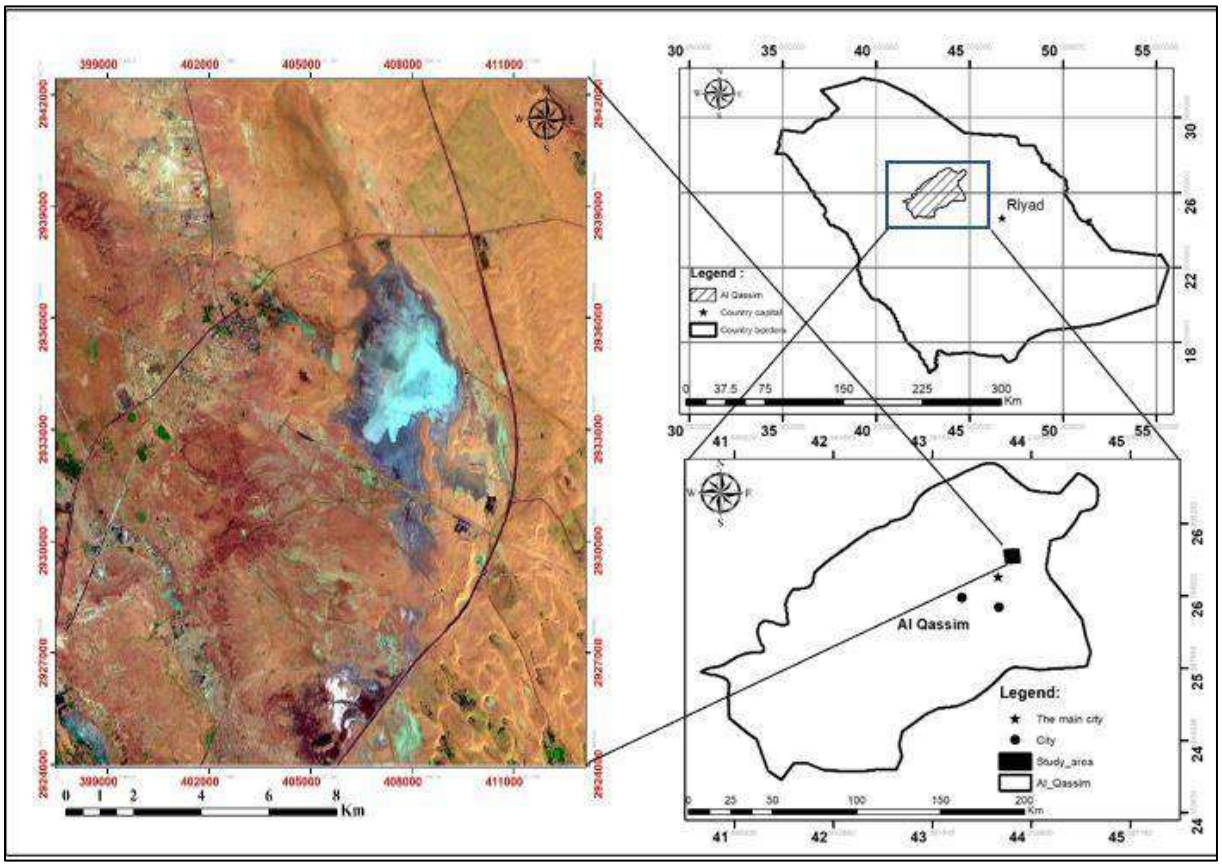


Figure 12 : Situation géographique du Sabkhat Atarafiyah

4. Cadre socio-économique de la zone d'étude

4.1. Croissance démographique et évolution de la population de la zone d'étude

La région d'Al-Qassim est classée 7ème dans le classement des régions saoudiennes en termes de population après les régions de Makkah, Al-Mukarramah, Riyadh, Al Shargiyah, Asir, Madinah et Jizan. L'enquête sur les caractéristiques de la population, publiée par l'Autorité générale des statistiques pour l'année 2018 a estimé que la population totale de la région d'Al-Qassim à (1 455 693). Le nombre de citoyens saoudiens parmi eux était de 1 025 915. La population de Qassim était connue par plusieurs développements. Où en 1992, il y avait 750 979 personnes. Puis en 2004, il atteignit 1015972 habitants. En 2014, il a touché 13 70727 personnes. Cette augmentation rapide est due à la croissance économique rapide qu'a connue Al-Qassim, en particulier dans le domaine agricole. En plus de la disponibilité de l'infrastructure et des installations nécessaires, ce qui a contribué à attirer de nombreux citoyens vers la stabilité dans la région.

La population d'Ouargla, d'origine nomade, s'est sédentarisée particulièrement depuis la découverte du pétrole dans la région, et la mise en œuvre du programme spécial dans l'ex-wilaya des oasis qui s'est traduit par la réalisation d'un programme d'habitat et d'équipement ; mais son

évolution est liée à la période post indépendance, au cours de laquelle le nombre d'habitants n'a cessé d'évoluer. La ville évoluait rapidement pendant les 15 années qui suivent l'indépendance. Elle passa de 23276 habitants en 1966 à 64300 habitants en 1977, soit un apport démographique de 41024 habitants dont 69 % est enregistré dans l'agglomération d'Ouargla. En 2008, la population a évolué à 199 840 habitants, ce qui représente un apport démographique de 176564 habitants dont 60 % est enregistré dans l'agglomération d'Ouargla. Par conséquent les zones aménagées et urbanisées prenaient de plus en plus d'ampleur. Depuis le début des années 80, la société algérienne, y compris celle d'Ouargla, a commencé à mieux contrôler son rythme d'accroissement et d'évolution.

Est. Au Nord entre le Ksar et Said Otba, un autre axe de développement urbain a pris naissance. Le tissu de ce dernier a tendance à la structuration et au développement au sein de la palmeraie. Au Sud-Est d'Ouargla, vers Rouissat, le tissu urbain est visiblement hétérogène à cause de la forte pression démographique. Actuellement, Ouargla et Rouissat constituent un tissu urbain continu. La migration qui s'établissait entre l'avenue du 1er novembre et Rouissat a donné naissance à l'agglomération de Sokra. Cette dernière se caractérise par une concentration de population et une anarchie dans le système d'aménagement. À l'Est de Rouissat, la ville de Ain Baida, constitue une entité à part, du fait qu'elle est séparée des deux premières agglomérations par une zone étendue de palmeraies. Son développement urbain est principalement dû à l'accroissement de la population à majorité rurale. D'autre part, Ain Beida se trouve sur un axe routier stratégique menant à Hassi Messaoud. Au Nord de l'agglomération de Ain Beida, se trouve le village « Chott », qui possède un tissus urbain caractéristique des zones à faible croissance. En effet, mis à part sa palmeraie relativement petite, l'agglomération dénommée Chott se trouve entourée par le chott « Ain Baida » à l'Ouest et une zone de dunes de sables à l'Est. L'opération tend à l'extension vers la nouvelle ville de Bamenda (cité Ennasr). Cette dernière est située à l'Ouest sur la route de Ghardaia, surplombant la ville d'Ouargla. Son tissu urbain est moderne et assez bien structuré. De façon générale, les agglomérations composant la ville d'Ouargla sont constituées de quartiers caractérisés par des concentrations de populations et d'habitations très variables. Pour le cas de quelques quartiers, comme dans le centre-ville les tissus urbains sont à saturation. En revanche, d'autres quartiers permettent de recevoir des équipements moyennant une structuration et une utilisation rationnelle de l'espace en relation avec la capacité des infrastructures de base actuelles et projetées. La forte pression démographique qui pèse sur les milieux urbains s'accompagne d'une émergence de tensions économiques, sociales et spatiales qui remettent en cause les fondements des modèles de développement urbain et les politiques d'aménagement. Si la crise urbaine constitue un élément

récurrent en Algérie, elle revêt au Sahara des formes particulières liées, en partie, aux spécificités du milieu et des pratiques socio-spatiales des populations.

D'après la situation illustrée sur le plan schématique d'occupation du sol, si le canal de drainage périphérique est pris comme limite du périmètre urbain, environ 3200 hectares zone urbains (Ouargla, Rouissat et Ain Beida), les palmeraies couvrent 2300 hectares, 7500 hectares sont des zones dunaires et arides. La sebkha et le chott occupent un espace de 550 hectares (Bonnard & Gardel, 2004).

4.2. Les d'activités agricoles

La région d'Al-Qassim compte presque 7 millions de palmiers (les Fermes Al-Rajhi le plus grand dans le monde avec 200 000 palmiers), ce qui en fait l'un des plus grands producteurs de dattes du Moyen-Orient, produisant une quantité annuelle de 205 000 tonnes de divers types luxe de dattes, ce qui confère à la région une valeur économique élevée en exportant de grandes quantités de dates au niveau national et international, en particulier dans les pays de Golf. Plusieurs villes de la région commercialisent leur production de dattes avec des festivals de dattes qui commencent principalement en septembre, bien que Buraydah (la capitale de la province) accueille l'un des plus grands festivals de la région, où beaucoup de gens viennent de tous les pays du Golf pour acheter leur besoin annuel de dates et pour le tourisme. L'agriculture est toujours la pierre angulaire de l'économie de la région. Bien que la région soit connue pour ses actifs agricoles depuis longtemps, ce n'est que récemment que la production de blé a été introduite dans l'industrie agricole locale, faisant de l'Arabie saoudite un exportateur net de céréales. La région produit également des dattes, des raisins, des citrons, des pamplemousses, des mandarines, des oranges, des grenades et un grand groupe de légumes. La région abrite également l'un des grands marchés aux chameaux, en raison de son emplacement central, entouré d'Al-Dahna' et de déserts trouvés.

L'activité agricole à Ouargla n'est plus la ressource essentielle de la région : on a presque 8000 agriculteurs qui se partagent plus de 9000 ha irrigués répertoriés, dont 6800 sont occupés par des palmeraies. La production de dattes au cours de l'année 2017 à attendre 120 000 tonnes de dans toutes les communes de la Wilaya de Ouargla (avec 68 300 tonnes de Daglet Nour), alors que la superficie totale occupé par les palmeraies est de 17 100 ha. Les palmeraies du Chott sont fortement dégradées par les difficultés de drainage et l'urbanisation. La nouvelle agriculture se met en place sur le plateau vers Hassi ben Abdallah et route de Hassi Messaoud. N'Goussa voit se développer les cultures légumières.

L'agriculture traditionnelle ne doit être négligée ou occultée, même si elle appelée à jouer à l'avenir un rôle secondaire dans l'activité de production. A cet effet, il serait important qu'un

plan d'aide à l'agriculture traditionnelle soit élaboré et ce, en vue d'initier des réalisations d'infrastructures hydrauliques (foggaras- implantation de puits et forages, réseaux d'irrigation … etc.) ainsi que des actions de protection des sols contre l'ensablement, de lutte contre les maladies parasitaires et de vulgarisation hydro-agricole.

PARTIE II

MATÉRIELS ET MÉTHODES

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Introduction

Pour arriver à bien attendre notre objectif d'étude, on a collecté les données bibliographiques pour faire une étude de comparaison entre les deux régions à différentes échelles ; géologique, hydrogéologique, climatique et hydrochimique pour déterminer les caractéristiques communs et différents entre les deux zones dans chaque domaine.

1. Hydrochimie

Dans le cadre de cette étude, on a effectué un échantillonnage au niveau de quelque piézomètres de la nappe phréatique à savoir que le temps et les moyens qui nous sont impartis ne nous permettent pas d'effectuer des analyses sur l'ensemble des piézomètres de la cuvette de Ouargla et pour cela le choix des lieux de prélèvement basé sur la répartition spatiale des points de façon à couvrir tout le secteur étudié. Treize (13) échantillons d'eau (Figure 13) de la nappe phréatique ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène et destinés aux analyses physico-chimiques pendant la période de Mars 2015.

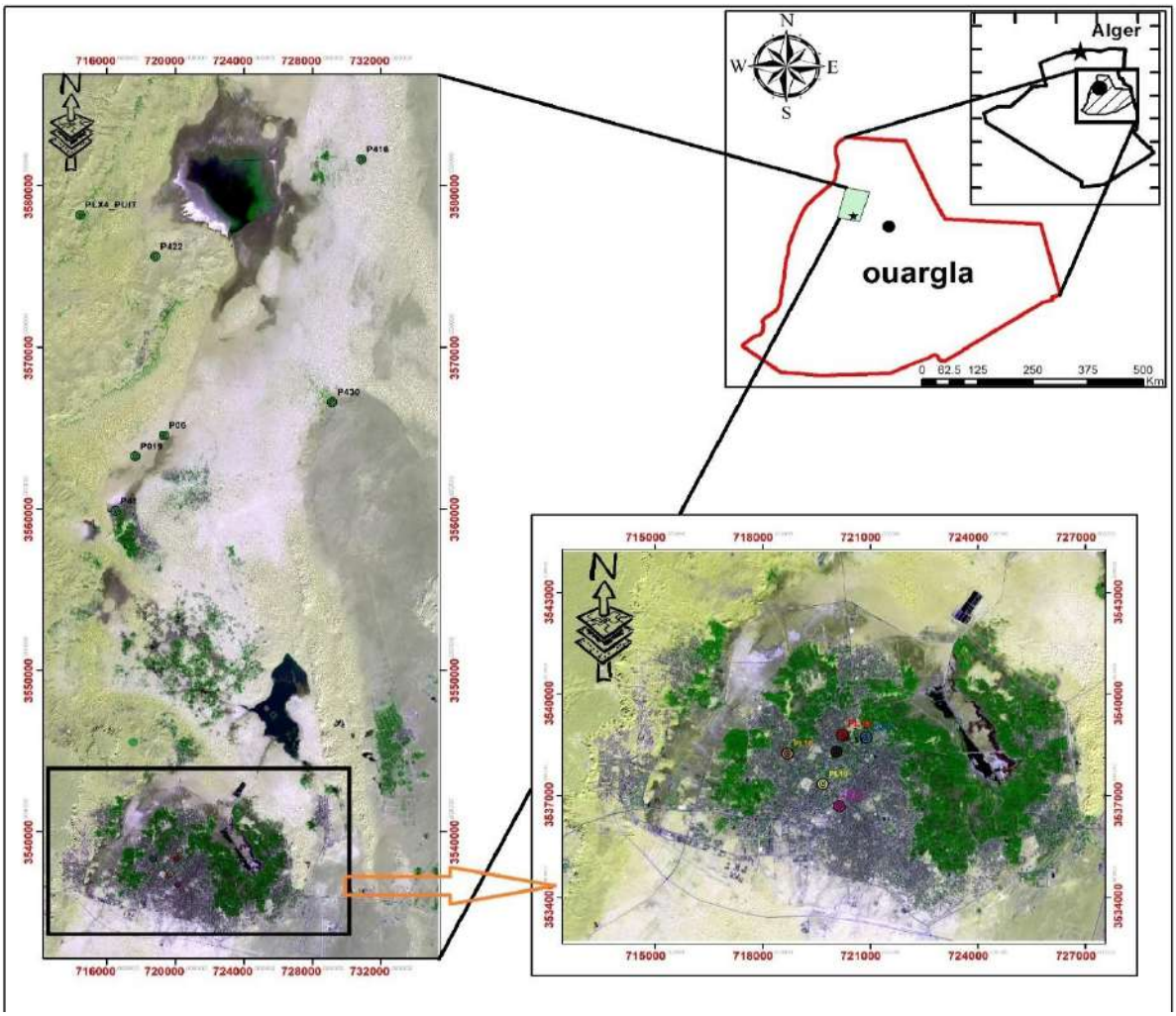


Figure 13 : Localisation des points d'eau échantillonnés.

1.1. Travail sur terrain

1.1.1. Echantillonnage

Dans le souci de rapporter au mieux les propriétés caractérisant les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, la collecte des échantillons s'est déroulée dans le respect des étapes suivantes :

- Remplissage des flacons destinés aux analyses physico-chimiques.
- Etiquetage des flacons, afin de facilité de leur identification.
- Transmission des échantillons ainsi prélevées et transportées au laboratoire.

Le prélèvement doit faire l'objet d'une attention particulière, qui s'adapte avec le type d'analyse procédé comme suivant. Pour les analyses physico-chimiques ; l'emploi des flocons de plastique d'un 1.5 L. Avant de procéder au prélèvement des échantillons d'eau, les bouteilles seront rincées 3 fois avec de l'eau distillé, puis elles sont rincées sur le terrain avec les eaux de différents puits, pour éviter toutes erreurs. Après le prélèvement des échantillons, les bouteilles sont fermées pour éviter l'évaporation et transportées au laboratoire dans une glacière.

1.1.2. Matériels d'échantillonnage

Pour la réalisation de notre travail, nous avons utilisé les matériels suivants :

- Des flacons : pour importer les échantillons de l'eau.
- Multi paramètres pour mesurer CE, ph et T.
- GPS : pour déterminer les coordonnées géographiques.
- Appareil photo numérique.
- Sonde piézométrique.

1.1.3. Les mesures in site

Les paramètres physiques qui font l'objet de l'analyse sont :

Le pH, la température et la conductivité électrique sont des paramètres doivent être appréciés au moment de prélèvement puisqu'ils changent pendant le temps de transport et de conservation. Ils sont des paramètres facilement mesurables et utiles pour la détermination de la qualité chimique des eaux (RODIER et COLL, 2005).

Sur le terrain, la conductivité électrique et la température sont déterminées par un conductimètre portable où l'électrode de ce dernier est introduite dans l'eau à analyser ensuit on lit la CE et la température affichée après la stabilité de l'appareil (WTW Cond 315i). Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre portable pH-mV (HI 9025).

1.2. Travail au laboratoire

Les mesures et analyses des paramètres physico-chimiques des eaux ont été effectuées au laboratoire d'analyses physico-chimiques de L'ANRH (Ouargla).

1.2.1 Par spectrophotométrie

Les sulfates, les nitrates, les nitrites, et les orthophosphates ont été analysés par un spectrophotomètre type DR2000, marque HACH, avec des réactifs en gélules :

Elément ;	Longueur d'onde ;	Réactif.
Les sulfates (SO_4^{2-})	450nm	SulfaVer 4
Les nitrates (NO_3^-)	500 nm	NitraVer 5
Les nitrites (NO_2^-)	507 nm	NitriVer 3
Les orthophosphates (PO_4^{3-})	890 nm	PhosVer 3

1.2.2. Par spectrophotométrie à absorption atomique

Le fer a été dosé par un spectrophotomètre à absorption atomique, type 11006.

1.2.3. Par photométrie de flamme

Le sodium Na^+, et le potassium K^+ : sont analysés par le photomètre à flamme, de marque JENWAY. Photomètres de flamme Modèle IC9223, de précision : < 0.2 ppms.

Les réactifs sont des solutions étalons de chaque élément. Les courbes d'étalonnage correspondantes au dosage de ces éléments sont représentées dans les figures (Figure.14, Figure.15).

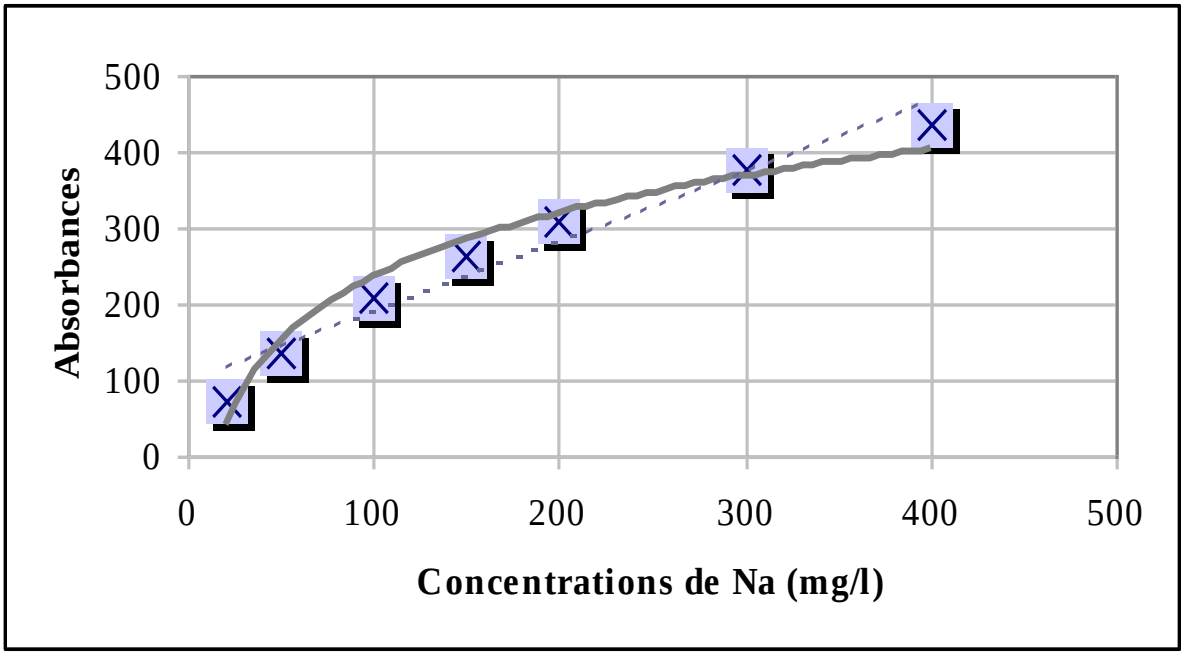


Figure 14 : Courbe d'étalonnage du sodium

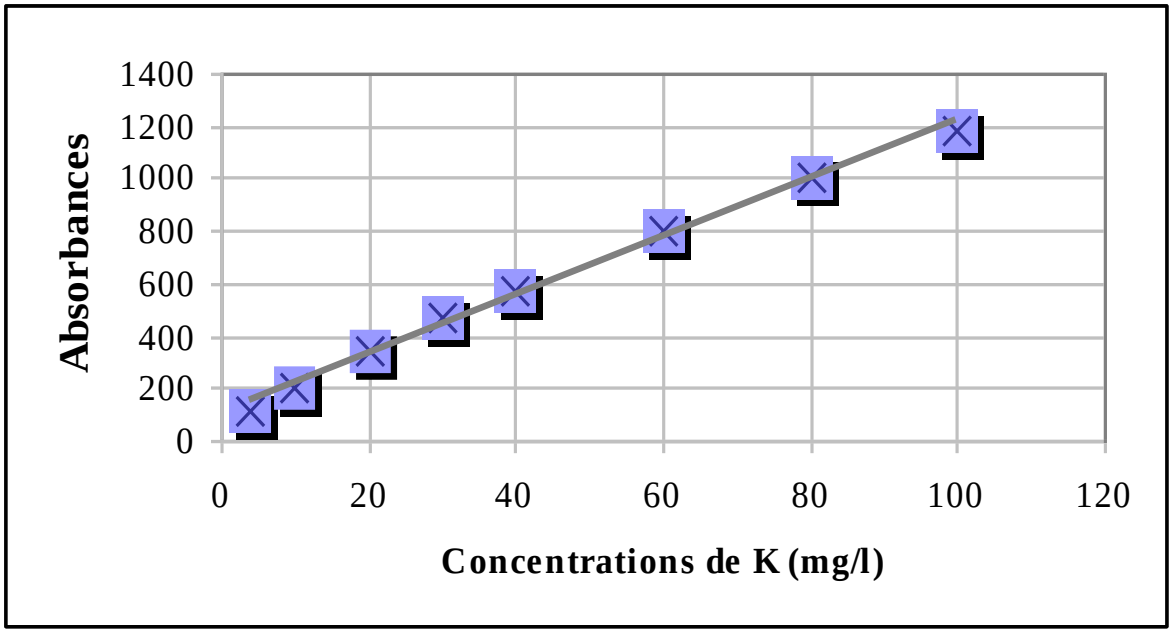


Figure 15 : Courbe d'étalonnage du potassium

1.2.4. Par titrimétrie

Les Chlorures, les carbonates et les bicarbonates HCO_3^-, ainsi que le calcium ont été dosés par titrimétrie.

- ☑ Les chlorures Cl^-, selon la méthode de MOHR, basée sur le titrage d'un volume d'eau avec une solution $AgNO_3$ concentrée en présence de l'indicateur K_2CrO_4, jusqu'à changement de la coloration et le début du dépôt d'un précipité rouge.
- ☑ Les carbonates CO_3^{2-} et les bicarbonates HCO_3^-, par ajustement de pH à 8.3 par H_2SO_4. Il est à noter que CO_3^{2-} n'existe pas car le pH est supérieur à 8.3, dans tous les échantillons
- ☑ Le calcium Ca^{2+}, ajustée à un pH =13 par la soude (NaOH), avec ajout d'une pincée de murexide, puis titrage d'un volume d'eau avec une solution d'EDTA concentrée jusqu'à changement de la coloration vers le violet.

1.2.5 Par complexométrie

La dureté totale a été déterminée par complexométrie, en utilisant l'EDTA comme réactif et le noir d'Eriochrome T comme indicateur coloré. Ce dosage représente la mesure de la dureté de l'eau (TH) en degré français, avec TH (°F) = [Ca^{2+} (méql^{-1}) + Mg^{2+} (méql^{-1})] *5, et par conséquent : **Mg^{2+}= TH - Ca^{2+}**

1.2.6. Par potentiométrie

Les fluorures ont été dosées par potentiométrie grâce à une électrode spécifique aux fluorures (référence : 1m/BNC/IC 9243/05, combinée), à membrane cristalline (cristal de fluorure de lanthane LaF_3). Branché à un pH mètre mV mètre, marque Hanna 211.0. À sa surface active (membrane) l'électrode donne un potentiel (réponse) proportionnel au logarithme de l'activité des ions F^- libres, selon la loi de Nernst nous avons :

$$E = E_0 - 2.3\ RT/F\ (\text{Log}\ \gamma[F^-]); \quad \text{Où } E = E_0 - S\ \text{Log}\ \gamma\ [F^-]$$

E : est le potentiel mesuré à l'électrode ; E_0 : est le potentiel standard de l'électrode

S :	**T :**	**R :**	**F= 96500**	**γ [F^-] :**
Facteur de Nernst ;	Température ;	cte des gaz parfaits ;	cte de Faraday ;	Activité des ions F^- γ : coeff d'activité

La relation $\mathbf{E = E_0 - S\ Log\ \gamma\ [F^-]}$, est une droite de la forme : $\mathbf{E = f\ (Log\ [F^-])}$, à condition d'ajouter une quantité suffisante d'une solution tampon TISAB (Total Ionic Strength Adjustment Buffer), pour maintenir le pH du milieu à 5,8, et éliminer toutes les interférences susceptibles de fausser les résultats. L'électrode utilisée est sensible à l'interférence des ions OH^- pour : $8<pH<4$.

1.2.7. Préparation des solutions

A partir de la solution mère de NaF (100 mg/l), on a préparé par dilution une série de solutions étalons ayant des concentrations en fluorures de 0.1 mgl^{-1}, 0.5 mgl^{-1}, 2 mgl^{-1}, 3 mgl^{-1}… 10 mgl^{-1}, dans l'eau distillée d'une part et dans la solution tampon citrates de sodium (pH 5.8) d'autre part dans un rapport I/I, et on procède de la même manière pour les échantillons à analyser.

1.2.8. Mesures des potentiels

- On plonge l'électrode sélective sèche et propre dans un bécher en polyéthylène contenant les solutions étalons, en commençant par la plus diluée (0.1mg/l), jusqu'à la plus concentrée (10 mg/l)
- On assure une agitation convenable ;
- On inscrit la valeur du potentiel après stabilisation.

Pour les échantillons, on plonge également l'électrode dans l'échantillon, traité préalablement et de façon à ramener son pH à 5.8, et nous effectuons la mesure et la transcription des résultats.

1.2.9. Établissement de la courbe d'étalonnage et expression des résultats

La droite d'étalonnage E (mV) = f ([F^-]), établie nous donne toutes les concentrations en [F^-] inconnues des échantillons d'eau (tableau 03 et Figure. 16).

Tableau 01 : Les données d'étalonnage de l'électrode spécifique

[F^-] mg/l	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E (mV)	-264,9	-294,1	-309,8	-326,0	-336,4	-341,4	-349,8	-354,0	-356,4	-360,4	-362,7	-364,0

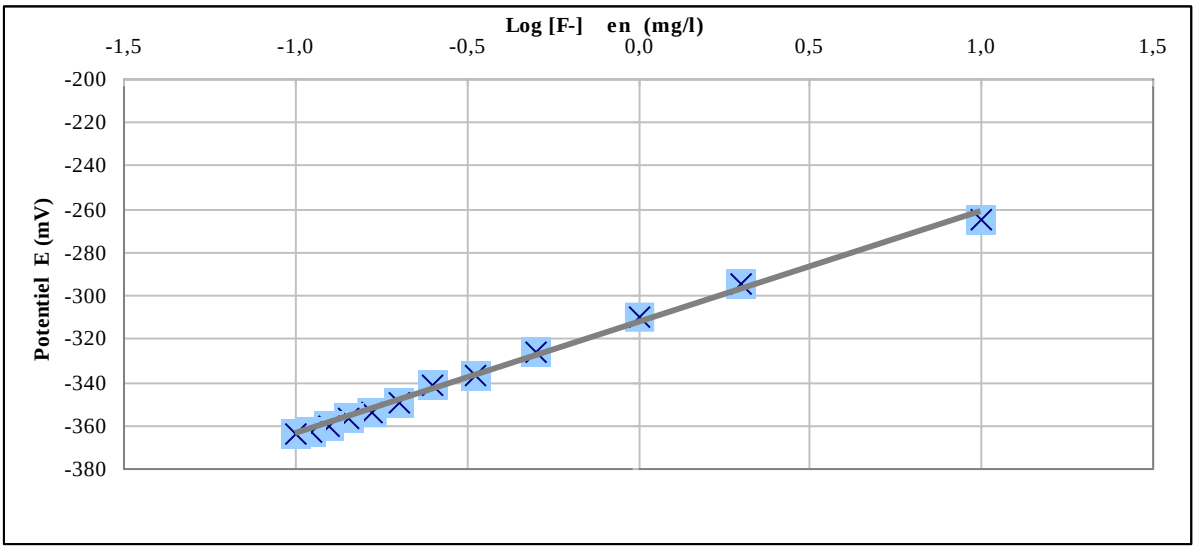


Figure 16 : Courbe d'étalonnage de l'électrode spécifique du potentiel E vs log [F^-]

1.3. Aptitude des eaux à l'irrigation

Les eaux chargées en sels minéraux posent des problèmes pédologiques et agronomiques entrainant une influence sur la croissance des plantes. Parmi ces sels, on peut citer le cas des sulfates et du sodium, qui avec de fortes teneurs influent sur la structure physique du sol et sur le développement de la plante. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante

$$SAR = Na/((Ca+Mg)/2)^{1/2}$$

2. La cartographie des Sebkhas et des chotts

Introduction

Les développements des technologiques réalisés lors de ces deux dernières décennies, pour l'observation et l'étude de la surface de la Terre sont devenues obligées d'utiliser la télédétection. En effet, les satellites de type héliosynchrone tels que les satellites optiques (Landsat, Sentinel 2, SPOT, etc.) ont permis à la télédétection de devenir un outil opérationnel d'investigation et d'interprétation de notre environnement terrestre.

La télédétection date de plus d'un siècle. Sa naissance correspondant à celle de la photographie. En 1858, Gaston Félix Tournachon, prend la première photographie en ballon et dépose un brevet d'invention pour un nouveau système de photographie aérostatique permettant le levé des plans topographiques, hydrographiques et cadastraux. Aujourd'hui ses principales applications sont la cartographie géologique, la cartographie générale, l'inventaire et l'étude des ressources en eau, l'étude de la couverture végétale et de l'utilisation des sols, la prévision des récoltes, les études littorales… etc.

La télédétection est une discipline ayant pour objet l'information portée par le rayonnement électromagnétique issu de la surface de la terre ou de celle d'autres planètes, captés à distance par des instruments aéroportés ou spatiaux (Chorowicz, 1980). Cette discipline développe des techniques et des méthodes qui interviennent à plusieurs niveaux :

1. le choix et l'acquisition des données.
2. le traitement des données, incluant leur mise en forme et leur restitution (chaine de traitement de l'image).
3. l'analyse et l'interprétation des données, incluant la photo-interprétation. Cette définition exclut de la télédétection les autres mesures physiques telles qu'acoustiques, sismiques, magnétiques, gravimétriques, radiométriques (rayonnement gamma) et électriques, mais inclus les photographies aériennes et la vidéographie (Chorowicz, 1980).

2.1. Principe et base physique de la télédétection

2.1.1. Principe et domaine d'application

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission française interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988.). C'est en fait l'étude de l'information véhiculée par le rayonnement visible, infrarouge et Radar du spectre électromagnétique provenant de la surface de la terre et captée par les appareils aérospatiaux

évoluant à distance convenable de cette dernière (Figure 17). Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau, sol nu ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état. Certains instruments de télédétection utilisent des ondes sonores de façon similaire, et d'autres mesurent des variations dans des champs magnétiques ou gravitaires.

En raison de contraintes technologiques ou physiques, et notamment des propriétés de transparence de l'atmosphère (Figure 17), la télédétection spatiale n'utilise qu'une partie du spectre électromagnétique, on distingue les domaines solaire (λ=0.38 à 3 µm), infrarouge thermique (λ=3 à 1000 µm), et micro-onde (λ = 10-3 m à 0.3 m).

Quand les spectres d'absorption des gaz de l'atmosphère sont combinés, il reste des fenêtres de faible opacité, autorisant le passage de certaines bandes lumineuses. La fenêtre optique va d'environ 300 nm (ultraviolet) jusqu'aux longueurs d'onde que les humains peuvent voir, la lumière visible (communément appelé lumière), à environ 400–700 nm et continue jusqu'aux infrarouges vers environ 1100 nm. Il y a aussi des fenêtres atmosphériques et radios qui transmettent certaines ondes infrarouges et radio sur des longueurs d'onde plus importantes.

Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées. La photographie aérienne, sous toutes ses formes, est encore, sans doute pour peu de temps, le moyen le plus usuel de télédétection spatiale, les photographies aériennes sont de plus en plus utilisées sous forme numérique de façon à permettre leur correction géométrique et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique. En télédétection spatiale, ce sont surtout les radiomètres optiques à haute ou très haute résolution qui sont utiles pour les applications terrestres. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30 m (TM, ETM+, OLI), à 20 et 10 m (HRV de SPOT), IKONOS, SANTINEL 2 et autre avec une résolution de moins d'un mètre. En géologie ou pour l'étude de la végétation, les radars imageurs, surtout aéroportés, sont aussi très utilisés. Le champ des utilisations de la télédétection ne cesse de s'élargir : cartographie, géologie et prospection minière, mais aussi surveillance des cultures ou du couvert forestier, urbanisme, aménagement, génie civil, etc.

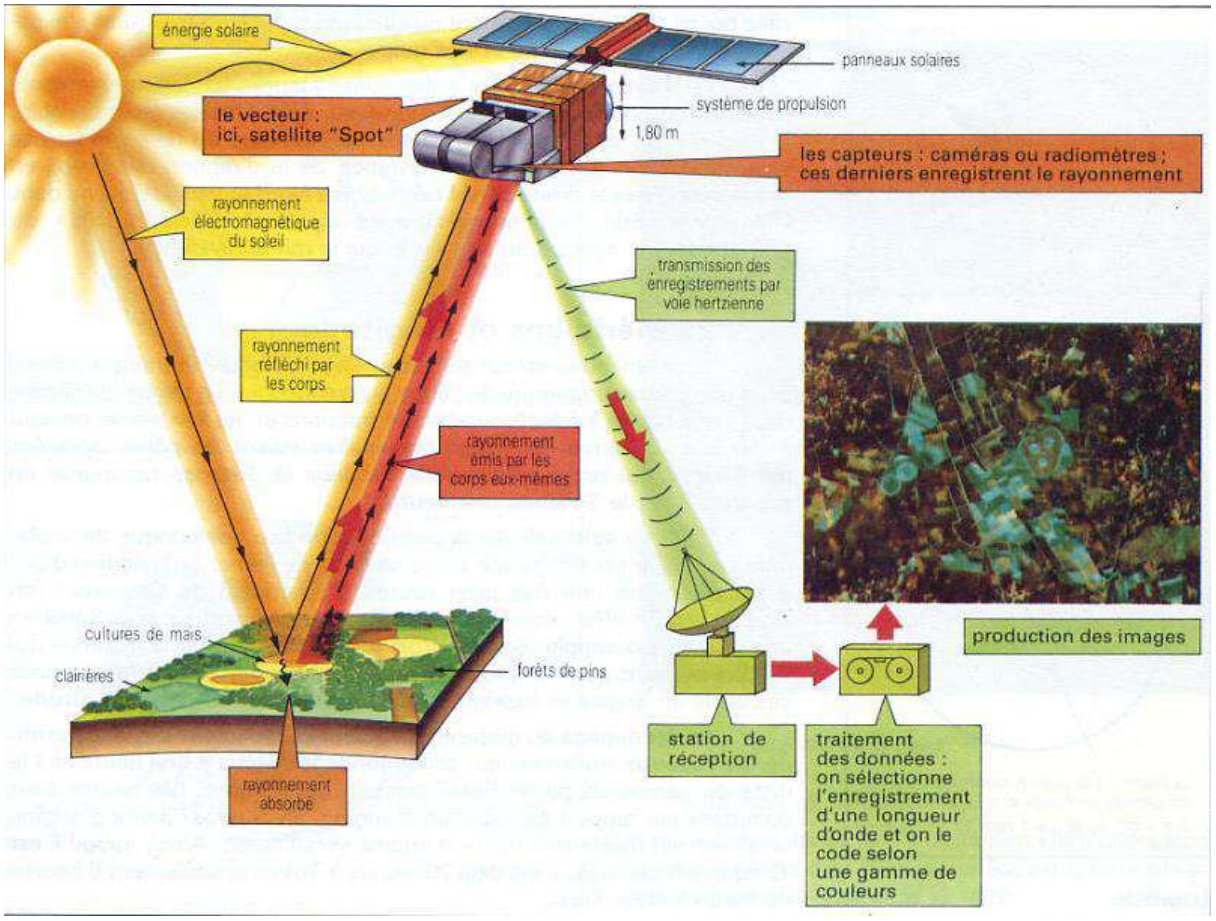


Figure 17 : Principe de la télédétection (Source : http://www.alertes-meteo.com)

Le traitement de l'imagerie satellitaire numérique est une discipline en constant développement, et la baisse du coût des outils informatiques a entraîné une augmentation rapide du nombre des utilisateurs.

2.1.2. Les bases physiques de la télédétection

a. Le rayonnement électromagnétique (Soudani K., 2005)

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Selon la théorie ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (300 000 km/s dans le vide). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur et sa fréquence (figure 18).

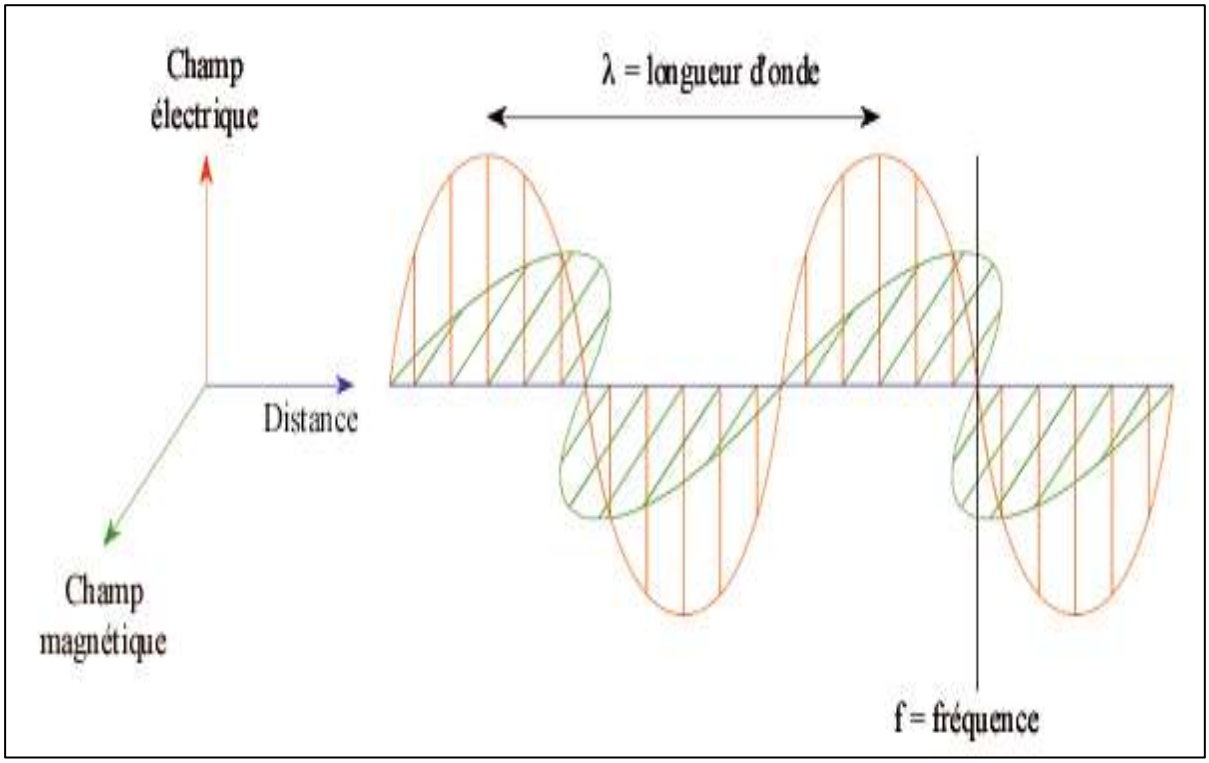


Figure 18 : Représentation de l'onde électromagnétique

b. Le spectre électromagnétique

C'est le résultat de la décomposition du rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes. Il s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). L'ensemble des fenêtres de toutes les longueurs d'ondes est appelé **spectre électromagnétique (**figure 19).

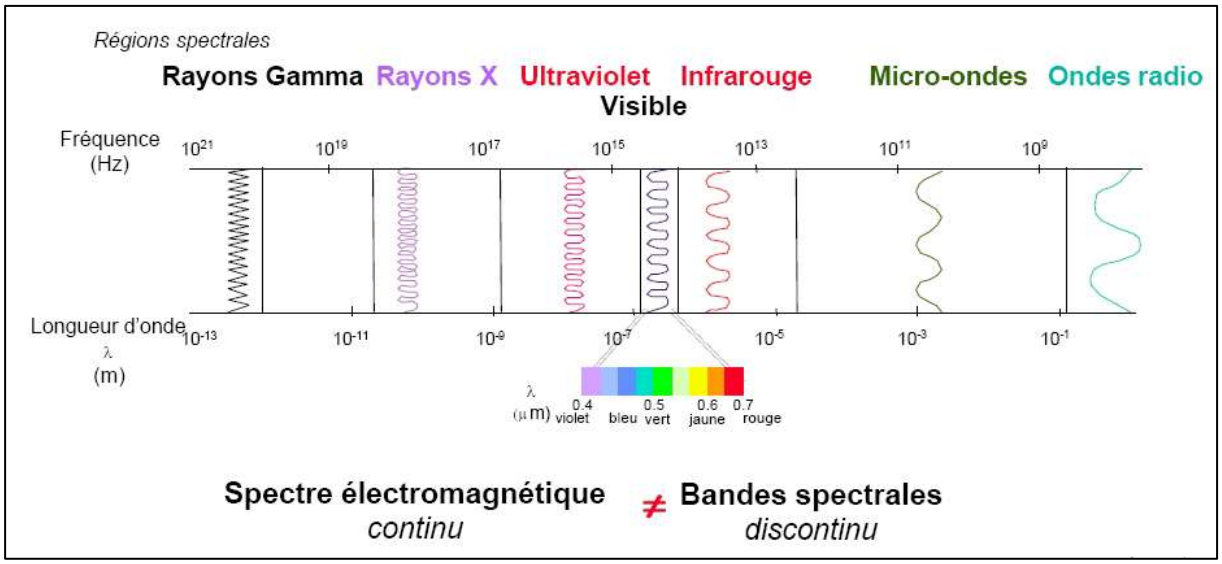


Figure 19 : Détails des domaines spectraux

La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique En télédétection, les capteurs des instruments embarqués sur les satellites et avions mesurent la quantité de REM renvoyée par une portion d'espace terrestre, les capteurs embarqués sur les satellites peuvent enregistrer les ultraviolets (rare), le visible, le proche-infrarouge, l'infrarouge moyen, l'infrarouge thermique, l'infrarouge lointain et les hyperfréquences. **(Big n°3).**

c. Signatures spectrales

En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. Les signatures spectrales sont donc la réponse radiométrique des objets dans une succession de longueurs d'ondes. Elles sont représentées par des courbes figurant la réflectance en ordonnées et la longueur d'onde en abscisse.

- La structure des minéraux est telle qu'il existe de nombreuses bandes d'absorptions dues aux transitions électroniques et aux vibrations moléculaires (figure 20) **(Delacourt C.).**
- La réflectance des roches dépend de leur composition physico-chimique mais également de leur degré d'altération. La signature spectrale d'une roche n'est donc pas uniquement une combinaison des signatures spectrales des minéraux qui la compose (figure 20) **(Delacourt C.).**

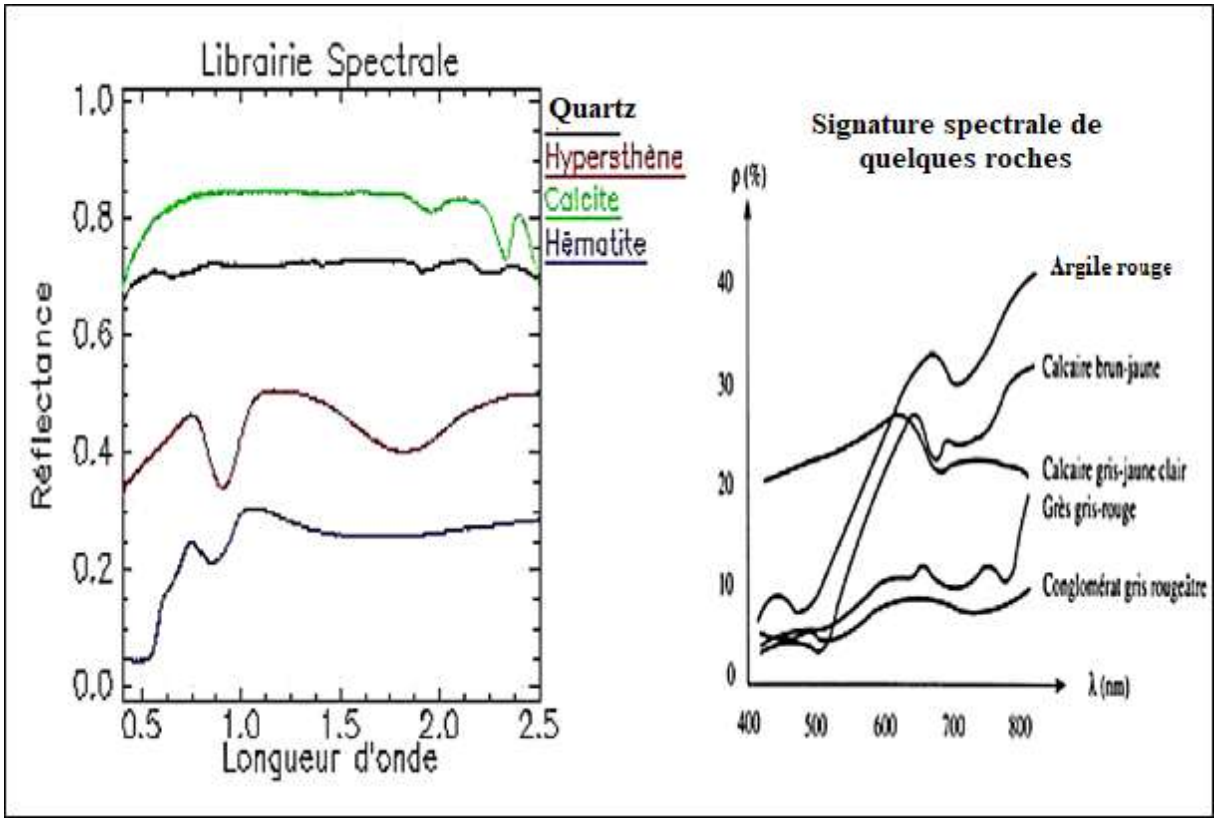


Figure 20 : Signatures spectrales de quelques minéraux et roches.

2.2. Les données satellitaires utilisées

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des images satellitaires de Landsat ainsi que les images MNT. Les images de Google Earth sont utilisées pour digitaliser les petites zones et la sortie sur terrain dans les deux régions. Pour traiter ces données, un ensemble de logiciels sont utilisés. Afin de couvrir la zone d'étude, on a utilisé deux scènes d'images (p193r038 et p168r042) de Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI, de plusieurs dates dont :

2.2.1. La région de Ouargla

- Six images multispectrales : Quatre de type TM de Landsat-5 (Path 193 Row 38) daté le 08/02/1987, 19/08/1987, 28/02/2000 et 28/02/2000. Deux images OLI de Landsat-8 daté 23/01/2016 et 18/08/2016. Ces derniers ont été utilisées pour étudier l'évolution saisonnière et interannuelle de sebkha Oum Erranebe et chott Ain El Baida.
- Six images multispectrales : OLI de Landsat-8 (23/01/2016, 08/02/2016, 21/05/2016, 22/06/2016, 24/07/2016, 18/08/2016) pour étudier l'évolution saisonnière de Sebkha Safioune.

2.2.2. La région de Al Qassim

- Six images multispectrales : quatre de type TM de Landsat-5 (Path 168 Row 42) daté le 22/02/1986, 02/09/1986, 06/02/2000 et 01/09/2000.

  Deux de OLI de Landsat-8 daté 18/02/2016 et 28/08/2016, ces images ont été utilisées pour étudier l'évolution saisonnière et interannuelle de Sabkhat Atarafiyah au nord de la ville de Buraydah.
- Six images OLI de Landsat-8 daté (17/01/2016, 18/02/2016, 21/03/2016, 06/04/2016, 24/05/2016, 28/08/2016) pour suivre l'évolution saisonnière du lac salé Al Aushaziyah.

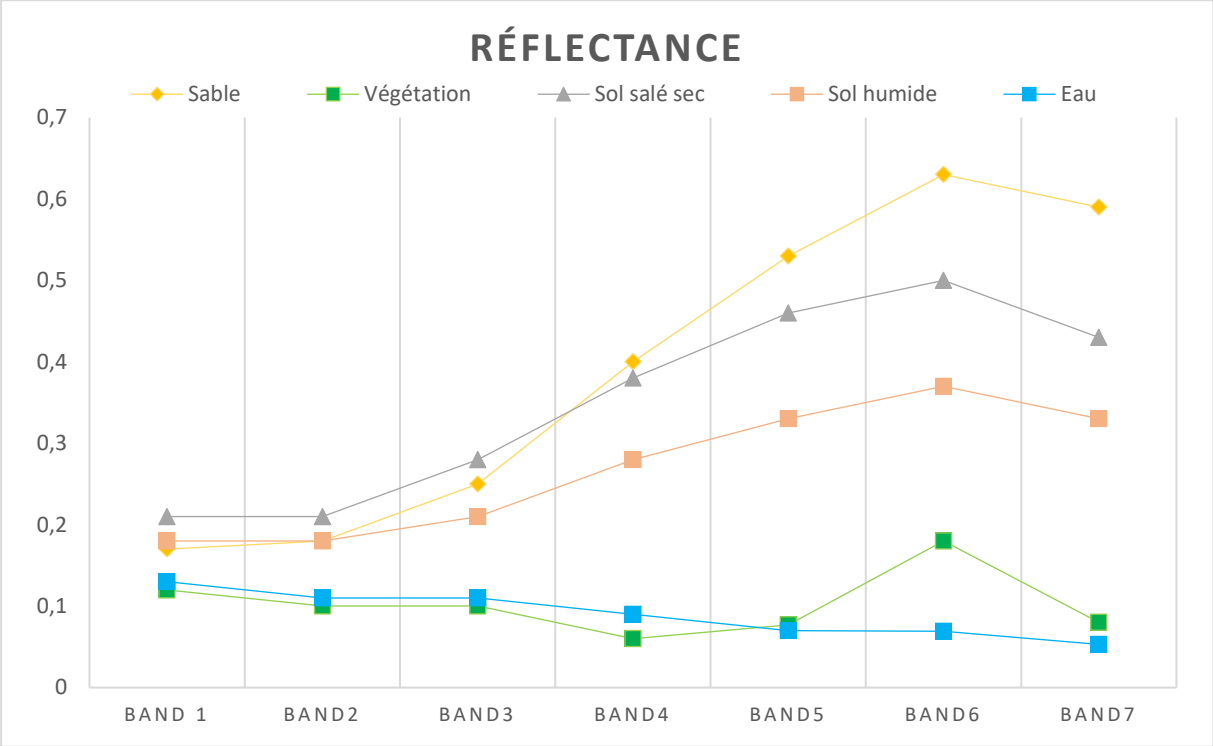


Figure 21 : Les signatures spectrales des classes humides en 2016 au lac salé Al Aushaziyah

Tableau 02 : Bandes spectrales de Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI

Landsat 5 Thematic Mapper (TM)				Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)	
Band	Name	Wavelength (µm)	Resolution (m)	Wavelength (µm)	Resolution (m)
1	Ultra-Blue (Aerosol)	-	-	0.435 - 0.451	30
2	Blue	0.45 - 0.52	30	0.452 - 0.512	30
3	Green	0.52 - 0.60	30	0.533 - 0.590	30
4	Red	0.63 - 0.69	30	0.636 - 0.673	30
5	Near infrared	0.76 - 0.90	30	0.851 - 0.879	30
6	Shortwave IR-1	1.55 - 1.75	30	1.566 - 1.651	30
7	Shortwave IR-2	2.08 - 2.35	30	2.107 - 2.294	30
8	Panchromatic	-	-	0.503 - 0.676	15

2.3. Analyse des données satellitaires

2.3.1. Les prétraitements d'image

Les données acquises par télédétection nécessitent donc une série de traitements afin qu'elles soient les plus représentatives possible de la réalité. Pour atteindre notre objectif, la démarche du travail a été réalisée comme suit. Un fichier très important vient avec l'image, c'est le métadonnée (Meta data), on le trouve sous le nom MTL, ce dernier contient des données importantes pour le traitement et l'analyse de l'images. Les fichiers de métadonnées fournissent toutes les données relatives aux images satellite telles que la date de l'acquisition en minutes et secondes, l'angle d'élévation du soleil, le type de conversion utilisé pendant le traitement d'image, la projection utilisée et certaines autres valeurs pouvant être utilisées pour la correction radiométrique de l'image satellitaire. Le prétraitement d'image passe par les étapes suivantes :

- Empilement des bandes spectrales (Image multi-bandes)

Le prétraitement d'image commence par la création d'une image multi-bandes, cela se fait par l'empilement spectral des bandes de chaque scène à partir de la commande ‹ layer stacking› dans le logiciel de traitement d'images satellitaires (Envi 5.1), aussi, cette étape peut être réaliser par l'ouverture de l'image à partir de fichier MTL (Geo TIFF with Metadata), qu'il vient attaché avec l'image, on obtient trois groupes des bands pour Landsat 8 : 7 bands multispectrales de même résolution (30 m), la band panchromatique a une résolution spatiales de 15 m et deux bands infrarouge thermique ont une résolution de 60 m, pour Landsat 5 TM on a 6 bands multispectrales de même résolution (30 m) et une band infrarouge thermique a une résolution de 120 m. Cette étape est utilisée pour simplifier le découpage des images étudiées.

- Extraire la zone d'étude (Resize Data)

Pour l'extraction du secteur d'intérêt et la correction géométrique de l'image LANDSAT dans le système de référence UTM/WGS 84, fuseau 31N et 38N. Nous avons effectué un redimensionnement par « Resize Data » dans le menu principal d'ENVI. Cette étape pour simplifier le traitaient de l'image et les opérations de calcule.

- La correction atmosphérique

Le principe de correction atmosphérique d'une image de télédétection consiste à convertir les comptes numériques de l'image (niveau de gris) en luminance (w m-2 sr-1 µm-1) au niveau du capteur satellitaire et ensuite d'extraire de cette nouvelle variable les effets perturbateurs atmosphériques afin d'aboutir finalement à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée. La méthode utilisée dans cette étude est **dark object subtraction** (DOS) qui est proposée par Song et al., 2001.

- Augmentation de la résolution spatiale (image sharpening)

L'objectif principal de cette dernière étape est de bien visualiser ou discriminer les zones humides de la région d'étude. Cette opération se fait par la fusion des bandes multispectrales (résolution 30 m) et la bande panchromatique (résolution 15m). La résulta sera une image a une résolution spatiale de 15 m, (figure 22).

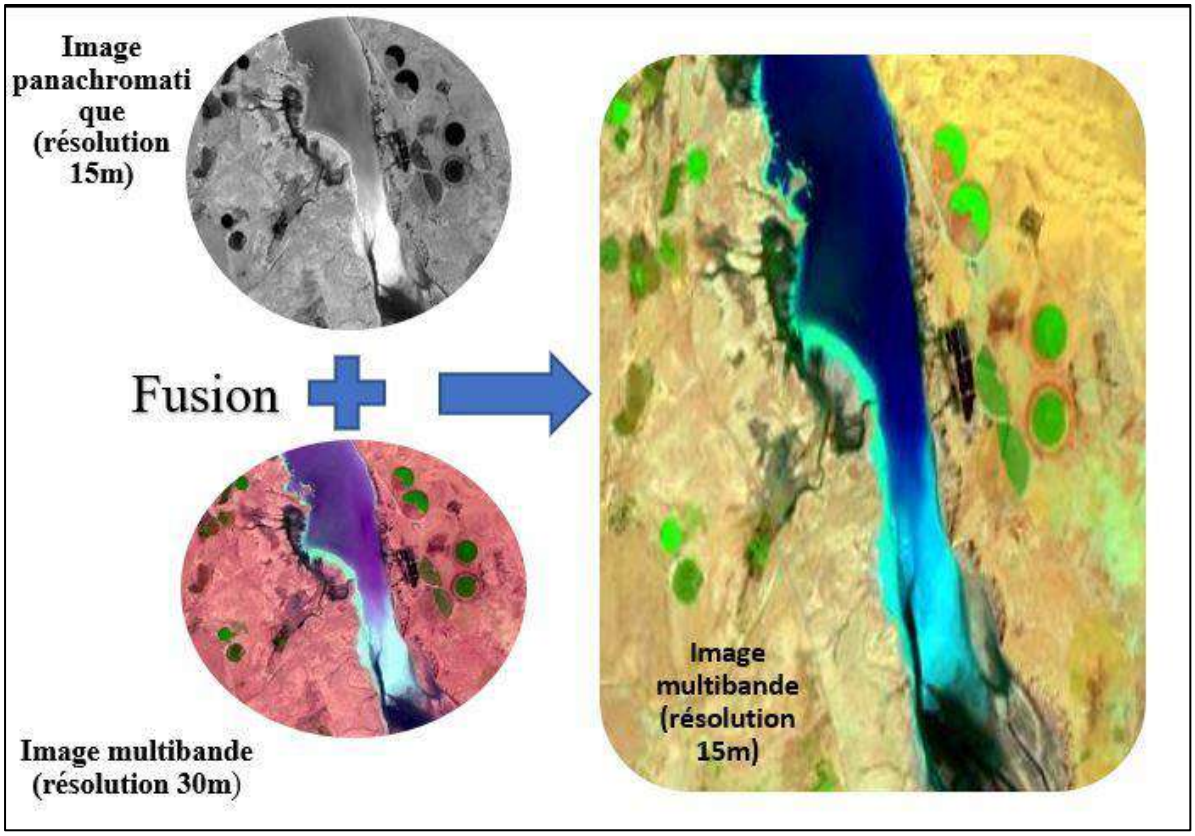


Figure 22 : Augmentation de la résolution spatiale des images de Landsat (**image sharpening)**.

2.3.2 Photo-interprétation

- La composition colorée

Dans l'exploitation des images LANDSAT, on peut faire une analyse combinée en faisant Appel aux différentes compositions colorées ou choisir une analyse individuelle, canal par Canal. On doit toujours choisir la composition colorée suivants les bandes qui donne une meilleure discrimination entre les classes d'occupation de sol et facilite le choix des zones d'intérêt (ROI) comme étant des échantillons de ces différentes classes choisies, et tout ça pour arriver à faire une bonne classification.

Les images individuelles apparaissent comme des images à niveaux de gris en Noir et Blanc.

Cependant, elles peuvent être combinées pour former des images composites, en affectant à chaque bande spectrale une couleur primaire. On considère que les trois bandes spectrales sélectionnées présentent le maximum d'information.

Pour obtenir des informations statistiques multivariées sur un ensemble de données, on peut calculer le facteur d'indice optimal (OIF) pour toute combinaison de trois bandes dans notre liste de cartes. Le facteur indice optimal (OIF) est une valeur statistique qui peut être utilisée pour sélectionner la combinaison optimale de trois bandes dans une image satellite avec laquelle vous souhaitez créer un composite couleur. La combinaison optimale de bandes parmi toutes les combinaisons possibles de trois bandes est celle qui contient le plus grand nombre d'informations (= somme des écarts-types la plus élevée), avec le moins de duplication possible (corrélation la plus faible entre les paires de bandes). Le logiciel ILWIS va être utilisé pour calculer le OIF.

Dans le cas d'étude la combinaison des trois bandes 5 (Swir), 4 (Nir) et 3 (Red) représente le maximum d'information pour notre thématique dans la région d'étude. L'analyse des signatures spectrales montre une décorrélation entre les différentes bandes spectrales.

- Rehaussement des images (Enhance)

C'est de modifier l'aspect visuel d'une image en vue de faciliter son interprétation. L'aspect visuel d'une image dépend fortement de sa dynamique (contraste).

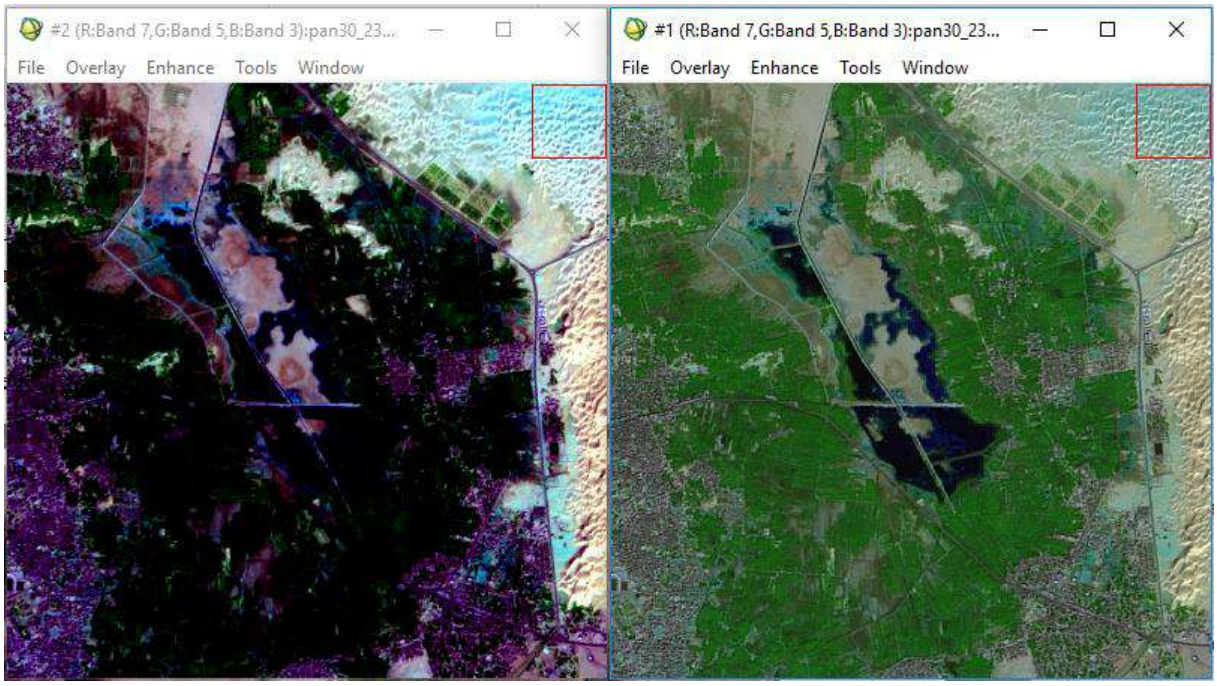


Image avant filtrage Image après filtrage

Figure 23 : Augmentation du contraste dans une image avant et après un rehaussement linéaire

- Classifications des images

Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : les méthodes de **classification supervisée** et les méthodes de **classification non supervisée**.

a- **La classification non supervisée**

Elle procède de la façon contraire. Les classes spectrales sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile (si possible). Des programmes appelés algorithmes de classification sont utilisés pour déterminer les groupes statistiques naturels ou les structures des données. Habituellement, l'analyste spécifie le nombre de groupes ou classes qui seront formés avec les données. De plus, l'analyste peut spécifier certains paramètres relatifs à la distance entre les classes et la variance à l'intérieur même d'une classe.

Le résultat final de ce processus de classification itératif peut créer des classes que l'analyste voudra combiner, ou des classes qui devraient être séparées de nouveau. Chacune de ces étapes nécessite une nouvelle application de l'algorithme. L'intervention humaine n'est donc pas totalement exempte de la classification non supervisée. Cependant, cette méthode ne commence pas avec un ensemble prédéterminé de classes comme pour la classification supervisée. Il s'agit de la technique le plus rapide, mais le moins exact vu qu'il n'existe pas de contrôle avec des connaissances du terrain.

b- **La classification supervisée**

Lors de l'utilisation d'une méthode de classification supervisée, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surfaces présents dans l'image. L'analyste supervise donc la classification d'un ensemble spécifique de classes.

Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées pour que l'ordinateur puisse définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe. L'ordinateur utilise un programme spécial ou algorithme afin de déterminer la 'signature' numérique de chacune des classes. Plusieurs algorithmes différents sont possibles. Une fois que l'ordinateur a établi la signature spectrale de chaque classe à la classe avec laquelle il a le plus d'affinités. Une classification supervisée commence donc par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales qui les représentent.

La classification supervisée maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood)

La classification supervisée est toujours précédée d'un apprentissage qui nous a demandé des sorties sur terrain et l'utilisation de Google-Earth. Le système est instruit en lui désignant des zones d'intérêts (apprentissage) de l'image comme étant des échantillons représentatifs des classes à extraire. Le principe de la classification d'image est l'attribution à chaque point une classe choisie dans la nomenclature constituée au préalable, ayant le nombre de classes et leurs appartenances (Pony et al. 2000).

Le principe de la classification dirigée par la procédure de 'maximum de vraisemblance', lors de laquelle la signature spectrale de chaque pixel, dans chacun des trois canaux (4, 3 et 2) est comparée à celle des zones d'apprentissage ou régions d'intérêt. Les pixels sont alors affectés dans la classe dont ils sont le plus proches.

La classification supervisée se déroule en deux étapes :

1) La première étape consiste à sélectionner des zones de l'image dont on connaît la vraie occupation du sol. Ces zones sont appelées régions d'intérêt : Regions of interest (ROI).

2) Utiliser ensuite ces zones comme références à la généralisation sur l'ensemble de l'image.

Les classes choisies pour notre thématique dans la région de Ouargla et Al Qassim sont :

1. Eau : rassemble les surfaces d'eau et englobe donc les chotts et les sebkhas. Cette classe absorbe la quasi-totalité du rayonnement solaire.

2. Sol humide : représente des dépressions où le niveau statique de la nappe phréatique est plus proche de la surface du sol.

3. Sol salé humide : occupe les périphéries des surfaces d'eau. Il représente essentiellement les dépôts et les encroutements gypseux et salifères, sous l'effet d'une évaporation intense dans un tel climat.

4. Sol salé sec : rassemble les dépressions éloignées des sources d'alimentations anthropiques (eaux d'irrigation et eaux usées). L'influence des vents de sable couvre partiellement les efflorescences des cristaux de sels formées dans la frange capillaire.

5. La végétation : cette classe englobe :

a- Palmeraie : située à proximité des agglomérations, représentée essentiellement par les palmiers dattiers, et/ou des cultures intercalaires.

b- Surface irriguée : parcelles de cultures irriguées par aspersion (pivot).

c- Roseau : plante des sols humides occupant une partie des chotts et sebkhas.

6. Surfaces minérales (sable) qui regroupent :

a- Croute grèso-calcaires : représenté par le plateau gréseux et quelques butes témoins (garas).

b- Grés rouge : le plus dominant, est représenté sous une forme érodée par l'effet du vent.

c- Sables : représente la zone où le sable recouvre le sol avec de grandes épaisseurs sous forme de dunes d'une part ; et par des faibles épaisseurs sous forme de sols sableux d'autre part.

Ces classes sont des fois regroupées ou détaillées suivant la thématique et l'intérêt du travail où on peut trouver les classes suivantes : eau, sol humide, sable, végétation, sel et agglomération. L'observation des compositions colorées des images, ainsi que les réponses spectrales de certaines classes ont permis de donner plus de précision pour la discrimination de ces classes humides dans un climat hyperaride.

- Choix des zones d'intérêt (Regions Of Interest -ROI-)

ENVI permet de tracer et de sélectionner des formes (polygones, polylignes, points, ellipses, rectangles) utilisés pour diverses opérations : classification, masques, etc.

La fenêtre Available Regions of Interest va afficher la liste des zones tracées, leur couleur et le nombre de pixels concernés. Chaque région correspond à une zone (échantillon ou groupe d'échantillons de la même classe). ENVI génère automatiquement les couleurs affectées à chaque région. L'utilisateur peut choisir lui-même les couleurs et affecter un nom à la région par un clic sur la cellule, écrire le nouveau nom et valider.

Le choix des zones d'intérêt (ROI) comme des échantillons représentatifs des classes déjà choisies est basé sur une identification sur terrain au premier lieu, ainsi que à l'aide des images de Google Earth de haute résolution. Pour une bonne discrimination de différence classes dans les dates précédentes, on a implanté ces échantillons sur la composition colorée (Swir, Nir, Red) de chaque date de ressortir les échantillons réellement utilisés.

- Sélection des aires d'entrainement (Regions Of Interest)

Il s'agit de sélectionner un minimum de 30 pixels spectralement représentatif de chaque signature spectrale identifiée précédemment. Cet échantillon, ou l'aire d'entrainement est défini à l'écran par la numérisation d'un ou plusieurs polygones pour chaque classe spectrale. Sur base des polygones ainsi définis, l'extraction automatique des valeurs de pixels contenues à l'intérieur des polygones et le calcul de leur moyenne et écart-type produiront la signature spectrale de chaque classe à partir des 3 canaux de l'image Landsat.

Pour la représentation cartographique, les différentes classes spectrales associées à un même taxon d'occupation du sol doivent être regroupées en une seule classe.

- Séparabilité des ROIs

Cette étape est pour contrôler la séparation entre les classes avant de commencer la classification**.** Deux méthodes de mesure de la séparabilité entre les différentes classes sont données. Les deux méthodes de calcul de la distance spectrale interclasses fournissent des statistiques qui varient entre 0 et 2 :

* Si 0 < x < 1.0 : séparabilité très faible, 0 implique une confusion totale entre deux classes ;

* Si 1.0 < x < 1.9 : séparabilité faible ;

* Si 1.9 < x < 2.0 : bonne séparabilité, 2 séparabilité parfaite avec aucun risque de confusion.

Une classe dont la séparabilité par rapport à une autre est faible doit être soit confondue avec celle-ci ou redéfinie.

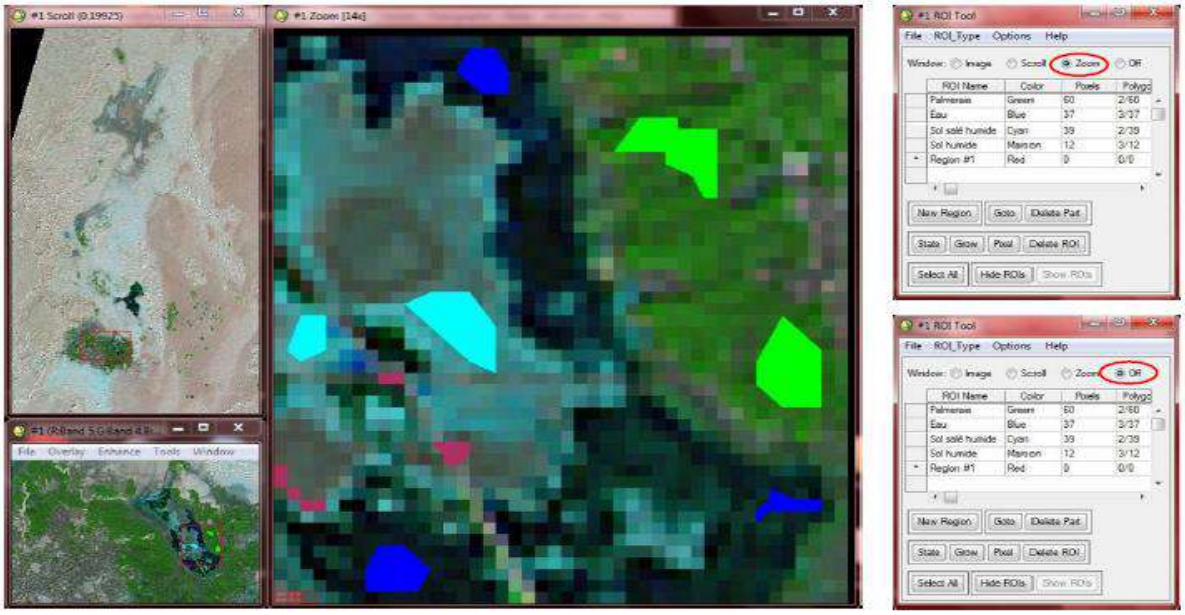


Figure 24 : Choix des zones d'intérêt (Regions Of Interest -ROI-)

2.4. Post classification

2.4.1. Matrice de confusion

La validation de la classification a été faite par la matrice de confusion (table de contingence calculée en comparant les résultats issus de la classification et aux échantillons de vérification). Les lignes de la matrice correspondent aux vérités terrain et les colonnes aux classes issues de la classification. Les valeurs de la diagonale indiquent le nombre de pixels bien classés et le reste la confusion entre les classes.

Plusieurs indicateurs permettent d'évaluer la qualité de la classification, soit :

- La précision globale (overall accuracy) est obtenue en divisant le nombre de pixels classés correctement (diagonale de la matrice) par la somme des pixels de toutes les classes d'apprentissage. Elle exprime par conséquent les pixels correctement classés par rapport à ceux mal classés.

- L'indice de Kappa est calculé en multipliant le nombre total de pixels des classes d'apprentissage par la somme des pixels classés correctement (diagonale de la matrice).

On soustrait la somme des produits « total des pixels de chaque classe d'apprentissage, par total des pixels affectés à chacune des classes, sommé sur toutes les classes ». Puis en divisant le tout par le nombre total de pixels des classes d'apprentissage au carré, moins la somme des produits « total des pixels de chaque classe d'apprentissage, par total des pixels affectés à chacune des classes, sommé sur toutes les classes »

2.4.2. Analyse majoritaire et minoritaire (Majority /Minority Analysis)

Le principe d'analyse majoritaire ou minoritaire est basé sur l'utilisation d'un filtre (ou noyau) de taille variable (par exemple : 3x3). Le filtre se déplace ligne par ligne, colonne par colonne sur l'ensemble de l'image classée. Dans le cas d'une analyse majoritaire, le pixel central du filtre sera affecté à la classe la plus représentée (majoritaire) dans le filtre. Inversement, dans une analyse minoritaire, le pixel central sera affecté à la classe la moins représentée dans le filtre. On va utiliser le filtre majoritaire sur une fenêtre 3 x 3 après chaque classification afin d'éliminer les pixels isolés.

2.4.3. La détection des changements (Change detection)

En utilisant la fonction « Change Detection » d'ENVI, la comparaison entre deux classifications de deux dates produit une matrice et une carte de changement entre l'état initial et l'état final. Les images d'entrée peuvent être mono-bande de différents types de formats d'images.

-Les matrices de changements

L'utilisation des statistiques de détection des changements permet de compiler un tableau détaillé des changements entre deux classifications. Les modifications détectées à l'aide de cette fonction sont différentes de la discrimination ordinaire des deux images : une analyse de changement de l'état initial de chaque classe de l'image par rapport à l'état final est donnée sous forme d'un rapport. Ce rapport contient les informations de changement entre les deux images en nombre de pixels, en pourcentage et en unité de surface (m^2). C'est cette dernière qu'on va utiliser dans notre travail pour construire la matrice « change detection Difference map ».

- Les cartes de changements

On utilise la fonction « Change Detection Difference Map » de l'ENVI, les cartes de classifications produisent des cartes de changement entre l'état initial et l'état final. Les images d'entrée peuvent être mono-bande de différents types de formats d'images.

La différence est calculée en faisant la soustraction entre l'image de l'état final et celle de l'état initial (c'est-à-dire final-initial), et les classes sont définies par changement seuils. Un

changement positif identifie les pixels qui sont devenus plus lumineux, alors qu'un changement négatif identifie les pixels qui sont devenus moins lumineux.

2.4.4. Cartographie par ArcGIS 10.3

La cartographie englobe un grand nombre de notions, et joue un rôle spécial dans les SIG.
Elle présente des regroupements logiques d'informations géographiques sous forme de couches.
Ce qui nous a conduits d'effectuer les opérations suivantes :

- Extraction des classes de chaque carte de classification et de changement réalisée sous ENVI.
- Création d'un fichier pour stocker les informations sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie.
- Transféré les différentes couches extraites d'ENVI vers ArcGIS 10.3, d'une part, sous forme vecteur (Shapefile) pour les différentes classes. D'autre part, sous forme raster pour les compositions colorées (Géo Tiff).
- La mise en page afin d'organiser les éléments cartographiques (bloc de données, barre d'échelle, légende … etc.) pour l'impression de la carte.

3. Logiciels utilisés

3.1. ENVI 5.1

Le logiciel ENVI est un logiciel commercial complet de traitement d'images de télédétection optiques et radar. Toutes les méthodes de traitement d'images de corrections géométriques, radiométriques, de démixage radiométrique, de classification et de mise en page cartographique sont présentes. Ce logiciel est un produit en développement perpétuel et qu'il soit ainsi enrichi par des fonctions multiples relatives à des problèmes et des thématiques variés. Sa force réside dans son approche de traitement d'image qui combine les techniques du (file-based) et (band-based) avec des fonctions interactives. Lorsqu'un fichier d'image est ouvert chaque bande est stockée dans une liste puis elle peut être manipulée par toutes les fonctions du système. Si plusieurs fichiers sont ouverts en même temps, on peut sélectionner les bandes qui vont être traitées. De façon 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.

3.2. ILWIS 3.8

Le logiciel ILWIS (Integrated Land and Water Information System) est un logiciel de télédétection qui propose diverses fonctionnalités d'importation, exportation, digitalisation, édition, analyse et affichage de données. Sous licence propriétaire jusqu'en 2005, ce logiciel a été basculé sous licence libre depuis juillet 2007 seulement, et n'est plus soutenu par ITC

(International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation). C'est maintenant la 52°North Initiative for Geospatial Open Source Software GmbH qui promeut son développement.

3.3. ArcGIS 10.3

ArcGIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo traitement.

ArcMap représente l'application centrale dans ArcGIS Desktop. Il s'agit de l'application SIG utilisée pour toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse des cartes et la mise à jour. Dans cette application, on travaille avec des cartes. Ces dernières ont une mise en page contenant une fenêtre géographique avec un ensemble de couches, légendes, barres d'échelle, Flèches « Nord » et autres éléments.

3.4. Google Earth

Est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies satellitaires. Ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Selon les régions géographiques, les informations disponibles sont plus ou moins précises. Ainsi un habitant d'une métropole peut localiser son restaurant préféré, obtenir une vue en 3D des immeubles de la métropole, alors que la résolution des photos d'une bonne partie de la Terre est très faible. La couverture, d'après Google, devrait s'améliorer rapidement. La modélisation en trois dimensions des constructions, initialement réalisée à l'aide du logiciel SketchUp, est maintenant créée automatiquement à l'aide d'algorithmes utilisant pour une part les prises de vues Street View et des données d'altitude. En octobre 2011, Google annonce que Google Earth a été téléchargé et installé plus d'un milliard de fois à travers la planète.

3.5. Diagramme

C'est un logiciel d'hydrogéochimie qui aide à vérifier la fiabilité des analyses chimiques par le calcul de la balance ionique, à calculer des paramètres géochimiques (rapports caractéristiques et les indices de saturation) et de réaliser des diagrammes hydrochimies (Piper, Schoeller, Reverside, … etc.).

3.6. Phreeqc Version 3.3.7

Phreeqc est un programme écrit en C par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo. Il est diffusé par l'USGS (United States Geological Survey). Il est utilisé pour simuler des réactions chimiques

et du transfert dans des eaux naturelles et polluées. Les premières versions remontent à 1980 (Phreeqe, Parkhurst et al.). Aujourd'hui, il dispose d'une interface interactive sous Windows et Mac. C'est un logiciel de modélisation thermodynamique qui fait la simulation à l'évaporation naturelle de l'eau (température de l'échantillon). Il fait des calculs des indices de saturation IS (IS = log (Q) / log (Kps)) des minéraux dissous dans l'eau (en utilisant la loi de Debye-Huckel).

PARTIE III.
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie on va faire une comparaison entre les deux régions d'études par une synthèse bibliographique des travaux publiées et par des travaux de terrain. Cette comparaison est à différentes échelles, hydro-climatique, géologique, hydrogéologique et hydrogéochimique. Un traitement statistique des résultats des analyses physicochimiques des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla a été faite, afin de déterminer leurs faciès chimiques et leurs aptitudes à l'irrigation. Les travaux de cartographie à l'aide de l'outil télédétection permis à réaliser des cartes de l'occupation de sol pour les zones humides salifères. Les cartes réaliser avait utilisé pour faire une comparaison entre quelque zone de sebkhas et chotts dans les deux régions. Les résultats obtenus ont permis de cartographie l'évolution de l'occupation des sols saisonnières et interannuelles des zones étudiés.

1- Hydro climatologie

Introduction

Le climat est l'ensemble des actions de l'atmosphère : l'humidité, la pluie, la température, le vent, etc. C'est l'élément naturel sur lequel l'homme n'a aucune influence directe à l'exception de cas particuliers. C'est un facteur déterminant pour le développement des plantes, la formation et l'évolution des sols. Ces principales composantes ont une influence importante sur l'érosion.

1.1. Aperçu sur quelques composantes du climat

Toute étude hydro climatologique passe principalement par le traitement détaillé des mesures hydro climatiques nous permet d'établir le bilan hydrique et par conséquence de comprendre les mécanismes de la circulation des eaux de surface. Le calcul de ce bilan hydrique exige la connaissance des paramètres suivants : les précipitations, le ruissellement, l'évaporation et l'infiltration. L'analyse des différents paramètres climatologiques (vitesse du vent, P, ETP, T ……etc.) donne une idée précise sur le climat qui caractérise la région et permet d'envisager les types d'agricultures que l'on peut l'adopter et leurs besoins en eaux. Ainsi elle donne un schéma global sur le mode de fonctionnement hydrologique du système aquifère.

Tableau 03 : Coordonnées des deux stations météorologiques des régions étudier

Station	Ouargla	Al Qassim
Latitude	31,93° N	26.30° N
Longitude	5,4° E	43.76° E
Altitude	141m	651m

1.1.1. Les précipitations

Les précipitations constituant le facteur principal dans l'établissement du bilan hydrique. Quel que soit leur nature (pluie, grêle, neige ou autre forme de condensation), les précipitations jouent un rôle essentiel dans l'alimentation des nappes souterraines et aussi dans le comportement hydrologique des cours d'eau de la région étudier.

Tableau 04 : Précipitation mensuelle moyenne (mm), période 1996-2015

Station	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mais	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Al Qassim P (mm)	21.8	10.8	26.9	24.7	8.4	0.1	0.1	0.2	0.6	2.9	20.8	18
Ouargla P (mm)	7.3	2.78	4.9	2.93	1.27	0.75	0.1	0.1	3.44	4.52	6.85	3.17

La répartition mensuelle des précipitations au cours de l'année influe aussitôt sur le régime des écoulements et les apports des nappes. Le tableau 04 révèle que le mois de Mars est le plus pluvieux avec un maximum de 26.9 mm obtenu à la station d'aéroport de Al Qassim, par contre les mois de Juillet et Aout sont considéré comme le plus sec avec une valeur nulle de 00 mm, alors que les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 135.3 mm

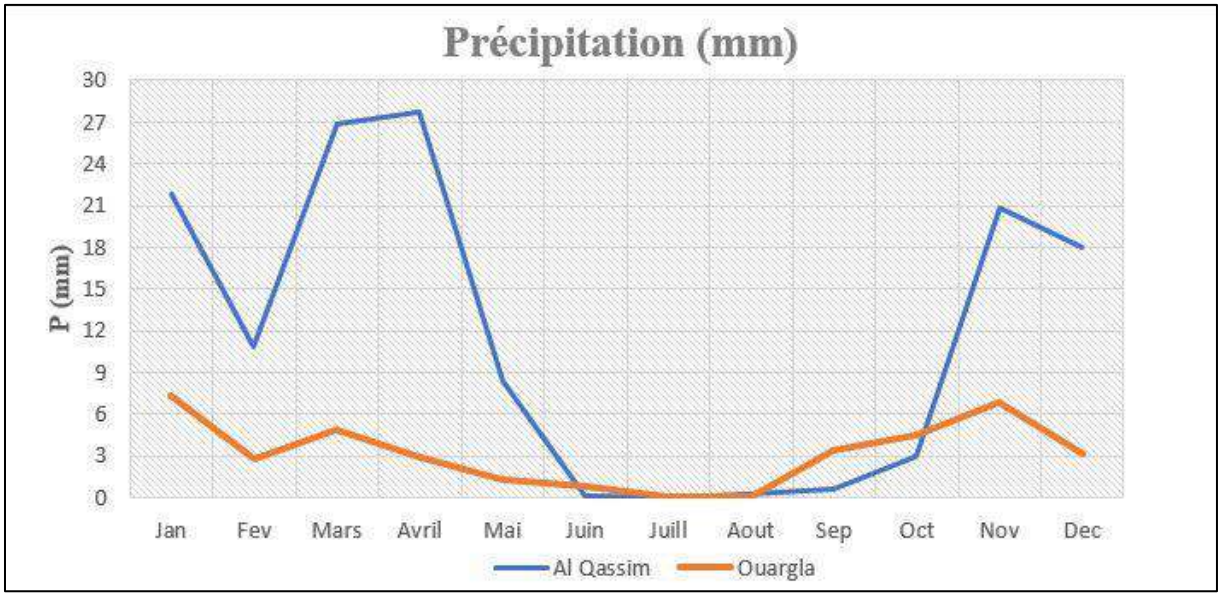


Figure 25 : Précipitation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015

A la région de Ouargla, on observe à partir de tableau les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 38.11 mm. Janvier est le mois le plus pluvieux avec moyenne mensuelle de 7.3 mm, Juillet et Aout représentent les mois les plus sec avec 0,1mm. Les précipitations exceptionnelles enregistrées à la station de Ouargla sont le quel de l'année 2000 en moi de Mai,

le total de ce dernier est de 132.32 mm dans un moi, Le jour 19 est le plus pluvieux avec 92.96 mm en 24 h.

1.1.2. Température :

La température est le facteur climatique le plus important, c'est celui qu'il faut examiner en premier lieu (Dreux ,1980). Elle réagit sur le phénomène d'évapotranspiration et donc sur le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Elle constitue un paramètre indispensable pour l'estimation du bilan hydrique. Les données des températures mesurées à la région de Al Qassim et Ouargla pour la même période sont illustrées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 05 : Température moyen mensuelle (°C) de la période 1996-2015

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mais	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Al Qasim T (°C)	13.2	15.6	18.3	20.2	29.5	31.5	32.5	33.1	30.0	25.5	19.5	15
Ouargla T (°C)	11.75	13.77	18.83	22.12	26.95	32.4	35.76	35.05	30.39	25.82	16.85	12.68

Les températures de la zone d'étude caractérisent un climat Saharien avec des valeurs très élevées en été. Le mois le plus chaud pour les deux stations est juillet avec une moyenne mensuelle de 32.5˚C (station de Al Qassim) et 35.76˚C (station d'Ouargla). Janvier est le mois le plus froid avec des valeurs de l'ordre 13.2 et 11.75˚C respectivement pour la station de Al Qassim et d'Ouargla (Figure 26). La région Al Qassim a enregistré une valeur minimale de -4°C, observé au 22 Janvier 2012.

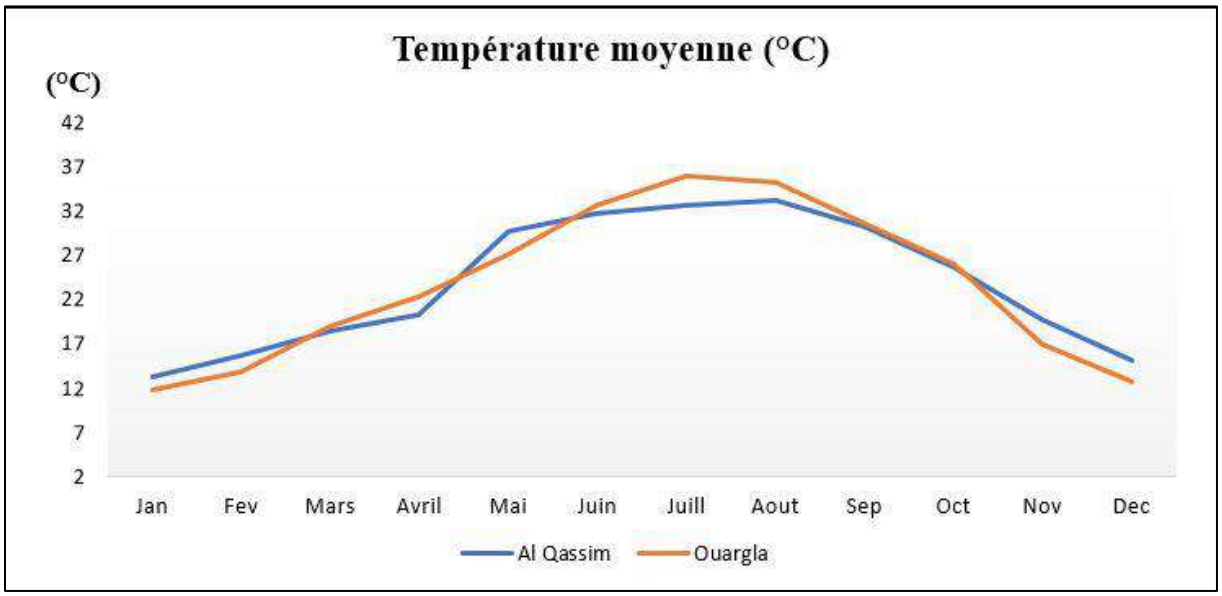


Figure 26 : Température moyenne mensuelle (°C) de la période 1996-2015

1.1.3. Evaporation

L'évaporation est un phénomène physique qui augmente avec la température, la sécheresse de l'aire et l'agitation de cet air. Dans le Sahara algérien l'eau évaporée annuellement serait de 3 à 5 mètres environ suivant les localités, c'est-à-dire une valeur infiniment plus forte que la quantité d'eau qui tombe sur le sol lors des pluies (OZENDA, 1983).

Dans la cuvette d'Ouargla, l'évaporation et très élevée : en effet, elle est en moyenne de 220 mm/moi, le plus élevé valeur est enregistré au mois de Juillet 374.9mm (figure 27).

Tableau 06 : Evaporation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015

Station	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mais	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Al Qassim E(mm)	100	140	190	240	310	330	360	350	290	250	150	120
Ouargla E (mm)	112	143	184.7	231.5	263.8	243.5	382.6	374.9	275.3	215	139.6	187

L'évaporation annuelle est de l'ordre 2752.9 mm /an. La région de Al Qassim est caractérisée par une évaporation aussi très élevé, on remarque que l'évaporation moyenne varie d'environ 100-120 mm/mois de Décembre à Janvier et jusqu'à 360 mm/mois en Juillet, alors que L'évaporation annuelle est de l'ordre de 2830 mm/an (Tableau 06). Selon BRGM l'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle de 2370 mm/an (BRGM/ATC, 2008a).

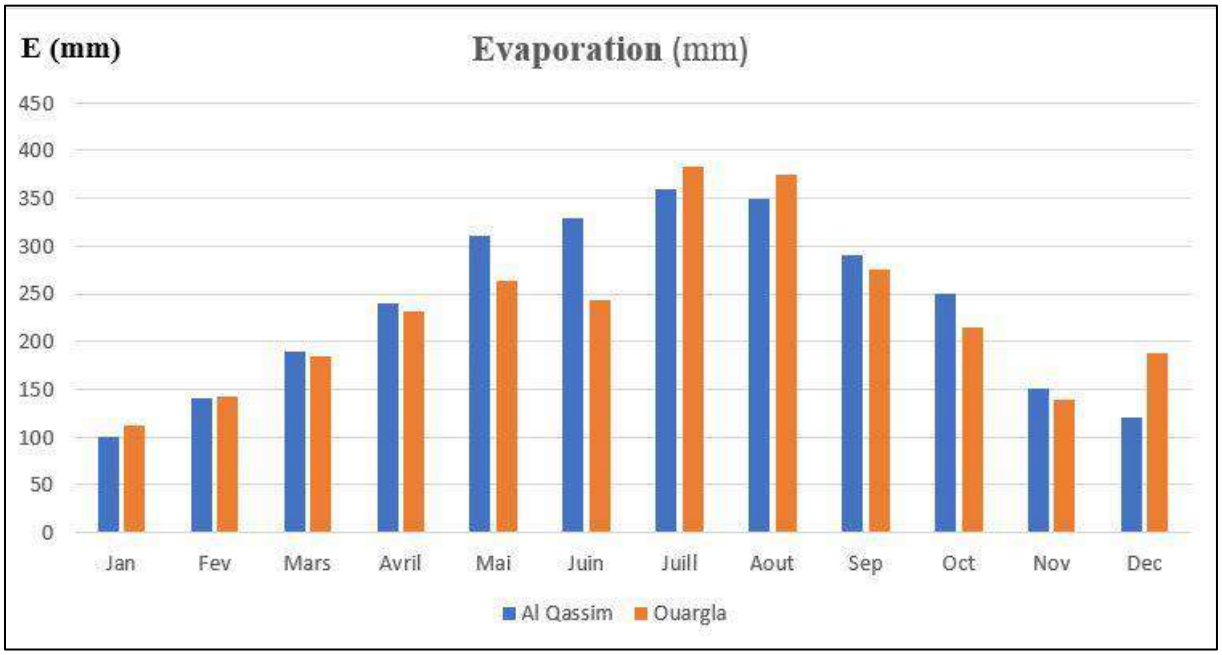


Figure 27 : Evaporation moyenne mensuelle (mm) de la période 1996-2015

1.1.4. Les vents

Les données climatiques recensées à l'ONM (station d'Ouargla) et (station de Buraydah) montrent que les vents les plus forts se produisent durant les mois d'avril à juillet, avec un maximum de 4,77m/s en juillet à Ouargla, et 2.69m/s en Mais à Al Qassim (tableau 7). Durant le reste des mois, la vitesse moyenne du vent minimale est en mois de novembre et décembre (2,7m/s) à Ouargla, et les valeurs minimales à Al Qassim sont enregistré en mois de Septembre et Octobre (1.6m/s). La vitesse moyenne annuelle du vent à Ouargla est de 3,70 m/s. Les vents les plus fréquents sont généralement ceux de direction S-N et SO-NE. Les vents dirigés vers le Sud et le Sud-ouest ne dominent qu'au mois de janvier. L'orientation grossièrement N-S de la vallée d'Ouargla influerai sur la direction des vents. Al Qassim est caractérisé par un vitesse moyenne annuelle du vent de 2.1 m/s, les vents les plus fréquents sont généralement ceux de direction de nord vers le Sud.

Tableau 07 : Vitesse moyenne mensuelle de vent (m/s) de la période 1996-2015

Station	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mais	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Al Qassim V(m/s)	1.8	2.2	2.5	2.55	2.69	2.25	2.15	1.9	1.6	1.8	2	1.9
Ouargla V(m/s)	2.79	3.01	3.95	4.56	4.83	4.77	4.45	3.06	3.94	3.55	2.78	2.77

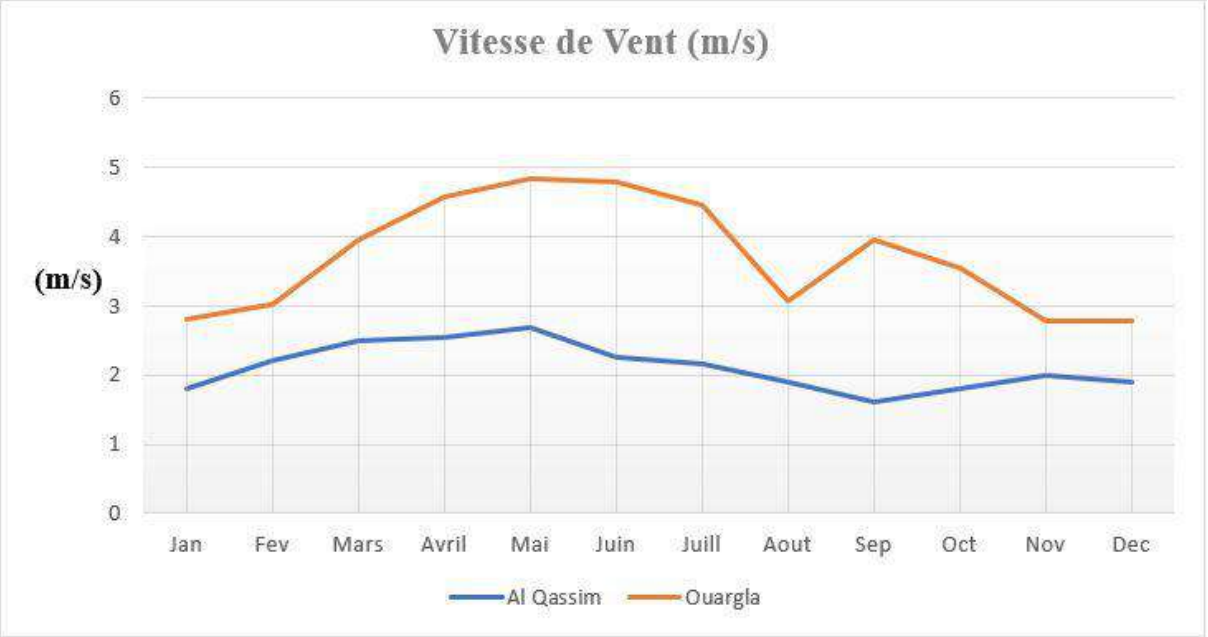


Figure 28 : Vitesse moyenne mensuelle de vents (m/s) de la période 1996-2015

1.2. Classification climatique

1.2.1. Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Pour déterminer les périodes sèches et humides au cours de l'année, de sorte que lorsque la courbe de précipitation passe au-dessus de la courbe de température, la période est humide. Au contraire, lorsque la courbe de température passe au-dessous de la courbe de précipitation (P ≤ 2T), c'est une période sèche **(Figure 29)**. D'après le diagramme Ombrothermique le climat dans les deux régions est sèche durant toute l'année.

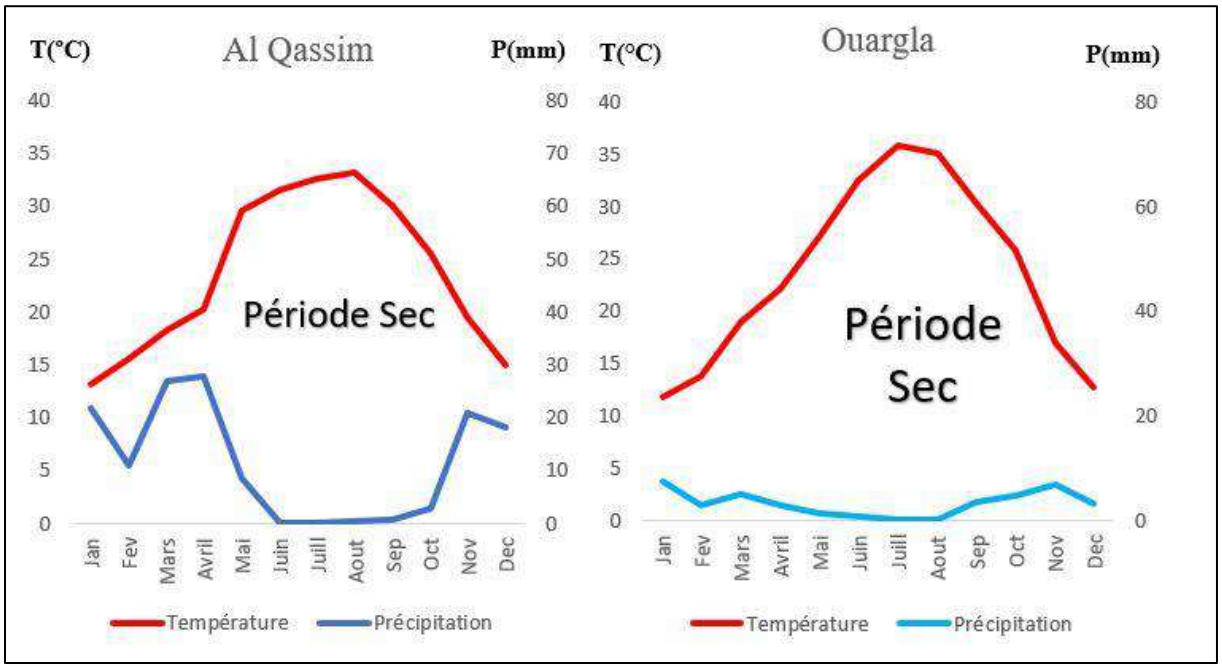


Figure 29 : Diagramme Ombrothermique de la zone d'étude 1996-2015.

1.2.2. Le diagramme pluviothermique de Pouget

Pour classer le bioclimat de Ouargla, il est pratique d'employer des critères climatiques simples tels que : **P**, et **m'**, pour établir un diagramme pluviothermique (Figure.30), analogue à celui d'Emberger (1955), avec, (m') en abscisse et (P) en ordonnée (Pouget, 1980), en se référant aux travaux de Le Houérou (1969) et Claudin et al (1979) sur la végétation des steppes algériennes (Hamdi-Aïssa, 2001), avec :

- **P :** précipitations annuelles moyennes (mm) pour caractériser les étages bioclimatiques.
- **m':** température moyenne des minima du mois le plus froid (°C) pour caractériser les variantes thermiques.

D'après ce diagramme, Ouargla a connu, pendant ces dernières années (1996-2015), un climat saharien à hivers tempérés (à hivers doux dans le diagramme d'Emberger), telle que :

P = 38.11 mm/an, et m'= 4.95 °C.

D'après le diagramme, Al Qassim a connu pendant ces dernière années (1996-2015), un climat aride à hivers doux, telle que : P = 135.3 mm/an, m'= 5°C

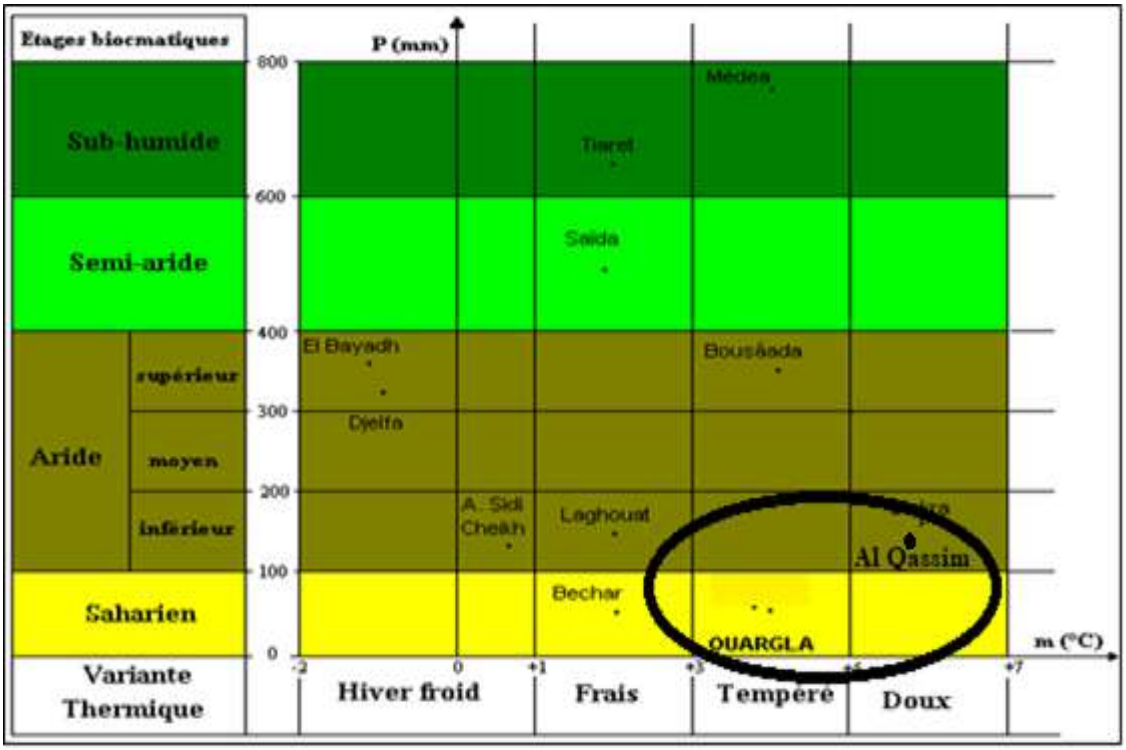


Figure 30 : Diagramme pluviothermique et bioclimatique, inspiré de Pouget (1980)

1.2.3. Indice d'Aridité De Martonne

Selon **Baltas (2007) et Lungu et al. (2011),** l'indice est calculé avec la formule suivante :

I= P/(T+10)

I= Indice d'Aridité de De Martonne.

P= Pluviosité moyenne annuelle (mm).

T=Température moyenne annuelle (mm).

Climat très sec : I < 10.

Climat sec : I < 0.

Climat humide : 20 < I < 30.

Climat très humide : I > 30.

Pour notre région de Ouargla : P= 38.11 mm, T= 23.53°C, donc I=1.13, le climat de la région de Ouargla est sec.

Pour la région Al Qassim P= 135.2 mm, T= 23.65, donc I= 4.01, le climat de la région Al Qassim est aussi sec.

1.2.4. Le bilan d'eau

*** Estimation de l'évapotranspiration**

Dans les études hydrogéologiques, les deux éléments principaux du bilan, évaporation et transpiration sont réunis en un seul. L'évapotranspiration ou l'évaporation totale (E.T) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (phénomène biologique). On distingue

- L'évapotranspiration potentielle (ETP)
- L'évapotranspiration réelle (ETR)

a) L'évapotranspiration potentielle (ETP)

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimé en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants. Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nous avons utilisé la formule de Thornthwaite qui a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et, l'évapotranspiration mensuelle, cet auteur définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

$$\boldsymbol{ETP = 16\left(\frac{10T}{I}\right)^{a} k, \quad I = \sum_{L}^{12} i \ , \qquad i = \left[\frac{T}{5}\right]^{1.514} \quad , \qquad a = \frac{1.6}{100} I + 0.5}$$

Avec : ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle en °C

i : Indice thermique mensuel.

I : Indice thermique annuel.

K : Coefficient d'ajustement

b) L'évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie. Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) : nous avons essayé d'estimer l'évapotranspiration réelle par la formule de Thornthwaite :

ETPc = $16(10T/I)^{a} f(\lambda)$

Avec : **ETPc** : évapotranspiration potentielle non corrigée mensuelle (mm)

c) Bilan de Thornthwaite

Pour établir le bilan hydrique il faut d'abord calculer la RFU qui est la réserve facilement utilisable. Cette RFU est nécessaire pour le bon fonctionnement physiologique des plantes

A partir des données des pluies mensuelles et l'ETP calculée par la formule de Thornthwaite, plusieurs cas peuvent être envisagés :

1- Si : P>ETP ETR=ETP RFU=P-ETP

2- Si : P=ETP les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU [RFU=0]

3- Si : P<ETP il y aura un épuisement des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan (ETP-ETR), ou encore (P-ETP) qui représentera la quantité d'eau qu'il faudra ajouter à l'ETR pour atteindre l'ETP.

Les résultats de calculs sont mentionnés dans les deux tableaux suivants :

Tableau N° 08 : Bilan Hydrique de la région de Al Qassim

Paramètres/ Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
P (mm)	21,8	10,8	26,9	24,7	8,4	0,1	0,1	0,2	0,6	2,9	20,8	18	135,3
T (°C)	13,2	15,6	18,3	20,2	29,5	31,5	32,5	33,1	30	25,5	19,5	15	23,65
i	4,34	5,59	7,13	8,28	14,69	16,22	17,01	17,48	15,07	11,78	7,85	5,27	
I	130,71												*
a	2,59												*
$f(\lambda)$	1,01	0,98	0,9	0,88	0,85	1,05	1,09	1,16	1,17	1,2	1,22	1,14	*
ETPc (mm)	16,57	24,79	34,42	43,47	112	163,95	184,54	205,92	161	108,4	55	26	1136,06
RFU (mm)	5,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*
ETR (mm)	16,57	10,8	26,9	24,7	8,4	0,1	0,1	0,2	0,6	2,9	20,8	18	130,07
DA (mm)	0	13,99	7,52	18,77	103,6	163,85	184,44	205,72	160,4	105,5	34,2	8	1005,99

Tableau N° 09 : Bilan Hydrique de la région de Ouargla

Paramètres/ Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
P (mm)	7,3	2,78	4,9	2,93	1,27	0,75	0,1	0,1	3,44	4,52	6,85	3,17	38,11
T (°C)	11.75	13.77	18.83	22.12	26.95	32.4	35.76	35.05	30.39	25.82	16.85	12.68	*
i	3,65	4,63	7,44	9,5	12,81	17,02	19,66	19,07	15,11	12	6,29	4,09	*
I	131,27												
a	2,6												
$f(\lambda)$	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	*
ETPc (mm)	12,35	17,75	35,97	54,05	92,41	144,15	223,13	222,08	168,86	110,54	37,05	16,81	1135,15
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*
ETR (mm)	7,3	2,78	4,9	2,93	1,27	0,75	0,1	0,1	3,44	4,52	6,85	3,17	38,11
DA (mm)	5,05	14,97	31,07	51,12	91,14	143,4	223,03	221,98	165,42	106,02	30,2	13,64	1097,04

D'après les résultats et les calculs, le bilan est nettement déficitaire sur la totalité de l'année hydrologique à la région de Ouargla et aussi à Al Qassim sauf une exception au mois de janvier, on a un RFU=5.23mm.

1.3. Conclusion :

Les régions d'étude caractérisé par une climat aride, cette aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. La région Al Qassim est majoritairement soumise à un climat aride. Le climat est plus sec et les températures sont plus fraiches en hiver (de 45°C en été à 7°C en hiver), presque les mêmes valeurs de températures sont enregistrées à Ouargla. La pluie moyenne annuelle est de l'ordre de 135 mm/an et excède rarement 160 mm/an, par contre à Ouargla sont de l'ordre moyenne de 38.11 mm/an et rarement excède de 100 mm/an. La pluie dans les régions se caractérisent par des précipitations rares mais violentes, par exemple 86 mm en une seule journée à l'aéroport Qassim en 2008, et à la région de Ouargla une quantité de précipitation de 92.96 mm a tombé dans un jour (19 Mais 2000). On a deux périodes de pluies plus intenses dans les deux régions qui sont : en Mars-Avril et d'Octobre à Janvier. L'évaporation moyenne varie d'environ 120 mm/mois de Décembre à Janvier à 300 mm/mois en Juillet et Aout, l'évaporation moyenne annuelle dans les deux régions est à l'environ de 2800 mm/an.

On peut dire que les régions sont soumises à un climat similaire. L'étude de ces paramètres Hydro climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères.

2- Le contexte géologique

2.1. La géologie régionale

a. la région de Al Qassim.

La bonne Compréhension de la géologie de la région Al Qassim, nous oblige de s'intéresser à l'échelle de la plaque Arabe et à l'ensemble de l'éon Phanérozoïque (~520 Ma à nos jours) pour comprendre l'origine des formations sédimentaires et leur structure actuelle. Il est présenté ici une courte synthèse du contexte géologique.

Le socle précambrien, appelé le bouclier arabe, affleure au ouest de la plaque Arabe et forme un massif montagneux le long de la Mer Rouge. Il est stabilisé depuis l'ère cambrienne.

L'érosion a affecté la majeure partie du bouclier depuis le temps médian paléozoïque jusqu'à le tertiaire pour devenir une masse basse relief et près du niveau de la mer.

A l'Oligocène le bouclier Arabe se soulèvent et la mer Rouge s'ouvrent. Ce processus a affecté le système de drainage : Les vallées, qui descendent du bouclier et écoulent vers l'ouest, ne dépassent pas 120 km de long, tandis que les autres qui ont une direction est et nord-est peuvent atteindre 1200 km, comme la vallée de Al rummah à Al Qassim

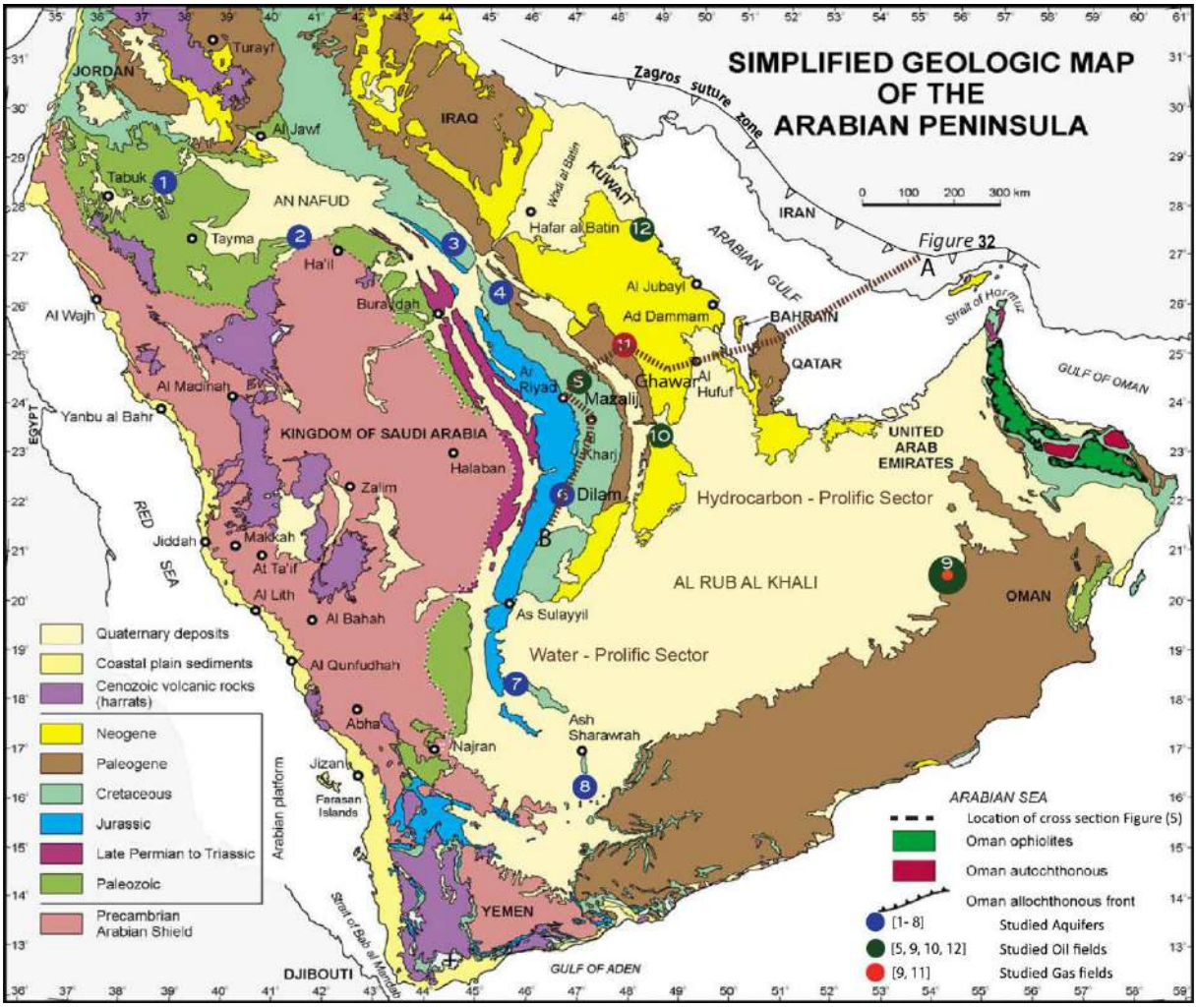


Figure 31 : Carte géologique de la péninsule arabique (D'après Le-Nindre et al. (2003)).

Le bouclier Arabe est recouvré du Nord jusqu'à l'Est par des bassins sédimentaires, qui formant la plateforme Arabe, cette dernière occupe près des 2/3 de la superficie total de la péninsule. Elle est consistéé de vastes pénéplaines où existent quelques reliefs dus à des anticlinaux et grabens. Dans le bassin nord-ouest de l'Arabie Saoudite, quasiment l'ensemble de la pile sédimentaire de la plate-forme Arabe se retrouve à l'affleurement. Au milieu de cette plateforme, on remarque des affleurements des déférence formations géologique ; première (Paléozoïque), secondaire et tertiaire. Elle se compose des différentes couches géologiques qui ont été déposés au cours des temps géologiques en raison de la baisse de l'eau de mer.

L'épaisseur des couches de cette plateforme augmente à mesure qu'on se déplace vers l'est et le nord-est (Figure 32).

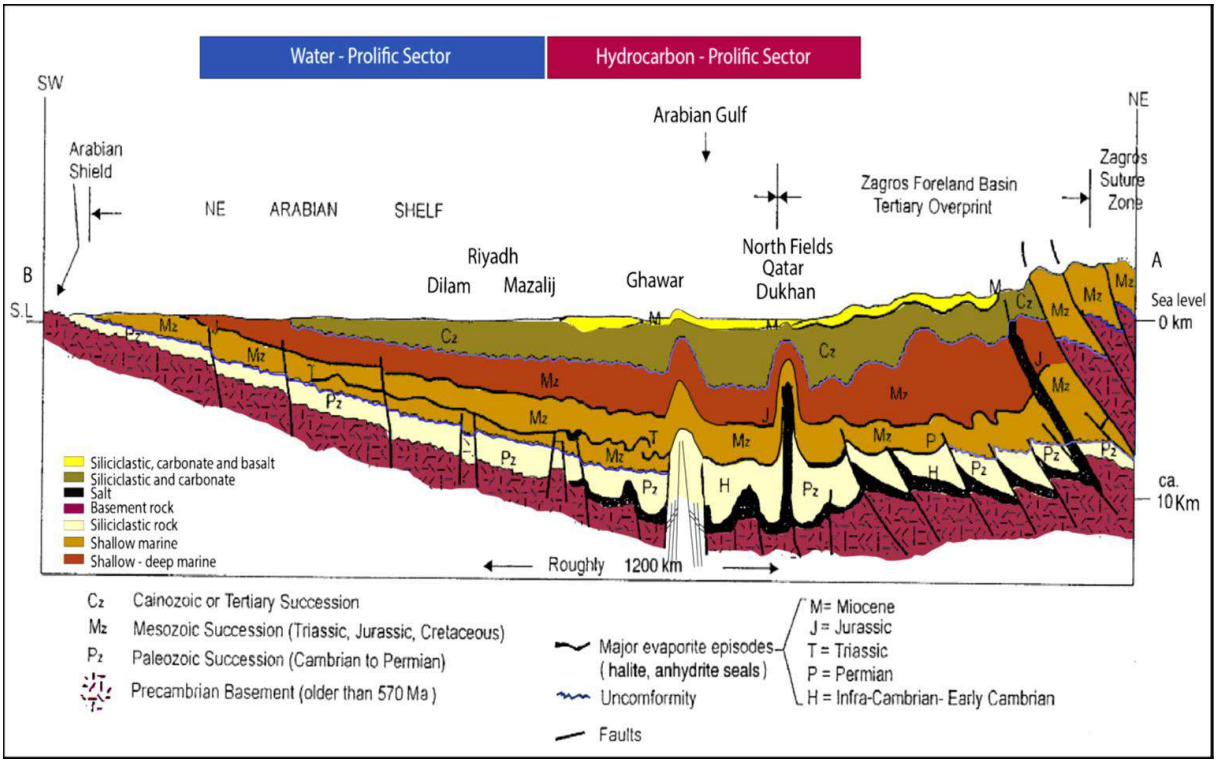


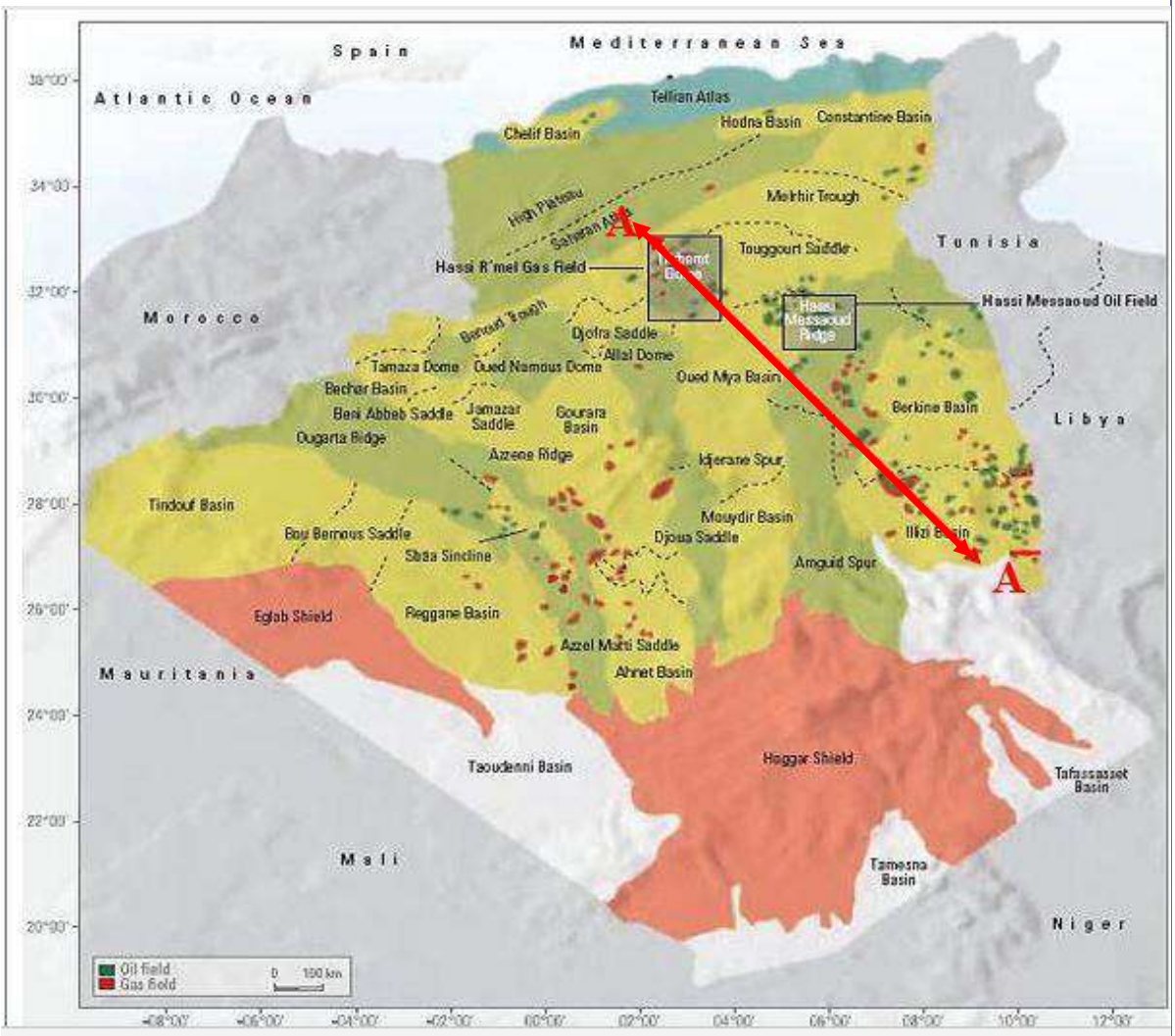
Figure 32 : coupe géologique transversale de la plateforme Arabe à l'Arabie Saoudite vers Qatar (D'après Le-Nindre et al. (2003)). Pour la localisation de coupe géologique voir la figure 31

b. La région de Ouargla

La région de Ouargla fait partie de la plateforme saharienne, cette plateforme est constituée d'un bouclier précambrien (Figure 33b), n'émergeant des sédiments qu'ils surmontent que dans le Sahara Central (Massif du Hoggar) et le Sahara Occidental (Massif des Eglab) (UNESCO, 1972).

Ce bouclier précambrien est constitué de roches volcaniques et métamorphiques, aplani par l'érosion, et surmonté par des couches sédimentaires de plusieurs milliers de mètres, allant du Primaire (Cambrien) au Quaternaire. Ces couches sont plus ou moins plissées en forme d'un grand bassin sédimentaire dissymétrique. Ce bassin se subdivise en trois (03) sous domaines : le bassin du Grand Erg Occidental, le bassin du Grand Erg Oriental, séparés par l'anticlinal du M'Zab, et celui du plateau de la Hamada El Hamra. (Figure.34a).

(A)



(B)

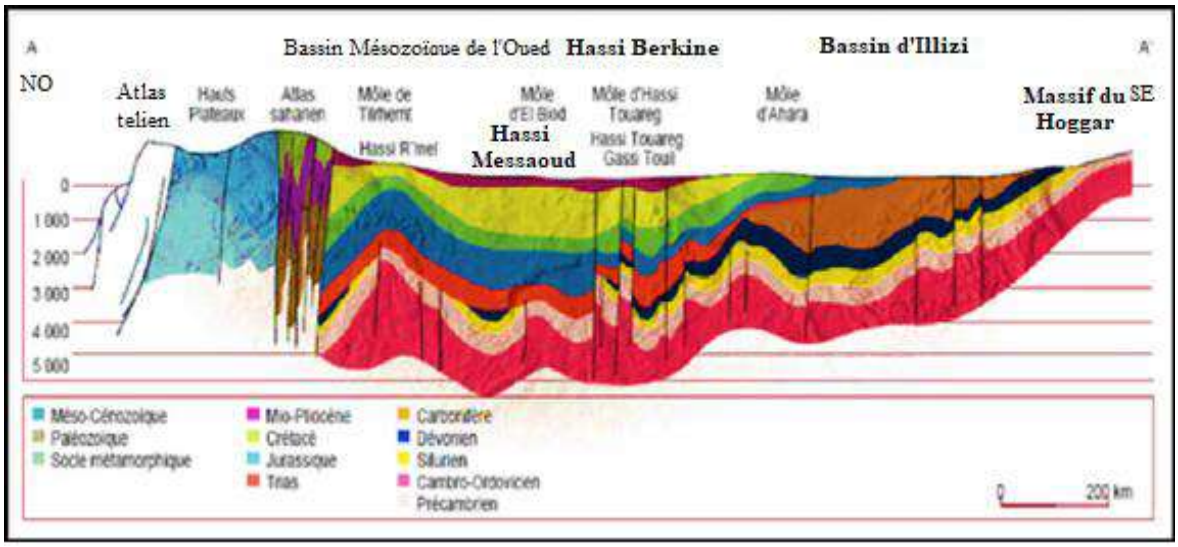


Figure 33. A : Le découpage de l'espace saharien (Brule et al, 2003).

B : Coupe géo structurale transversale régionale (WEC, 2007)

Ouargla se trouve ainsi enfoncée dans la dépression de l'Oued M'ya. Cette dépression fait partie, selon le découpage administratif, du « Bas Sahara », qui offre une topographie basse (-40m) en dessous du niveau de la mer, au Chott Melrhir (au Nord). Elle est occupée par les formations du bassin oriental, qui renferme les puissants aquifères et les impressionnantes réserves pétrolifères (Cornet, 1964) et qui font la richesse du Sahara (Fontaine, 1996).

L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire est de 4000 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m (Aliev, 1972).

Les données géophysiques (sismologiques), montrent que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar (Aliev, 1972 ; Fabre, 1976) à partir du Cambrien jusqu'au Sénonien inférieur (Figure 34b). Ces failles sont orientées Sud-Est Nord-Ouest et traversent la région de Ouargla par l'Est. Elles peuvent être l'origine de communications inter les aquifères (CI, CT) dans cette zone (Guendouz et al, 1992 ; Edmund et al, 2003 ; Guendouz et al, 2003.

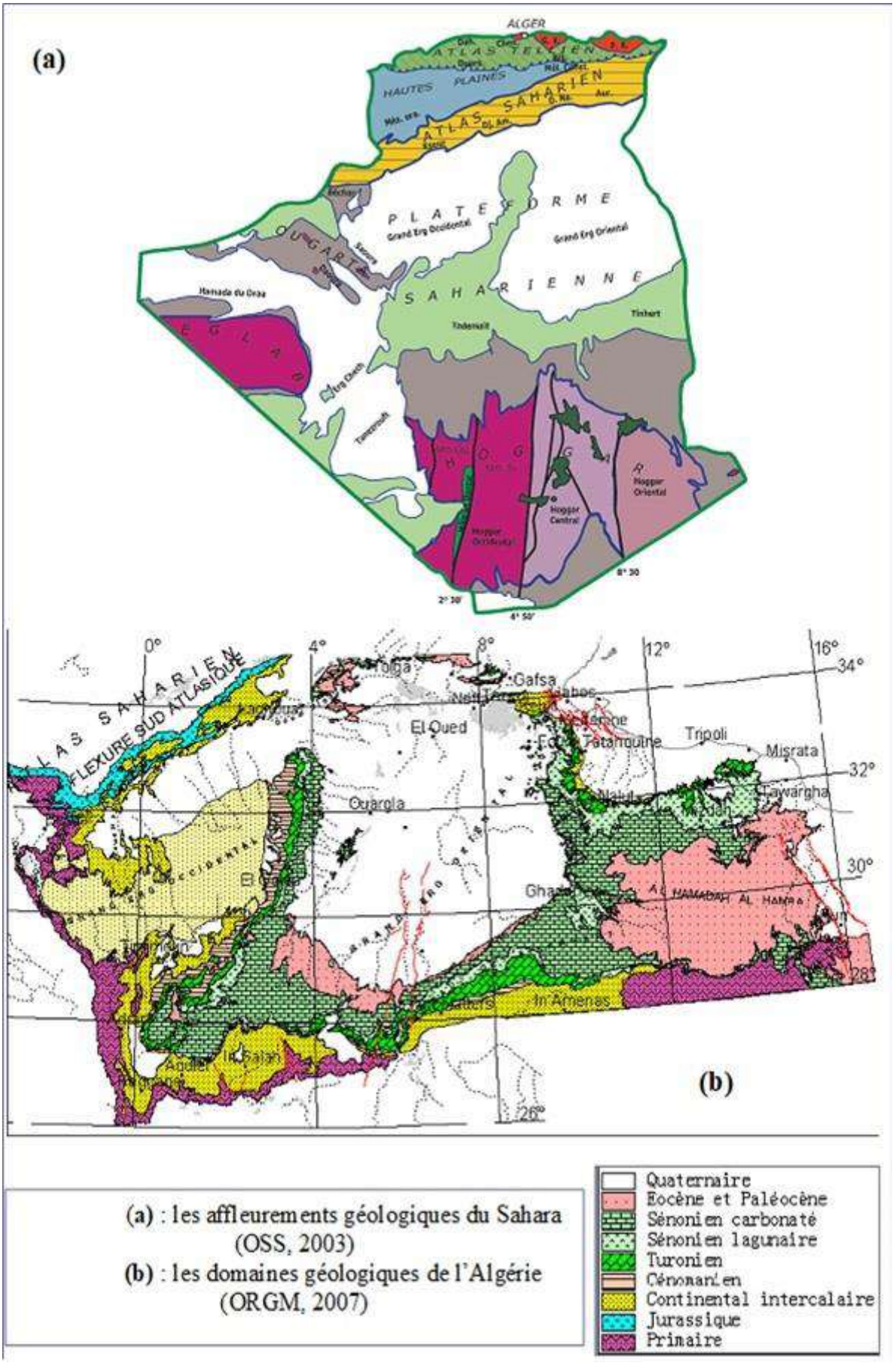


Figure 34 : Carte géologique du SASS (OSS, 2003)

2.2. La géologie locale

a. La région Al Qassim

Al-Qassim est divisée géologiquement en deux sections distinctes : la première se trouve dans le bouclier Arabe à l'ouest et le seconde à la plateforme Arabe à l'est. Le socle précambrien où le bouclier arabe (Arabian Shield) est la base construite par les couches sédimentaires, qui se compose principalement de roches souterraines (plutonique) précambriens, ignées et métamorphique, ainsi que des plateaux de basalte de la tertiaire.

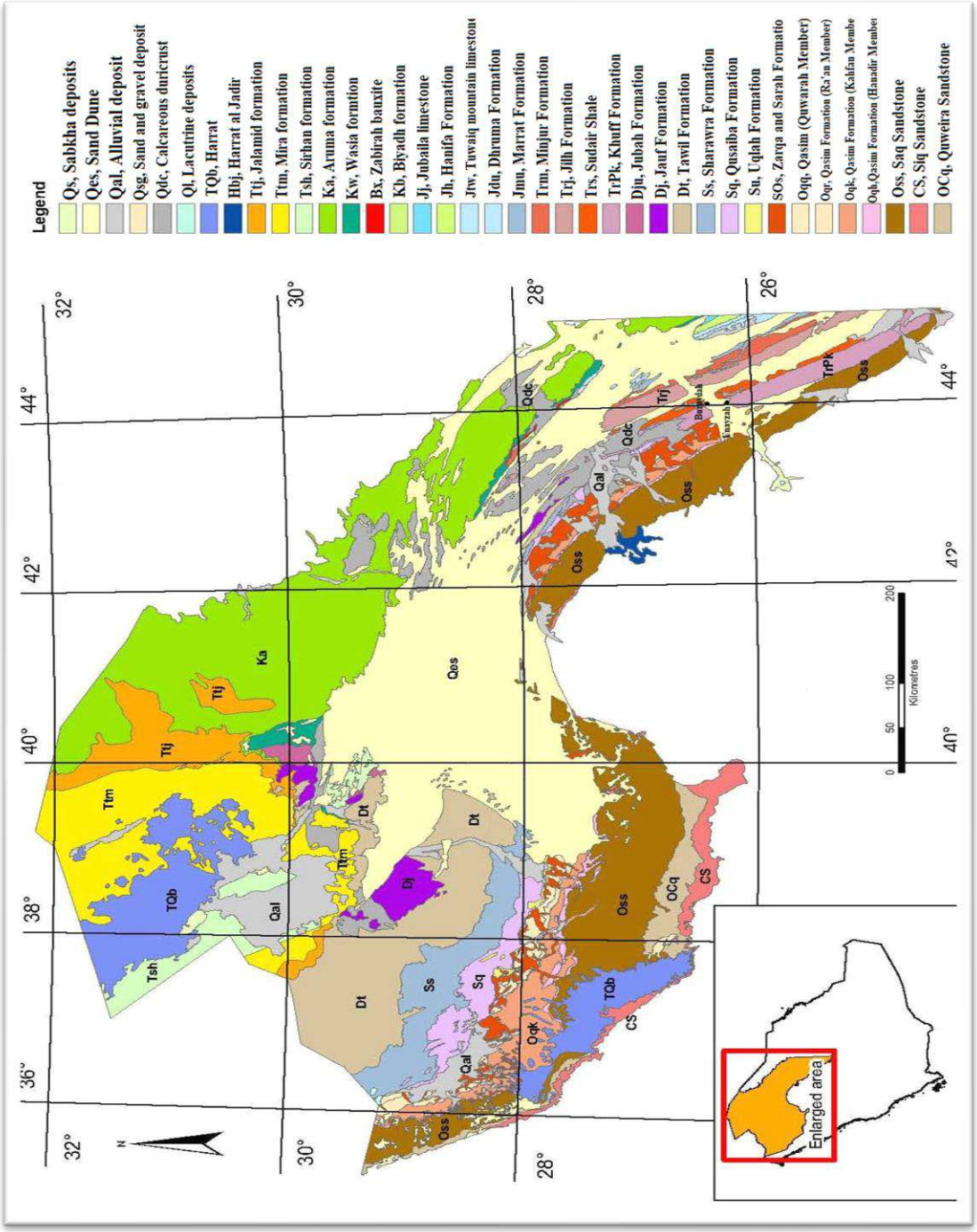


Figure 35 : Carte géologique de la zone du Projet Saq (BRGM/ATC, 2008a)

Dans le bassin central de l'Arabie Saoudite, quasiment l'ensemble de la pile sédimentaire de la plate-forme Arabe se retrouve à l'affleurement. En effet, sur la carte géologique de la zone d'étude, on remarque des formations détritiques du Paléozoïque, successivement des plus anciennes au ouest le long du socle aux plus jeunes vers l'est. Elles sont recouvertes en discontinuité par des formations plus calcaires d'âges secondaire et tertiaire, ainsi que des basaltes (Harrat) et des sédiments détritiques quaternaires (figure 35).

b. La région Ouargla

La carte des affleurements géologiques (Figure 36) de Ouargla, ne fait montrer qu'un revêtement tabulaire de terrains d'âge Tertiaire et de dépôts détritiques quaternaires. Un dépôt continental du Mio-Pliocène, dans lequel alterne des sables siliceux, de grès, des argiles et parfois des marnes, localement équivalent au Miocène continental, en outre, le Pliocène continental, constitue la structure des regs sous forme d'une croûte calcaire, avec des poudings ou des calcaires lacustres.

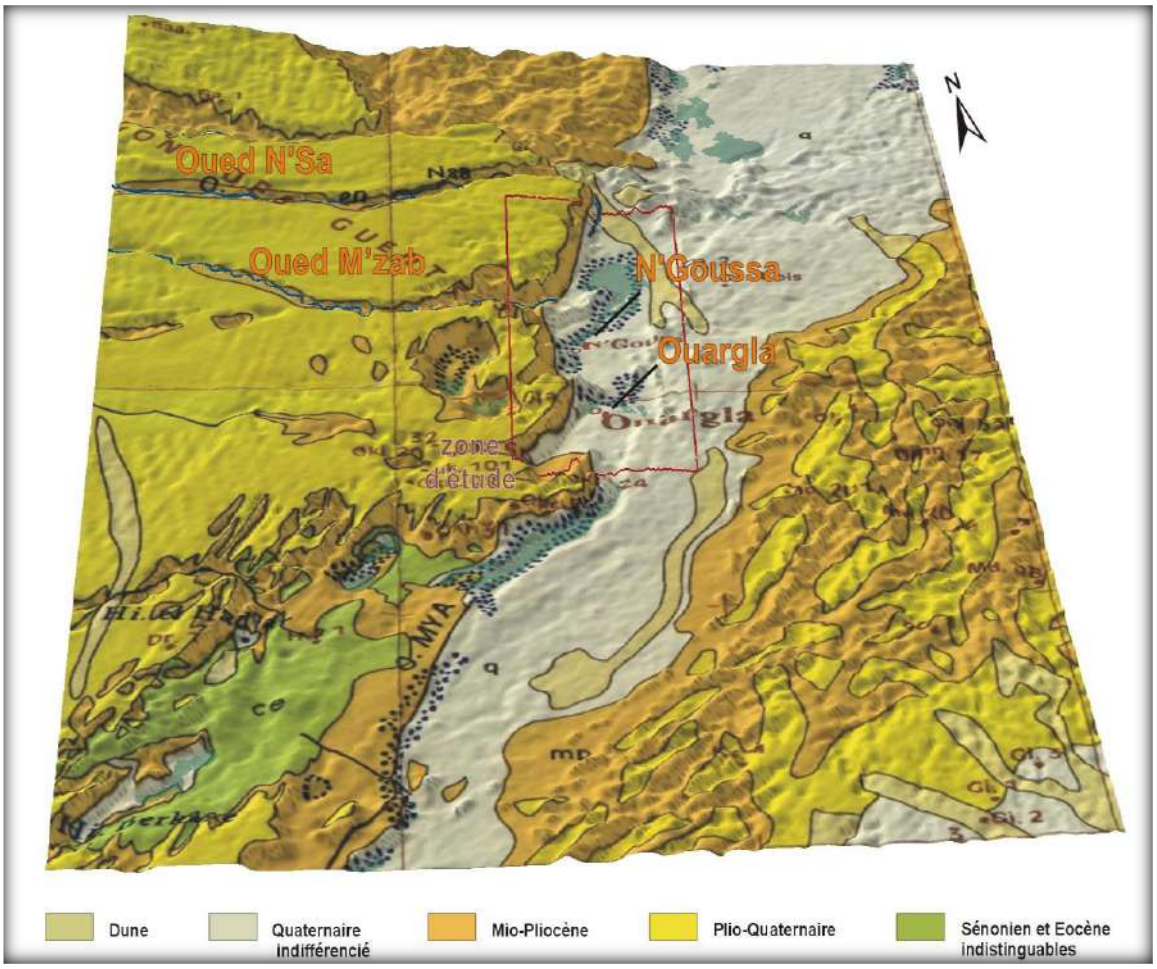


Figure 36 : Relief géologique de la région d'Ouargla Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT

2.3. La litho- stratigraphie

a. La région de Al Qassim

La séquence sédimentaire commence par des dépôts détritiques de la formation de Saq d'âge cambro-ordovicien et se termine par des dépôts quaternaires récents. Cette formation est composée de conglomérat basal, de grès et de siltite, elle est recouverte de manière Confirmé par les roches détritique de l'ordovicien à la formation de Sarah au silurien inférieur représente le dépôt glaciaire et préglaciaire canalisé dans les formations Saq et Qassim. Une période d'érosion suivez par la formation d'une paléo surface qui est la formation 'Unayzah (pré-Khuff), la formation de Khuff (d'âge Permien supérieur-Trias inférieur) est composée de roches argileuses, sableuses, dolomitiques, gypsifères et calcaires. Cette zone est recouverte de schiste Sudair (d'âge Trias) et suivie par la formation Jilh. Les séquences sédimentaires mentionnées ci-dessus sont recouvertes par un dépôt superficiel Quaternaire dans la plupart de la région.

Le comité saoudien de stratigraphique (SSC) a déterminé une classification de la succession des unités litho-stratigraphiques de paléozoïque qui compose de 5 groupes. Chaque groupe est composé de formations, ces dernières est aussi peut être composer de membres. L'origine des noms des formation géologique provient d'une place qui peut être une ville ou montagne ou un Oued…etc. Pour les formations de Mésozoïque et Cénozoïque on va utiliser le terme STQ (secondaire, tertiaire, Quaternaire). La sécession Paléozoïque est plus très riche en ressources en eau et hydrocarbure. Les unités stratigraphiques principales du plus vieux au plus jeune de la zone d'étude sont :

1- Le socle précambrien, qui affleurent à l'ouest de la zone d'étude, se compose principalement de roches volcaniques.

2- Cambro-ordovicien : présenter à la formation Saq, qui est Appartiennent au **groupe de Tayma** Vaslet et al (1987) et Vaslet (1990) ont proposé que le groupe Tayma englobe tous les gisements du Paléozoïque inférieur antérieurs au premier épisode glaciaire de l'Ordovicien supérieur. **:** Le nom de la formation a été dérivé après Jabal Saq dans la région d'Al Qasim. "Saq" était à l'origine utilisé comme membre inférieur de la "formation d'Uyun" obsolète. Bramkamp (1952) éleva le Saq au statut de formation. Steineke et al. (1958) et Powers et al. (1966) ont publié des études détaillées sur le type de localité. Delfour et al. (1982) ont divisé le « grès Saq » en membres inférieurs et supérieurs que Vaslet et al. (1985) ont nommés respectivement membre de Risha et membre de Sajir. Dans le nord-ouest du royaume. Cette formation est constituée principalement de : la base de la formation est constituée de grès caillouteux à grain grossier, mal trié, la partie supérieure est constituée de grès à grain fin, brun

à beige, en couches inclinées et dégradées. L'épaisseur total de cette formation est variée entre 600-700 mètres.

3. Ordovicien inférieure : Représenté **à La formation Qassim,** qui est aussi inclus dans le groupe de Tayma**.** Le nom vient de notre région d'étude Al Qassim, au centre de l'Arabie saoudite. Cette formation Ordovicien inférieure est correspondue à la partie inférieure (unités 1 à 3, au moins) de la formation de Tabuk obsolète telle que définie par Powers et autres (1966) et modifiée par Powers (1968). La partie ordovicienne de la formation de Tabuk a été étudiée par Davis et autres (1981) dans la région de Ha'il, ainsi que par Clark-Lowes (1980) et McClure (1988a, b) dans la région de Al Qassim. Ces études, associées à une compilation de Wolfart (1981), ont défini la lithostratigraphie et la sédimentologie de la formation. La formation est divisée en quatre membres, de bas en haut : Hanadir, Kahfah, Ra'an et Quwarah. La formation est constituée de Conglomérat brun bioclastique contenant des galets de grès et des galets d'argile, Grès brun à grain moyen à grossier contenant des graptolites, des languides ; interstratifié avec un matériau bioclastique riche en débris de poissons formant des lits d'os phosphatés, argile limoneuse grise, blanche ou rouge foncé riche en graptolites et trilobites, des calcaires, des argiles micacées et limoneuses, gypsifère bleu. L'épaisseur de la formation est de 261 mètres au Al Qassim et peut attendre jusque 358m dans le bassin nord-est.

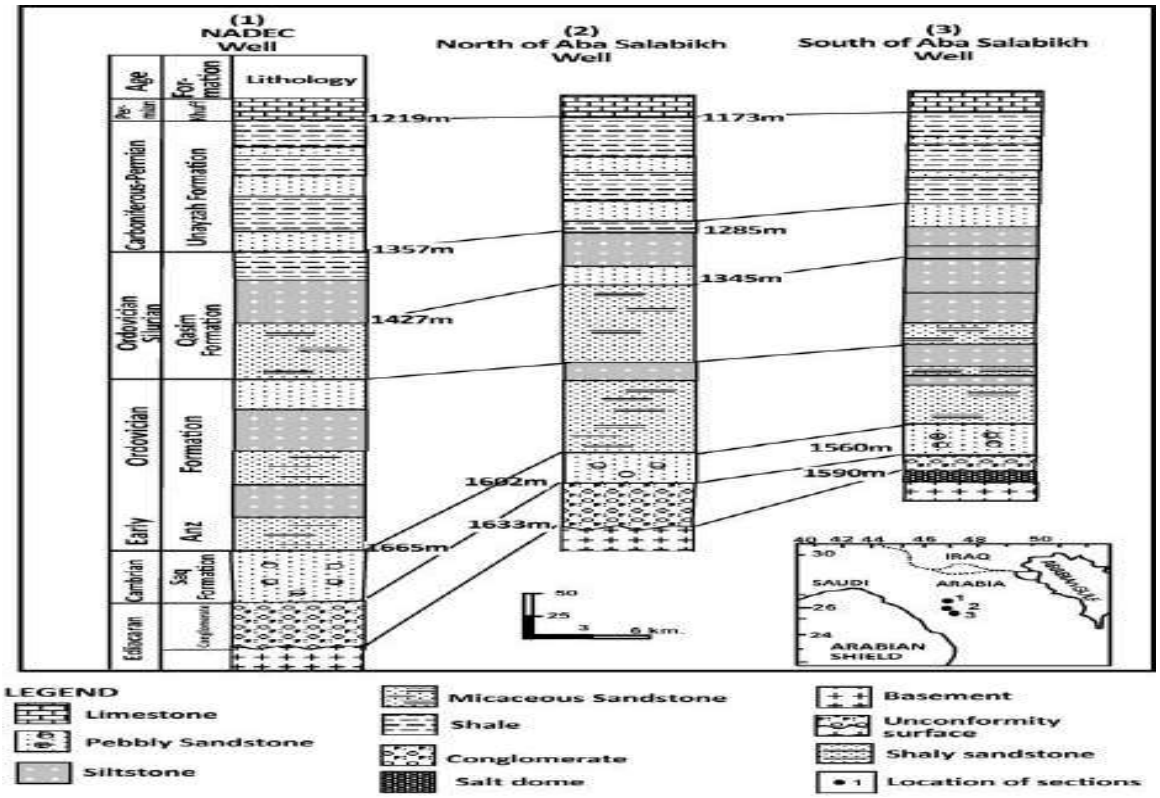


Figure 37 : Log des forages hydraulique à l'aquifère Saq

4- **Carbonifère-Permien :** Le **groupe de Buraydah** qui est composé de 2 formations paléozoïques qui sont : Berwath, Unayzah et la formation Khuff qui est d'âge Permien supérieur-Trias inférieur. Il a été introduit par Vaslet et al. (1988) pour inclure, par ordre croissant, les formations de Berwath, Unayzah, Khuff, Sudair, Jilh et Minjur. Les formations de Berwath, Unayzah et Khuff sont d'âge paléozoïque. Les formations de Khuff, Sudair, Jilh et Minjur sont d'âge mésozoïque. Il est composé principalement de grès avec des schistes et calcaires rouges à verts mineurs. L'épaisseur total de la partie paléozoïque ce groupe peut attendre 1032 mètres.

4.1. **La formation Berwath** : cette formation n'est pas identifiée que dans la section de subsurface et n'est pas exposée à la surface. Elle est composée de grès argileux à grains fine à grossier. L'épaisseur total de cette formation est variée entre 190.6 mètres.

4.2. **La formation Unayzah** : est composée d'alternance de grès à couche mince, de siltite, de schiste, de marne et de calcaire mineur et d'anhydrite, gypsifère vari colore, limoneux, entremêlé dans sa partie inférieure avec de la dolomie limoneuse jaunâtre à grise.

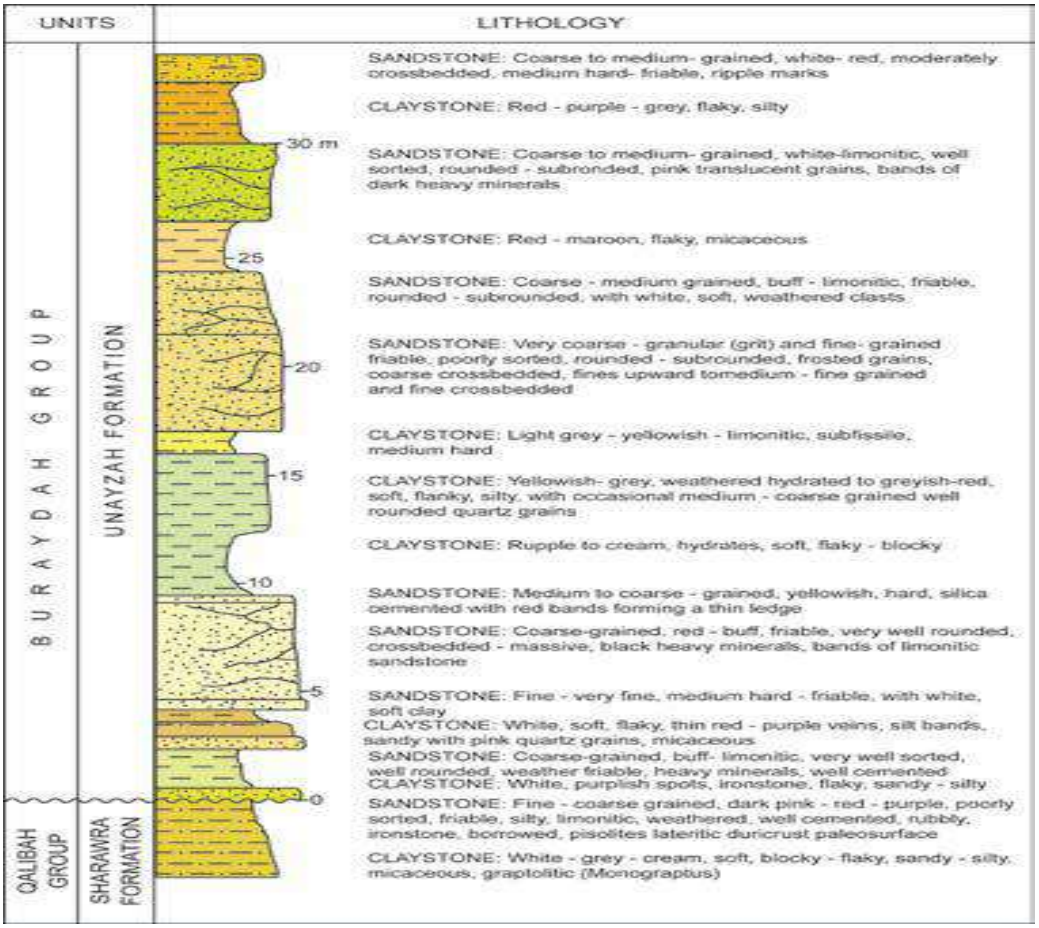


Figure 38. Colonne stratigraphique de la formation Unayzah à la ville de Unayzah (Al Qassim) (Al-Laboun, 1987).

Localement (à la région Unayzah) ; grès blanc à grain fin avec litière croisée au milieu, les lits de dolomite sont affaissés et teintés de rouge par les oxydes de fer et le manganèse au sommet (figure 38). Dans le sous-sol, la formation d'Unayzah est subdivisée en trois membres informels A, B et C, disposés de haut en bas. L'épaisseur total de cette formation est variée entre 32.2 et 34 mètres.

4.3. La formation Khuff : La formation est composée principalement de calcaire et de dolomite intercalés avec du schiste dominant à la partie médiane. Au sud de la région la base de Khuff couvre en discordance la formation Saq, et sa partie supérieure est couvert par Sudair. Il est subdivisé en cinq membres (Figure 39), du plus âgé au plus jeune : Ash Shiqqah (qui a remplacé le « membre Unayzah » obsolète de Delfour et al. (1982), Huqayl, Duhaysan, Midhnab et Khartam (Vaslet et al., 2005). L'épaisseur total de la formation Khuff est variée entre 177-192 mètres.

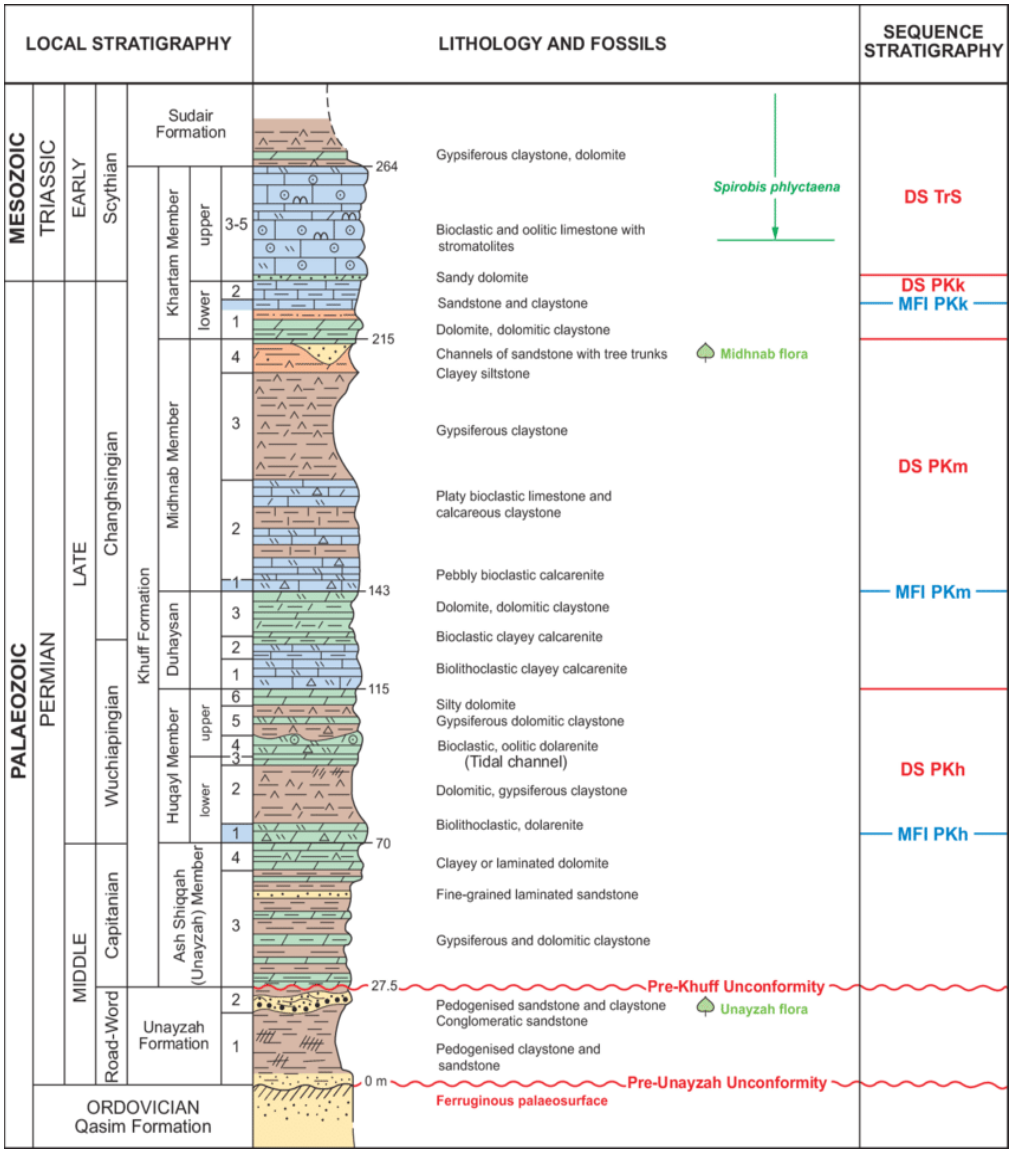


Figure 39 : Colonne stratigraphique de la formation Khuff **(**D'après Vaslet et al, 2005)

4. Mésozoïque et Cénozoïque (STQ) : les formations de secondaire de Trias qui sont Sudair, Jilh et Minijur, qui sont même inclus au groupe de Buraydah. En suite les formations cénozoïque (tertiaire et quaternaire). Les formation STQ recouvrent en discordance les formations paléozoïques au Nord et NE de la zone d'étude, et sont plus épaisses vers le NE. Elles sont principalement constituées de couches carbonatées (en particulier au Mésozoïque) et évaporitiques avec quelques progradations clastiques. Elles se sont formées en milieu marin peu profond ou émergé. Les formations paléocènes à quaternaires marquent un retour à une sédimentation continentale détritique et localement basaltique (Harrat).

b. La région de Ouargla

Les travaux de Busson (1970) et de Fabre (1976), ainsi que l'analyse des données de forages profonds d'exploration pétrolière ou hydraulique ont permis une description litho stratigraphique à travers tout le Sahara. A l'échelle de la zone d'étude :

1- L'Albien est formé d'un dépôt gréseux continental à ciment argileux ou carbonaté et des passées d'argiles, connu sur une épaisseur de 400 mètres en moyenne, repose sur **l'Aptien** ou, la barre aptienne imperméable, constituée de marnes et dolomies, avec une épaisseur de 10 à 30 mètres (Figure.40).

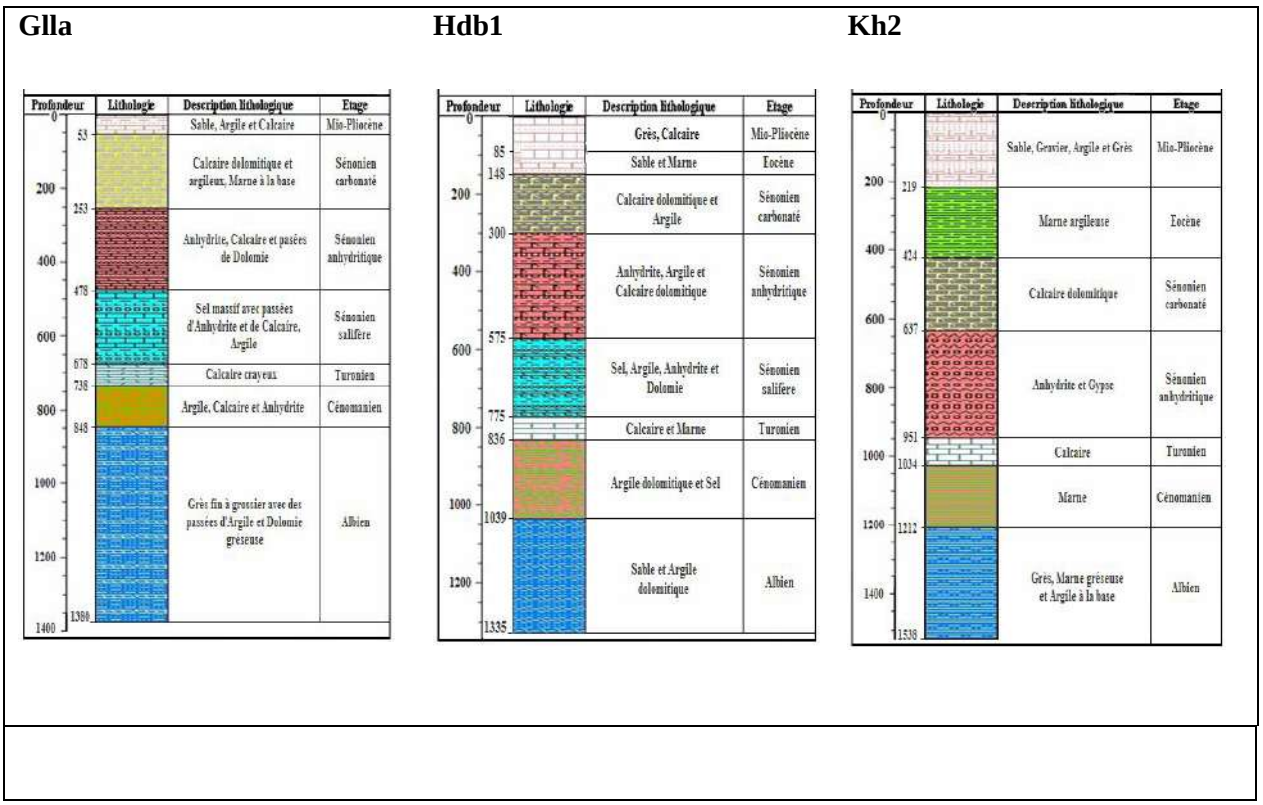


Figure 40 : Logs stratigraphiques des forages d'eau à l'Albien (ANRH, 2004)

2- Le Vraconien (de 50 à 100 m d'épaisseur), caractérisé par une alternance de niveaux argileux et dolomitiques, n'est qu'un terme de passage entre l'Albien (sommet du Continental Intercalaire), et le Cénomanien argilo-évaporitique et carbonaté (base du Complexe Terminal). Il ne peut pas être toujours différenciable de l'Albien ou du Cénomanien (de 150 à 250 m d'épaisseur).

3- Le Turonien, d'une épaisseur de 70m, il est constitué de calcaire poreux et crayeux, et repose sur la série imperméable du Cénomanien.

4- Le Sénonien lagunaire (350 m d'épaisseur), salifère et anhydritique, constitue le substratum imperméable aux Sénonien et Eocène carbonatés, ayant une épaisseur allant de 150 à 200 m. alors que l'Eocène évaporitique, qu'est une formation lagunaire, constituée de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrites, très peu perméable et séparant l'Eocène carbonaté des sables du Mio-Pliocène.

5- Le Mio-Pliocène, est un puissant ensemble de grés, sables et d'argiles, qui repose en discordance sur l'Eocène, et caractérisé par une forte hétérogénéité, aussi bien dans la direction verticale que dans les directions horizontales.

6- Le Quaternaire, constitué de sables alluviaux ou éoliens, fins à moyen, et sables gypseux et parfois argileux ou carbonaté, repose en discordance, et irrégulièrement dans la vallée, sur les séries moyennes du Complexe Terminal (Sénonien, Eocène, et Mio-Pliocène).

2.4. Discussion

Géologiquement les deux régions d'étude se ressemblent dans de nombreuses caractéristiques, malgré la grande distance qui les sépare, en plus chacun d'eux est situé dans un continent différent. Les deux régions se fait partie des bassins sédimentaires, Al Qassim s'occupe le bas lit de Wadi Al Rummah au centre de plateforme Arabe, et Ouargla se trouve enfoncée dans la dépression de l'Oued M'ya à l'ouest de la plateforme Saharien, ce qui est observé à Ouargla que seul les affleurements de Cénozoïques qui s'expose en surface (Quaternaire et tertiaire), par contre à la région Al Qassim la plus part des couches de la succession sédimentaire s'affleure, que ça soit d'âge Paléozoïque, Mésozoïque ou Cénozoïques, sans oublier le socle précambrien qui s'affleure à l'ouest de la région. Ouargla se trouve au centre de la plateforme Saharien, par contre Al Qassim se situe au bordure Ouest de la plateforme Arabe, à cause cette position les couches sédimentaires se repose en discordances, et leurs épaisseurs se diminue vers l'ouest.

3. La tectonique :

a. La région de Al Qassim

L'histoire tectonique de cette plaque est très complexe et encore discutée. Suite à l'accrétion et pénéplanation du socle précambrien, la plaque subit de nombreuses phases de rifting continental et marge passive le long de sa bordure nord-est, dès le Cambrien. Il s'agit des événements téthysiens représentés principalement par la formation de la marge passive de la Paléo-Téthys jusqu'aux obductions d'ophiolites et le début de la fermeture de la Néo- Téthys au Mésozoïque supérieur.

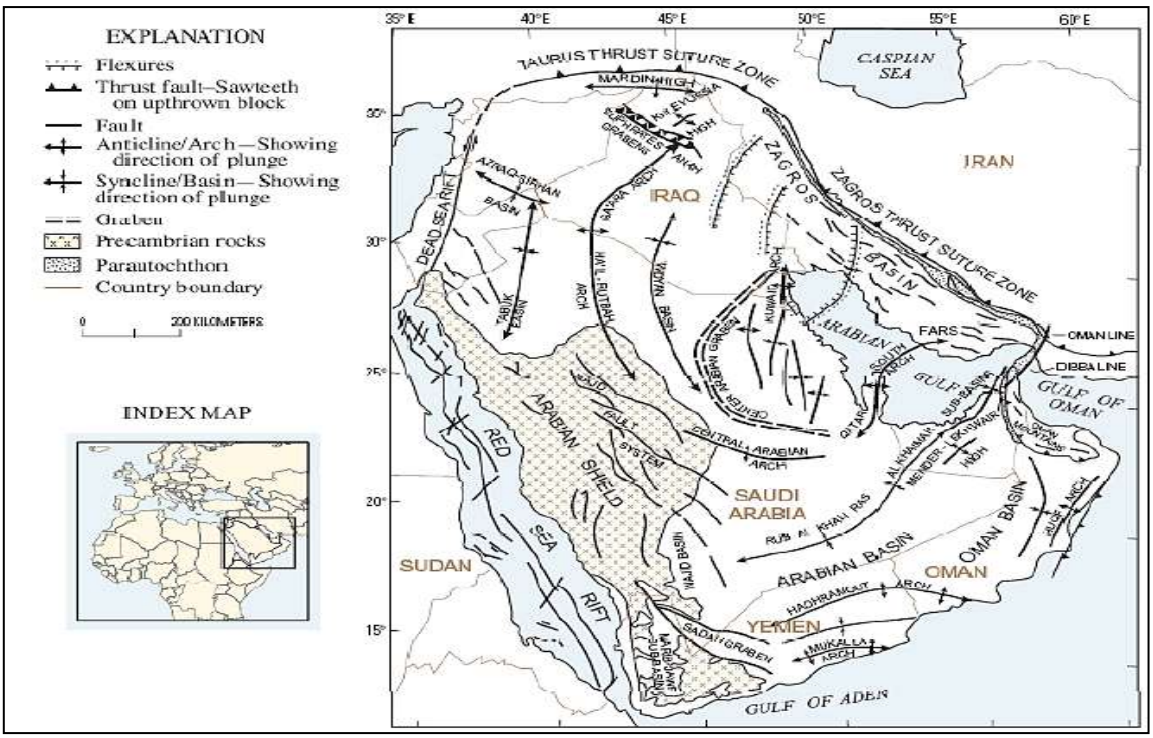


Figure 41 : Carte structurale de Péninsule Arabe (Fox et Ahlbrandt, 2002).

Note : les coordonnées sont approximatives

La plaque est aussi affectée par les événements majeurs et certains événements régionaux sont liés à leurs effets, telles que les glaciations ou l'orogénèse hercynienne. Par la suite, les montagnes d'Oman et de la ceinture du Zagros se soulèvent et le Golfe d'Aden et de la mer Rouge s'ouvrent (Figure 41). Ainsi, l'inclinaison régionale nord-est de la plaque arabe à partir de l'Oligocène est le résultat d'un soulèvement thermal associé au rifting de la Mer Rouge et de la collision avec l'Eurasie (Alsharhan et Nairn, 1997 ; Sharland et al., 2001 ; Laboun, 2010). Les différentes subsidences dues à ces mouvements tectoniques combinées aux variations eustatiques sont donc à l'origine de dépôts sédimentaires hétérogènes et de surfaces de discordances régionales importantes. En effet, la pile sédimentaire contient aussi bien des dépôts détritiques grossiers à fins que des couches carbonatées à évaporitiques. Onze mégaséquences stratigraphiques d'origine tectono-eustatique ont, de plus, été identifiées sur

l'ensemble du Phanérozoïque (Sharland et al., 2001), chacune contenant des sous-séquences régionales. Des études approfondies ont ainsi permis de subdiviser la succession stratigraphique de la plate-forme arabe.

b. La région de Ouargla

La cuvette d'Ouargla fait partie de la dépression d'Oued M'ya. Cette dernière, occupe la plus grande partie du bas-Sahara. L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire atteigne 4000 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m. Dans son ensemble la dépression d'Oued M'ya est une structure dissymétrique assez plate (ALIEV M.,1972).

Les données sismologiques recueillies à l'occasion des recherches pétrolières, montrent que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du Cambrien jusqu'au Sénonien inférieur (Figure 42).

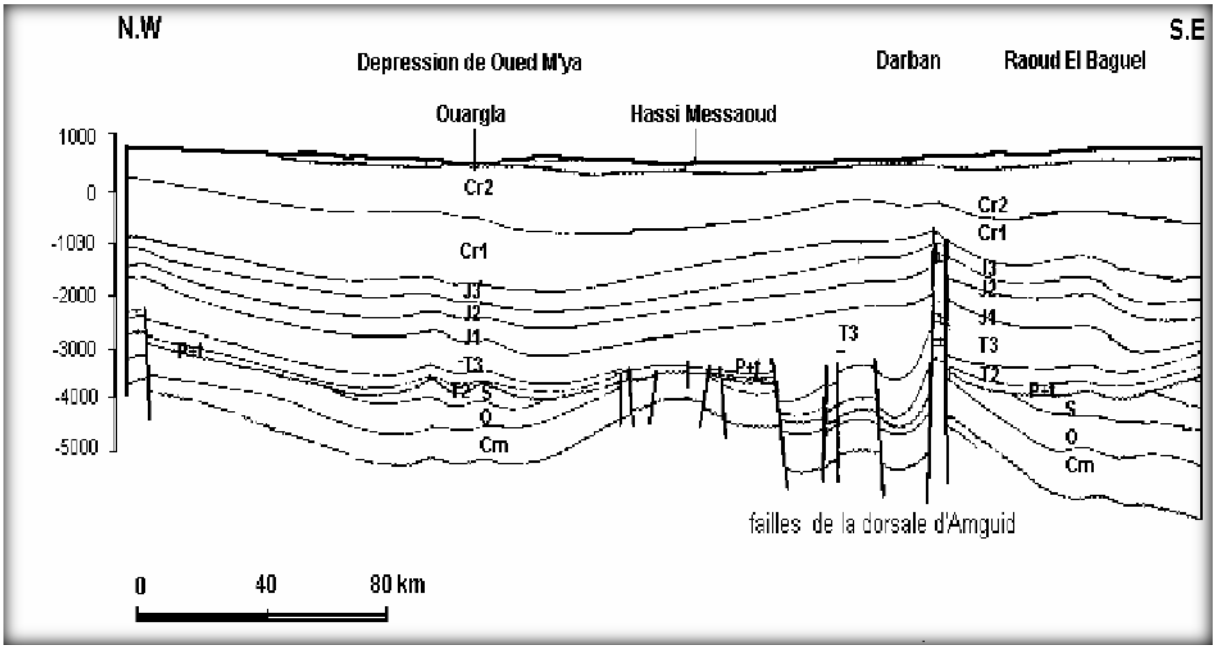


Figure 42 : Coupe Structurale Transversale du Bas-Sahara (Source : SONATRACH)

Ces failles sont orientées Sud-est Nord-Ouest et traversent la région de Ouargla par l'est. Elles seraient à l'origine des apports profonds dans cette zone (GUENDOUZ et al .1992-1995).

Les logs de forages, et les coupes géologiques qui ont été établi, on a permis de préciser les formations litho-stratigraphiques présentes sur la région de Ouargla, il s'agit :

- Du secondaire, avec les formations allant de l'Aptien jusqu'au Sénonien ;
- Du tertiaire, allant de l'Eocène inférieur jusqu'au Mio-Pliocène constituant les formations du complexe terminal ;
- Et enfin du quaternaire qui est constitué d'un matériau détritique et de sables éoliens.

4. Contexte hydrogéologique

4.1. La région de Al Qassim

La platform Arabe de l'Arabie Saoudite contient des ressources en eau considérable répartie verticalement dans différentes unités hydrogéologiques (figure 43). Les échanges entre les différentes formations de ce système aquifère sont assez complexes. La figure 45 présente l'évolution de l'exploitation des eaux souterraines dans la zone de Saq compilée à partir de différentes sources. En raison de la position prédominante de la région dans le passé et de la disponibilité de données historiques, des chiffres distincts sont également fournis pour la région de Qassim. On peut voir que le captage des eaux souterraines est resté marginal jusqu'aux années 1960. Une croissance rapide du volume extrait s'est produite dans la région de Qassim entre 1966 et 1984, qui s'est poursuivie entre 1984 et 2005. Dans d'autres régions, la croissance du volume des eaux souterraines pompé a été modérée jusqu'en 1984, mais a ensuite été multipliée par dix au cours des 20 dernières années. Le volume total d'eau souterraine prélevé annuellement dans la zone de Saq en 2005 (8 727 Mm^3/an) équivaut à une colonne d'eau de 24 mm couvrant toute la zone de Saq (~ 370 000 km²). Ceci est plus de cinq fois plus élevé que les quelques mm de recharge survenus au cours de la même période de l'année. Étant donné que le captage des eaux souterraines est concentré dans les principales zones irriguées ne représentant pas plus de 10% de la zone de Saq, il est évident que dans ces régions, le pourcentage de la recharge ne passe pas 0.02% par rapport au volume des eaux pompé. Les estimations recharge dans la zone du Saq varient entre 950 et 1100 Mm^3 /an sur l'ensemble de la zone Saq (= 2,5 à 3 mm / a × 378 000 km²), dont 350 Mm^3 /an au maximum rechargent l'aquifère de grès Saq (BRGM 2008).

La recharge se fait aux affleurements au Sud du bassin et les écoulements suivent la pente générale du bassin sédimentaire vers le NE. Ceci est néanmoins complexifié par la présence des jeux de failles et des surfaces de discordances régionales et locales. Ainsi, certaines couches sont discontinues et les transferts entre les unités hydrogéologiques peuvent être localement différents. L'âge des eaux du Saq estimée par les mesures radiométriques est à environ 20 000 ans (NRAJ, 1986 dans SNC-Lavalin, 2005) et celles de la formation Tabuk1 à environ 15 000 années (BRGM, 1984 dans SNC-Lavalin, 2005).

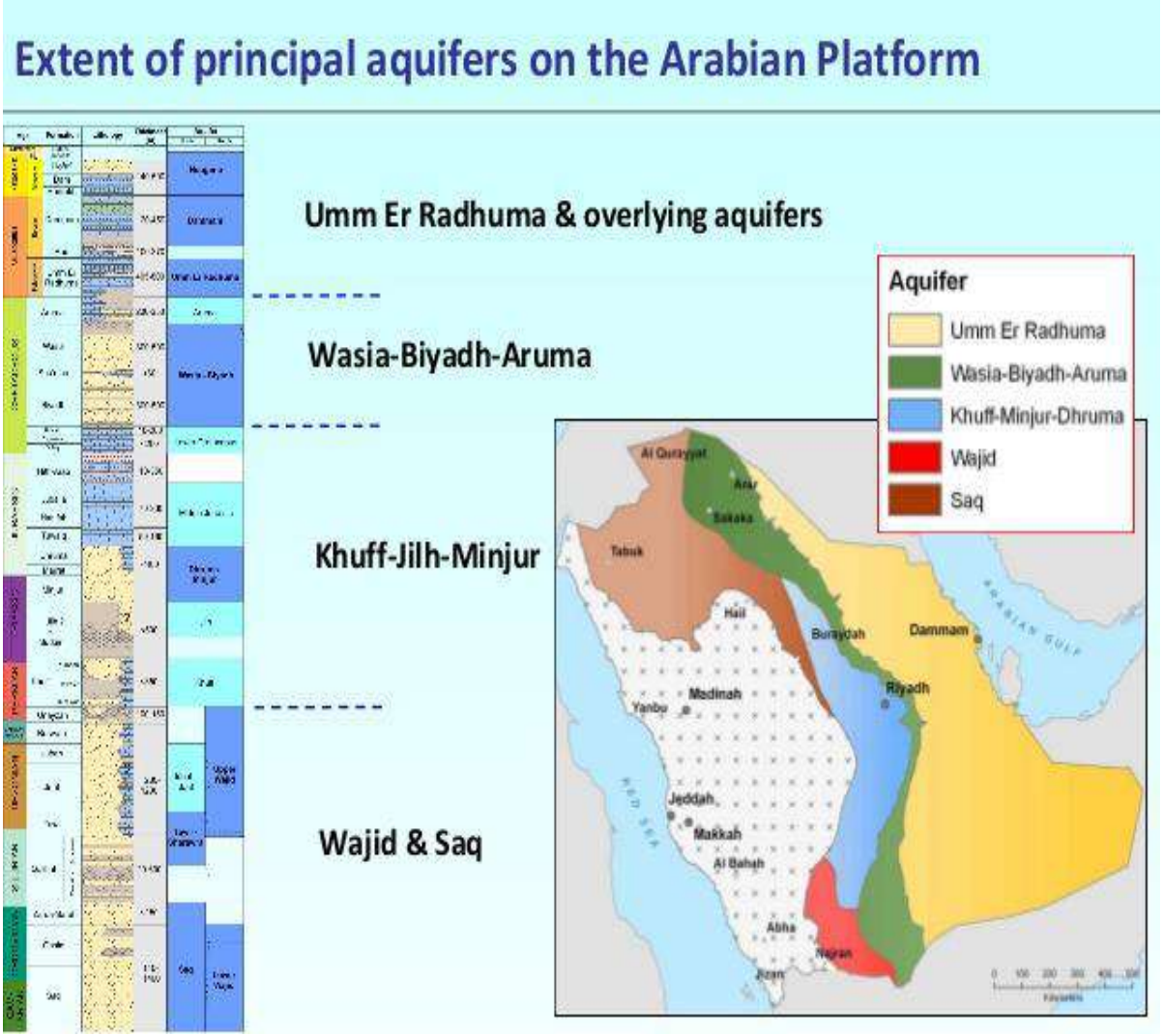


Figure 43 : Schéma des principaux aquifères de la platform Arabe

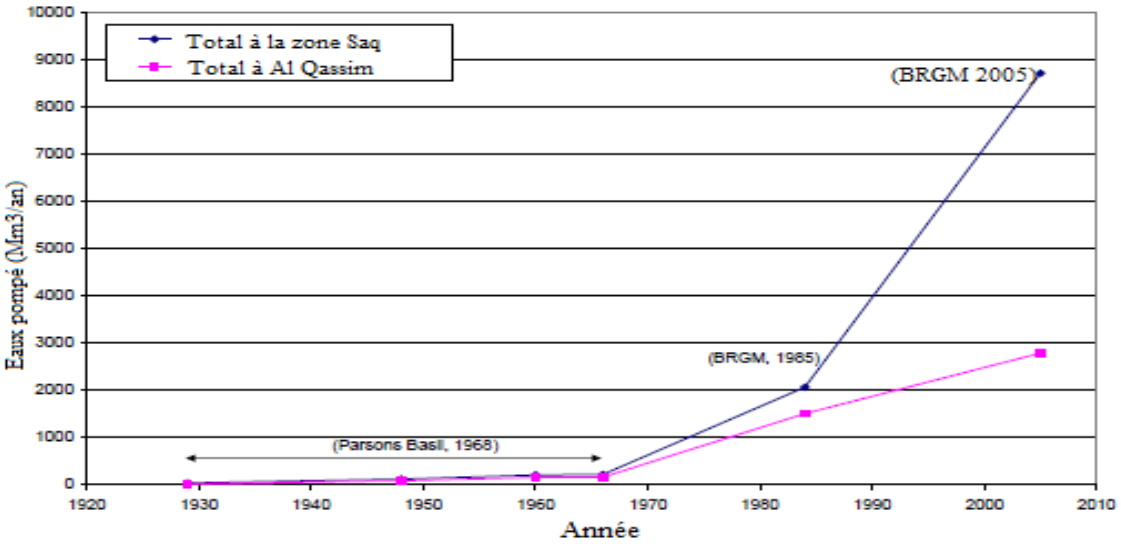


Figure 45 : L'évolution de volume des eaux exploité dans la zone Saq et Al Qassim.

4.1.1. L'aquifère de grès Saq :

Le majeur aquifère de ce système aquifère de nord-ouest de l'Arabie Saoudite est l'aquifère de Saq, par son extension et son épaisseur. Cette formation gréseuse cambro-ordovicienne repose juste au-dessus du socle et ainsi affleure au Sud de la zone d'étude tout le long du massif montagneux.

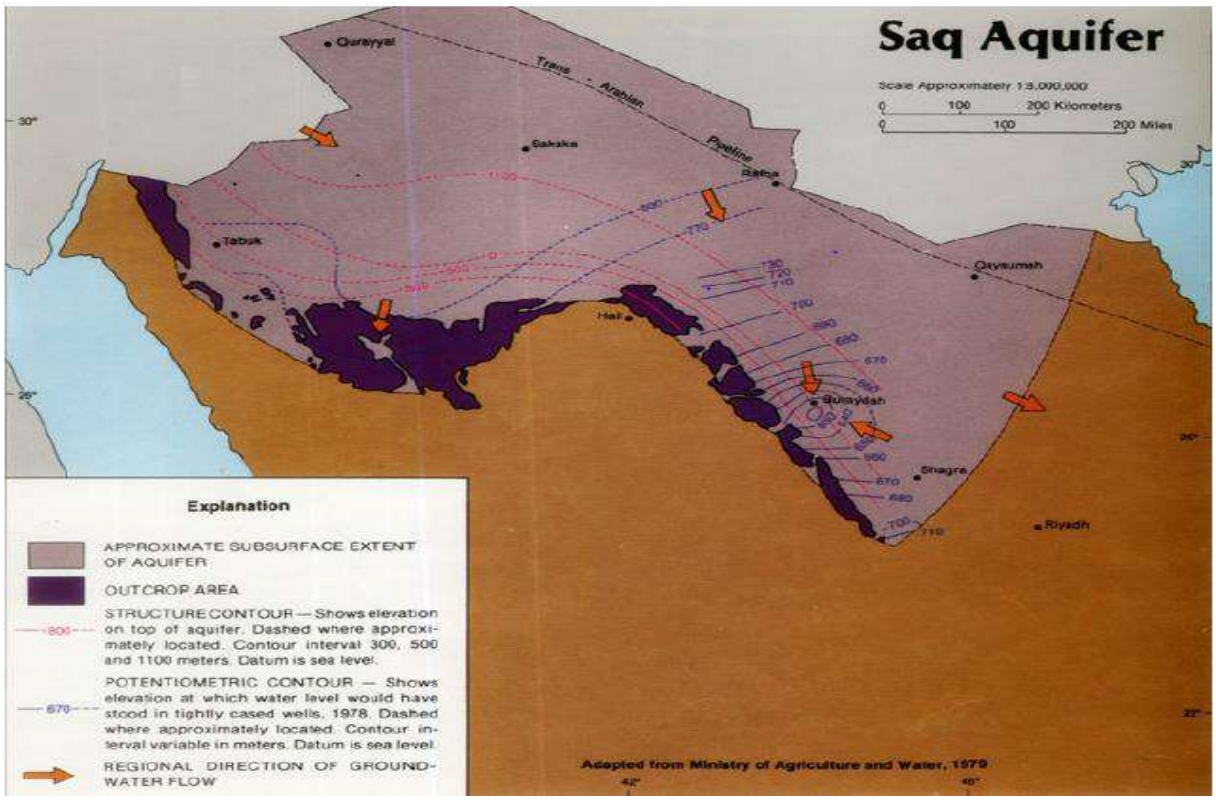


Figure 44 : Carte hydrogéologique de l'aquifère Saq (Ministry of agriculture and water KSA)

La surface du Saq dans le bassin sédimentaire nord-ouest est d'environ 452 000 km² sur la zone du Projet Saq (BRGM). 20% de cette surface est en condition non-confinée avec des charges hydrauliques de l'ordre de 900 mètres Au-dessus du niveau de la mer. Au lieu où la formation est la plus profonde le niveau piézométrique est d'environ 650m. et d'environ 550 mètres. À Al Qurayyat. Ainsi, le Saq est un aquifère captif et localement artésien, à l'origine d'une drainance verticale ascendante sur quasiment l'ensemble des aquifères du système. L'écoulement naturel se fait dans deux directions générales (Figure 44). Dans la région de Qassim, le Saq est confiné et les flux ont une direction naturelle NE, vers l'Iraq.

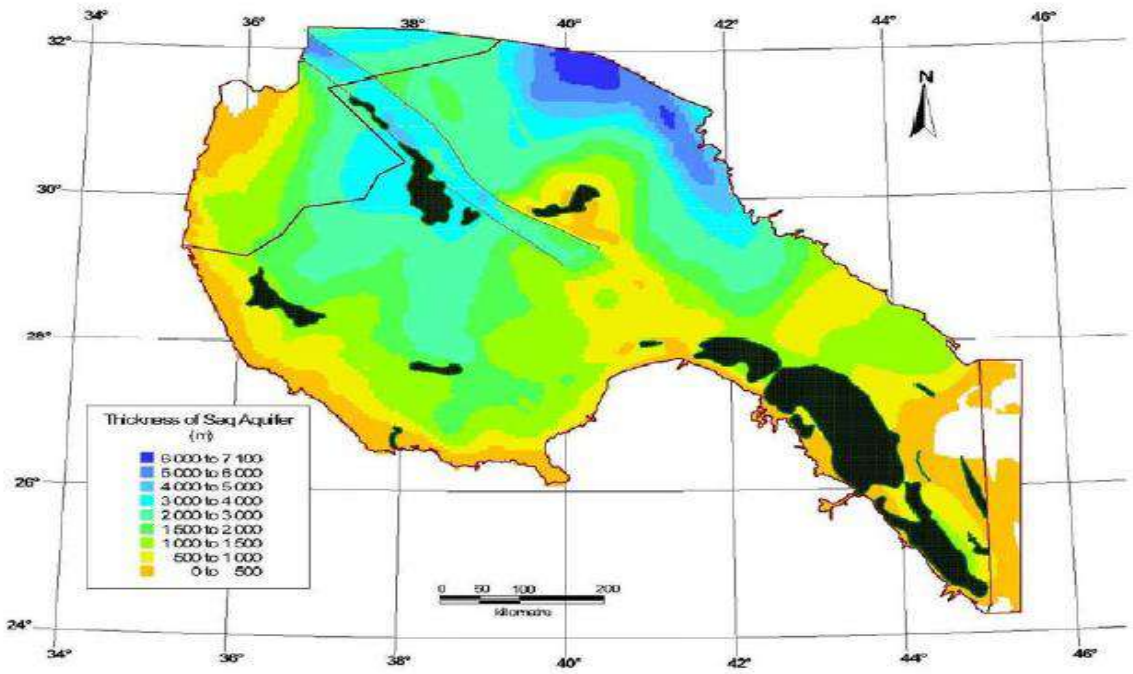


Figure 46 : Carte de la profondeur du toit de l'aquifère Saq (en mètres sous le niveau du sol) (BRGM, 2006)

Dans la partie ouest du bassin (région de Tabuk à Sakakah), les écoulements ont une direction générale vers le Nord en suivant la direction naturelle de la pente en condition non confinée puis en rejoignant le graben Wadi Sirhan connu comme exutoire majeur du système (sauf exceptions dans quelques bassins endoréiques)..

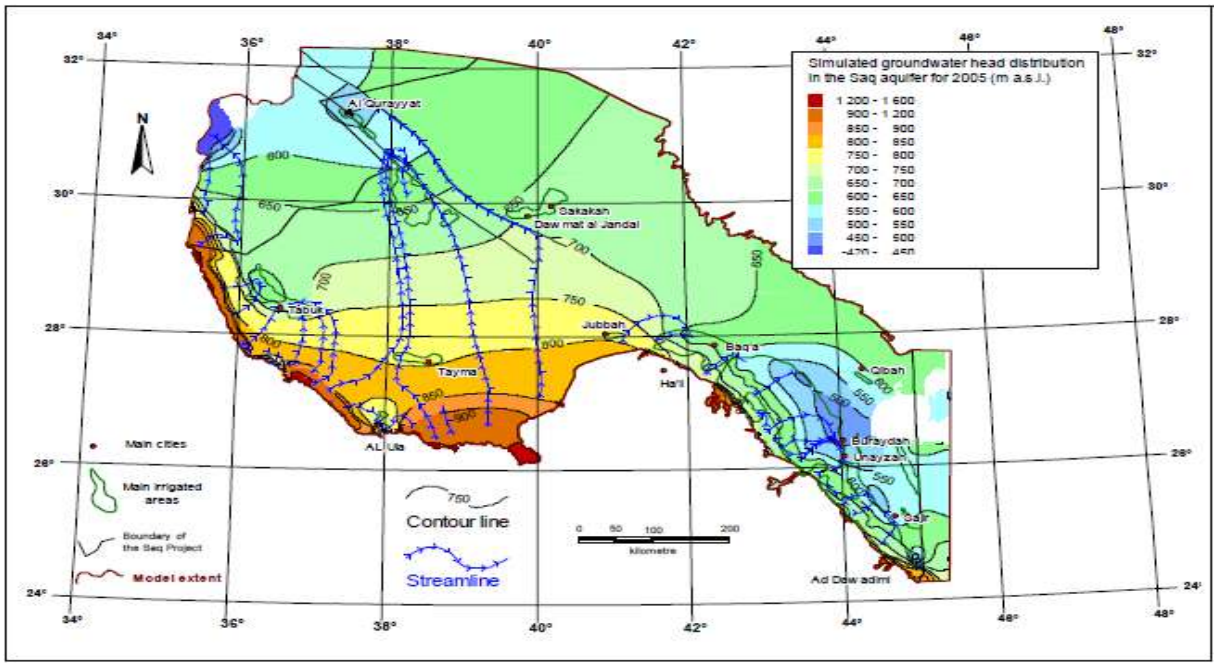


Figure 47 : Carte piézométrique estimée de l'aquifère Saq en 2005 (BRGM/ATC, 2008a).

Ainsi, de par son extension et rôle sur l'hydrodynamisme du système, les frontières affleurantes du Saq correspondent aux limites hydrogéologiques amont Sud et Ouest du système aquifère.

4.1.2. L'aquifère de grès Kahfah

Dans la partie ouest de la zone de Saq, l'écoulement naturel se fait vers le nord, tandis que dans la zone de Qassim, l'écoulement des eaux souterraines est dirigé vers le nord-est. En 1983, dans des endroits tels que les zones irriguées de Ha'il ou de Tabuk, le niveau d'eau de Saq était plus élevé que celui de l'aquifère de Kahfah. Aujourd'hui, cette situation a changé et la nappe phréatique de Saq est partout à une altitude plus basse. Dans la région de Qassim, l'écoulement naturel des eaux souterraines a été perturbé par un pompage intensif. Les observations montrent une zone appauvrie avec une élévation minimale à 500 m d'altitude. en dessous de Buraydah, qui est à peu près la même altitude que dans l'aquifère Saq et pourrait indiquer que l'équilibre est atteint entre les deux aquifères. Cet équilibre peut être dû au fait que de nombreux puits tapent les deux couches, établissant ainsi un contact hydraulique entre les deux couches. Cependant, l'extension de la zone appauvrie est légèrement différente par rapport à l'épuisement observé dans l'aquifère Saq, et en dehors du centre de la dépression, la nappe phréatique de l'aquifère Kahfah est généralement de 10 à 50 m au-dessus de la nappe phréatique Saq. La nappe phréatique de Kahfah est actuellement à 100 m en dessous du niveau d'eau de 1983 au centre de l'épuisement, mais cette différence diminue lorsque l'on s'éloigne de la zone de Buraydah. Les niveaux d'eau sont similaires à ceux observés en 1983 au sud-est de Baq'a. Au nord de Ha'il, la nappe phréatique actuelle semble à nouveau inférieure aux niveaux de 1983. Ce schéma reflète bien la répartition des zones irriguées, le rabattement le plus élevé ayant lieu près du centre des périmètres irrigués. Dans la partie ouest de la zone de projet Saq, la zone irriguée près de Tabuk coïncide avec une grande dépression dans la nappe phréatique. Les niveaux d'eau au centre de la dépression sont inférieurs à 650 m d'altitude. Ici aussi, un grand nombre de puits tapent les deux aquifères et les niveaux influencés ont la même forme. Cependant, il n'y a pas d'équilibre entre les deux aquifères.

4.1.3. L'aquifère de grès Quwarah-Sarah

L'aquifère Quwarah-Sarah est un système complexe dans lequel les propriétés de l'aquifère peuvent varier considérablement en raison de la présence de paléo-canaux dans les membres supérieurs de Zarqa et Sarah. Ces unités sont des dépôts glaciaires recouvrant de façon discordante le grès de Quwarah. Les paléo vallées incisent également le schiste Ra'an qui forme la base du système et le relie aux formations Kahfah et Saq sous-jacentes. Pour cette raison, l'épaisseur de l'aquifère est hétérogène et des trous existent à différents endroits, comme à 40 km au nord de Tabuk. La formation ne se trouve pas à l'est et au sud d'Unayzah. Dans ces

circonstances, il est très difficile de tracer une carte piézométrique pour cet aquifère. Une tentative est cependant présentée pour montrer que la direction générale de l'écoulement suit la même tendance que les aquifères sous-jacents. L'écoulement des eaux souterraines est dirigé vers le nord-est dans la région de Tabuk-Tayma et se rend probablement au graben de Wadi Sirhan. Le gradient doit être affecté par la variation d'épaisseur du réservoir. Dans la région de Qassim, le flux est également dirigé vers le nord-est.

4.1.4. Les aquifère de grès et de calcaire Jauf, grès de Jubah et Barwath

La formation Jauf d'âge dévonien recouvre directement le grès Tawil au nord-est de la zone d'étude Saq. Bien que des affleurements se trouvent à l'ouest de Wadi Sirhan, il n'est pas considéré comme un aquifère majeur car ces affleurements sont isolés. À l'est de Wadi Sirhan, malgré la rareté des affleurements, la formation de Jauf est reconnue dans la région de Sakakah comme un aquifère local. Cependant, une seule unité de cette formation, à savoir le membre Qasr, doit être considérée comme une couche productive car elle est constituée de calcaire avec une bonne perméabilité. L'aquifère de grès Jubah (anciennement connu sous le nom de formation de Sakakah) est exposé près de la ville de Sakakah et s'étend vers l'est et le nord.

Environ 150 puits ont été identifiés dans la Formation de Jauf, dans lesquels 135 niveaux d'eau ont été mesurés ou estimés lors de l'inventaire sur le terrain. Cependant, 90% des puits sont situés près de Sakakah, dans une zone représentant moins de 3% de l'extension de l'aquifère Jauf. Les informations manquent vers le nord et le sud-est. Les courbes de niveau de Jauf dessinées pour 2005 montrent une dépression centrée sur Sakakah, résultant de l'important pompage dans cette zone et un axe de drainage nord-est en direction d'Ar'ar. La forme de cet axe, contrôlé par un point à Ar'ar, pourrait être influencée par la rareté des données disponibles. Néanmoins, cet axe a déjà été interprété de la même manière en 1983, bien que plusieurs aquifères étaient considérés ensemble à cette époque. En fait, les aquifères de Jauf, Jubah et Berwath ont des niveaux d'eau localement similaires et pourrait être en contact. La formation de Jubah, où elle est exploitée près de Sakakah, correspond parfaitement aux niveaux d'eau de Jauf. Les aquifères de Jubah et de Berwath ont des niveaux piézométriques similaires à Ar'ar (environ 240 à 260 m en élévation). Le Jubah et le Berwath à Ar'ar pourraient être en contact avec le système aquifère « STQ » (Secondaire-Tertiaire-Quaternaire) car les têtes d'eau sont similaires à celles de la formation du Crétacé Wasia qui recouvre en discordance les roches du Dévonien et du Carbonifère.

4.1.5. L'aquifère de calcaire Khuff

La formation de Khuff s'étend vers le nord-ouest, depuis la limite sud-est de la zone d'étude de Saq jusqu'à la frontière irakienne au nord ; il est absent de Wadi Sirhan. Les affleurements sont

limités dans la région de Qassim où ils couvrent environ 4000 km² entre Sajir et Buraydah. Sa lithologie est différente de celle des aquifères plus anciens car elle se compose principalement de calcaire et de dolomite avec quelques couches d'anhydrite. Les eaux de cette aquifère sont caractériser par une conductivité électronique élevé (la CE moyenne est d'environ 2400 µS / cm) et donc le nombre de puits qui le tapent est limité. De plus, les niveaux d'eau pourraient être mesurés ou estimés dans moins de 20 puits. Les courbes de niveau tracées sur la carte piézométrique de 2005 doivent donc être prises comme hypothèses. Les courbes de niveau supposées, parallèles à la limite de l'aquifère, montrent une direction d'écoulement est-nord-est. Une zone appauvrie apparaît à 30 km au nord de Buraydah avec des élévations minimales de la nappe phréatique mesurées à 505 m d'altitude. Ce niveau d'eau est à peu près le même que ceux observés dans les aquifères de Saq et Kahfah à cet endroit. Cependant, l'aquifère de Khuff est séparé de ces autres couches productives par plus de 300 m des argiles imperméable des formations Ash Shiqqah et Ra'an. En fait, la zone appauvrie est beaucoup plus petite et, comme ailleurs, les niveaux des eaux souterraines dans l'aquifère de Khuff sont à environ 100 m au-dessus des niveaux observés dans le Saq. Par rapport à la situation de 1983, les charges hydrauliques actuelles sont généralement entre 100 m et 200 m plus basses dans la zone au sud de Sajir. La carte de 1983 montre un flux vers le nord dans cette région qui n'apparaît plus, avec le point le plus élevé près du village de Khuff. Depuis lors, l'agriculture s'est développée dans cette zone et de nombreux puits exploitent à l'aquifère de Khuff. De plus, parce que le Khuff recouvre en discordance les formations plus anciennes, il y a un vide géologique dans la série à cet endroit : le Saq est couvert directement par les argiles de Ash Shiqqah, qui est l'unité la plus basse de la formation de Khuff. Il est probable que de nombreux puits qui tapissent l'aquifère Saq tapent également l'aquifère Khuff et créent la dépression observée.

4.1.6. Le système aquifère STQ

Le système aquifère STQ (secondaire-tertiaire-quaternaire) prend en compte les couches du Crétacé supérieur au Quaternaire. Le système se compose d'un empilement d'unités géologiques avec différentes propriétés aquifères qui recouvre en discordance les couches paléozoïques. Le système est assez complexe. Les puits exploitant les différentes formations du Mésozoïque au Quaternaire sont considérés comme représentant le système aquifère STQ. Les dunes de sable, les Harrats et les aquifères alluviaux ne sont pas cependant considérés, ils font partie de la STQ, car ils constituent des unités souterraines indépendantes. Dans le système oriental, le flux est dirigé vers le nord-est. Un gradient plus raide est supposé près de la limite ouest de ce système parce que les couches sont plus épaisses vers l'est. La partie nord de ce système (région d'Ar'ar) est en contact avec le grès de Jubah et le Berwath qui a de bonnes propriétés aquifères dans

cette zone. La profondeur de l'eau dans la STQ ainsi qu'à Jubah et Berwath est proche de 300m, ce qui correspond à une altitude d'environ 250 m d'altitude. En raison de l'élévation de son fond, il est probable que le complexe aquifère devienne sec ou improductif à l'ouest du méridien 40 ° E. À l'est de ce méridien, le pendage oriental de la Jubah et les formations sus-jacentes favorisent l'écoulement des eaux souterraines dans cette direction. Au nord, les eaux souterraines s'écoulent vers Wadi Sirhan où le niveau d'eau est peu profond. Le la présence de grandes sebkhas atteste de l'occurrence d'une zone d'évaporation considérable. Ce débit d'eau souterraine est confirmé par la qualité des eaux souterraines. La qualité STQ, fraîche à la frontière ouest du Wadi Sirhan où le Crétacé est en contact avec le Tawil sous-jacent aquifère, devient salé dans la vallée.

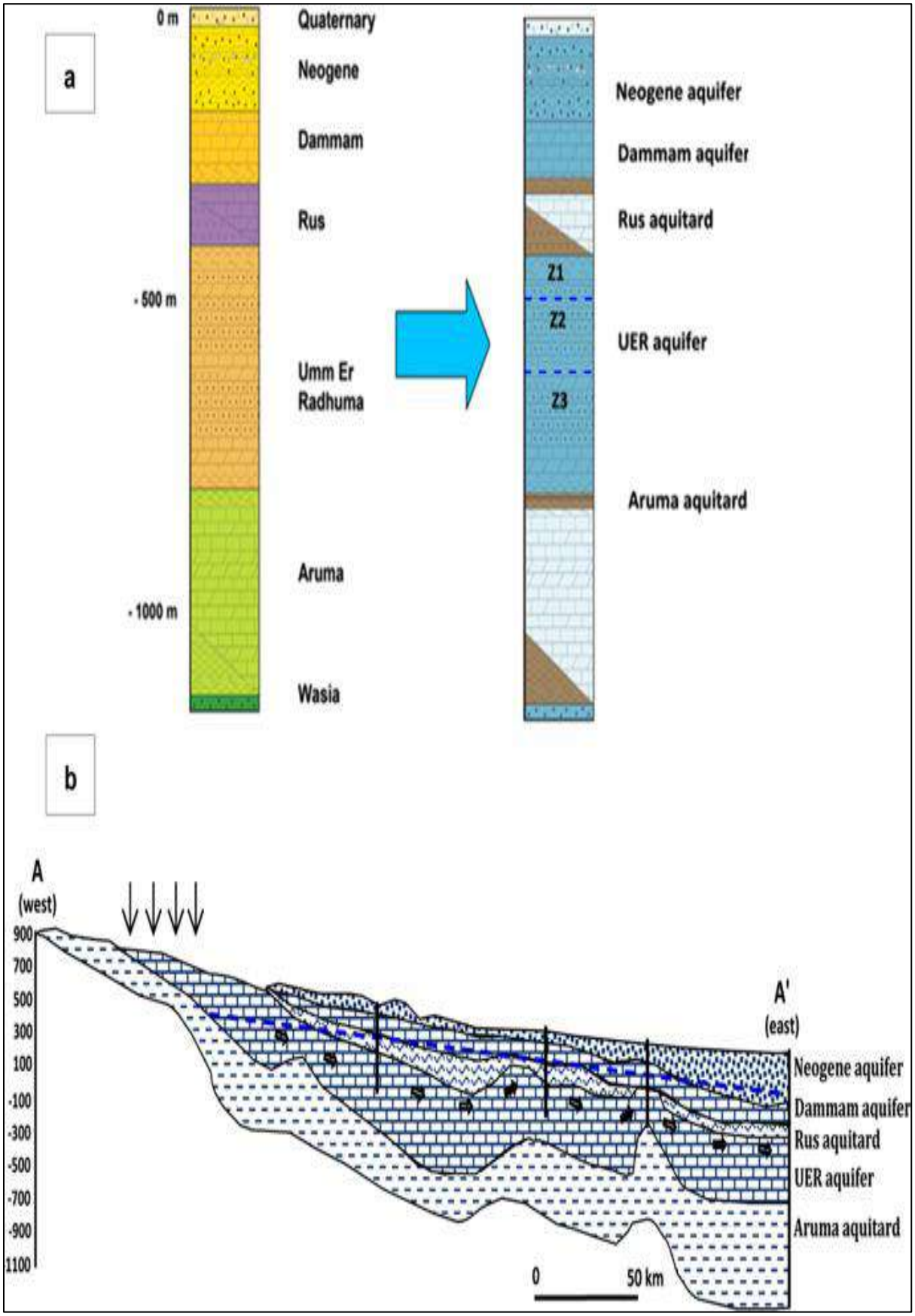


Figure 48 : A : Log stratigraphique des puits hydrauliques à la région de Al Qassim
B : Coupe hydrogéologique transversale des formations STQ
(BRGM/ATC 2008)

4.2. La région de Ouargla

Le bassin du Sahara septentrional est bien doté en formations aquifères favorables à la circulation souterraine des eaux. Il comprend le fameux système aquifère du Sahara septentrional (SASS), à savoir, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal (figure 49). Il plonge sur une surface d'environ 1.000.000 Km^2 partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye, ayant de réserves estimées à 31.000×10^9 m^3, dont l'accumulation ne peut être expliquée par le climat actuel ; la recharge actuelle n'étant que de 1×10^9 m^3/an, dont, la nappe du Continental Intercalaire possède la durée de renouvellement la plus longue (Ould Baba Sy, 2005). Ils proviendraient d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur et de l'Holocène. L'âge des eaux des différentes nappes du SASS, déterminé au ^{14}C, montre qu'aux zones de recharge, les eaux sont jeunes, et attestent d'une recharge actuelle de l'ordre de 500 ans près des zones d'alimentation possible, et arrivent jusqu'à 40000 ans dans les parties confinées des nappes et des zones d'exhaures situées à 500 km des zones de recharge (Conrad et al, 1972 ; Gonfiantini et al, 1974 ; Aranyossy et al, 1985).

En Algérie, ce système aquifère couvre une surface de 700 000 Km^2, et est d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (Cornet, 1964). L'anticlinal du M'Zab, véritable passerelle structurale entre l'Atlas saharien et le plateau de Tademaït, divise ce réservoir « multicouche » en deux (02) sous bassins hydrogéologiques, l'un occidental de 280 000 Km^2, recouvert partiellement par le Grand Erg Occidental, et l'un oriental, le plus étendu avec 500 000 Km^2, occupé en grande partie par le Grand Erg Oriental.

4.2.1. Le Continental Intercalaire

D'après Kilian, (1931), le « Continental Intercalaire » (Figure 49) désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogenèse hercynienne, alors qu'au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la transgression cénomanienne. (Busson, 1970 ; Fabre, 1976).

Il occupe les formations sableuses et argilo gréseuses du Néocomien, Barrémien, Aptien, et de l'Albien (Cornet, 1964 ; Cornet et Gouscov, 1952). L'aquifère est continu du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar, et d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen. Le débit d'alimentation du Continental intercalaire provenant du piémont de l'Atlas saharien est de 7.7 m^3/s, (Ould Baba Sy, 2005 ; Ould Baba Sy, et al, 2006). Ce débit entre dans l'intervalle des estimations recueillies dans les études antérieures qui le situent entre 4 m^3/s (Cornet, 1961) et 8.5 m^3/s (Margat, 1990).

La carte piézométrique (Figure.51) de référence du Continental intercalaire établie, à l'état stationnaire (peu ou pas influencée par les pompages), sur la base des études antérieures (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972, 1972 ; Pallas, 1978), met en évidence les zones d'alimentation suivantes (Ould Baba Sy, 2005) :

1- piémont sud atlasique au Nord-Ouest ;

2- Tinrhert au Sud ;

3- Dahar à l'Est ;

4- Jebel Nafusa au Nord-Est ;

5- Jebel Hassawna au Sud, où la nappe du Cambro-Ordovicien est drainée vers le Nord ; Par la nappe du Continental Intercalaire.

Les zones d'exutoire sont :

1-les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt

2- l'exutoire tunisien marqué par la faille d'El-Hamma

3- l'exutoire libyen au niveau d'AinTawargha.

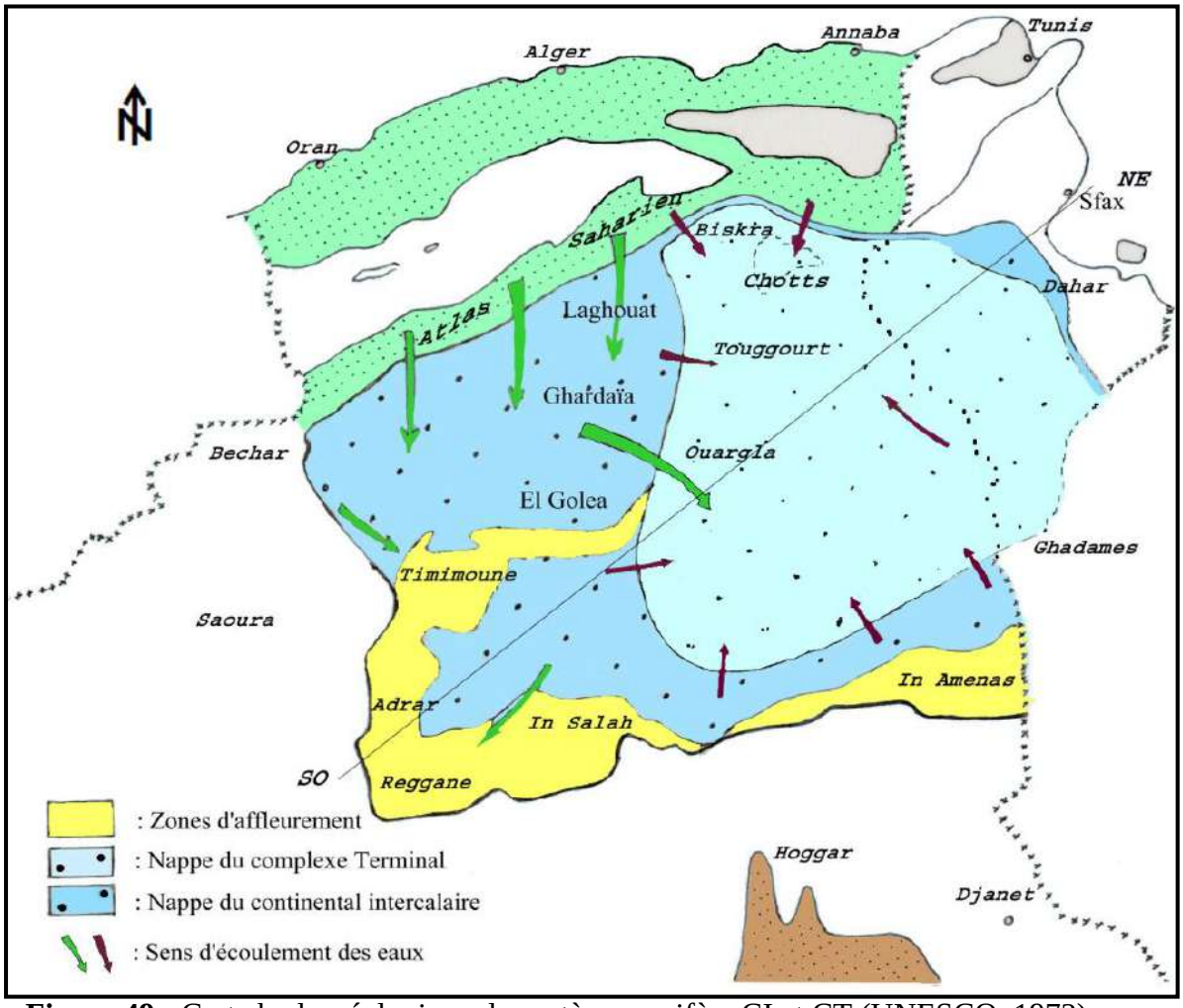


Figure 49 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972).

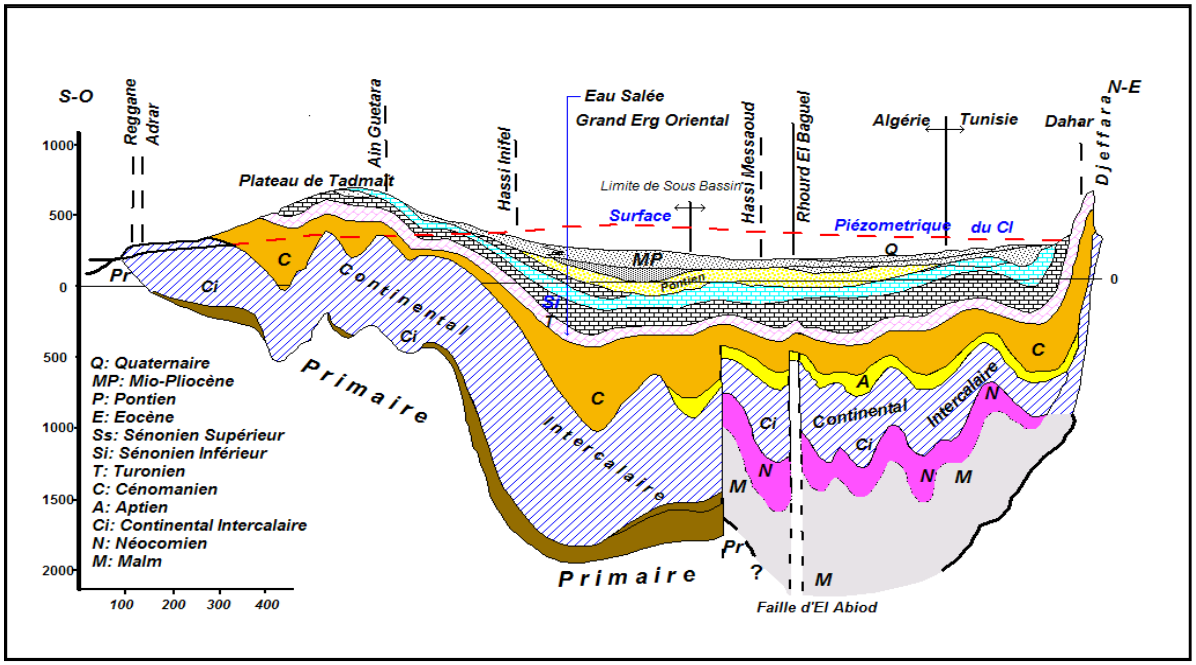


Figure 50 : Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)

Les failles de la dorsale d'Amguid (Figure 49 et Figure 50) sont à l'origine d'une drainance verticale, préalablement signalée, des eaux du CI vers la nappe du CT (Guendouz, 1985, Edmunds et al, 2003 ; Moulla et al, 2002 ; Guendouz et al, 2003), ce qui explique l'anomalie piézométrique observée sur la carte.

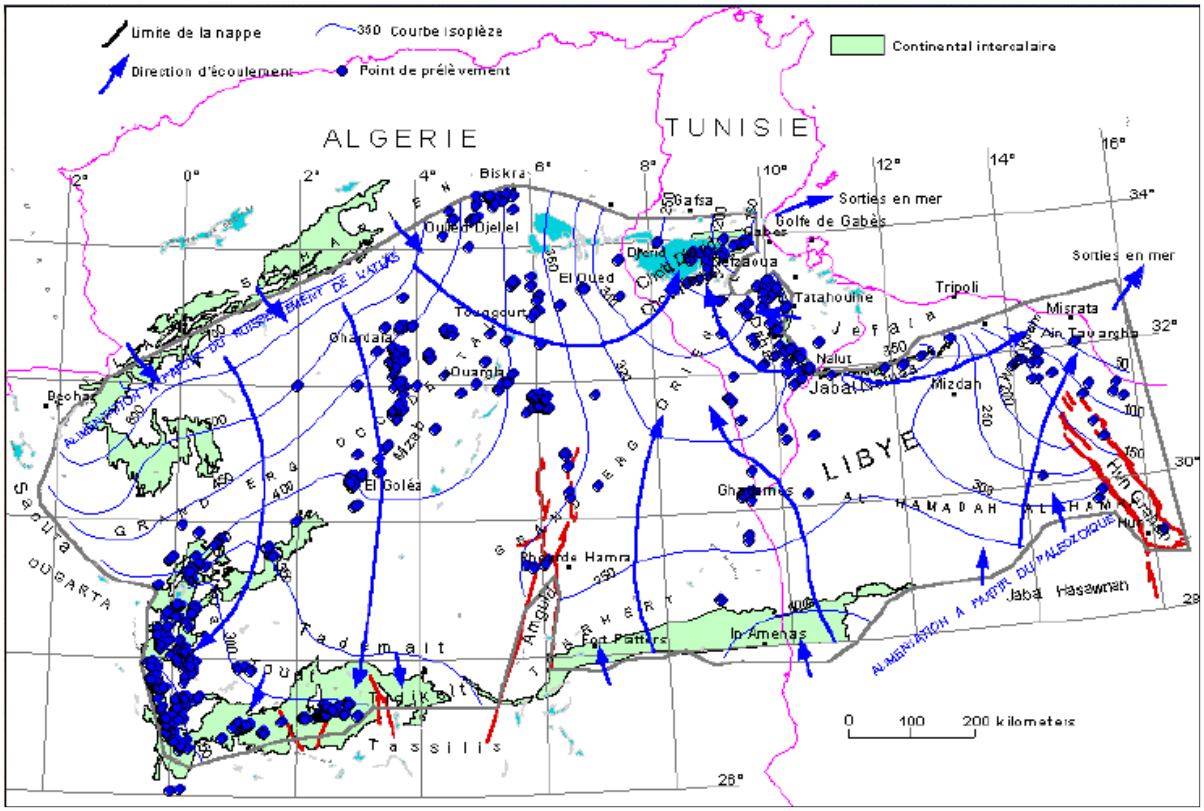


Figure 51 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)

4.2.2. Le Complexe Terminal

Pour Kilian, (1931), le terme « Continental terminal » désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-pliocène, alors que, pour Bel et Dermagne (1966), ce terme représentait toute la série allant du Cénomanien au Mio-Piocène. Le Complexe Terminal est, quant à lui, un ensemble assez peu homogène (Busson, 1970 ; Fabre, 1976), incluant les aquifères du Sénonien, de l'Eocène et du Mio-pliocène, d'une même unité hydrogéologique multicouches (Bel et Cuche, 1969 ; UNESCO, 1972 ; OSS, 2003). Les communications inter nappes sont évidentes sur l'ensemble du bassin (Figure 49 et 50).

Dans le bassin occidental, entre le M'zab et la Saoura, à l'exception de la zone située immédiatement au Sud de la flexure saharienne, on constate que la nappe du Complexe Terminal est en liaison étroite avec la nappe du Continental Intercalaire par l'absence de formations intermédiaire entre les sables de cette dernière et les sables du Mio-Pliocène.

Dans le Sud-Ouest, sous le plateau du Tademaït, cette nappe est peu importante et même parfois absente. Dans le bassin oriental, la nappe s'étale sur près de 350 000 Km^2, et limitée à l'Ouest par la dorsale du M'zab, au Nord par l'accident majeur de l'Atlas saharien, à l'Est par le Dahar, au Sud par la ligne passant au Nord de l'axe de In Salah-Zarzaïtine sous l'Erg Oriental. Elle présente un intérêt majeur comme formation aquifère indépendante ; car la communication des eaux de ladite nappe entre le bassin oriental et le bassin occidental parait peu importante (UNESCO, 1972, 1972).

Le Turonien, à la base, le Sénonien, l'Eocène et le Mio-Pliocène sont avec le Quaternaire les dernières formations déposées au Bas-Sahara. Elles couvrent la majeure partie du territoire saharien septentrional. Elles sont caractérisées par l'absence de déformations tectoniques importantes, et les surfaces qui les limitent sont quasi horizontales ou ont de très grands rayons de courbure. Selon (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972, 1972), elles abritent trois aquifères à importance variable

L'observation de la carte piézométrique de référence (à l'état stationnaire) du Complexe Terminal, établie, également, par OSS (2003a et b), sur la base des travaux de Bel et Cuche (1969), le Projet UNESCO, 1972 (1972c), Levassor (1975), Pallas (1978), Srivastava (1981), et Mamou (1990). Cette (Figure 51), montre que les zones d'alimentation de la nappe proviennent de :

1- l'Atlas saharien au Nord-Ouest ;
2- le Dahar à l'Est ;
3- le J. Nafusa au Nord-Est ;
4- le Tinrhert au Sud.

Les zones d'exutoires sont principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisiens et sur le Golfe de Syrte.

A l'échelle du bassin oriental, le **Turonien** calcairo-dolomitique est un aquifère étendu. Elle est plus individualisée sous la couverture imperméable du Sénonien lagunaire, mais ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Mio-pliocène sur la bordure du bassin. Il est imperméable (marnes) dans l'extrême Nord du Sahara oriental.

Le **Sénonien et l'Eocène** carbonatés forment un seul ensemble litho-stratigraphique, de nature calcaire, dont l'épaisseur varie de 50 à 250 mètres. Sa fissuration secondaire lui confère des propriétés hydrogéologiques intéressantes.

Le **Mio-Pliocène** est une formation entièrement aquifère, exploitée un peu partout dans le Sahara septentrional, d'une épaisseur qui augmente de 50 à 100 mètres dans la direction Sud-Ouest / Nord-Est. La partie supérieure de cet aquifère est difficile à schématiser, suite au changement rapide du faciès ; plus argileux à l'intérieur du bassin. C'est ainsi qu'au niveau de l'oued Rhir septentrional, deux unités aquifères lenticulaires ont été reconnues et individualisées au Mio-Pliocène, suite au changement lithologique ; une première et une deuxième nappe, situées respectivement à 40 et 130 mètres de profondeur. Les niveaux argileux et la topographie, confèrent aux deux nappes un artésianisme dans le fond de la Vallée.

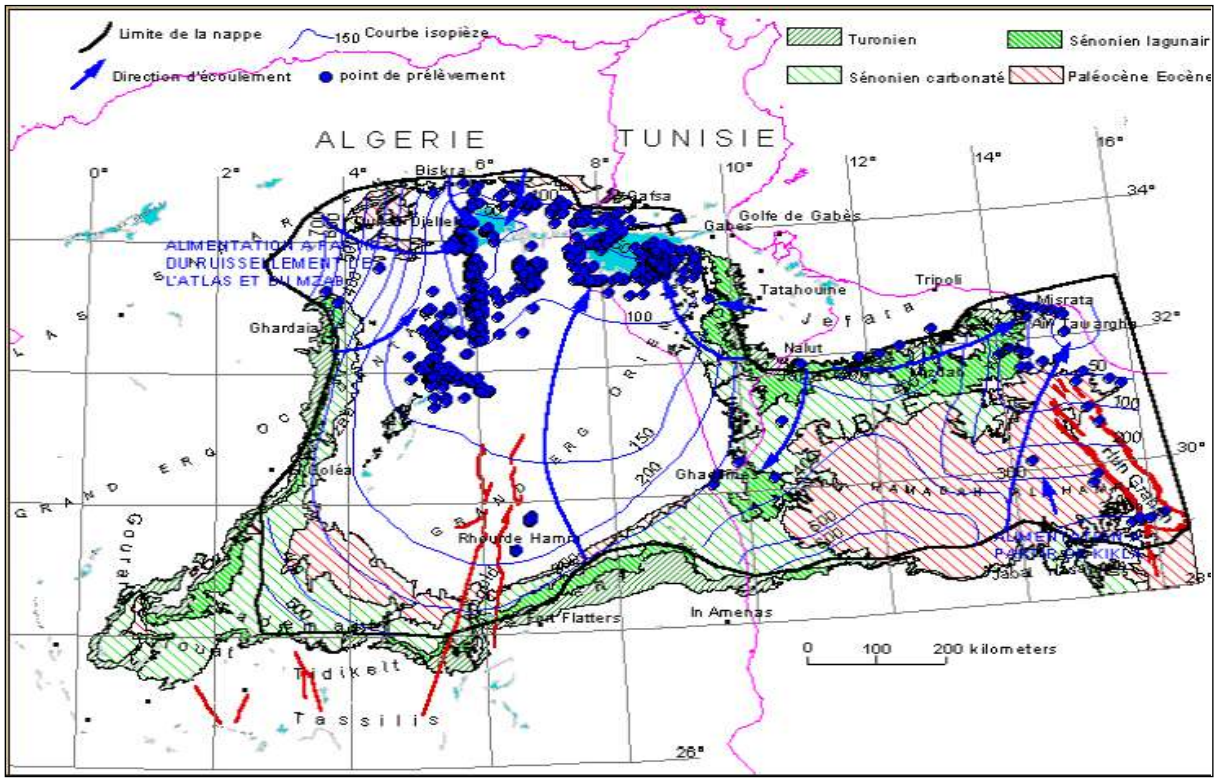


Figure 52 : Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003)

L'écoulement des eaux de la nappe du CT s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental : Melrhir, en Algerie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celle du Continental Intercalaire (UNESCO, 1972)

Le Mio-Plio-Quaternaire, de faciès sableux et argileux avec du gypse, renferme des nappes phréatiques héritées des périodes pluvieuses du pléistocène inférieur. Il résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts (BUSSON, 1970). Le sens d'écoulement de ces nappes est orienté parallèlement avec celui de la nappe du CT

3.2.3 Le contexte hydrogéologique local

A l'échelle de la zone d'étude, trois aquifères (Cornet, 1964. ANRH, 2004, 2004) utilisables à des fins urbaines et agricoles, de bas en haut nous avons (Figure 53) :

- Les grès et argiles sableuses du CI avec la nappe dite de l'Albien ;
- Les calcaires avec la nappe du Sénono-Eocène carbonatés ;
- L'ensemble détritique (sables, argiles et évaporites) des formations continentales avec la nappe du Mio-Piocène ;
- Une nappe libre (phréatique), contenue dans les sables fins argileux et gypseux du Quaternaire.

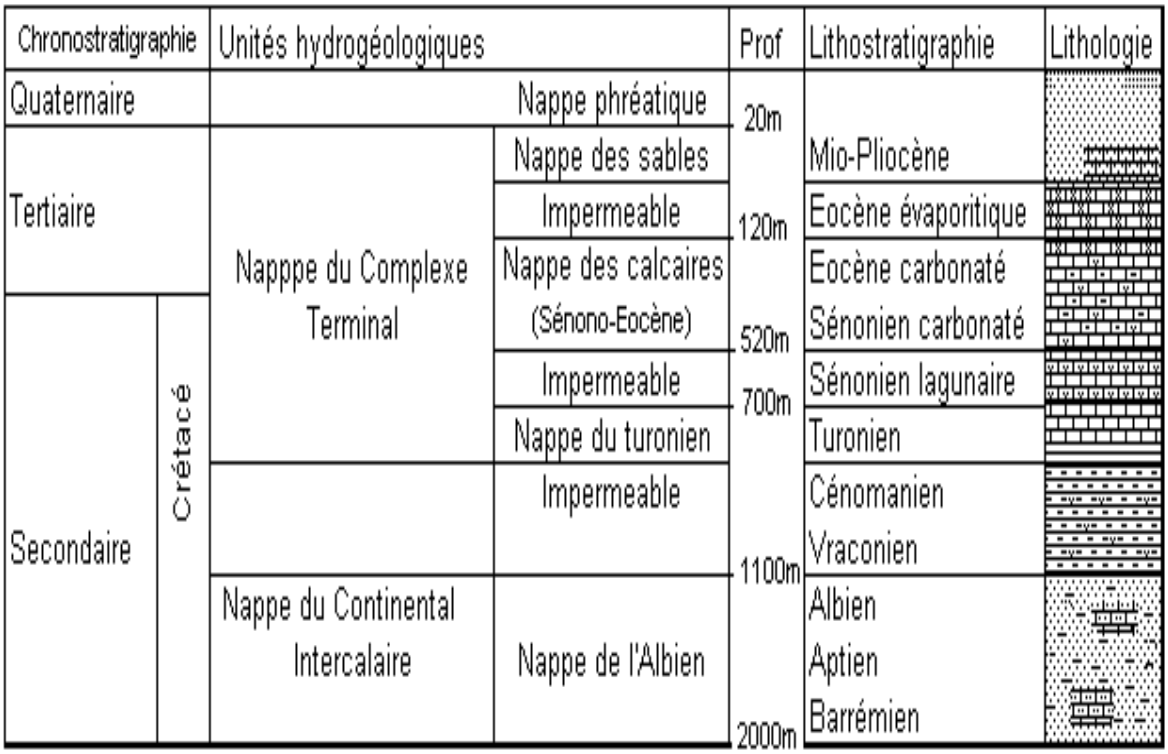


Figure 53 : Logs stratigraphiques des forages d'eau à l'Albien (ANRH, 2004)

La nappe de l'Albien :

La nappe est située à une profondeur de 1100 à 1400 mètres, avec une épaisseur utile près de 640 mètres, et constituée de grès fins, gris, à ciment argileux, parfois dolomitiques, avec intercalation de marnes dolomitiques et argiles sableuses. La nappe est jaillissante et exploitée par des forages destinés à l'A.E.P.

La nappe du Sénono-Eocène

La nappe se situe entre 120 et 200 mètres en profondeur. Elle est formée de calcaires poreux à silex très coquilliers, gris jaunâtre, à intercalation de marnes blanches et dolomitiques. Les eaux de la nappe sont exploitées essentiellement pour l'A.E.P.

La nappe du Mio-Pliocène (nappe des sables)

A une profondeur allant de 20 à 100 mètres, la nappe du Mio-Pliocène est constituée de sables fins à grossiers graveleux, à intercalation de calcaires blancs tendres et marnes sableuses, d'argiles sableuses roses et passées de grès et de gypses. L'exploitation de cette nappe, remonte à une époque lointaine, par des puits traditionnels. Actuellement, plusieurs centaines de forages creusés sont exploités pour l'irrigation des palmeraies et des cultures sous-jacentes.

La nappe superficielle (phréatique)

La nappe est présente partout à l'échelle de la région. Son épaisseur varie de 1 à 8m et repose sur un niveau imperméable étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d'Ouargla. Sa frange capillaire surgie souvent sur la surface du sol sous forme de chotts qu'on trouve de part et d'autre de la ville de Ouargla. Elle est relativement profonde dans les points de haute topographie (Ergs), et moins profonde dans les zones à proximité des palmeraies irriguées. Les eaux de rejets urbains et agricoles (palmeraies) maintiennent des niveaux piézométriques très élevées par rapport à la topographie du terrain, s'exprimant par une remontée de la nappe en surface (Lelièvre, 1969 ; Idder, 1998 ; BG, 2004 ; Nezli, 2007).

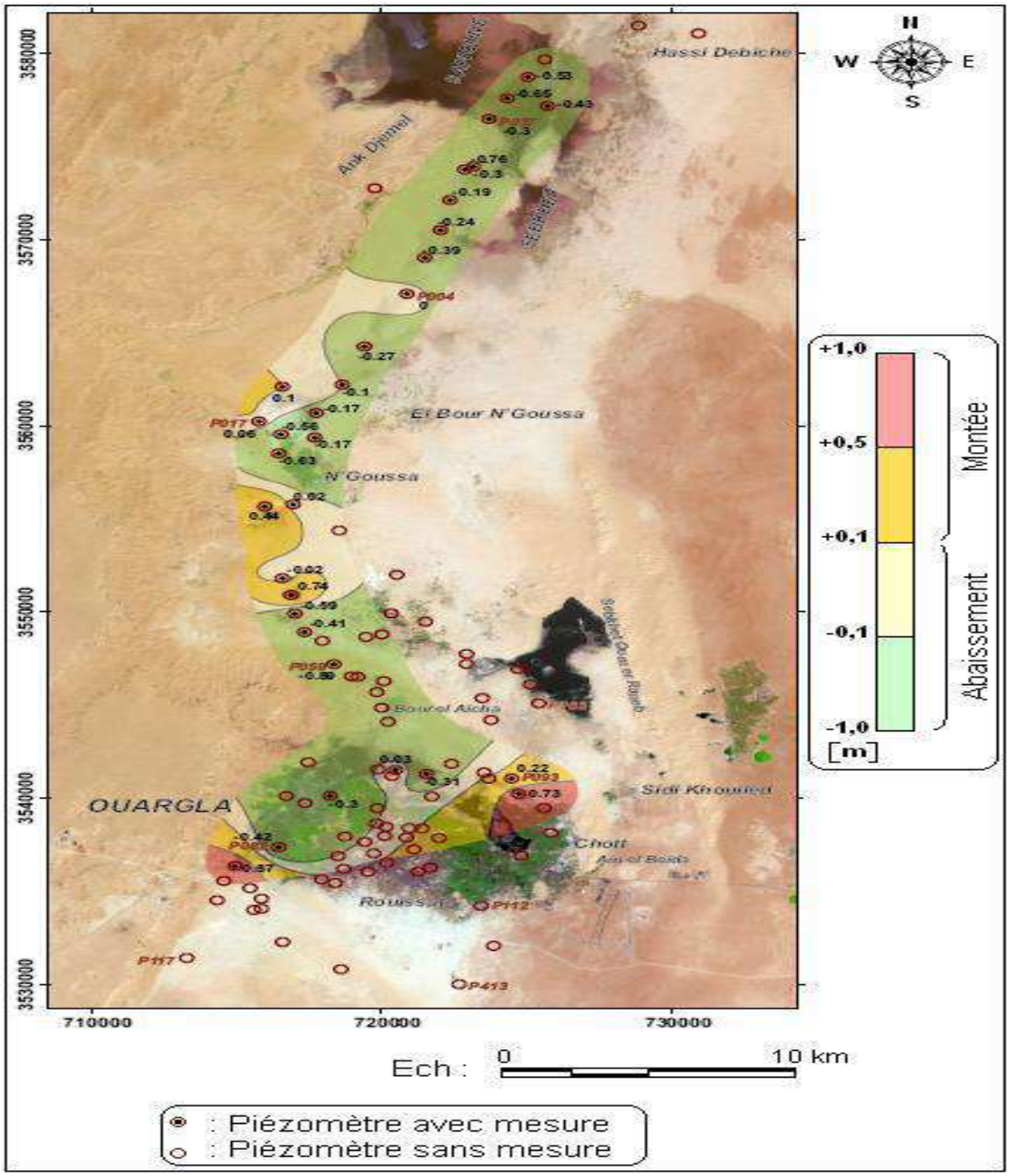


Figure 54 : Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique Dans la cuvette de Ouargla, période 1992-2002 (BG, 2004)

Le bilan hydrique de la nappe superficielle (phréatique), ou évaluation du débit d'alimentation et d'exhaure. Ce bilan a été établi par le bureau d'Etudes Lausannois B&G (Bonnard & Gardel) (2004), et Bellaouer (2008) a montré que l'eau, recueillie par la nappe phréatique à l'échelle de la zone de concentration de l'agglomération de Ouargla (10327,5 ha), est de l'ordre de 31760000 m^3/an lui arrive par :

1- Écoulements naturels,

2- Précipitations atmosphériques

3- Débits que produisent les forages du CI et du CT.

Alors que le débit d'exhaure, évalué à 31708800 m^3/an, a comme origine :

1- Le pompage des eaux d'assainissement, urbaines et agricoles, vers l'exutoire d'Oum Erraneb

2- L'évapotranspiration des végétaux ;

3- L'évaporation à l'air libre dans la Sebkha et le Chott

4- L'écoulement naturel des eaux de la nappe vers le Nord.

L'eau, aussi bien dans les agglomérations, dans les palmeraies et dans les sebkhas se trouve proche de la surface du sol, est exprimée convenablement par le solde positif de la réserve (ΔQ) tel que : **ΔQ = + 51 200 m^3/an.**

Cette étude avait conclu que la station de pompage de Chott et les canaux de drainage en bon état de fonctionnement permettent de régler le niveau d'eau dans les zones inondées.

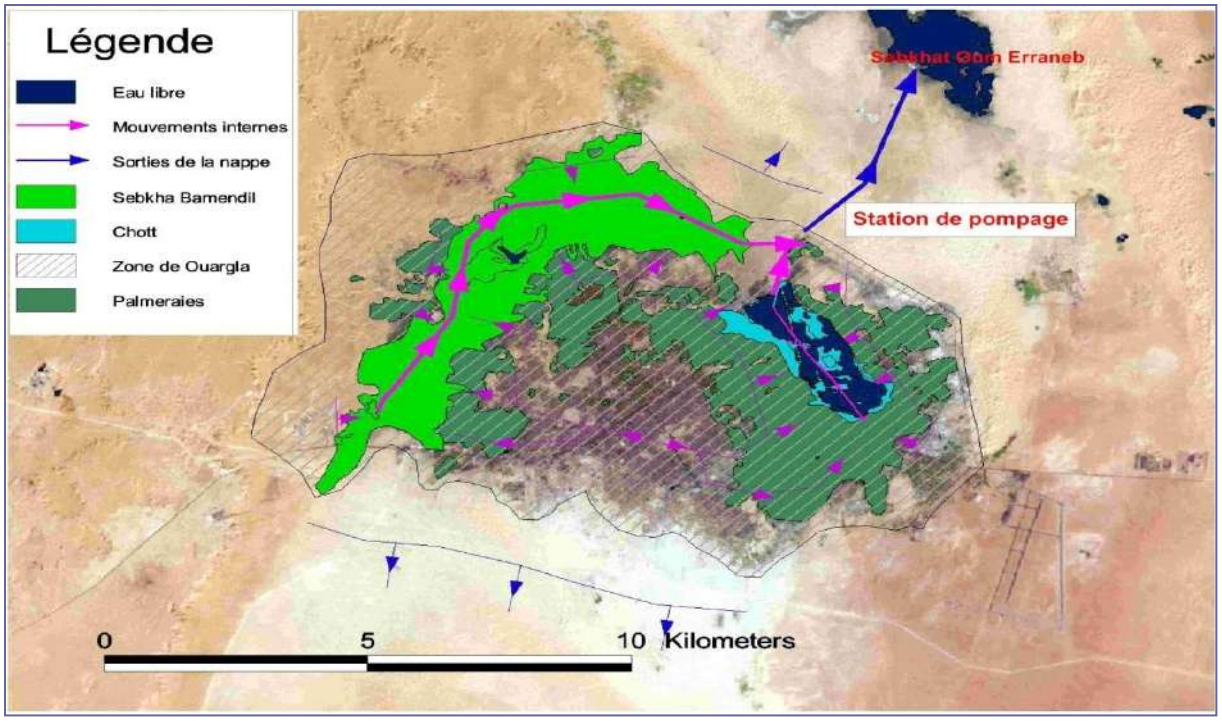


Figure 55 : Schéma illustratif pour résoudre le problème de la remontée des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla d'après BG (2004)

4.3. Discussion

L'hydrogéologie de la zone d'étude est caractérisée par la présence des aquifères profonds, qui ont des potentiels d'eau considérable. Les aquifères majeurs de la région Al Qassim sont Celle de Saq, Qassim et Khuff, la plus important est de Saq, avec une superficie d'environ 452 000 km². La région de Ouargla possède aussi des aquifères énormes qui sont classé parmi les plus

grande au monde, en premier le CI et en deuxième CT, la superficie totale de système SASS est plus que le double de Saq, qui est environ de 1000 000 Km^2 partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Ces systèmes aquifères multicouche présentent une succession de formations ayant des propriétés hydrodynamiques distinctes, c'est-à-dire une alternance de couches perméables, semi-perméables et imperméables, les aquifères majors de Saq, Qassim et Khuff sont contenue dans les formations Paléozoïques, alors que l'aquifère de Ouargla le CI est contenu dans les formations mésozoïques et CT dans les formations Crétacé supérieur et tertiaire. D'autre part les principales formations aquifères à Al Qassim s'affleure sur surface, par contre les formations aquifères de mésozoïque de CI ne sont pas exposées en surface, il n'y a que quelques formations de tertiaire supérieur de CT qui expose en surface. Ces ressources aquifères sont inrenouvelables à cause de la disparition et changement de conditions climatiques dans lequel ils ont été créé (Les deux aquifères proviendraient d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur et de l'Holocène), l'estimation de recharge est une étape importante pour la gestion optimale, à Al Qassim la recharge se fait aux affleurements au Sud du bassin, elle a été estimée actuellement entre 0.9×10^9 à 1.1×10^9 m^3/an dans la zone de Saq (D'après BRGM, 2008). Au SASS La recharge actuelle n'étant que de 1×10^9 m^3/an (Ould Baba Sy, 2005). L'âge des eaux du Saq est estimée à environ de 15000 à 20 000 ans, à la région Ouargla, l'âge des eaux des différentes nappes du SASS est de 500 ans aux zones de recharge (les eaux sont jeunes), et arrivent jusqu'à 40000 ans dans les parties confinées des aquifères.

5. Contexte hydrochimique

5.1. Hydrochimie des eaux des aquifères profonds

5.1.1. La région Al Qassim

Dans cette partie, on va présenter une synthèse bibliographique des résultats de travaux concernant les principales caractéristiques physicochimiques des eaux des différentes nappes aquifères à l'échelle régionale (La zone de Saq au nord-est de KSA) et locale (Al Qassim). On base sur l'étude fait par Abdulaziz M. Al-Bassam 2006, qui a étudié l'évolution de la qualité des eaux souterraines de principaux aquifères dans la région Al Qassim. Il a utilisé les techniques statistiques multivariées, à l'aide de l'analyse en grappes et l'analyses des facteurs aux données sur la qualité des eaux.

a- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Les pH des eaux des principaux aquifères ; l'aquifère de grès Saq, l'aquifère des membres de Grès de Qassim (Kahfah et Quwarah – Sarah) et l'aquifère de calcaire Khuff montrant une

homogénéité et proches de la neutralité à légèrement alcalins, les valeurs des centres de grappes de pH pour les trois aquifères varie entre 6,98 à 7,07.

b- La conductivité électrique (CE)

L'eau peut être considérée comme une solution électrolytique, car presque tous ses constituants dissous, majeurs et mineurs, sont présents sous forme ionique. Grâce à la présence de ces ions, l'eau devient susceptible de se laisser traverser par un courant électrique (la salinité).

A les échelle régional les eaux de l'aquifère du grés Saq ont une conductivité électrique (CE) varie entre 284 à 9902 µS/cm, avec une valeur moyenne de 1599,4 µS/cm, Environ 31% des échantillons dépassant la limite maximale admissible de 1599.4 µS/cm (Yousef Nazzal et al, 2014). Les valeurs les plus bases sont vu au nord-ouest, CE est de 1000 au maximum dans la majorité des puits. La conductivité électrique des eaux de Saq à la région de Al Qassim varier entre 1000 à 2000 µS/cm dans plupart des puits (figure 56), et peut attendre jusqu'au 5000 µS/cm dans les zones d'affleurements (BRGM 2008). Dans la région Al Qassim, l'eau souterraine de Saq est connue pour sa meilleure qualité., la minéralisation moyenne des eaux de Saq est de 670 mg/l (Abdulaziz M. Al-Bassam 2006).

Dans la région Al Qassim, les aquifères de membres de grès de Qassim sont caractérisé par une conductivité électrique moyenne égale à 2000 µS/cm, alors que l'aquifère de Khuff a enregistré une valeur moyenne de 4200 µS/cm. La minéralisation totale dépassant les normes de la potabilité, soit 1000 mg/l (OMS, 1994), on a une valeur moyenne de minorisation égale à 1600 mg/l pour les membres aquifères de Qassim, et l'aquifère Khuff a enregistré une minéralisation élevée de 4g/l (Abdulaziz M. Al-Bassam 2006).

c- Faciès chimique

La composition chimique des eaux souterraines est généralement affectée par certains nombres de facteurs, dont les plus importants sont : la géologie de l'aquifère présenter aux types de roches dans la zone, le degré d'altération chimique des types de roches, l'interaction entre les eaux souterraines et le matériel aquifère, les apports provenant de autres sources que l'interaction de la roche de l'eau, et l'influence des activités anthropiques dans la région (l'agriculture, industrie…etc.).

Pour faire une telle classification, Nous avons plusieurs méthodes disponibles. La plus simple est probablement d'utiliser la formule ionique de STABLER, qui consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale de l'eau. La formule

$$r\ \% = (100/c) \times r$$

Avec : r : est la quantité en réaction de l'ion considéré en meq/l ; c : la concentration totale.

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant, on obtient les différents faciès chimiques des eaux étudiées.

D'après le BRGM, dans la zone Saq au nord-ouest de l'Arabie Saoudite, les faciès chimiques généraux sont le sulfato-calcique (Ca-SO_4) et le chlorure-sodique (Na-Cl). Cependant, trois groupes de profils d'eau sont identifiés :

- Un groupe sulfato-évaporitique ne comprenant que l'aquifère de Khuff. L'origine de ce faciès ne peut pas être liée à la Formation de Khuff car elle est essentiellement composée de calcaire. Elle doit être liée au faciès lithologique des strates dans les formations sur et sous-jacentes.
- Un groupe mixte sulfate et chlorure (dominant) comprenant STQ, Quwarah – Sarah et Saq.
- Un groupe mixte sulfate, chlorure et bicarbonate comprenant les roches Jubah – Jauf, Tawil, Kahfah.

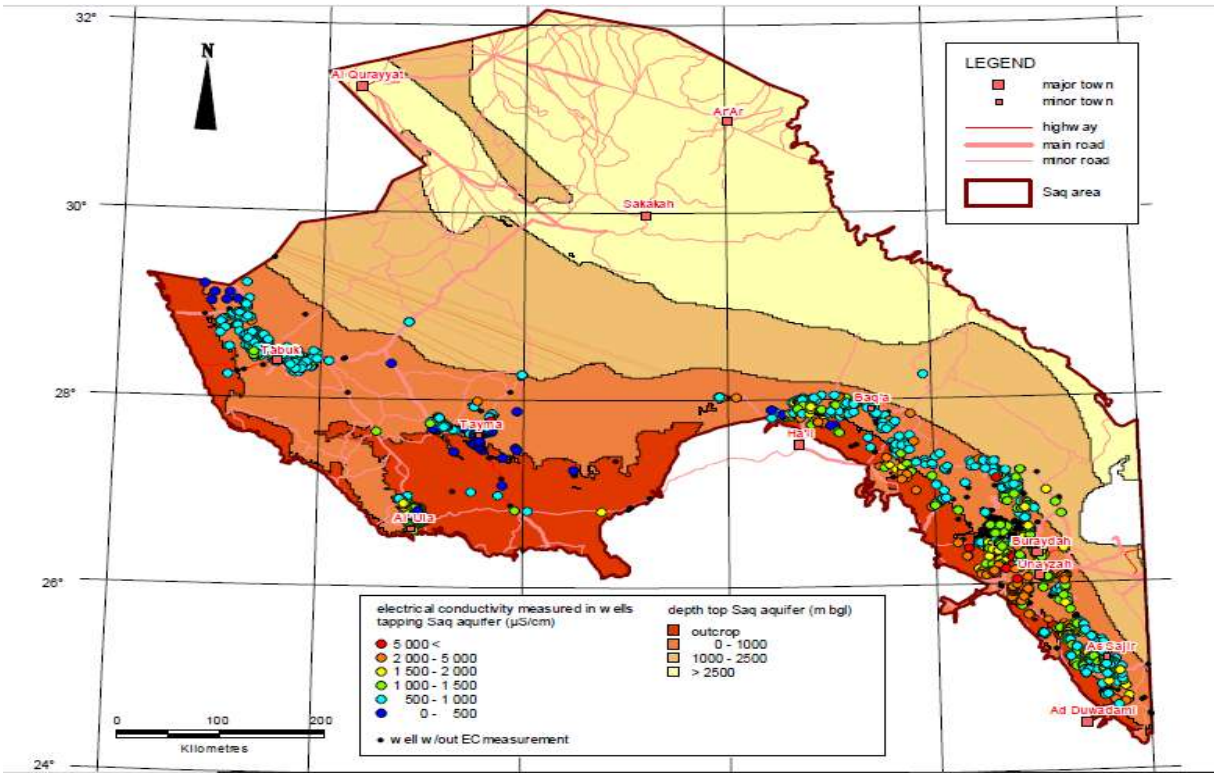


Figure 56 : la profondeur et de l'aquifère Saq et la conductivité électronique des eaux à l'échelle régional (BRGM 2008).

La classification des faciès des eaux souterraines, qui a été effectuée à l'aide du diagramme de Piper à l'échelles régional de l'aquifère Saq (figure 57), montrant qu'il y a une tendance d'enrichie un mélange de cation de sodium (Na), et de calcium (Ca), et un mélange d'anion de chlorure (Cl), et de sulfate (SO4) (Yousef Nazzal et al, 2014).

Le faciès chimique des eaux de l'aquifère du Saq et les aquifères de membres de grès de Qassim à la région Al Qassim est chlorure-sodique (Na-Cl) (Abdulaziz M. Al-Bassam 2006). Ces eaux sont caractérisées par la formule ionique est :

$$(rCl > rSO_4 > rHCO_3 > rNO_3 \text{ et } rNa > rCa > rMg > rK^+)$$

Pour l'aquifères Khuff le faciès chimique dominant est le sulfato-sodique (Na-SO_4). Sa formule ionique est : ($rSO_4 > rCl > rHCO_3 > rNO_3$ et $rNa > rMg > rCa > rK$)

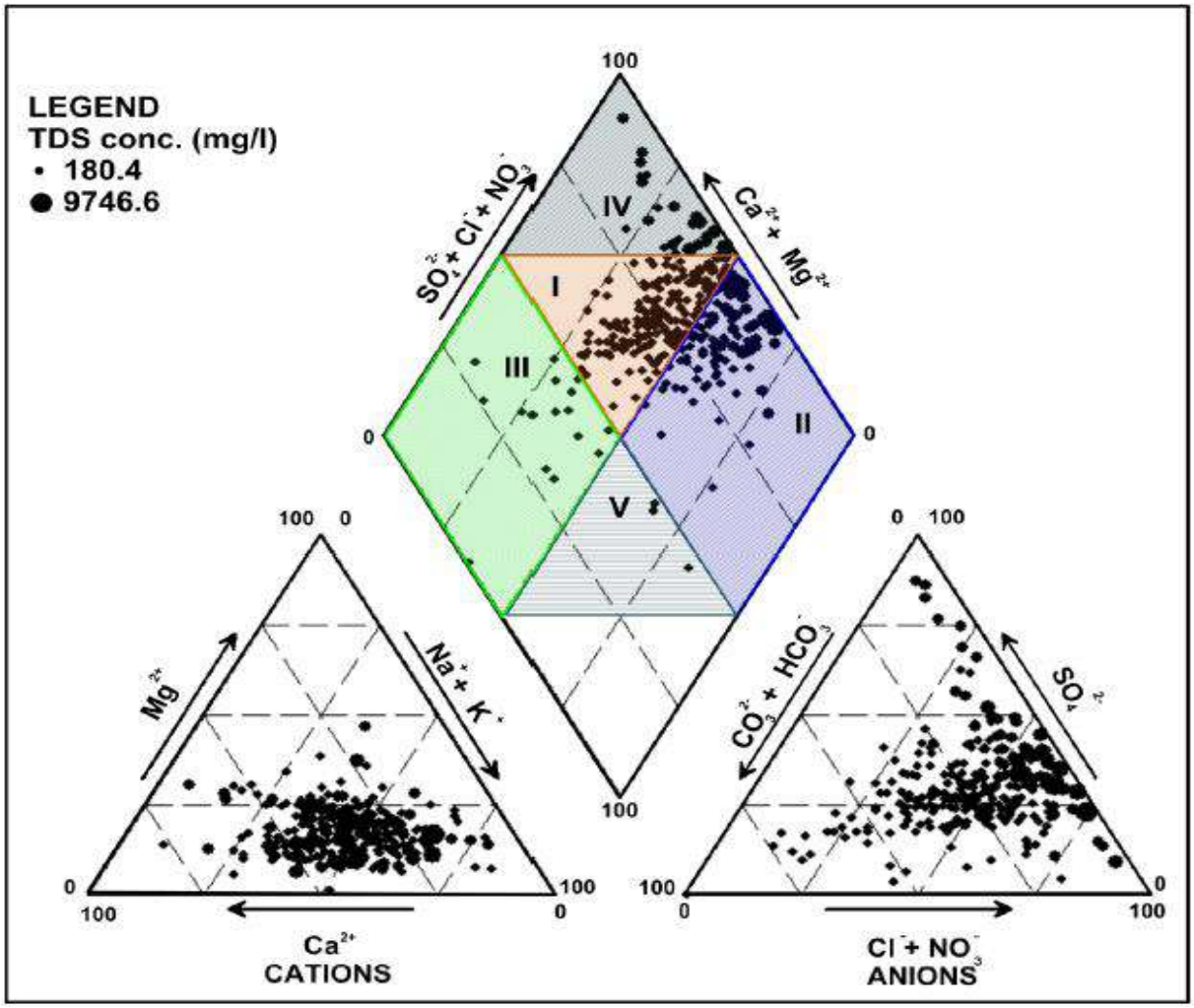


Figure 57 : Diagramme de Piper. Classification des faciès chimique des eaux de Saq au nord-ouest de l'Arabie Saoudite (Yousef Nazzal et al, 2014).

5.1.2. La région de Ouargla

a- Température (T°)

La température des eaux des nappes profond, Bien qu'elles dépassent légèrement les températures recommandées par l'OMS (22-25°C), les eaux des deux niveaux aquifères de la nappe du Complexe Terminal, sont relativement homogènes, et ne présentent pas de grandes variations, leur température moyenne est de 25.74°C pour la nappe Moi-pliocène, et 27.33°C

pour la nappe Sénono-Eocène dans les eaux du Sénono-Eocène, et de 2.09 dans les eaux du Mio-Pliocène. Située à une profondeur qui varie entre 1309 et 1545 m dans les forages échantillonnés, la nappe albienne présente des températures, légèrement élevée, avec une valeur moyenne de 47.94°C (Nezli 2009).

b- Conductivité électrique (CE)

Les conductivités électriques des eaux du CT et CI dépassent les normes (>1000 $\mu S.cm^{-1}$) de potabilité de l'OMS, voir supérieure 2500 $\mu S.cm^{-1}$, et communiquent une minéralisation excessive. La minéralisation moyenne des eaux est proche de la minéralisation naturelle des eaux chaudes albienne (entre 3000 $\mu S.cm^{-1}$ et 4000 $\mu S.cm^{-1}$). De variations horizontales et verticales (Nezli 2009).

c- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH, mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il détermine ainsi l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. La balance entre acide et base sur une échelle est de 0 à 14, alors que le pH de neutralité est 7. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, entre autres, la température et l'origine de l'eau.

Les pH des eaux des nappes du **Continental Intercalaire (CI)**, du **Complexe Terminal (CT)** et phréatiques demeurent homogènes et proches de la neutralité à légèrement alcalins. CI et CT possèdent pH variant entre 7.27 à 8.47. La plupart des eaux présentent aussi un caractère alcalin bicarbonaté du fait que le pH est souvent inférieur à 8,3. (Edmunds et al, 2003 ; Bouchahm et al, 2008 ; Nezli 2009).

d- Faciès chimique

La lithologie des aquifères de Sahara septentrional est riche en éléments évaporitiques (Cl^-, Na^+, K^+, SO^{2-}_4, et Ca^{2+}), leurs eaux souterraines sont caractérisé par la dominances des faciès chlorure et/ou sulfate : ($rCl > rSO_4 > rHCO_3$ > et/ou $SO_4 > rCl > HCO_3$) par les anions, et pour les cations, il y a pas de cation dominant. Il y a plusieurs processus hydrogéochimiques peuvent intervenir, pour rendre les eaux, tantôt calciques, tantôt sodiques et aussi magnésiennes parfois (Schoeller, 1962).

Les eaux de l'aquifère du **Continental intercalaire (CI)** dans le Sahara septentrional algéro-tunisien ont une faciès sulfaté chloruré sodique (Edmunds et al, 2003). À Ouargla le faciès est chloruré sulfaté calcique et magnésien : ($rCl > rSO_4 > HCO_3$ et $rCa > rMg > rNa$) ; (Bouchahm et Achour, 2008). À El Oued Souf, les eaux sont sulfatées chlorurées calciques et magnésiennes : ($rSO_4 > rCl > HCO_3$ et $rCa > rMg > rNa$) ; (Bouchahm et Achour, 2008).

A Biskra, les eaux ont un faciès sulfaté sodique et/ou calcique : ($rSO_4 > rCl > HCO_3$ et $rNa > rCa > rMg$) et ($rSO_4 > rCl > HCO_3$ et $rCa > rNa > rMg$) ; (Bouziane et Labadi, 2009).

Les eaux de l'aquifère du **Complexe terminal (CT),** ont un faciès chimique, fréquemment, variable et corrélatif à leur grande hétérogénéité lithologique verticale et horizontale. Les eaux de la nappe des sables à une tendance vers le faciès sulfaté calcique en amont : ($rSO_4 > rCl > rHCO_3$ et $rCa > rNa > rMg$), et le faciès chloruré sodique vers l'aval : ($rCl > rSO_4 > rHCO_3$ et $rNa > rCa > rMg$) (Guendouz et al, 2003).

À l'échelle de Ouargla, les eaux des sables Moi-pliocènes sont du type: chlorurées et sulfatées calciques et magnésienne : $rCl > rSO_4 > rHCO_3$ et $rCa > rMg > rNa$, avec une tendance vers le faciès chloruré sodique et sulfaté calcique (Bouchahm et Achour, 2008).

Quant à la nappe des calcaires, les eaux acquièrent leur faciès des évaporites, plus solubles, de la matrice aquifère, qui est sulfaté chloruré sodique et/ou calcique : $rSO_4 > rCl > rHCO_3$ et $rNa > rCa > rMg$, ou bien : $rSO_4 > rCl > rHCO_3$ et $rCa > rNa > rMg$ (Bouchahm et Achour, 2008). Le faciès des eaux de la nappe du Sénono-Eocène carbonaté à Ouargla est du type : sulfaté sodique et calcique (Bellaouer, 2008).

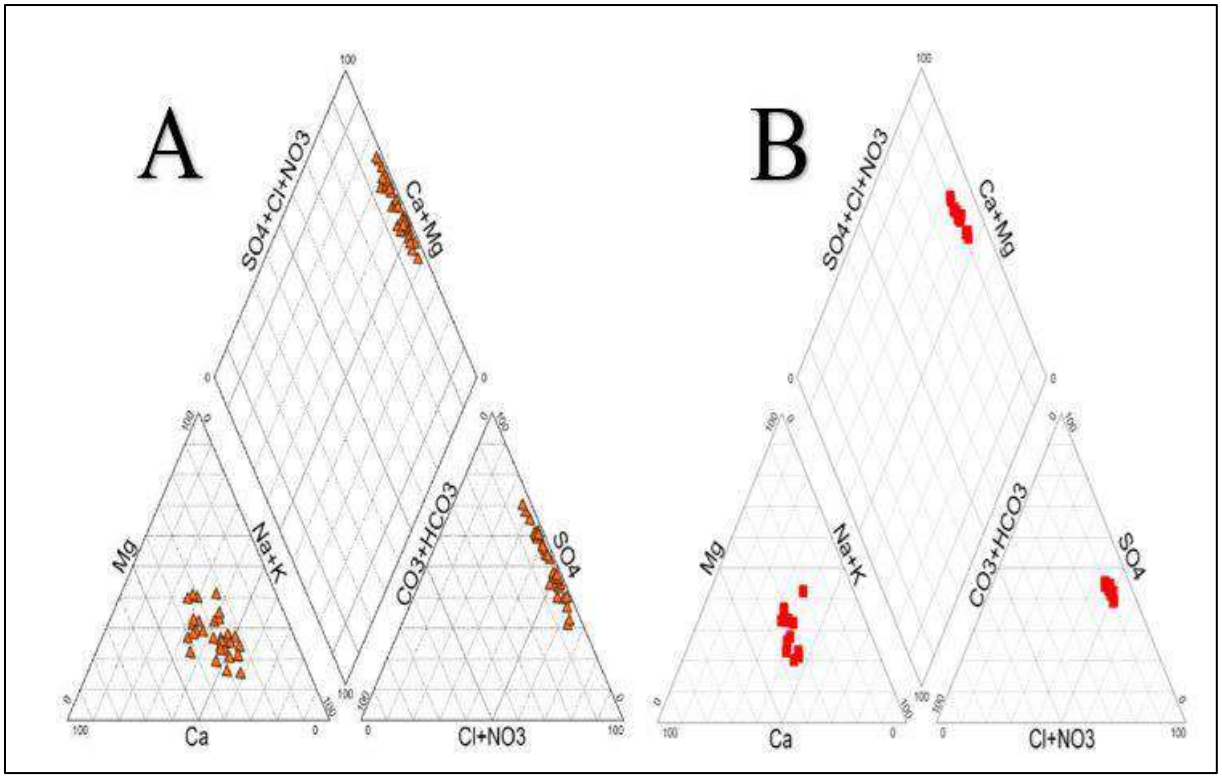


Figure 58 : A : Diagramme de Piper des eaux de Moi-pliocène du Sahara septentrional (HOUARI I M 2011)
B : Diagramme Piper des eaux de la nappe de l'Albien (Nazli 2009)

5.1.3. Discussion

A l'échelle générale la qualité des eaux des aquifères dans les deux régions est presque de même qualité. Les eaux de Al Qassim sont proches de la neutralité à légèrement alcalins, ils présentent des valeurs entre 6.98-7.07, alors que les eaux des aquifères de Ouargla (CI et CT) sont alcalines bicarbonatées (pH < 8,3). La qualité des eaux des aquifères Saq et CI est similaire ; les eaux de Saq ont une conductivité électrique varier entre 1000 à 2000 µS/cm dans plupart des puits, et peut attendre jusque 5000 dans les zones d'affleurements, les eaux de Qassim sont caractérisées par une conductivité électrique moyenne égale à 2000 µS/cm, alors que l'aquifère de Khuff a enregistré une valeur moyenne de 4200 µS/cm de l'aquifère, la minéralisation moyenne des eaux de Saq est de 670 mg/l. La qualité des eaux à Ouargla affiche des minéralisations excessives, exprimées par des conductivités électriques oscillant entre 1500 et 3500 µS/Cm dans les eaux du CI, et allant jusqu'à 6000 $\mu S.cm^{-1}$ dans le CT. Les eaux de la zone de Saq caractérisé par des faciès chimiques généraux sont le sulfato-calcique ($Ca-SO_4$) et le chlorure-sodique (Na-Cl), alors que les eaux de CI ont une faciès chloruré calcique sulfato magnésien et les eaux de CT présente un faciès sulfaté calcique et Chloruré sodique. On peut dire que les faciès chimiques dans les deux régions sont similaires.

5.2. Hydrochimie des eaux de la nappe phréatique de Ouargla

Une compagne d'échantillonnage a été fait au mars 2015, les échantillons prélèvent de la nappe phréatique avaient analysé au laboratoire de ANRH de Ouargla. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau 8.

Tableau 10 : Variation des paramètres physicochimique des eaux de la nappe phréatique (Mars 2015)

Paramètre	Min	Max	Moyenne	Écarte type
Température (°C)	**18.3**	**23.8**	**20.9**	**1.79**
CE (µS.cm-1)	**2850**	**58900**	**13070**	**16194**
pH	**7.62**	**8.16**	**7.93**	**0.13**
Ca^{2+} (Mg/l)	**160**	**2650**	**768.8**	**849.98**
Mg^{2+}(Mg/l)	**94.7**	**1753.6**	**507.47**	**479.19**
Na^{+}(Mg/l)	**370**	**13750**	**2396.34**	**3924.21**
K^{+}(Mg/l)	**18.5**	**1120**	**178.73**	**307.27**
Cl^{-}(Mg/l)	**335**	**27750**	**4332.88**	**7715.48**
SO_4^{2-}(Mg/l)	**756**	**9850**	**2954.3**	**2601.51**
HCO_3^{-}(Mg/l)	**115.9**	**619.15**	**269.45**	**166.13**
NO_3^{-}(Mg/l)	**1**	**5**	**1.8**	**1.77**
RS (Mg/l)	**2418**	**60621**	**13132**	**16954.99**

5.2.1. Les paramètres physicochimique (mesurer in site)

a- Température (T °C)

La température de l'eau varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol. Le gradient de température géothermale est de 1°C par 33 mètres. Cela signifie que les eaux souterraines sont d'autant plus chaudes qu'elles sont profondes.

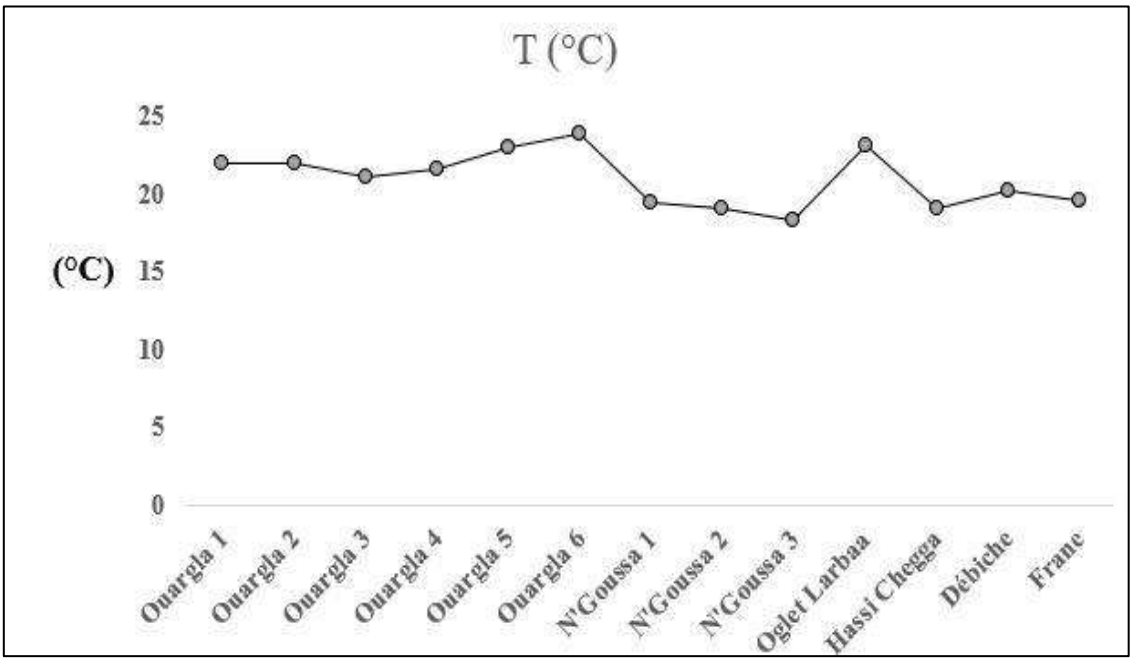


Figure 59 : Variation du Température des eaux phréatiques de Ouargla

Les eaux phréatiques ont une température plus élevée que celle des eaux du CT, surtout dans les points d'eau, où la nappe est proche de la surface du sol (dépressions, sebkhas, chotts). Elle varie entre 25°C et 37°C pendant le mois de juin (Djidel, 2009). Ces valeurs sont très proches de la température moyenne de l'atmosphère à Ouargla. Nous pouvons penser donc que l'aquifère est en équilibre thermique avec l'atmosphère. Les valeurs mesuraient au cours de notre compagne des échantillons sont : $T_{moy} = 20.9°C$, $T_{min} = 18.3°C$, $T_{max} = 23.8°C$, avec une écarte type égale à 1.79.

b- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Les valeurs de pH, mesurées dans toutes les eaux de la nappes phréatique (Tableau.), paraissent proches de la neutralité à légèrement alcalins, avec de faibles écarts types (0.13). Les eaux phréatiques possèdent des pH variants entre (7.62 à 8.16),

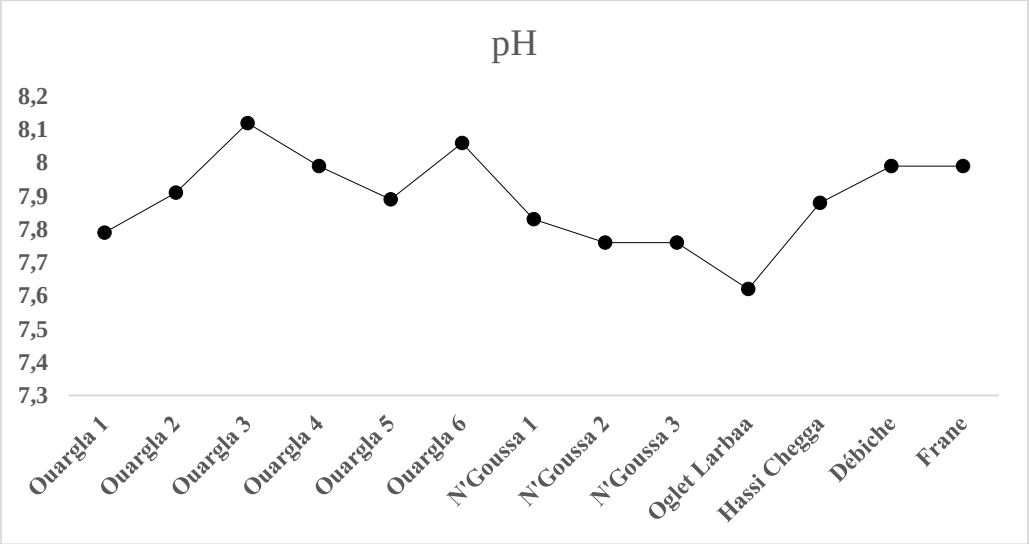


Figure 60 : Variation des valeurs de pH des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla

c- Conductivité électrique (CE)

Les conductivités des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla (Tableau 11) dépassent les normes (>1000 µS.cm^{-1}) de potabilité de l'OMS, voir supérieure 2800 µS.cm^{-1}, et communiquent une minéralisation excessive. La minéralisation moyenne des eaux est de 13070 µS/cm. avec 23% des échantillons dépassent 18 mS/cm (à N'Goussa**),** 77% des échantillons inférieur 10 mS/cm et écarts types égale 16194 µS/cm. Cette variation est due aux conditions climatiques où les hautes températures accentuent l'évaporation des eaux et par conséquence augmentent la concentration des sels solubles dans l'eau.

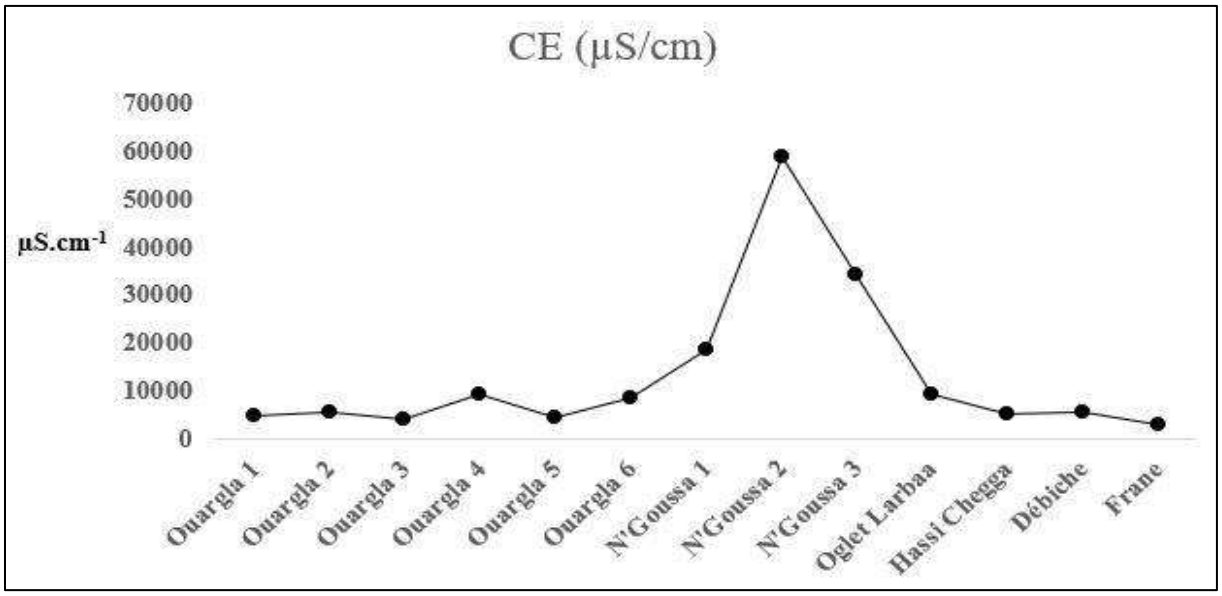


Figure 61 : Variation des valeurs de CE des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla

5.2.2. Les paramètres chimiques mesuré au laboratoire

*** Les éléments majeurs**

a- Calcium (Ca^{++})

L'origine de calcium est liée principalement à la dissolution formations géologiques carbonaté selon (l'équation 1) et gypseuses (équation 2).

$$\textbf{(1): } CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{2-} \textbf{ / (2): } CaSO_4.2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$$

Les eaux de la nappe phréatique (Tableau 08.) présentent des teneurs supérieures à 150 mg/l. Le calcium est un des paramètres qui contribuent à la minéralisation des eaux. Il en ressort que les eaux de souterraines comme celles de surface de la région d'étude, présentent des teneurs assez remarquables en calcium. Cela aurait pour origine la dissolution des formations carbonatées $CaCO_3$ du Moi-pliocène, et des formations alluvionnaires gypseuses ($CaSO_4$) du Quaternaire, situées dans les dépressions. Les résultats des analyses chimiques faites au niveau de la cuvette, montrent que les concentrations en calcium dépasse largement la concentration de 220 mg/l dans la plus parte des échantillons, sauf l'exception de Piézomètre situé à Frane qui a une valeur de 160 mg/l, voir une moyenne aux alentours de 768 mg/l. Alors que, les piézomètres situés à N'Goussa ont des valeurs dépassent 1g/l. Avec un écarte type globale égale à 849.98, Cette minéralisation élevé à N'Goussa est due au la proche de puit à la zone de Sebkha (Voire la figure 13 : P19 et P41).

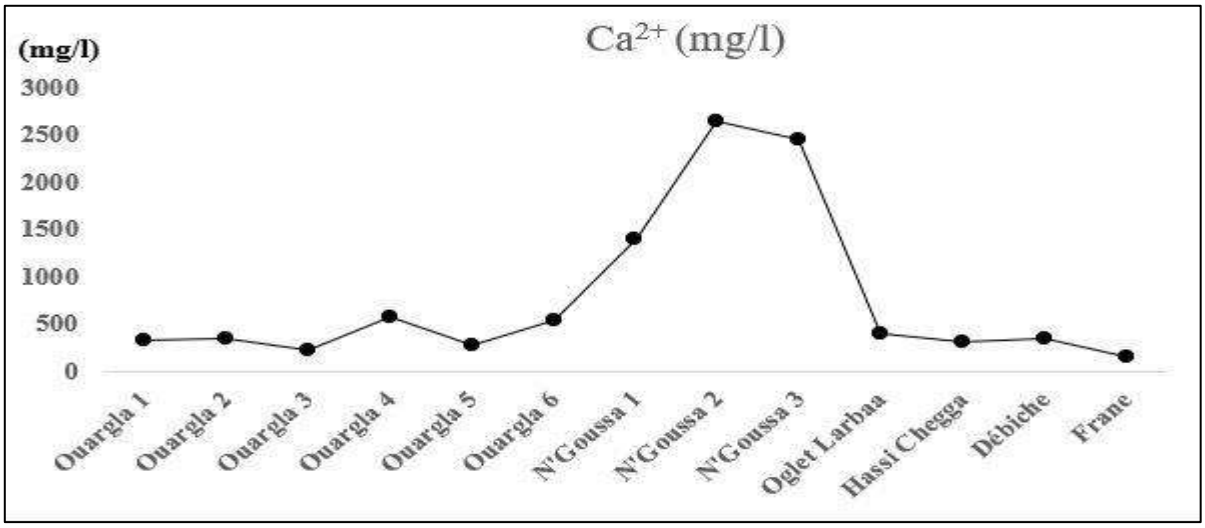


Figure 62 : Variation de la concentration de Ca^{2+} des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla

b- Magnésium (Mg^{++})

Le magnésium provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium en l'occurrence ; la Dolomite selon la relation (3), Soit des formations salifères riches en magnésium « $MgSO_4$ ».

$$(3): CaMg.(CO_3)_2 = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$$

Les concentrations en magnésium des eaux souterraines varient entre 94.4 mg/l (Frane) et 1753.6 mg/l (N'Goussa). Alors que 77% des échantillons ont des concentration inferieur de 550 mg/l. l'écarte type de 479.19. Deux piézomètres situent à N'Goussa enregistrent les valeurs le plus élevés que dépasse 1g/l à cause de leurs proximités au Sebkha.

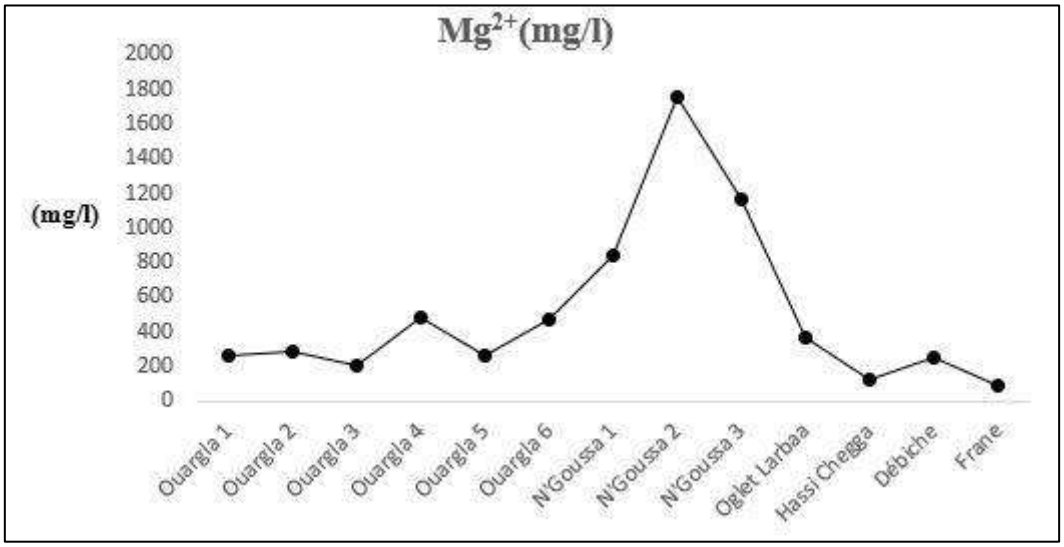


Figure 63 : Variation de la concentration de Mg^{2+} des eaux phréatiques de Ouargla

c- Sodium Na^+

L'existence de sodium est liée, essentiellement, à la dissolution de la Halite (4). En effet, le sodium, de même que pour les chlorures, affiche des teneurs élevées et non homogènes dans les eaux de la nappe phréatique, avec des valeurs maximales de plus de 13750 mg/ l, avec un écart type dépassant largement (3924 mg/l) de potabilités.

$$(4) : NaCl = Na^+ + Cl^-$$

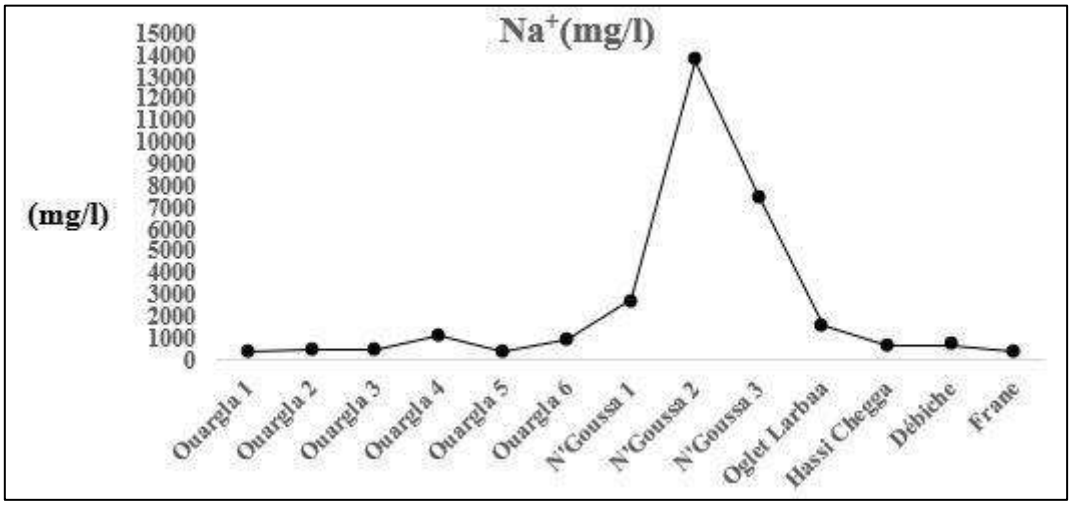


Figure 64 : Variation de la concentration Na^+ (mg/l) des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla

Les concentrations en sodium sont extrêmes. La concentration moyenne est de l'ordre 2396.34 m**g/l**, sachant que, 38% des échantillons dépassant 1000 m**g/l** de concentration. Les valeurs le plus élevé sont vu à N'Goussa, qui allant de 2750 à 13750 mg/l.

d- Potassium K^+

Cet élément provient essentiellement, des évaporites, en l'occurrence la Sylvite (KCl) (5), ou par suite d'altération des argiles potassiques des mures des aquifères étudiées.

$$\textbf{(5) : } KCl = K^+ + Cl^-$$

Les concentrations de potassium dans les eaux phréatiques présentent des valeurs appréciables. Plus de 69% des échantillons ne dépassant pas 100 mg/l, et plus de 31% des échantillons dépassent 150 mg/l, alors que l'écarte type est de 307.24 mg/l et la concentration moyenne avoisine 178 mg/l.

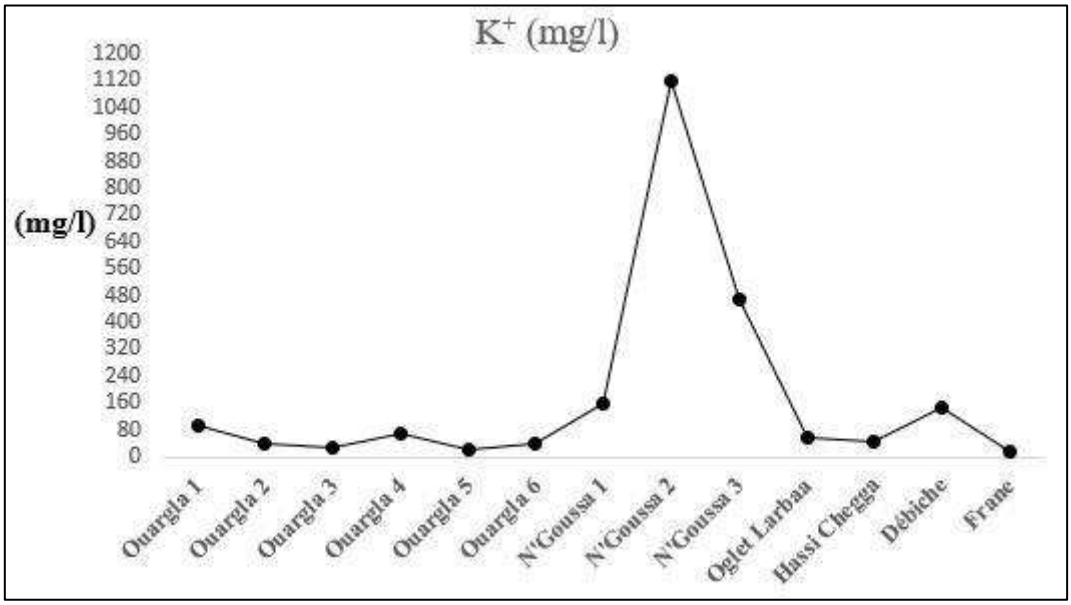


Figure 65 : Variation de la concentration de K^+ des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla

e- Sulfate (SO_4^{2-})

Les sulfates sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence dans le l'eau résulte est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, selon l'équation (2).

Les concentrations des sulfates observées dépassent les normes (500 mg/l) En effet, Les eaux phréatiques étudiés, renferment des concentrations élevées. Ceci montre l'importance des terrains gypsifères dans la concentration par les sulfates. On trouve plus de 92% des échantillons dépassent 1.5 g/l. La concentration moyenne est de 2954 mg/l et l'écarte type égale à 2601.51 mg/l. les concentrations les plus élevées sont vu à N'Goussa 1 et 2 avec des valeurs dépassants 7 g/l à cause de leurs proximités au Sebkha (Voire la figure 13 : P19 et P41).

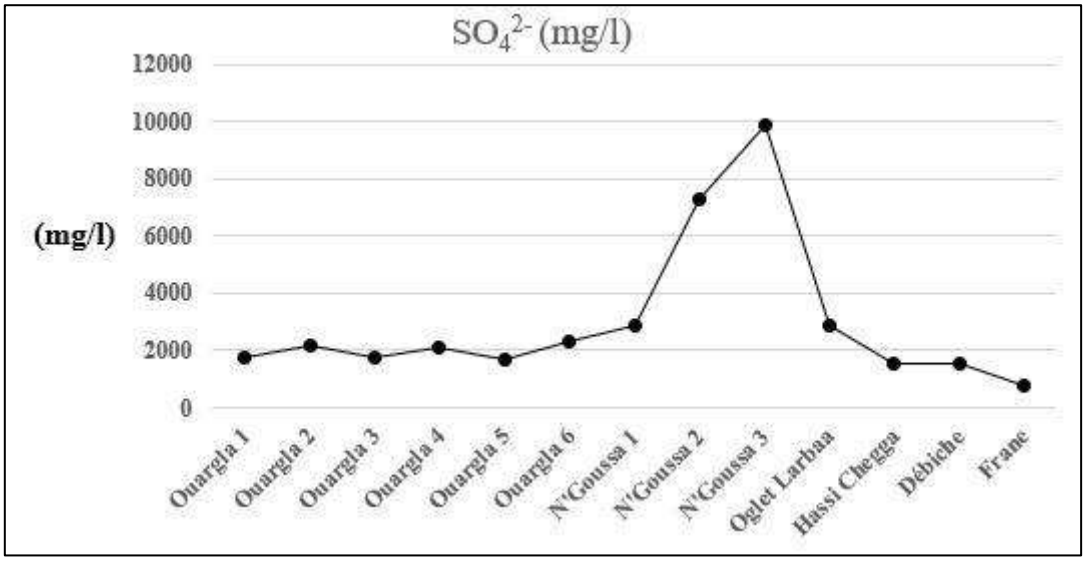


Figure 66 : Variation du SO_4^{2-} au niveau de la cuvette de Ouargla

f- Chlorures (Cl^-)

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution du Halite (NaCl), qui se fait selon la relation (4), et secondairement aux rejets d'eau usée.

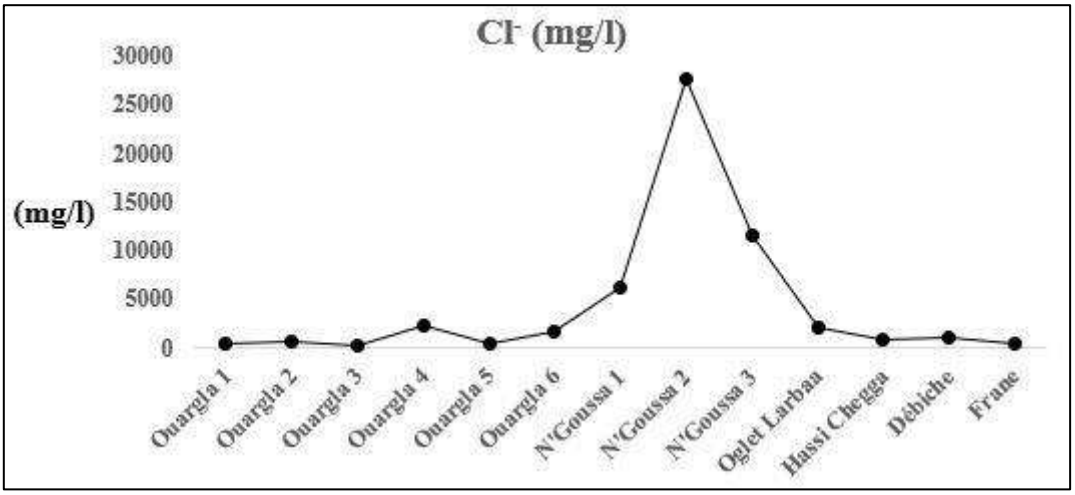


Figure 67 : Variation de la concentration de Cl^- des eaux phréatiques de Ouargla

Les chlorures dans les eaux de la nappe phréatique dévoilent des concentrations extrêmes. On a une concentration moyenne est plus de 4332 mg/l, avec 54% des échantillons dépassant 1 g/l. La concentration maximale est de 27.75 g/l (N'Goussa), la plus faible concentration a été vu au à l'intérieur de l'agglomération de Ouargla avec une valeur de 335 mg/l.

g- Bicarbonate (HCO_3^-)

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire, dolomite…etc.) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit :

$$CaCO_{3\,(Soluble)} + H_2O_{\,(Liquide)} + CO_{2\,(Gaz)} = 2HCO_3^- + Ca^{2+}$$

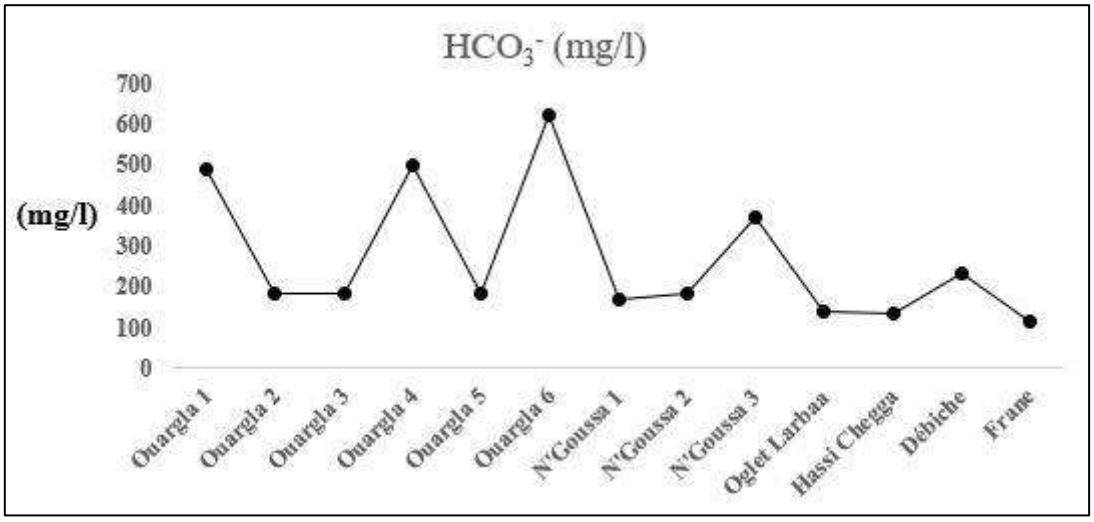


Figure 68 : Variation de la concentration de HCO_3^- des eaux phréatiques de Ouargla

Les concentrations moyennes enregistrées dans les eaux de la nappe superficielle dépassent les 250 mg/l. Alors plus de la moitié (61%) des échantillons ont des concentrations inférieures de 200 mg/l, et presque 30% des échantillons dépassent leur concentration la valeur de 350 mg/l. Les concentrations extrêmes (entre : 488 mg/l et 619 mg/l), sont enregistrées dans la zone d'agglomération de Ouargla.

5.2.3. Détermination des faciès chimique

Le tableau ci-dessous montre les des faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique de Ouargla.

Tableau 11 : Faciès chimiques et formules ioniques des échantillons

Number of samples	Ionic formulas	Chemical facies
5	**$r(Na^+ + K^+) > rCa^{++} > rMg^{++}\ rSO4^{-2} > rCl^- > HCO3^-$**	**$Na^+–SO_4^{-2}$**
5	**$r(Na^+ + K^+) > rCa^{++} > rMg^{++}\ rCl^- > rSO4^{-2} > rHCO3^-$**	**$Na^+–Cl^-$**
3	**$rMg^{++} > r(Na^+ + K^+) > rCa^{++}\ rSO4^{-2} > rCl^- > rHCO3^-$**	**$Mg^{++}–SO_4^{-2}$**

5.2.4. Présentation graphique sur le diagramme de Piper :

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, aidant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation est importante, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

La projection de composition chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla sur le diagramme de piper (Figure 69) permet de distinguer trois faciès principaux :

- Sulfaté-sodique (Na-SO_4)
- Sulfaté magnésien (Mg-SO_4)
- Chlorure sodique (Na-Cl)

Les résultats d'analyses chimiques pour tous les points d'observation ont permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux phréatique de la cuvette de Ouargla. Dans notre cas, les points des eaux représentés sur le diagramme de Piper (Figure 70) montrent des faciès chimiques sulfaté-sodique, sulfaté-magnésien et chlorure sodique.

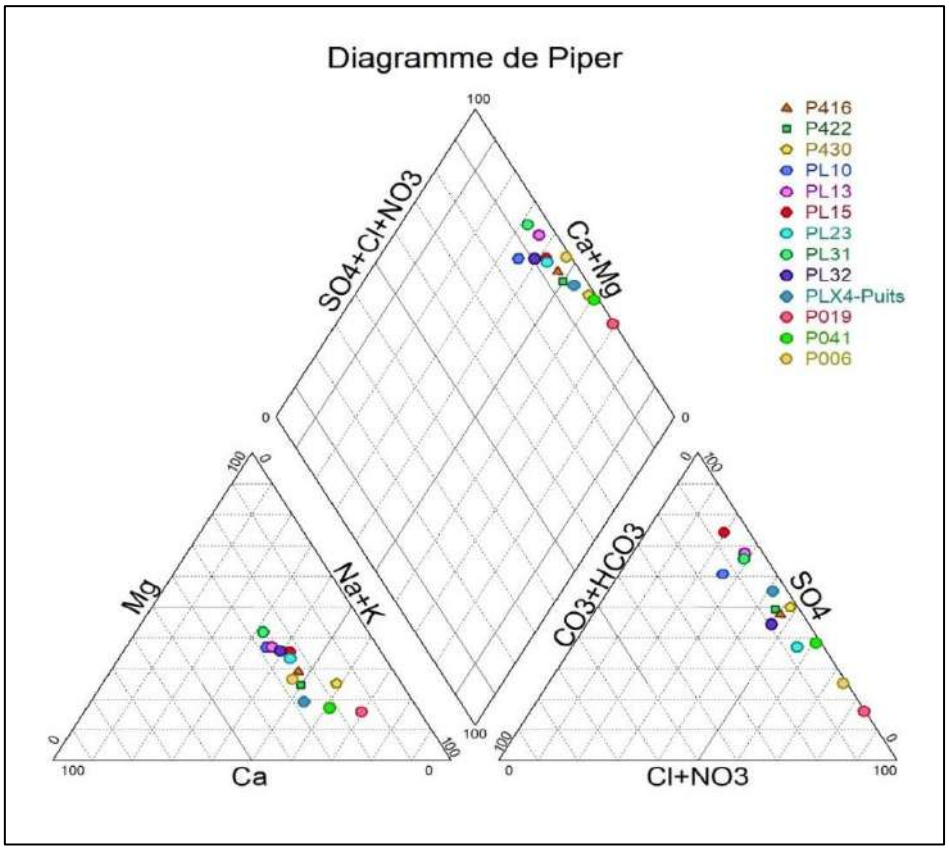


Figure 69 : Diagramme de Piper des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla (Mars 2015)

Les teneurs en sulfate et sodium prennent la prédominance. Il est observé que Les cations ont une tendance vers le pôle sodique, et les anions ont une tendance vers le pôle sulfaté, les sulfate sont dominants par leur origine géologique, précisément à la forte évaporation des eaux.

5.3. Utilisation des eaux phréatique pour l'irrigation

Diagramme de Richer

Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable

pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation. Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relatives à la salinité de l'eau, et l'indice d'adsorption du sodium (SAR) aussi appelé "pouvoir alcalisant" qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en cinq classes de salinité (axe des abscisses) et cinq classes de risques de sodisation (axe des ordonnées)

En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides et semi-arides, auxquels elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau.

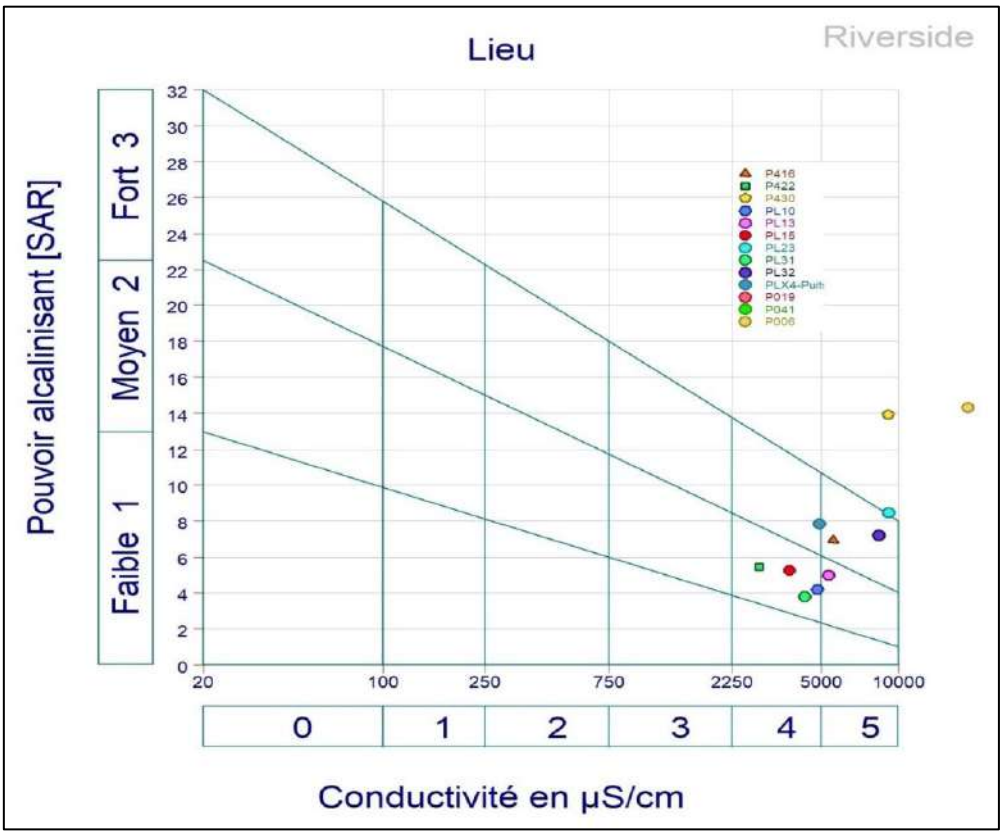


Figure 70 : Diagramme de Richards des eaux de la nappe phréatique

Les résultats obtenus à partir de diagramme, montrant que les eaux phréatiques présentent une qualité douteuse à inadaptée, avec un risque de salinité élevé à très élevé, et un risque de sodisation moyen à fort. Cela rend la plupart de ces eaux (61% des puits) inconvenable aux activités agricoles. Certains puits (39% des puits) peuvent être utilisés, mais dans des conditions particulières. En conclusion, cette eau doit être traitée avant de l'utiliser pour l'irrigation.

5.4. Indices de saturations (IS) des eaux phréatiques

Le calcul de l'indice de saturation fait par le logiciel Phreeqc, montrent que les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés [(Dolomite (CaMgCO3)2), Calcite (CaCO3) et l'Aragonite (sauf deux Point qui se trouve à Frane et Hassi Chegga qui sont à l'équilibre)], ces minéraux carbonatés sont en phase de précipitation. Les minéraux sulfatés ; pour le Gypse (CaSO4.2H2O) le point de Frane est sous-saturé, et le point de N'Goussa 2 est sursaturé, par contre les points restants sont à l'équilibre. Pour l'Anhydrite (CaSO4) 46% des points sont sous-saturés (Débiche, Frane, Hassi Chegga, Ouargla 1, Ouargla 3, Ouargla 5) et le reste des points sont à l'équilibre. Pour l'Halite l'indice de saturation montre que les eaux de la nappe phréatique sont sous-saturées par l'Halite (Figure 71).

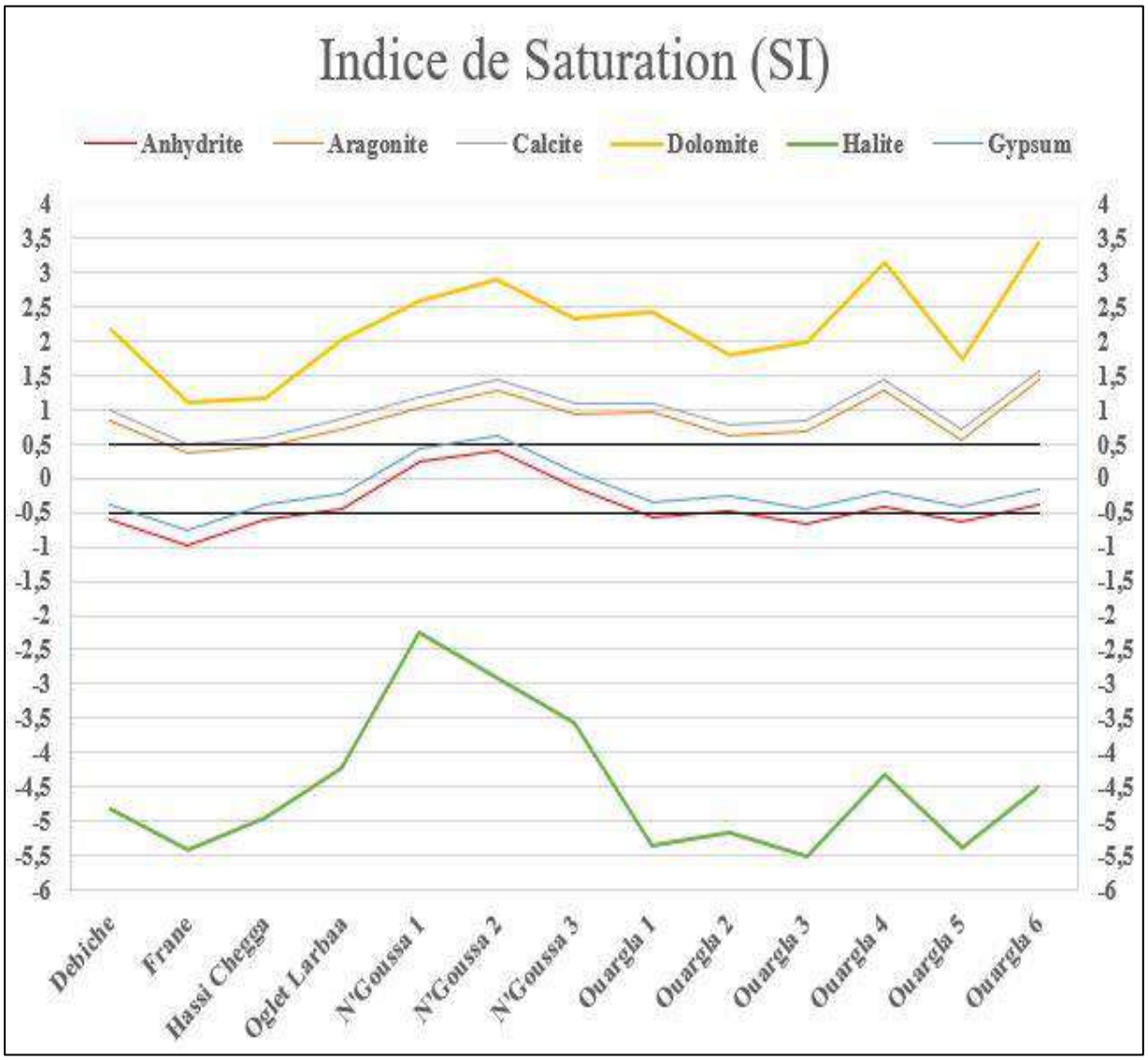


Figure 71 : Indice de saturation des eaux phréatique de la cuvette de Ouargla

6. La cartographie de Sebkhas et des Chotts

La présentation des images des zones étudier, fait ressortir visuellement une évolution des états de surface des zones de Sebkhas et chotts, qui nous intéresse dans notre travail. On remarque notamment une diminution des eaux et des sols humides durant la période estivale marqué par ces conditions extrêmes. Mais cela reste visuelle et sans aucune quantification, ni dans le temps ni dans l'espace. C'est pourquoi on fait appel à les techniques de télédétections et le SIG pour estimer les surfaces et cartographie l'évolutions des zones humides.

6.1. Représentation d'évolution saisonnière de Sebkha Safioune et le lac salé Al Aushaziyah au cours de l'année 2016.

Les deux sites (Sebkha Safioune et lac salé Al Aushaziyah) se trouvent en dehors de la structure urbaine, ils sont alimentés essentiellement par les eaux des Oueds, les précipitations et les eaux usée épurés. On a étudié l'évolution saisonnière de l'états de surface dans la sebkha et le lac salé au cours de l'année 2016. Après le traitement des images, l'évolution de l'état de surface des différentes classes de la sebkha a été cartographiée au cours des saisons de l'année. Les cartes d'occupation des sols ont été produites et leurs précisions de classification a été calculé, on a étudié 5 classes (eau, sol humide, sol salé humide, sel, végétation). La présentation des 6 cartes de chaque zone humide fait ressortir visuellement une nette évolution de l'occupation du sol entre Janvier et Août de l'année 2016. Sur le lac salé Al Aushaziyah et sebkha Safioune une changement rapide et important affecte les classes humides (Eau, Sol humide et sol salé humide). La progression et régression des classes étudié au cours de période estivales sont extrait à partir de la matrice de confusion.

Tableau 10 : Caractéristiques du lac salé Al Aushaziyah et sebkha Safioune

Lieu /caractères	Superficie total (Ha)	Max surface d'eau (Ha) 2016	Min surface d'eau (Ha) 2016	Altitude max (m)	Altitude min (m)
Lac salé Al Aushaziyah	**2000**	**910**	**3.42**	**605**	**597**
Sebkha Safioune	**8000**	**933**	**193**	**110**	**102**

6.1.1. Validation de classification

La classification supervisée par le maximum de vraisemblance a été validée avec une bonne précision globale supérieure à 89%, induisant une excellente correspondance entre la cartographie et les observations de terrain. La classe Eau et la classe Sol humide sont très bien discriminés. Le périmètre irrigué, la palmeraie et le sable sont bien classés.

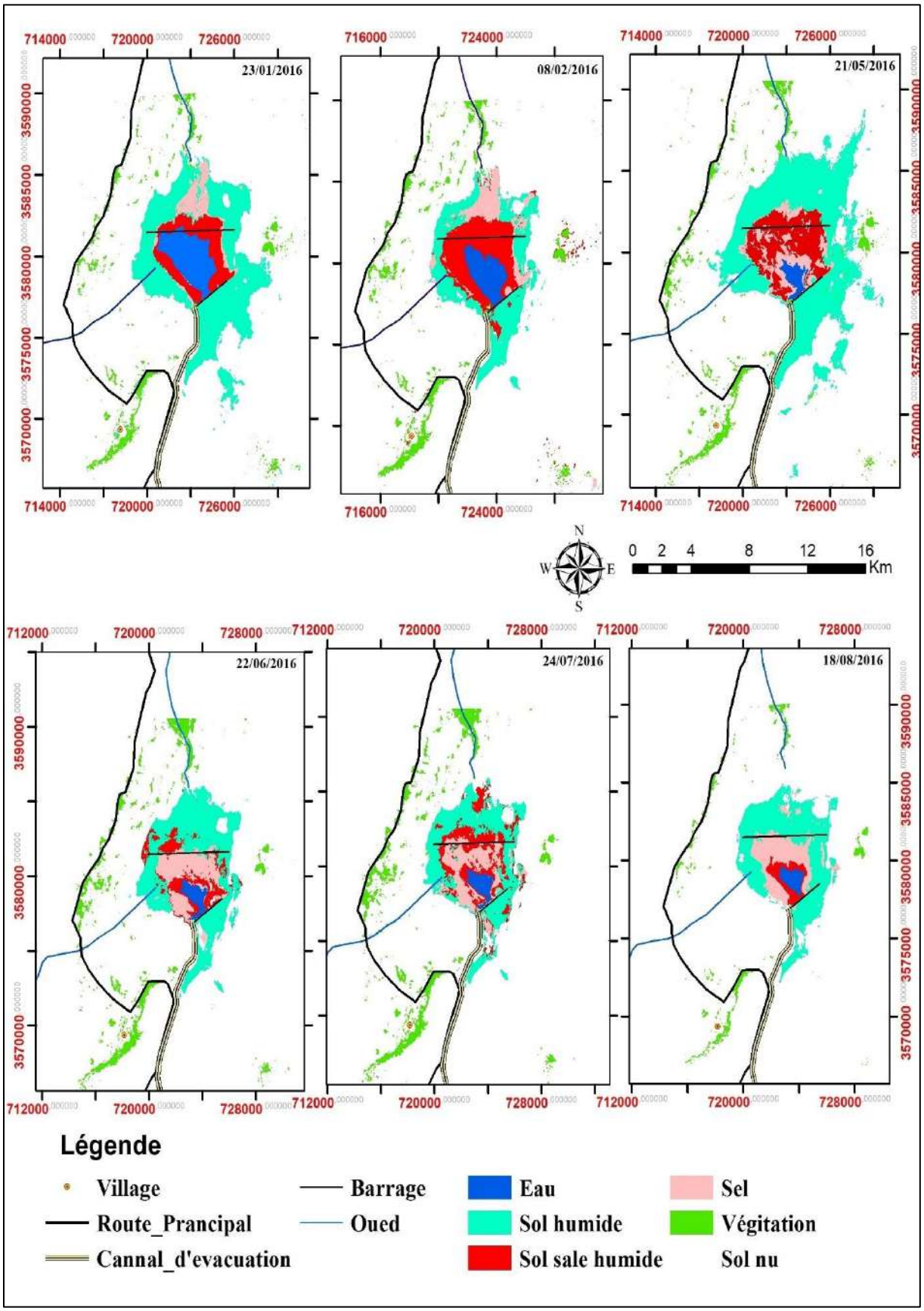


Figure 72 : Evolution des états de surface au Sebkha Safioune au cours de l'année 2016.

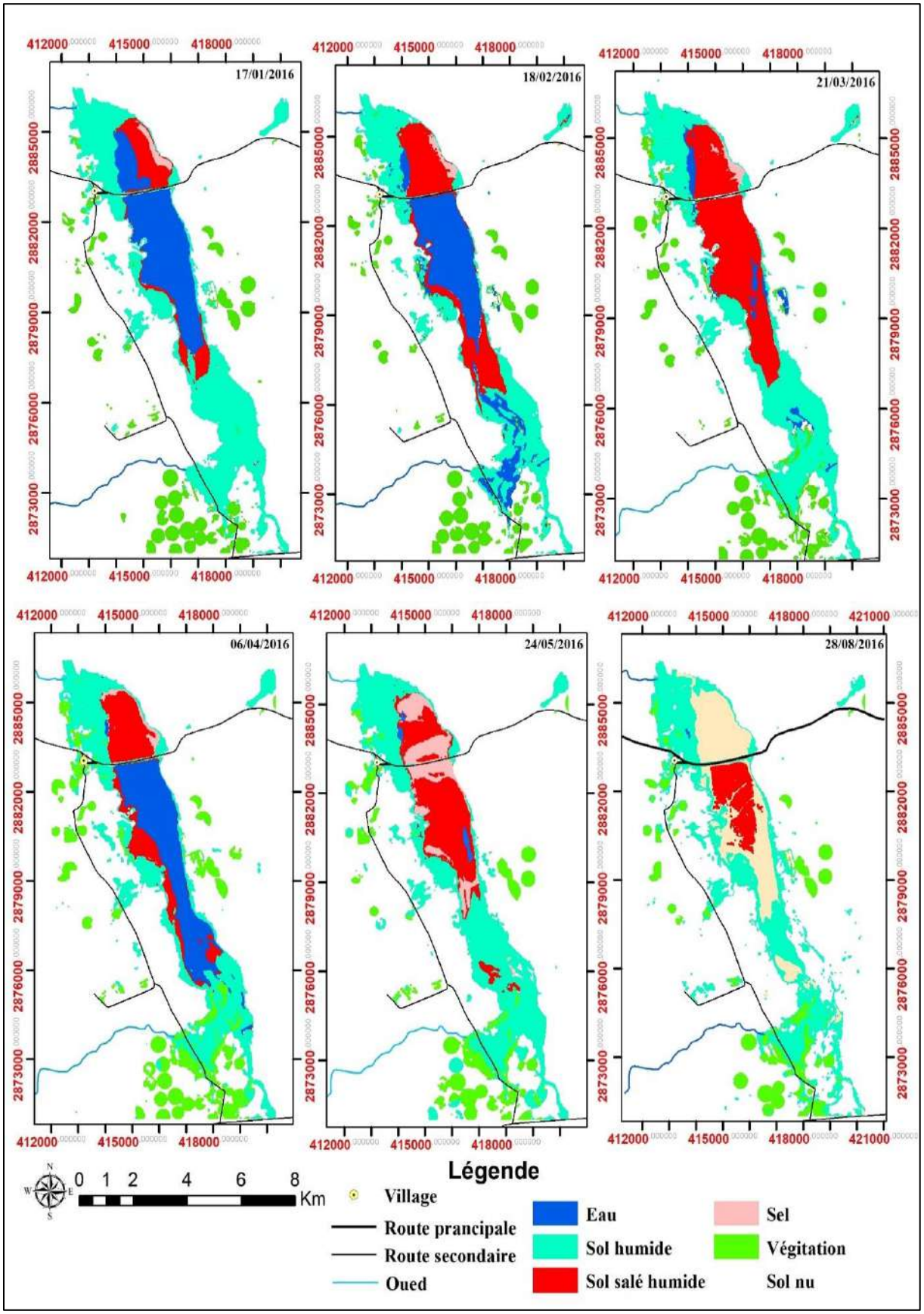


Figure 73 : Evolution des états de surface au Lac salé Al Aushaziyah au cours de l'année 2016.

Pour valider notre classification, une matrice de confusion (confusion matrix) est construite en mettant respectivement sur les lignes et sur les colonnes les données de référence et la classification, ce qui permet de calculer les résultats suivants :

1- Précision globale c'est le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels donc la précision globale est bonne :

2- L'indice de kappa, il correspond à une autre mesure de précisons de la classification et varie de 0 à 1, on constate qu'il existe une excellente correspondance entre la cartographie et les observations de terrain.

Toutes les classifications des images ont été validées par les matrices de confusion avec des valeurs de précision globales dépassant 89 % et un coefficients Kappa entre 0,87-0,93 de toutes les classification (tableau 13 et 14)

Tableau 13 : Récapitulatif de la précision des classifications du lac salé Al Aushaziyah

Classification du lac sale Al Aushaziyah	Précision globale	Indice de Kappa
17/01/2016	92.15	0,90
18/02/2016	89,48	0,89
21/03/2016	92,54	0,90
06/04/2016	90.87	0,88
24/05/2016	93.63	0,87
28/08/2016	91.11	0,91

Tableau 14 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Safioune

Classification de sebkha Safioune	Précision globale	Indice de Kappa
23/01/2016	93.23	0,92
08/02/2016	89.54	0,89
21/05/2016	94.12	0,92
22/06/2016	92.60	0,93
24/07/2016	95.14	0,90
18/08/2016	90.11	0,87

6.1.2. Matrice de changement

Afin d'étudier l'évolution entre les six dates on a utilisé les cinq intervalles, Puis l'intervalle de changement entre six dates pour permet la comparaison entre les cinq couples de changement précédent de Sebkhas Safioune et le Lac salé Al Aushaziyah.

On fait une étude statistique qui nous a permis de donner une estimation des surfaces inchangées et changées entre deux dates. Cette étape indique les résultats suivants :

1- Le lac salé Al Aushaziyah :

L'évolution de changement des classes humides du lac salé Al Aushaziyah est importante et rapide (figure), l'analyse des matrices de changement a indiqué les résultats suivants :

- **La classe eau :** c'est la classe la plus rapide a changé à cause des conditions climatique, le pic de surface d'eau remarquer est en mois de Février avec une superficie de 910 Ha, cette classe a vu une augmentation de 3.5% de surface total entre 17/01/2016 et 18/02/2016, mais juste après une cours période, elle a perdu 84% de surface total entre 18/02/2016 et 21/03/2016, la couple 21/03/2016 à 06/04/2016 la surface a enregistré une augmentation de 662 Ha, pour Continuer à diminuer au cours de la période d'Avril à Août. Jusqu'à ce que la surface d'eau atteigne 3.42 Ha. Le taux de changement globale de la surface d'eau est de 99% de surface initial. L'augmentation de surface d'eau est dû aux précipitations importantes dans la période de Janvier à Avril. La diminution, elle est due à baisse des précipitations en plus de l'augmentation de l'intensité d'évaporation.

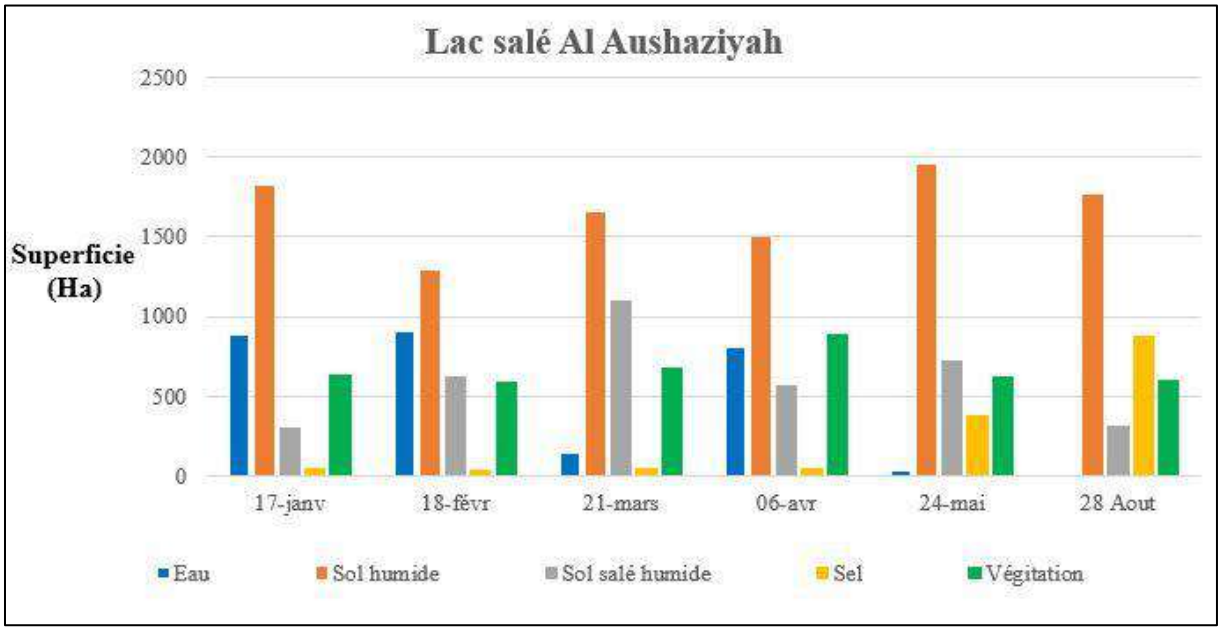


Figure 74 : Evolution de l'occupation de sol du lac salé Al Aushaziyah (Hectare) durant l'année 2016

- **Les autres classes :** la classe sol humide a enregistré une diminution de 29%, 9%, et 9.5% de surface total respectivement durant les couples :17/01 à 18/02, 21/03 à 06/04 et 24/05/2016 à 28/08/2016, par contre cette classe a gagné une surface de 27% et 30% de surface total respectivement entre les périodes : 18/02 à 21/03 et 06/04/2016 à 24/05/2016. Le percentage total de changement de cette classe égale à 3.3% de la surface initial.

  La classe sol salé humide a perdu 48% et 57% de surface respectivement durant les périodes 21/03 à 06/04 et 24/05/2016 à 28/08/2016. Le taux de changement de cette classe est de 3.5% de surface initial au cours de période Janvier à Aout 2016.

  La classe sel a perdu un fois 11% de la surface total durant la période 17/01 à 18/02, mais après cette diminution, cette classe a contenu a gagné des surfaces jusqu'à attendre un pic de 839 Ha au mois d'Aout.

2- Sebkha Safioune :

Le Sebkha Safioune est alimenté par un canal depuis 2011, avec un début de 60000 m^3/j des eaux épurés, ce qui a produit un écosystème humide important. Les matrices de changements (Figure 75) montrent l'évolution des classes étudié au Sebkha Safioune comme suivant :

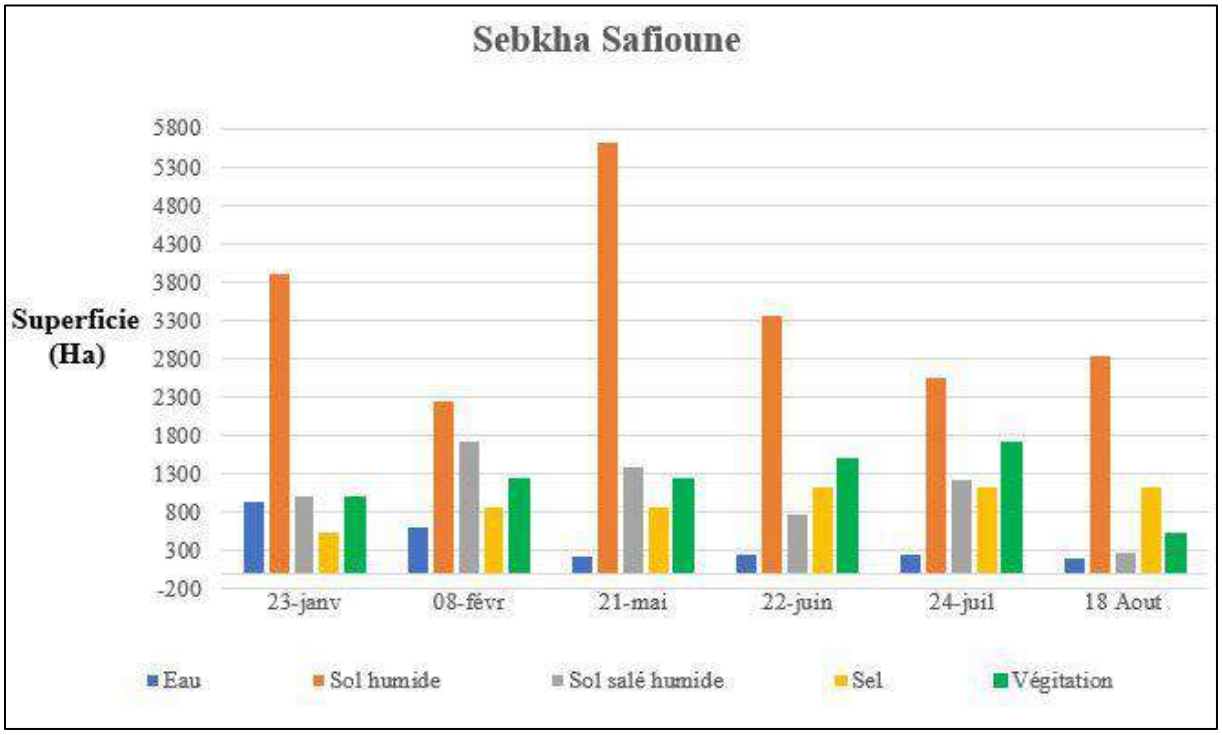


Figure 75 : Evolution de l'occupation de sol de Sebkha Safioune (Hectare) au cours de l'année 2016

- **La classe Eau** : c'est la classe la plus affecter par les conductions extérieures. Le pic de surface de classe est vu au mois de janvier à cause de volume important des apports anthropiques par rapport au volume perdus par évaporation. Cette classe perte 34% et 63% de la surface total de la classe respectivement entre 23/01/2016 à 08/02/2016 et 08/02/2016 à 21/05/2016, cette diminution est due à une augmentation du taux d'évaporation. Au cours de la période 21/05/2016 à 22/06/2016 la classe a connu une faible augmentation de 11% de surface, après elle a vu une stabilisation entre 22/06/2016 à 24/07/2016. Ceci indique qu'il existe une égalité entre les apports anthropiques et les pertes par évaporation, au période entre 24/07/2016 et 18/08/2016 on a remarqué une chute de 22% de surface d'eau. Le taux de changement total de classe d'eau est de 79% dans le sens négative, ce qui présent 740 Ha de surface d'eau perdu entre Janvier et Aout. Ce changement est dû à l'influence directe des conditions climatiques aride.
- **Les autres classes :** la classe sol humide a une relation inverse avec les classes sel et sol salé humide, la classe de sel se change vers le sol humide en hiver à cause de la dissolution des sels en eau, ou par l'effet de l'érosion. Le sol humide a enregistré une baisse de 42% dans le couple 23/01/2016-08/02/2016, avant de constater une augmentation significative de l'ordre de 151% de la surface total au période 08/02/2016 à 21/05/2016. Ce changement est dû à la perte de surface de classe eau. Le changement total de sol humide égale à 33% de la surface total initial.

  Le sol salé humide a vu progression importante de 73% et 57% de surface initial respectivement dans les périodes 23/01/2016 à 08/02/2016 et 22/06/2016 à 24/07/2016, par contre il existe quand même une perte de 19% ,44% et 77% de surface total respectivement au couple 08/02/2016 à 21/05/2016, 21/05/2016 à 22/06/2016 et 24/07/2016 à 18/08/2016. Le taux de changement total du sol humide est de -72%.

  Le sel a enregistré une progression contenue de surface, de moi de Janvier à Aout avec une augmentation total égale à 110% de surface initial.

6.1.3. Cartographie de changement

- Lac salé Al Aushaziyah

La carte d'évolution des états de surfaces réaliser entre les six dates au lac salé Al Aushaziyah au cours de l'année 2016 (Figure 76), a montré une nette évolution des états de classes humides avec une stabilité de surface inchangé nulle pour la surface d'eau et de sol salé humide, de 1266 Ha de sol humide et de 39.6 Ha de sel comme surfaces inchangées. La donnée climatique de la région a montré une période de précipitation important entre février et Avril ce qui explique la

stabilisation des classes humides au cours cette période. La figure 75 au-dessous présente les changements des états des classes.

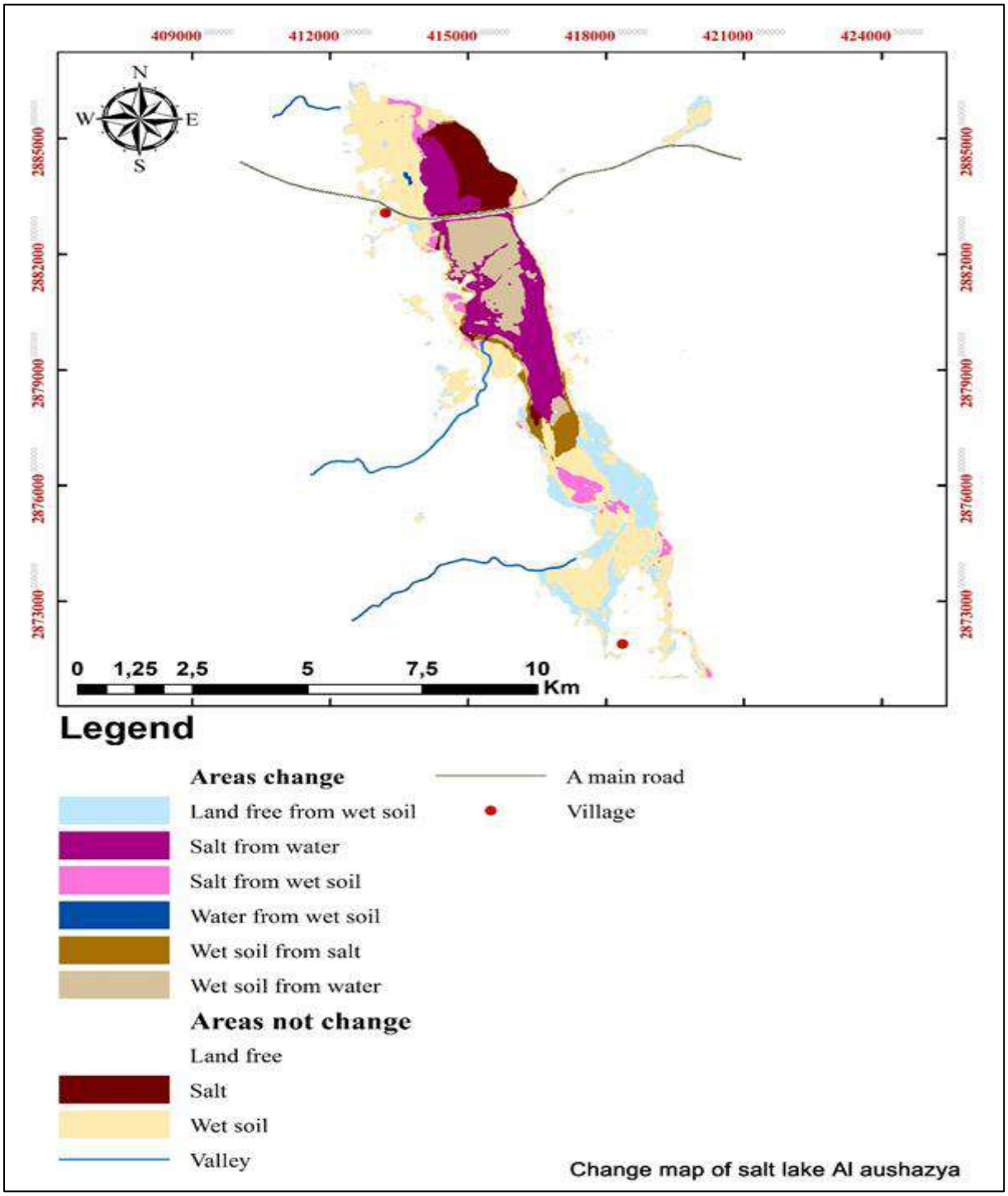


Figure 76 : Cartographie du changement de l'occupation du sol au lac salé Al Aushaziyah au cours de l'année 2016

- Sebkha Safioune

La carte d'évolution des états de surfaces pour les six dates de l'année 2016 de Sebkha Safioune (Figure 77), a montré une nette évolution des états de classes humides avec une stabilité de 192

Ha d'eau, de 92 Ha de sel et de 1804 Ha de sol humide. Les classes de changements situent en pourtour de la surface d'eau stable au centre limité au sud par une digue, Elles sont comme suit :

- **La classe Eau** : a perdu une surface de 743 Ha au cours de période entre Janvier et Aout 2016, égale à un taux de changement de -79% de surface initial.
- **La classe sol humide** : a perdu 33% de surface initial égale à 1055 Ha au cours de période d'étude. Le changement de sol humide vers sol nu est dû au phénomène d'évaporation et la baisse de niveau piézométrique de la nappe phréatique. Les limites internes déterminent les changements entre le sol humide et le sel par le phénomène d'évaporation capillaire et la formation d'efflorescences de cristaux de sel en surface.
- **Les classes sel et sol salé humide** : pour la faciliter de la lecture de carte réaliser on combine les deux classes précédant. La classe sel a gagné 592 Ha au cours de la période d'étude, la classe sol salé humide a perdu 717 Ha de surface initial.

6.1.4. Conclusion :

Les changements rapide et importants sur les états de surface de la sebkha Safioune et le lac salé Al Aushaziyah affectent essentiellement les classes humides. Au lac salé Al Aushaziyah les eaux des précipitations et de ruissellement s'accumule au fond de lac salé au cours de la période humide avant de commencer à diminue sous l'effet des conditions climatiques désertique, jusqu'à arriver une surface inchangée égale à 00 Ha (cette valeur nulle ne dit pas que le surface d'eau est disparait). Par contre au Sebkha Safioune la classe d'eau montre une diminution de 740 Ha entre janvier à Aout mais il garde une surface inchangée égale à 192 Ha, cette situation montre une pérennité des eaux de surface de sebkha Safioune avec le débit actuel du canal (Djidel 2014). La diminution de classe d'eau a été affectée sous l'influence des conditions climatiques extrêmes, d'une part, des températures atteignant parfois 50°C favorisant une intense évaporation, et d'autre part, des vents de sable d'une vitesse de 65 km/h qui contribuent à l'assèchement des eaux en diminuant l'humidité du sol et couvre les cristaux des sels.

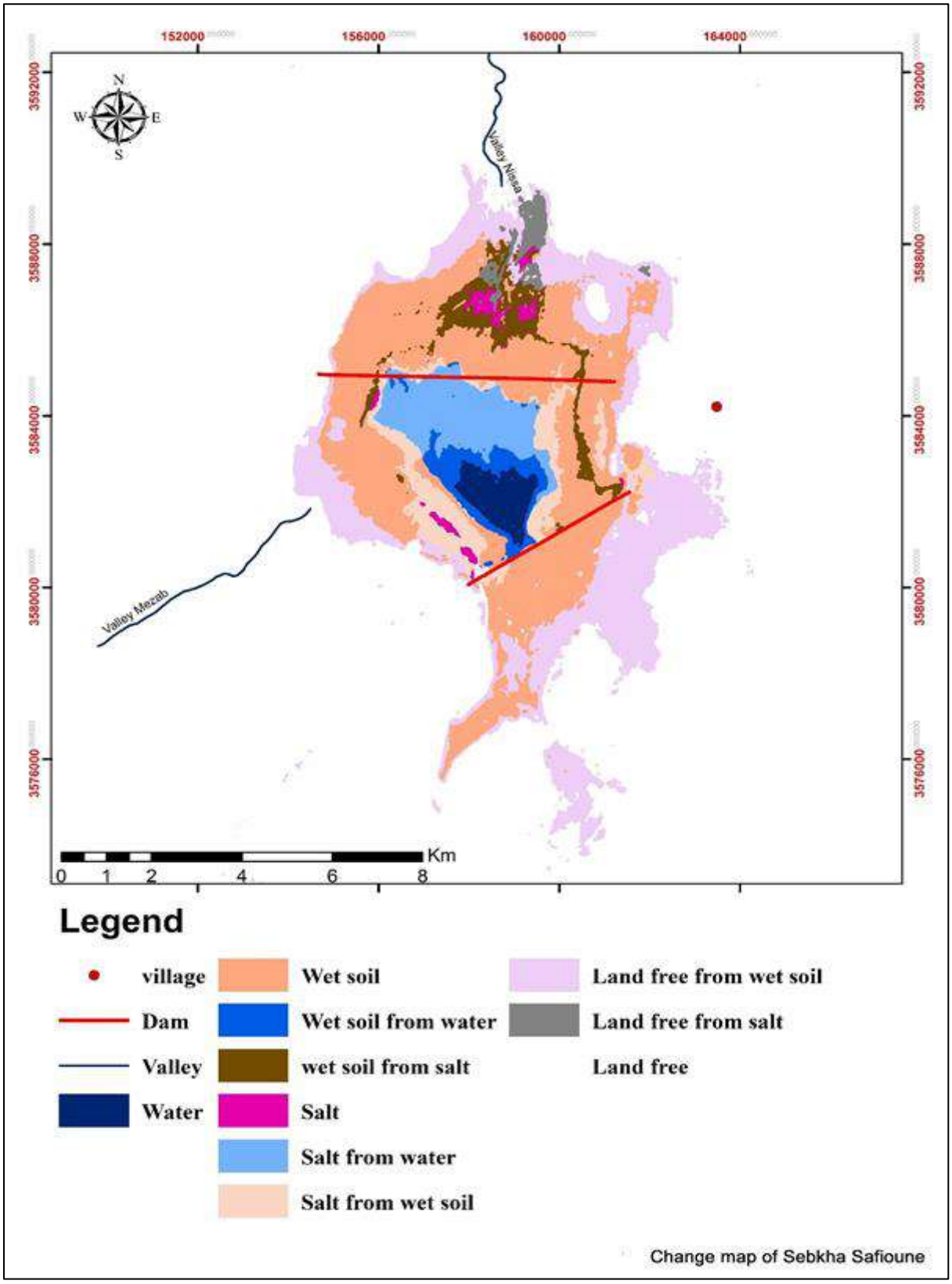


Figure 77 : Cartographie du changement de l'occupation du sol au Sebkha au cours de l'année 2016

6.2. Représentation d'évolution saisonnière de Sabkhat Atarafiyah au cours des année 1986, 2000 et 2016, et au Sebkha Oum Erranebe au cours des années 1987, 2000 et 2016.

Sabkhat Atarafiyah avait ce nom à partir de le ville Atarafiyah (nord-est de Buraydah), le Sebkha est alimenté par les eaux de précipitation et par les eaux d'Oued en hivers, le Sebkha est situé dans le parc national de dunes de Atarafiyah. Sebkha Oum Erranebe située loin de 12 km à la ville de Ouargla, Elle est alimentée par les eaux usées de l'agglomération d'Ouargla et les eaux de drainage agricole. Les deux Sebkhas sont entourées par des formations dunaires au Nord à l'Est En forme d'arc.

Afin de connaître l'évolution des états des surface au Sabkhat Atarafiyah et Sebkha Oum Erranebe et chott Ain El Beida, on va étudier l'évolution des états de surface entre la période humide et sèche au cours des années suivant :1986, 2000 et 2016 pour Atarafiyah et 1987,2000 et 2016 pour Sebkha Oum Erranebe.

6.2.1. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sabkhat Atarafiyah

6.2.1.1. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sabkhat Atarafiyah de l'année 1986.

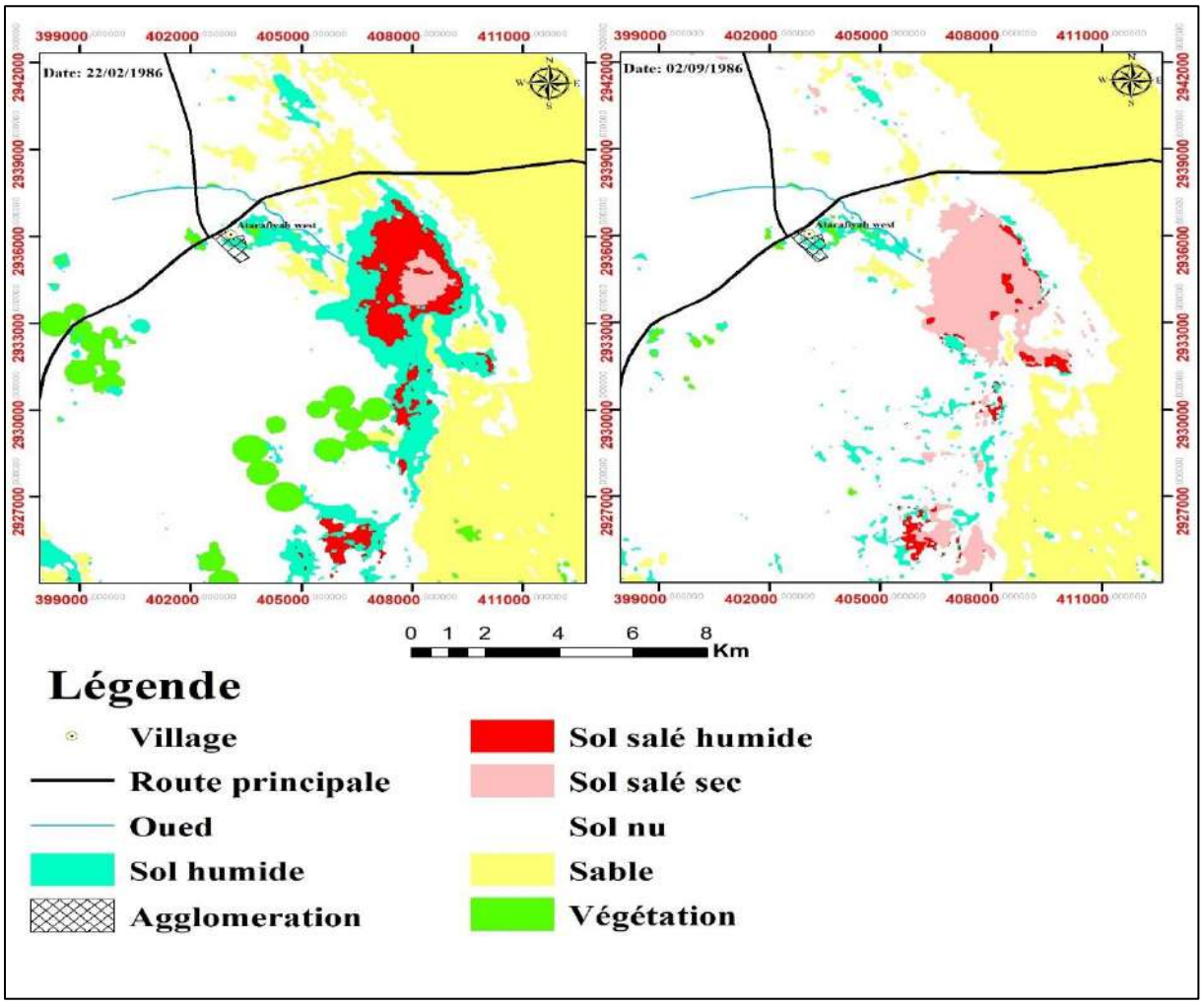


Figure 78 : Evolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 1986.

Les deux images de Landsat 5 TM daté 22/02 et 02/09/ 1986 de Sabkhat Atarafiyah ont été classifier par la méthode de maximum de vraisemblance, la précision de la classification et le coefficient de Kappa sont respectivement 90.31% et 0.91 pour la date 22/02, et 91.12% et 0.90 pour la date 02/09/1986. On a fait une sortie sur terrain au Sebkha et prie des échantillons de référence des sols, à l'aide de GPS on a pris les coordonnés des points d'échantillonnages.

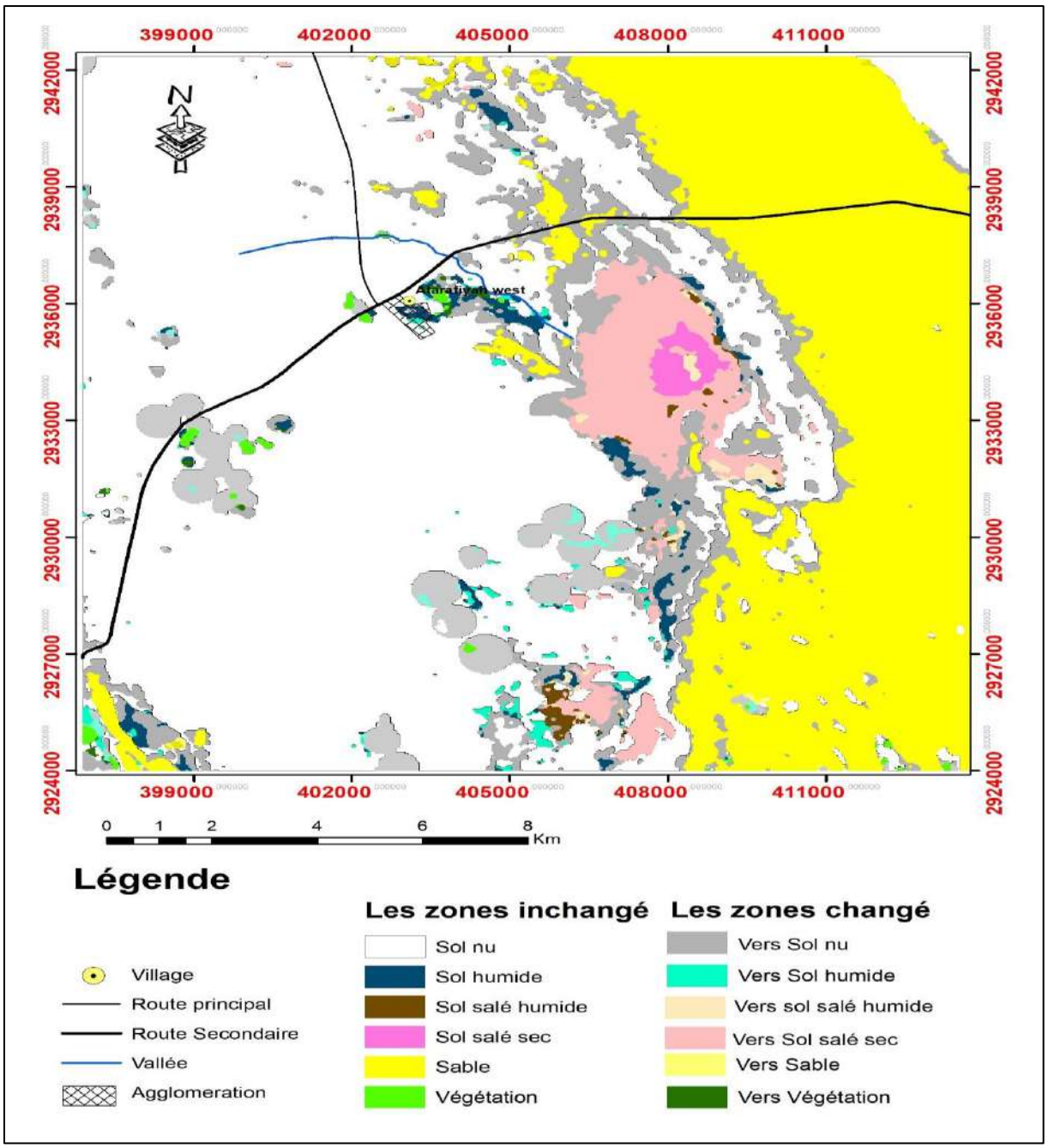


Figure 79 : Cartographie de l'évolution des états de surface au Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 1986

Les dates de pris des deux images en 1986 est coïncidées avec l'absence d'eau dans la Sebkha, ce qui explique l'absence de la classe d'eau dans les cartes des occupations de sol réalisés. La

carte (figure 79) de l'évolution des états de surface a montré des changements des surface entre les deux dates comme suivant : Les surfaces inchangées de la classe sol humide et de sol salé humide sont respectivement de 331 ha et 71 ha, avec une diminution totale de 1468 ha de sol humide, et 597 ha de sol salé humide, par contre le sol salé sec a enregistré une augmentation totale de 1239 ha, après qu'elle a été 169 ha à l'état initial. On a vu que pas de nécessaire de discuté l'évolution de la classe de végétation parce qu'il n'y a pas de développement dans les terres agricoles entre les saisons, mais il n'y a que des certaines récoltes saisonnières que se présente dans une Saison, et se disparaître à l'autre.

6.2.1.2. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2000

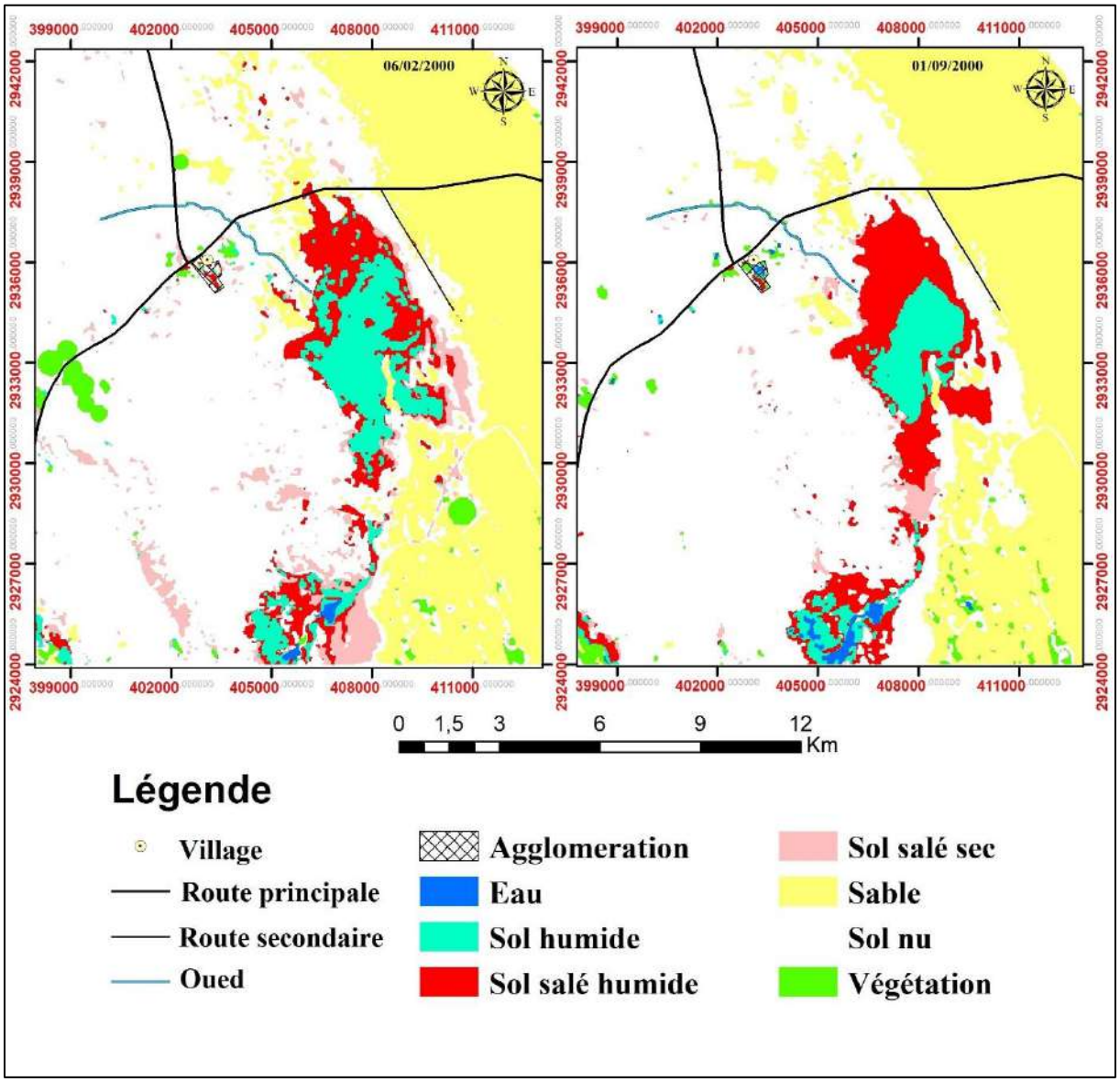


Figure 80 : Evolution de l'occupation des sols de Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2000.

Les cartes réalisées avaient validé avec une précision de 92.31% et indice de Kappa 0.91 pour l'image daté 06/02/2000, et 93.51% et indice de Kappa 0.92 pour l'image daté 01/09/2000. L'évolution des états des surface entre la période humide et sèche de l'année 2000 est présenté à la **figure 81** qui montre les changements des classes. La matrice de changement montre l'évolution. L'analyse de la matrice des changements a donné les informations suivantes :

Le surface de classe d'eau inchangée est d'une superficie de 35 ha de l'état initial, avec un faible changement présente la perte de 02 ha, alors que l'évolution total de la classe indique une augmentation de 78 ha, cette augmentation est dû au la tempe des précipitations dans cette période. Le sol humide a gardé une surface inchangée de 704 ha, mais l'évolution total a indiqué une diminution de 530 ha, la plus parte de cette superficie est devenus une sol salé humide, ce changement est résultat de la précipitation des cristaux de sel, l'autre partie de surface humide a changé vers le sol nu sous l'influence de l'évaporation intensive. La classe sol salé sec a enregistré un changement considérable de 839 ha perdu, et 3 ha de surface inchangée.

La classe sol salé humide qui est une classe intermédiaire entre le sol humide et le sol salé humide, le sol salé humide deviens sol salé sec lorsque l'humidité se perte à cause de l'évaporation intensive en été. Cette classe a gardé une surface inchangée de 934 ha entre les deux datés. Le percentage de changement est de 48% de surface initial qui égale 451 ha, le résultat final de changement présente une augmentation de 410 ha qui est équivalant à 29% de la superficie initial.

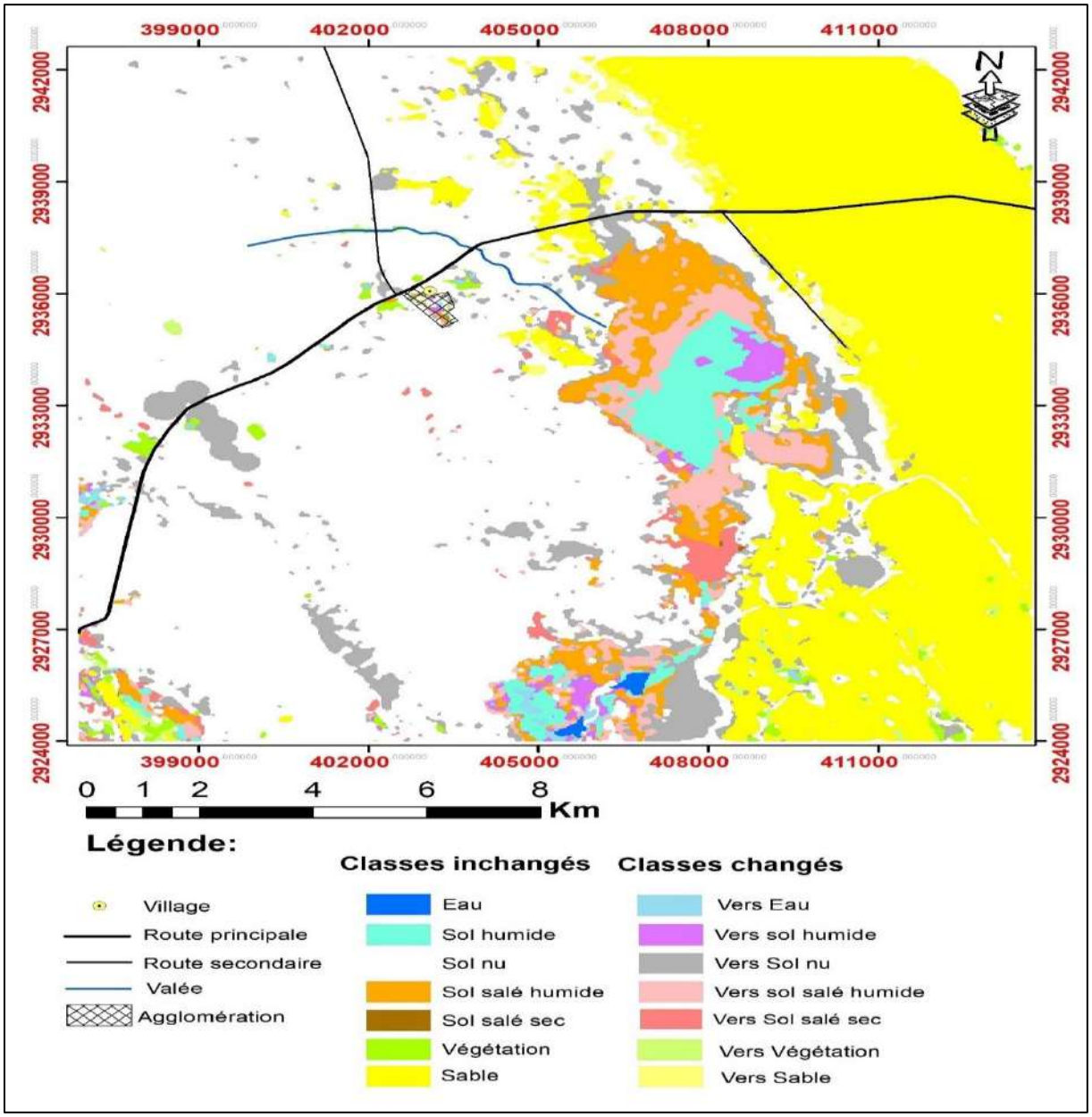


Figure 81 : Cartographie de changement des états de surface de Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2000

6.2.1.3. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2016

La précision de classification et le coefficient Kappa des images daté 18/02/2016 et 28/08/2016 est respectivement de 92.41% et 0.91, et 94.05 et 0.95. Les valeurs des changements enregistrés entre les deux dates ont été comme suivant :

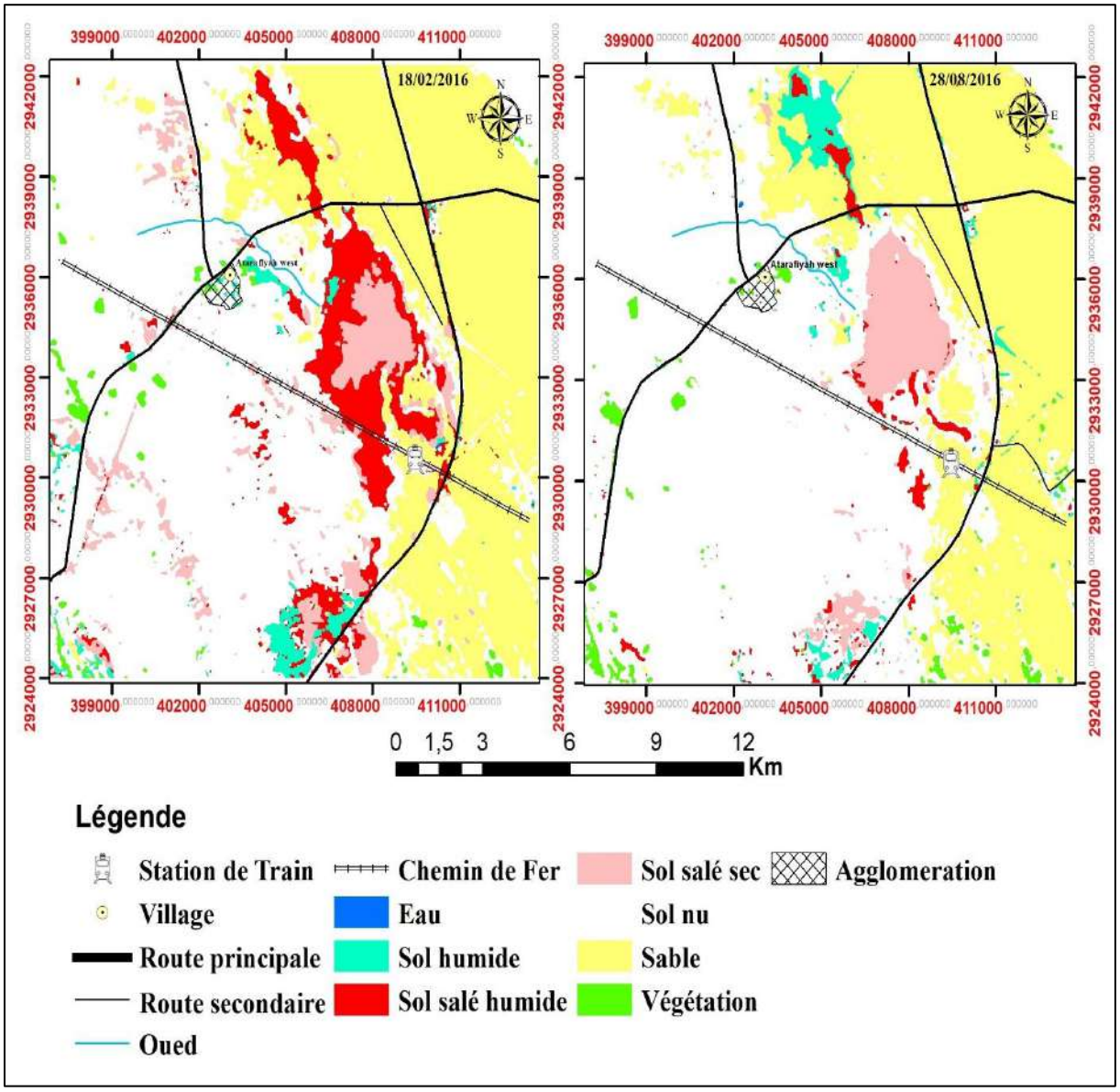


Figure 82 : Evolution de l'occupation des sols de Sabkhat Atarafiyah au cours de l'année 2016

La classe de sol humide et le sol salé sec ont perdu une surface totale de 529 ha pour le premier et 841 ha pour le deuxième, au même temps elles ont gardé des surfaces inchangées de 03 ha de sol salé sec et 704 ha de sol humide. La classe d'eau a vu une augmentation remarquable de 102 ha, avec une surface inchangée de 35 ha, cette augmentation de classe d'eau est dû aux pluies soudaines n'est pas habitué à cette saison.

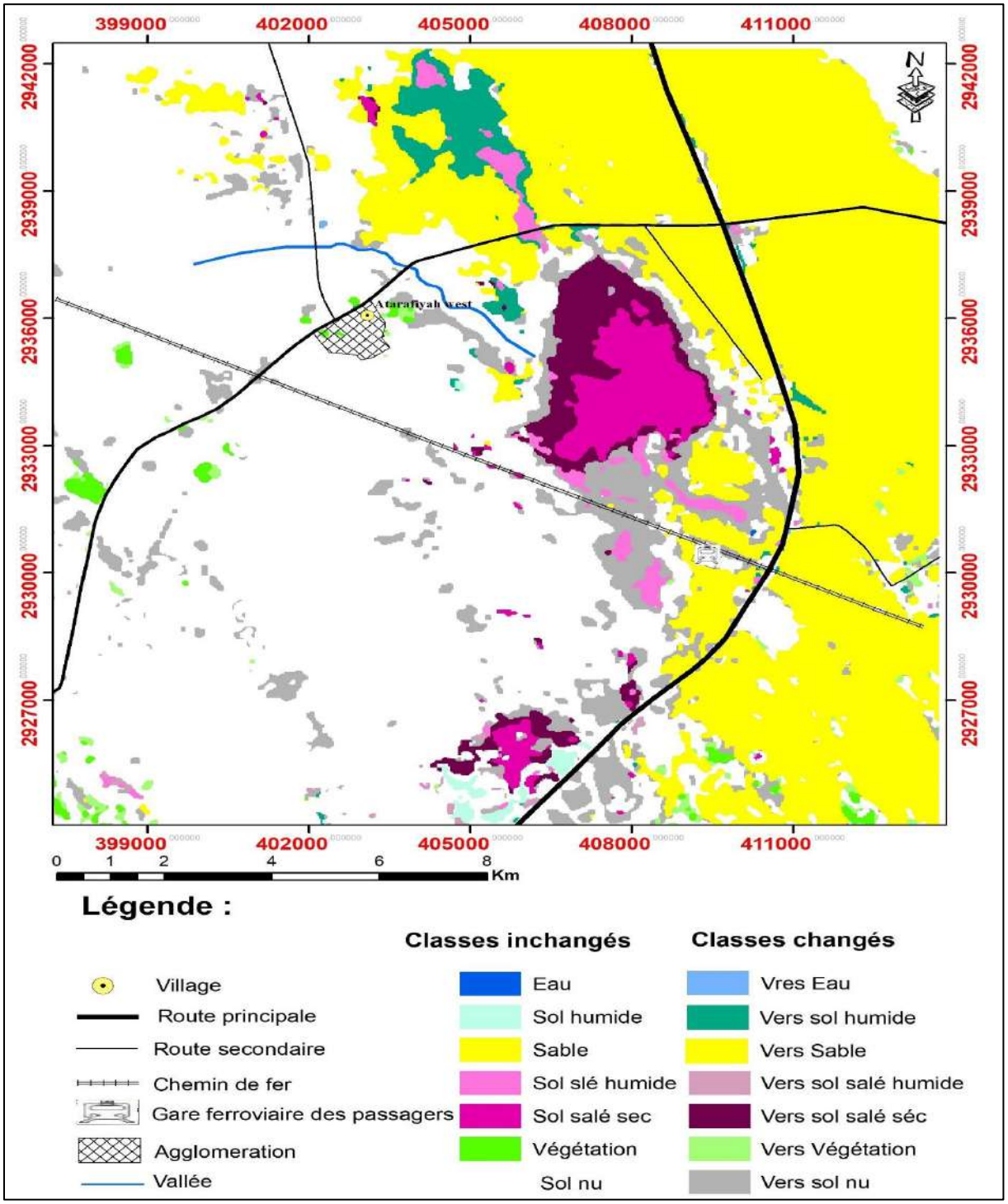


Figure 83 : Cartographie de changement des états de surface de Sabkhat Atarafiyah (Février – Aout 2016)

6.2.2. Représentation d'évolution saisonnière de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Beida au cours des année 1987, 2000 et 2016.

6.2.2.1. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 1987.

Le tableau 15 indique les précisions et les coefficientes de Kappa de classification pour les deux images Landsat 5 TM de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida.

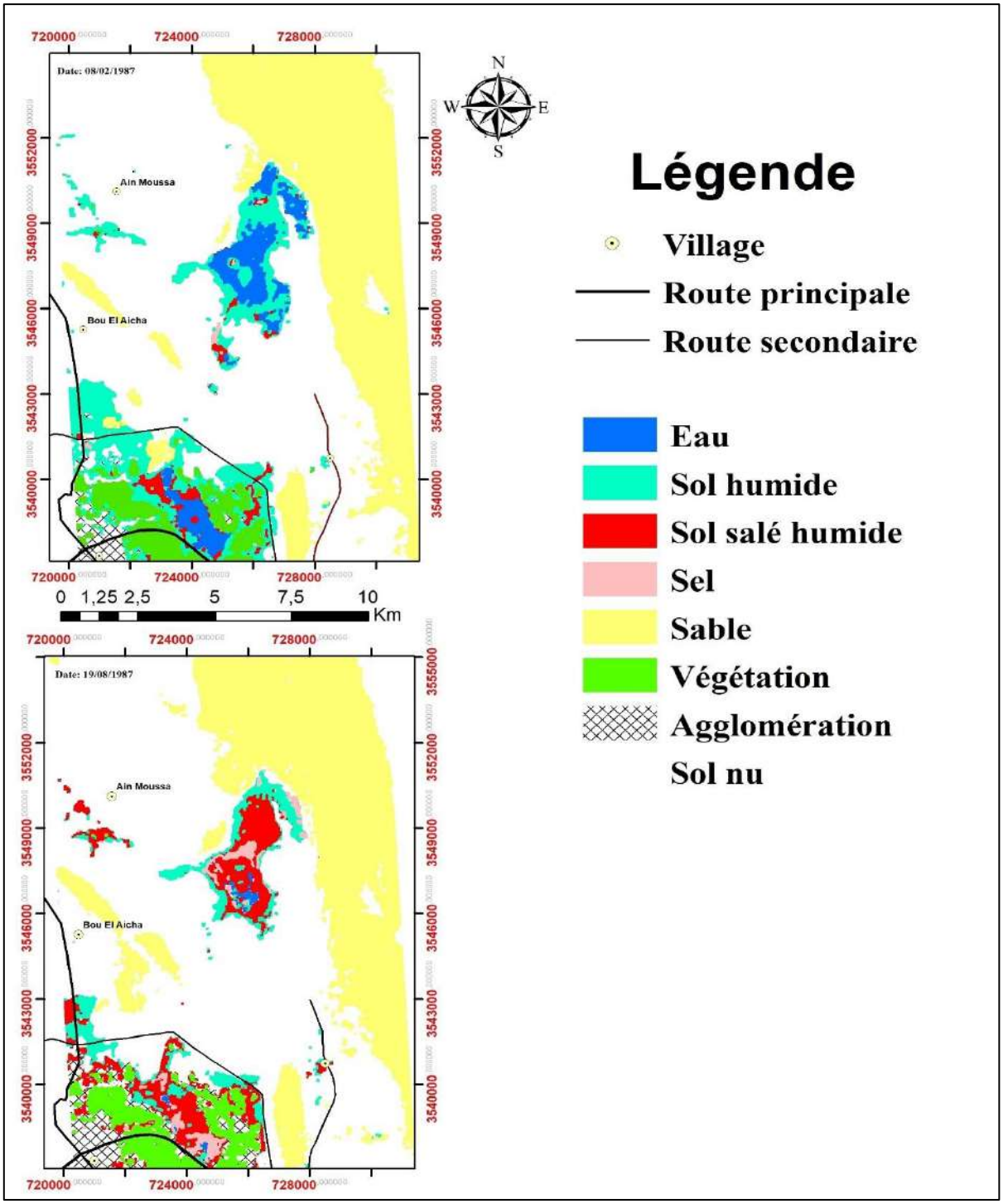


Figure 84 : Evolution de l'occupation des sols de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 1987

Tableau 15 : Récapitulatif de la précision des classifications

Classification	Précision globale	Indice de Kappa
02 Février 1987	90.33 %	0.90
06 Aout 1987	89.82 %	0.88

Les surfaces d'eau ont été diminuées continuellement, depuis le période humide jusqu'à la période sèche de 727 ha au mois de Février à 46 ha au mois d'Aout avec une diminution de 93%. Cette diminution d'eau est due à une évaporation intense dans un tel climat conduisant à une précipitation des sels. Ces résultats montrent l'influence directe de facteurs climatiques sur les zones humides de cette région désertique. La figure présente l'évolution des états des surface entre Février et Aout de l'année 1987.

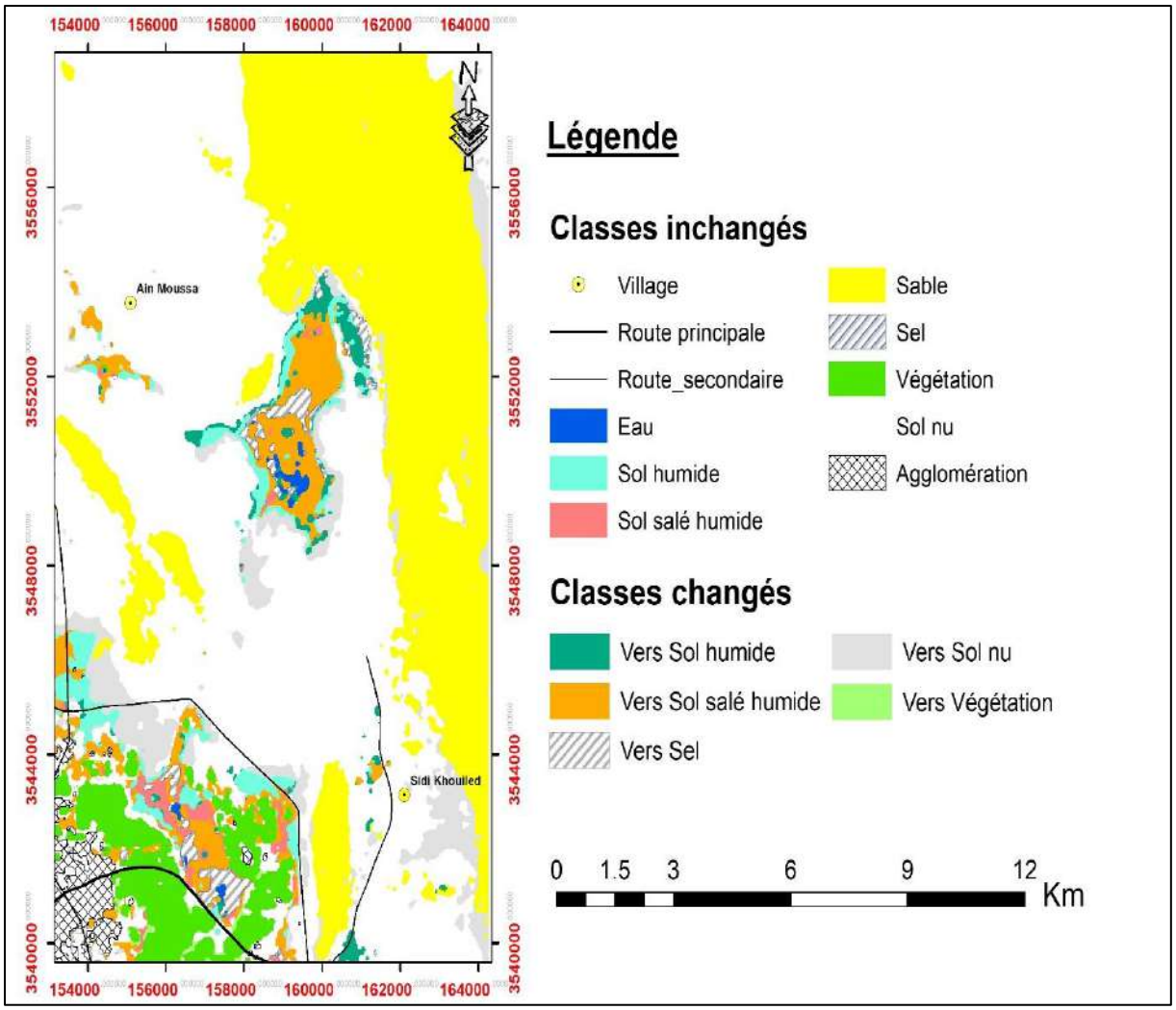


Figure 85 : Cartographie de changement des états de surface de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 1987)

6.2.2.2. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 2000.

Le tableau 16 montre la récapitulatif de la précision des classifications des images de l'année 2000. Les surfaces d'eau ont enregistré une diminution considérable, depuis la période humide jusqu'à la période sèche,

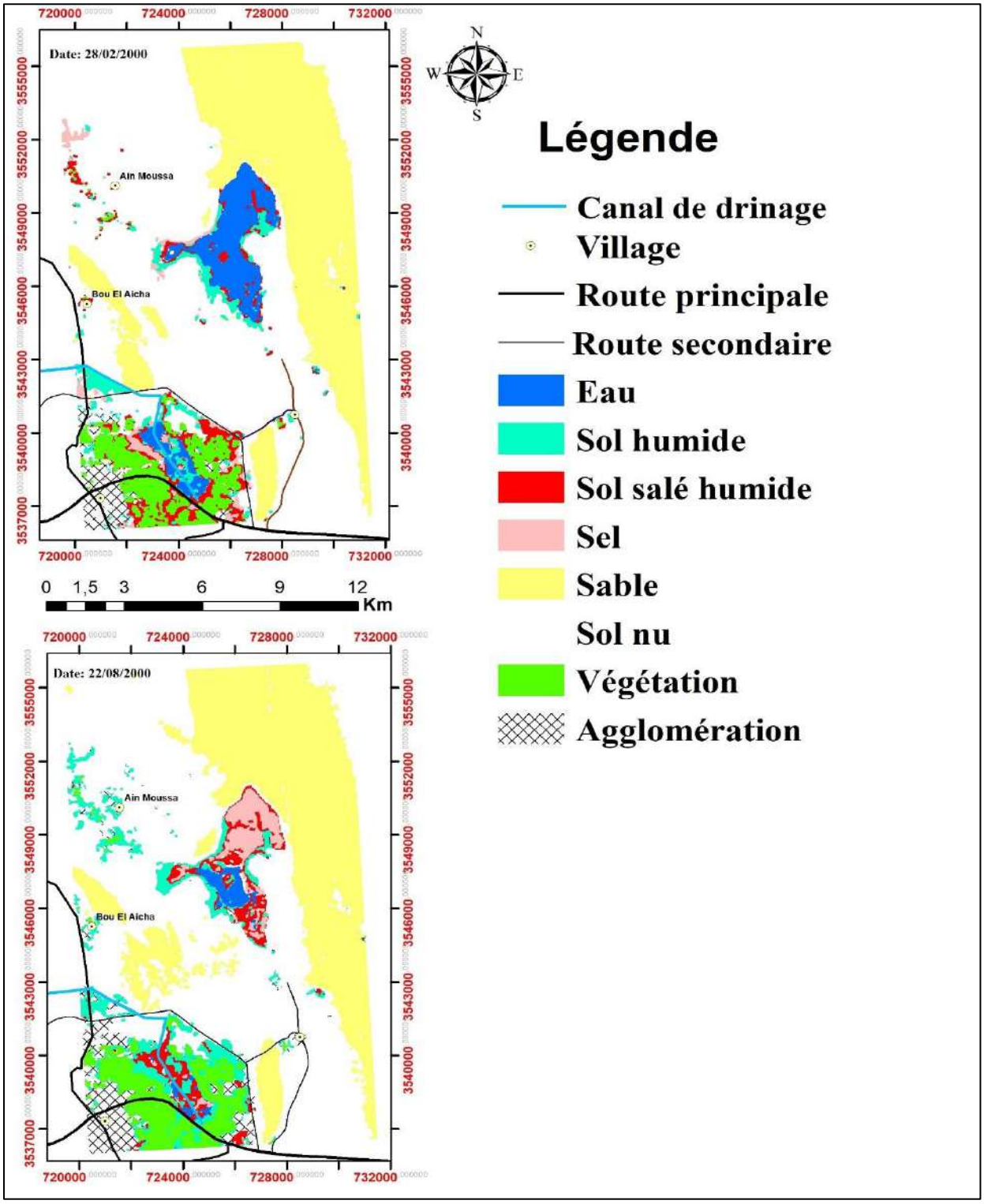


Figure 86 : Evolution de l'occupation des sols de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 2000

Tableau 16 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Oum Erranebe (Février-Aout 2000)

Classification	Précision globale	Indice de Kappa
28 Février 2000	91.32 %	0.91
22 Aout 2000	93.87 %	0.94

On a une valeur de 1108 ha de surface d'eau au mois de Février à seulement 20% de surface initial au mois d'Aout avec un taux de diminution de 80%, la surface inchangée est de surface d'eau est 227 ha. Cette diminution d'eau est due à une évaporation intense. Le sol humide a gardé une surface de 320 ha, alors que le taux changement total indique une augmentation de 83% de surface par apport à la surface initial. Ces résultats montrent toujours l'influence directe de facteurs climatiques sur les zones humides de cette région désertique. On remarque l'augmentation de surface d'eau à l'année 2000 par rapport à l'année 1987, cette augmentation est dû au développement démographique et économique à la région de Ouargla.

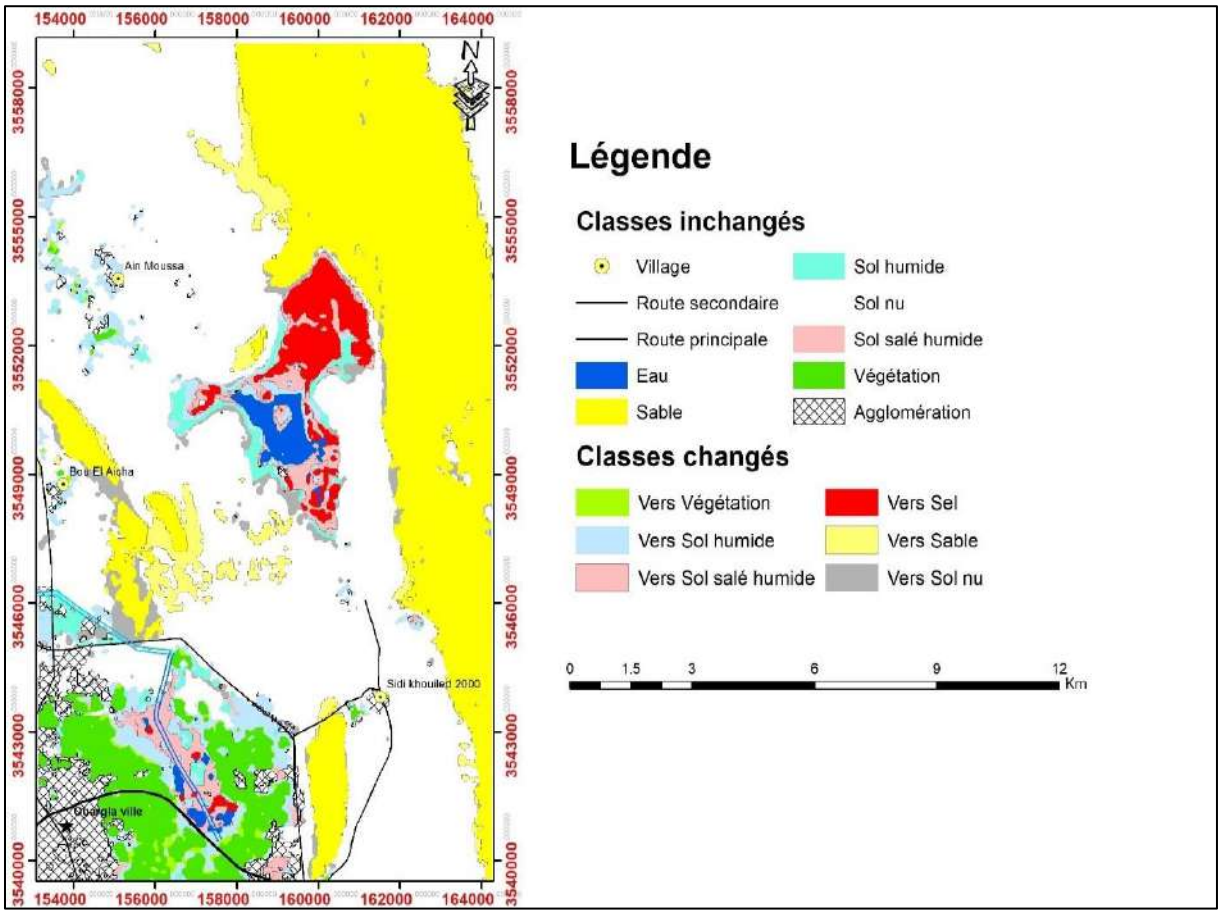


Figure 87 : Cartographie de changement des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 2000)

6.2.2.3. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida au cours de l'année 2016

La matrice de confusion pour les classifications est calculée, on a extrait la précision de classification et le coefficient de Kappa pour chaque image. L'image daté 23/01/2016 a une précision de classification de 94.18% et un indice de Kappa égale à 0.93, et l'image daté 18/08/2016 a une précision de 95.22% et un indice de Kappa de 0.92.

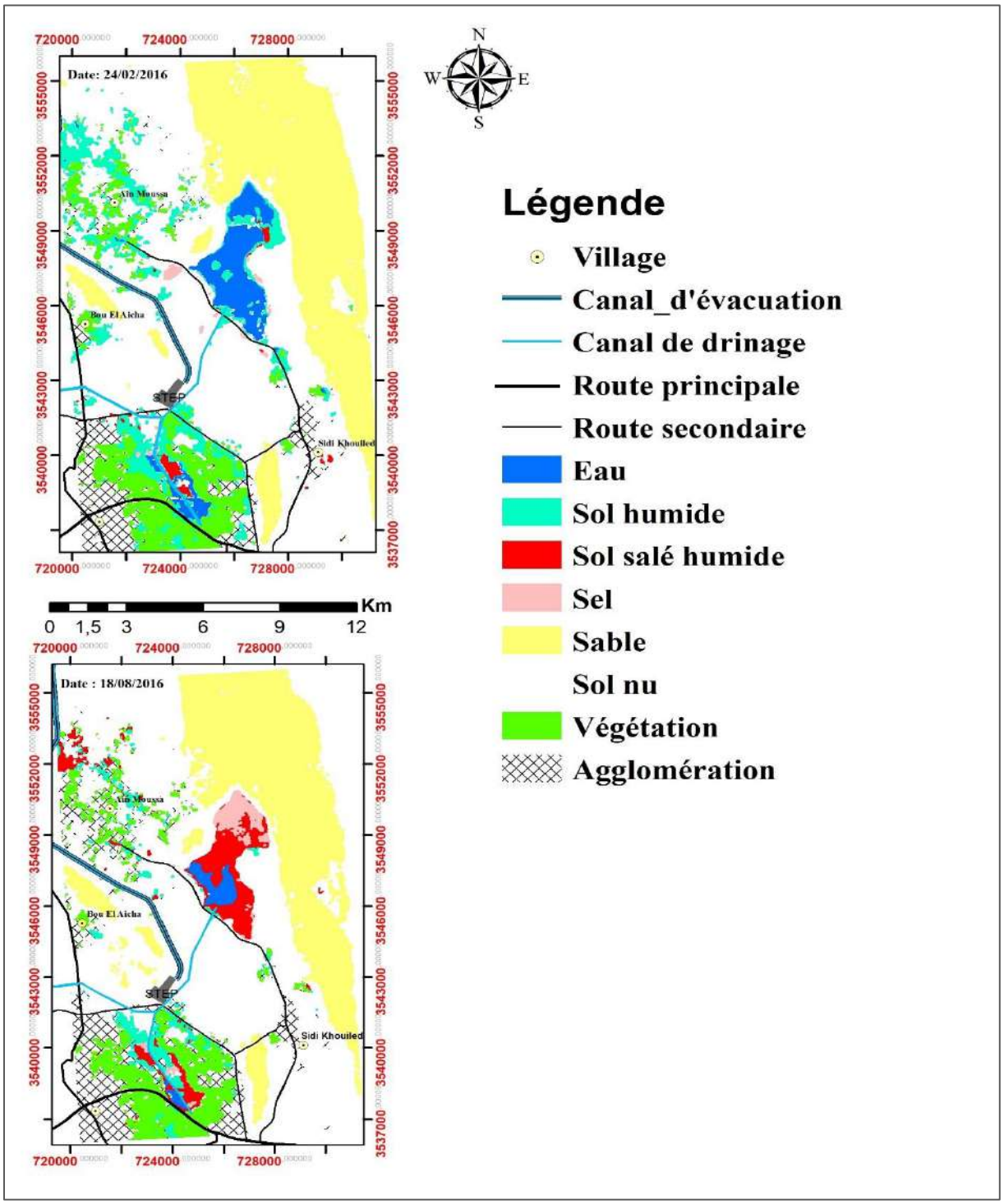


Figure 88 : Evolution de l'occupation des sols de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Beida au cours de l'année 2016.

Les surfaces d'eau ont enregistré une diminution considérable, depuis la période humide jusqu'à la période sèche, au mois de février la surface totale d'eau au Sebkha et Chott Ain El Baida à l'ordre de 856 ha, alors qu'au mois d'Aout la surface d'eau est de 215 ha avec un taux total de diminution de 74% de l'état initial.

On constate que la surface d'eau soit au période humide ou sèche a diminué, malgré l'augmentation des rejets urbain ou des eaux de drainage des zone agriculture. Cette diminution est dû à la création d'un grand projet d'épuration représenté au transférer les eaux usées épurés de l'agglomération de Ouargla vers Sebkha Safioune depuis l'année 2011, au niveau de Chott Ain El Baida la mise en marche de niveau canal de drainage des eaux d'irrigation a la surface d'eau dans le chott.

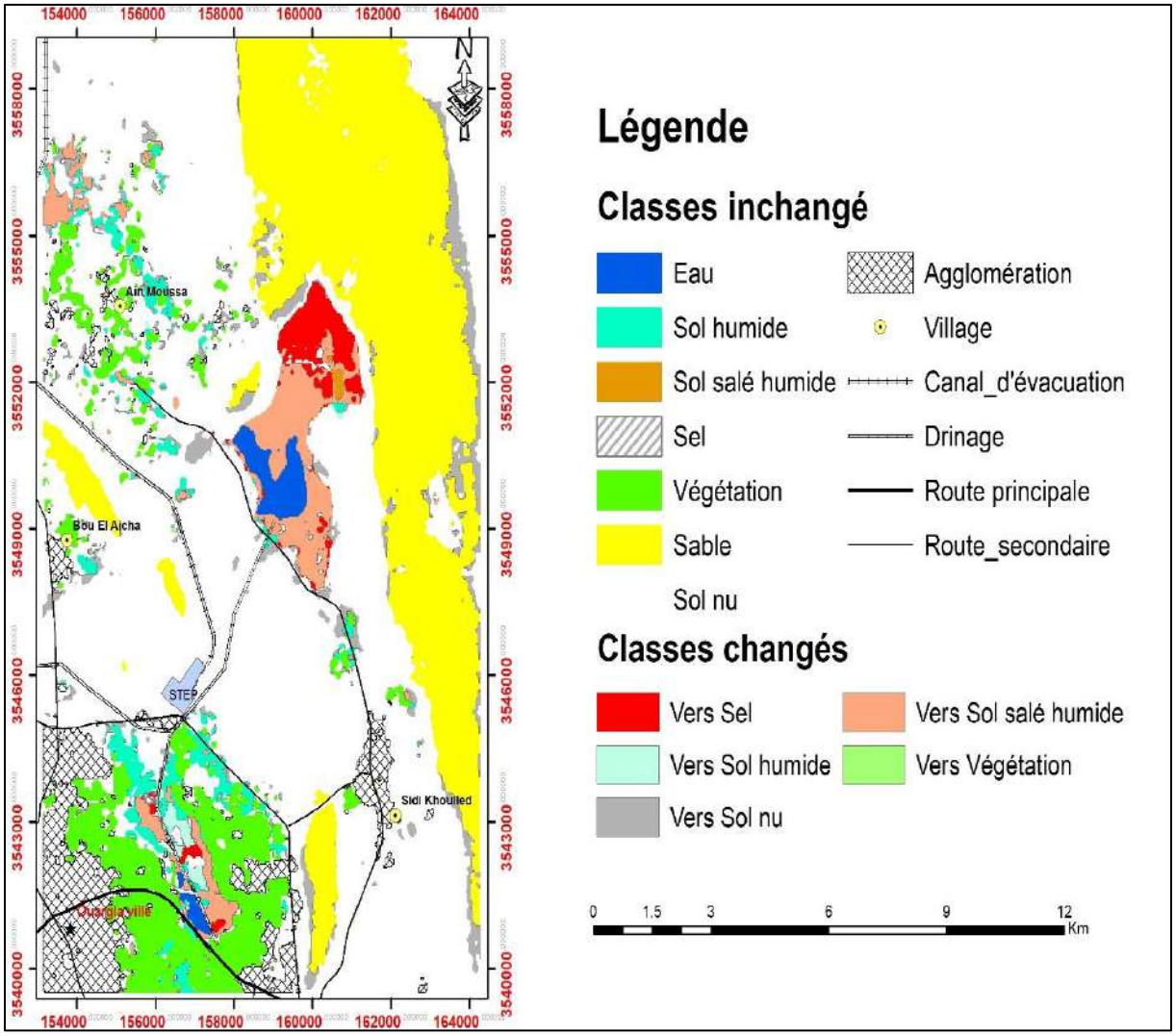


Figure 89 : Cartographie de changement des états de surface au Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida (Février-Aout 2016)

6.3. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sabkhat Atarafiyah et Sebkha Oum Erranebe

6.3.1. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sabkhat Atarafiyah (1986, 2000 et 2016)

Pour étudier l'évolution interannuelle de Sabkhat Atarafiyah, trois images satellitaires a été choisi ; 2 images de Landsat 5 TM daté 22/02/1986 et 06/02/2000, et une image de Landsat 8 OLI daté 18/02/2016. Les trois images étaient par le logiciel Envi pour avoir trois cartes de l'occupation de sol, une étude statistique sur ces dernières a été faite pour déterminer les changements des surfaces (Change detection) de Sebkha.

6.3.1.1. Validation de classification

La méthode de maximum de vraisemblances a été toujours utiliser pour la classification des images satellitaires. La validation de l'ensemble des classifications est faite par l'utilisation des matrices de confusion des années 1986, 2000 et 2016 (Tableau 17).

Tableau 17 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sabkhat Atarafiyah (1986,2000 et 2016)

Classification	Précision globale	Indice de Kappa
22 Février 1986	90.31%	0.91
06 Février 2000	93.51%	0.92
18 Février 2016	92.41%	0.91

6.3.1.2. Les matrices de changement

Les différents changements d'occupation de sol sont calculés à partir de matrice de changement. Une simple lecture montre l'évolution des surfaces occupées par ces classes, où chaque colonne représente l'état initial de chaque classe dans la date donnée, ainsi que les différents changements de cette même classe vers autres. Par exemple on prend la matrice de changement mentionnée dans le tableau 16, la colonne de sol humide occupe une surface totale de 899 ha (class total) où 23 ha sont restés de sol humide, 360 ha au Février 1986 devenus des sols nus, ainsi que les autres évolutions. On a chaque ligne montre l'état final de chaque classe. La ligne de sol humide par exemple montre que sa surface en Février 2000 était 41 ha.

1- évolution temporelle entre 1986 et 2000

Les surfaces des classes inchangées :

Le tableau 18 montre les valeurs stables des classes étudier, pour la classe de Végétation une surface de 159 Ha inchangée entre les deux dates, avec 592 ha pour le sol salé sec, 261 ha de sol salé humide, 23 ha de sol humide et 8862 ha de sol nu.

Tableau 18 : Matrices de changement entre 1986 et 2000 de Sabkhat Atarafiyah.

Superficie (Ha)	Végétation	Sol nu	Sable	Sol salé humide	Sol salé sec	Sol humide	Classe total
Végétation	**159**	8	57	0	0	3	**227**
Sol nu	444	**8862**	403	34	146	360	**10249**
Sable	37	327	**3437**	3	22	66	**3892**
Sol salé humide	0	0	0	**261**	2	5	**269**
Sol salé sec	3	375	310	825	**592**	442	**2547**
Sol humide	1	10	1	3	3	**23**	**41**
Classe totale	**644**	**9582**	**4208**	**1126**	**765**	**899**	
Classe change	**485**	**720**	**771**	**505**	**173**	**876**	
Image déférence	**-417**	**-667**	**-316**	**-857**	**1782**	**-858**	

Les surfaces des classes changées : la classe sol humide a vu un changement très important présenté d'une surface de 876 ha, par contre elle avait gagné une surface de 18 ha, la diminution totale de cette Classe égale à 858 ha. La classe sol salé humide a enregistré un changement de 865 ha, alors que la surface totale perdu est de 857 ha. Le sol salé sec a vu une augmentation de 1782 ha, alors que la surface changée est de 173 ha. La végétation a perdu 416 ha de surface total entre les daté.

I1- évolution temporelle entre 2000 et 2016

Le tableau 19 montre l'évolution des états de surface entre 2000 et 2016, les résultats obtenus sont comme suivant :

Les surfaces des clases inchangées :

Dans cette période la classe de sol salé humide a une surface inchangée de 255 ha, le sol salé sec avec une surface de 1422 ha, 3437 ha de sable et une surface de 9618 ha de sol nu.

Les surfaces des classes changées :

La classe le plus changée est le sol humide avec un taux de changement de 100%, par contre Cette classe a gagné une surface de 432 ha entre les deux dates. Les classes végétation, sable et sol salé sec ont enregistré respectivement une diminution de 170 ha, 831 ha et 842 ha de surface

total. Les classes sol nu et sol salé humide leur superficie a augmenté avec 1132 ha pour le premier et 279 ha pour le sol salé humide.

Tableau 19 : Matrices de changement entre 2000 et 2016 de Sabkhat Atarafiyah

Superficie (Ha)	Végétation	Sol nu	Sable	Sol salé humide	Sol salé sec	Sol humide	Classe total
Végétation	**6**	40	8	0	0	0	**54**
Sol nu	164	**9618**	1135	0	575	15	**11507**
Sable	52	327	**3437**	3	22	1	**3842**
Sol salé humide	0	0	0	**255**	295	0	**550**
Sol salé sec	0	109	44	13	**1422**	24	**1612**
Sol humide	2	281	49	0	140	**0**	**472**
Classe totale	**224**	**10375**	**4673**	**271**	**2454**	**40**	
Classe change	**218**	**757**	**1236**	**16**	**2312**	**16**	
Image déférence	**-170**	**1132**	**-831**	**279**	**-842**	**432**	

II1- évolution temporelle total de Sabkhat Atarafiyah (entre 1986 et 2016).

Le tableau 20 montre l'évolution total des états de surface entre 1986 et 2016, les résultats obtenus sont comme suivant :

Les surfaces des classes inchangées

La classe sol salé humide a gardé une surface inchangée de 331 ha, et le sol salé sec a enregistré une valeur de 165 ha de surface inchangée, et le sol humide a gardé 221 ha sans changement, et la végétation avec une superficie de 72 ha sans changement.

Tableau 20 : Matrices de changement entre 1986 et 2016 de Sabkhat Atarafiyah.

Superficie (Ha)	*Végétation*	*Sol nu*	*Sable*	*Sol salé humide*	*Sol salé sec*	*Sol humide*	*Classe total*
Végétation	**72**	125	42	0	0	55	**294**
Sol nu	948	**13746**	1516	11	0	387	**16608**
Sable	42	1210	**7947**	2	0	17	**9218**
Sol salé humide	1	544	206	**331**	1	1068	**2151**
Sol salé sec	10	1042	38	403	**165**	177	**1835**
Sol humide	6	225	53	43	0	**221**	**548**
Classe totale	**1079**	**16892**	**9802**	**790**	**166**	**1925**	
Classe change	**1007**	**3146**	**1855**	**459**	**1**	**1704**	
Image déférence	**-785**	**-284**	**-584**	**1361**	**1669**	**-1156**	

Les surfaces des classes changées

La classes sol humide a perdu la plus grande surface qui est de 1156 ha, suivi par la végétation qui a perdu 785 ha de surface total initial, cela est dû à la réticence de la population à s'engager dans des activités agricoles. Par contre les classes de sol salé humide et le sol salé sec ont enregistré une augmentation respectivement de 1361 ha et 1669 ha.

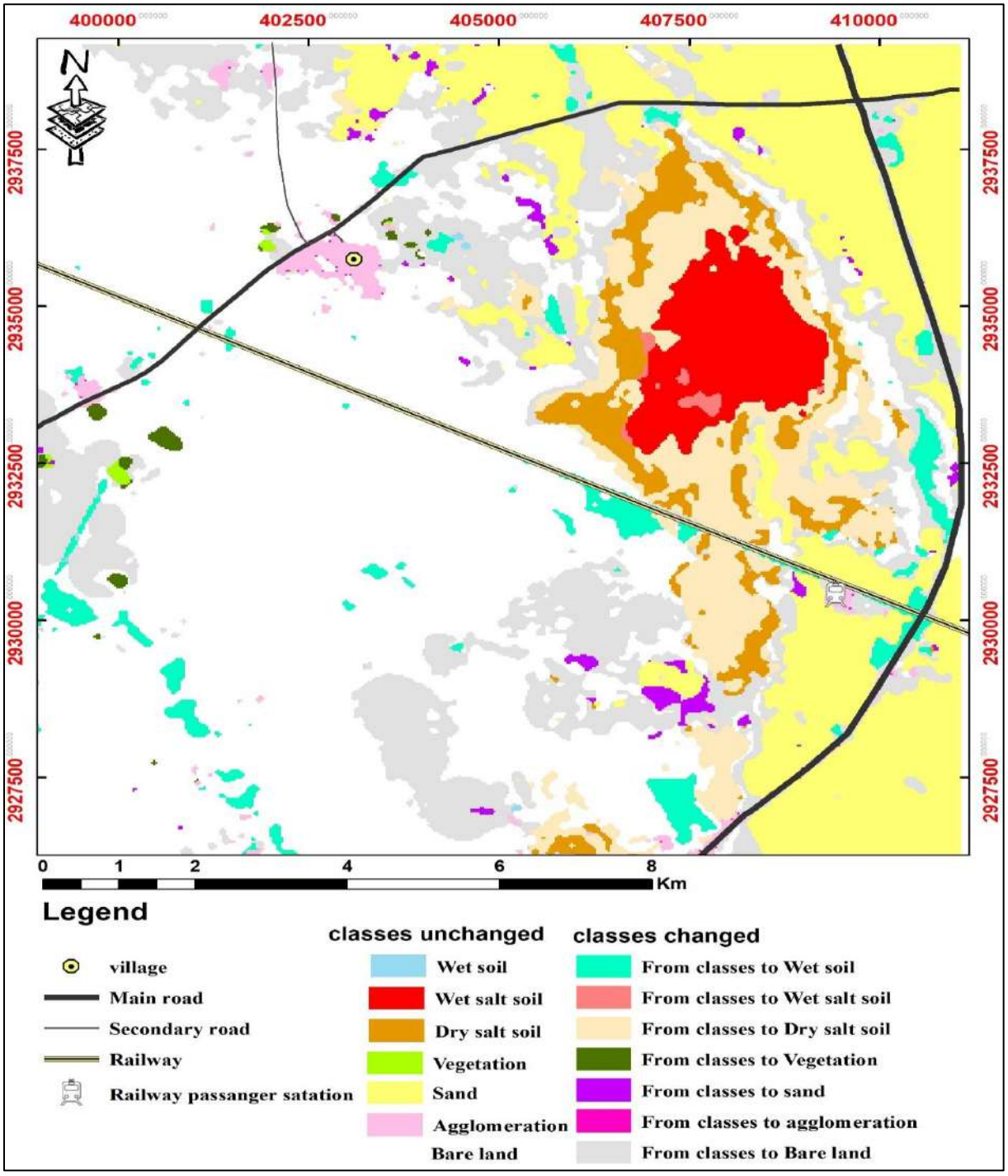


Figure 90 : Carte d'évolution de l'occupation des sols de Sabkhat Atarafiyah entre 1986 et 2016.

6.3.1.3. Cartographie de changement :

La figure 90 montre l'évolution globale entre 1986 et 2016, le changement des états des surfaces est très remarquable, les classes qui sont frottement changées sont les végétation et le sol humide , cette changement est dû au condition climatique en premier lieu et au Le facteur humain en deuxième, le projet de le train a été précédent par une aménagement de terrain, ils ont construit des canaux de drainage sous la route pour séché les surface proche au le chemin de fer, ce là aidé à fait une écoulement des eaux de Sebkha vers l'ouest à Faidat Al ikrache.

6.3.2. Evolution spatiotemporelle interannuelle de Sebkha Oum Erranebe (1987,2000 et 2016)

6.3.2.1. Validation de classification

L'ensemble des classifications ont étés validées par les matrices de confusion des différentes dates. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous. On peut donc constater qu'il existe une très bonne correspondance entre la cartographie et les observations de terrain.

Tableau 21 : Récapitulatif de la précision des classifications de Sebkha Oum Erranebe (1987,2000 et 2016)

Classification	Précision globale	Indice de Kappa
08 Février 1987	90.33 %	0.90
28 Février 2000	91.32 %	0.91
23 Janvier 2016	94.18%	0.93

6.3.2.2. Les matrices de changement

Pour obtenir une estimation quantitative des surfaces, on a calculé les matrices des changements, les résultats obtenus montrent des surfaces des classes inchangées entre deux dates d'une part, et celles qui ont changé par une augmentation ou une diminution d'autre part. à partir des trois dates choisis. On fait une étude statistique entre les couples suivant :

1- Evolution entre 1987 et 2000

2- Evolution entre 2000 et 2016

3- Evolution total entre 1987 et 2016.

1- évolution temporelle entre 1987 et 2000

Le tableau 22 de changement entre 1987 et 2000 a montré les surfaces inchangées et changées des classes étudiées.

Les surfaces des classes inchangées

La classe d'eau a gardé une surface inchangée de 638 ha, le sol humide avec 297 ha, le sol salé humide a 81 ha de surface inchangée, les autres classes comme le sel a gardé 7 ha, et l'agglomération avec 293 ha

Tableau 22 : Matrices de changement entre 1987 et 2000 de Sebkha Oum Erranebe

Surface (Ha)	Sel	Végétation	Eau	Sable	Sol humide	Sol salé humide	Sol nu	Agglomération	Class Total
Sel	**7**	0	1	0	163	39	121	1	**332**
Végétation	0	**941**	1	0	137	6	13	2	**1100**
Eau	7	2	**638**	1	345	85	50	0	**1128**
Sable	0	0	0	**505**	23	0	644	1	**1173**
Sol humide	4	9	64	37	**297**	40	229	18	**698**
Sol salé humide	2	80	10	2	365	**81**	114	3	**657**
Sol nu	2	3	13	661	626	32	**9919**	22	**11278**
Agglomération	0	40	0	0	136	9	34	**293**	**512**
Class Total	**22**	**1075**	**727**	**1206**	**2092**	**292**	**11124**	**340**	
Class Changes	**15**	**1.46**	**89**	**701**	**1795**	**211**	**1205**	**47**	
Image Difference	**310**	**25**	**401**	**-33**	**-1394**	**365**	**154**	**172**	

Les surfaces des classes changées

La classe la plus changée est seul de sol humide qui a perdu 1349 ha, les autres classes ont enregistré une augmentation comme suivant ; le sel a gagné 310 ha de surface, les classes sol salé humide et eau ont augmenté respectivement avec 365 ha et 401 ha de surfaces nouveaux.

I1- évolution temporelle entre 2000 et 2016

L'évolution de cette période est présentée dans le tableau 23, les résultats obtenus sont comme suivant :

Tableau 23 : Matrices de changement entre 2000 et 2016 de Sebkha Oum Erranebe

Surface (Ha)	Sel	Végétation	Eau	Sable	Sol humide	Sol salé humide	Sol nu	Aggloméra	Class Total
Sel	**3**	0	32	0	16	9	25	0	**85**
Végétation	15	**967**	14	1	25	269	498	2	**1791**
Eau	1	0	**835**	0	25	5	7	0	**873**
Sable	0	0	0	**5175**	1	1	208	0	**5385**
Sol humide	173	16	156	8	**176**	222	859	3	**1613**
Sol salé humide	16	0	13	1	42	**10**	26	0	**108**
Sol nu	76	1	38	761	29	67	**8647**	0	**9619**
Agglomération	47	107	8	6	110	61	612	**508**	**1459**
Class Total	**332**	**1091**	**1096**	**5952**	**424**	**644**	**10882**	**513**	
Class Changes	**328**	**124**	**261**	**777**	**248**	**634**	**2235**	**5**	
Image Difference	**-246**	**700**	**-223**	**-567**	**1189**	**-536**	**-1263**	**946**	

Les surfaces des classes inchangées :

La classe de l'eau a une surface inchangée de 835 ha et le sol humide a 176 ha, le sol salé humide et le sel ont des surfaces inchangées respectivement de 10 ha et 3 ha, la végétation garde 967 ha sans changement, et l'agglomération avec 508 ha.

Les surfaces des classes changées :

La classe la plus changée est le sol humide avec une augmentation de 1189 ha et le sol nu avec une diminution de 1263 ha, les classes eau, sel, sol salé humide tous ont enregistré une diminution avec : 246 ha de sel, 223 ha de l'eau, 536 ha de sol salé humide.

II1- évolution temporelle entre 1987 et 2016 :

Les résultats obtenus à partir de tableau 24 montre les informations suivantes :

La classe d'eau a gardé une surface de 547 ha sans changement, mais il a aussi gagné une surface de 223 ha entre Les deux dates. La classes de sol humide a une surface inchangée de 509 ha, mais elle a perdu 498 ha, la classe sol salé humide même a perdu 180 ha de surface initial, avec le sol humide qui a perdu aussi 498 ha. Par contre la végétation a augmenté sa surface avec 728 ha, et aussi les sels ont gagné 50 ha de nouveau surface.

Tableau 24 : Matrices de changement entre 1987 et 2016 de Sebkha Oum Erranebe

Surface (Ha)	Sel	Végétation	Eau	Sable	Sol humide	Sol salé humide	Sol nu	Agglomération	Class Total
Sel	**4**	0	6	4	37	5	33	0	**89**
Végétation	0	**908**	14	2	334	32	506	1	**1797**
Eau	5	2	**547**	0	228	53	37	0	**872**
Sable	0	0	0	**5029**	8	0	346	1	**5384**
Sol humide	5	29	7	18	**509**	90	879	8	**1545**
Sol salé humide	1	0	24	1	32	**20**	29	0	**107**
Sol nu	19	1	31	921	538	41	**8313**	9	**9873**
Agglomération	5	129	20	17	357	46	563	**321**	**1458**
Class Total	**39**	**1069**	**649**	**5992**	**2043**	**287**	**10706**	**340**	
Class Changes	**35**	**161**	**102**	**963**	**1534**	**267**	**2393**	**19**	
Image Difference	**50**	**728**	**223**	**-608**	**-498**	**-180**	**-833**	**1118**	

6.3.2.3. Cartographie de changement

La figue 91 montre l'évolution de changement total ente 1987 et 2016, L'étude de détection des changements des deux dates à la fois montre que la surface de l'eau inchangée est de 547 ha. Ceci indique la vaste étendue de cette classe cela peut expliquer à la réalisation de station de pompage et le canal de drainage des eaux urbain et agriculture.

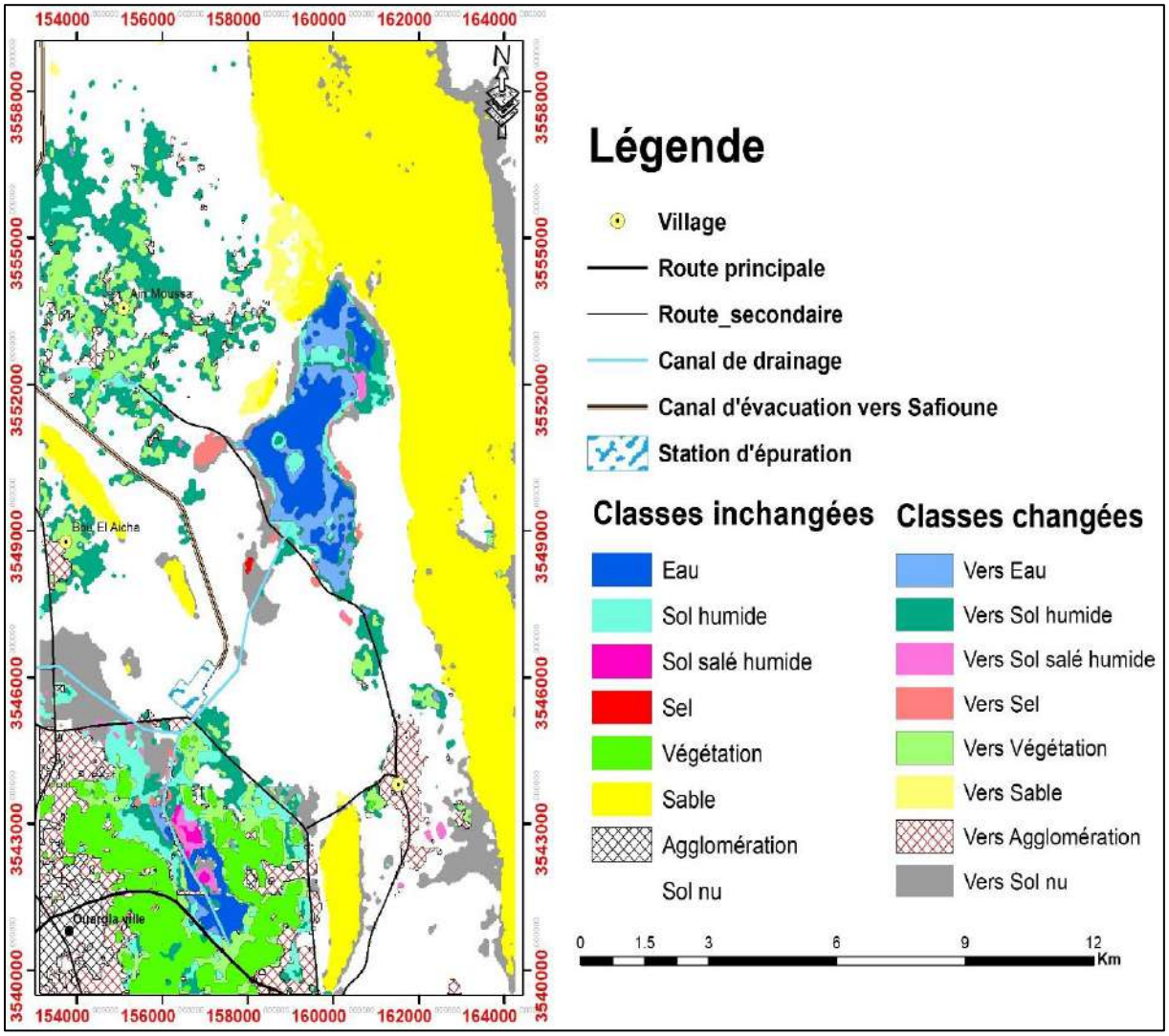


Figure 91 : Carte d'évolution de l'occupation des sols de Sebkha Oum Erranebe entre 1987 et 2016.

6.4. Conclusion

Les résultats obtenus à partir de l'étude des développements saisonniers au cours des années successives montrent que les changements saisonniers des zones humides sont directement affectés par les facteurs climatiques, notamment l'intensité de l'évaporation et les quantités de précipitation, cela a été remarqué au Sabkhat Atarafiyah. Au Sebkha Oum Erranebe en plus de ces facteurs climatiques, l'activité humaine représentée dans l'eau anthropique déverser dans la Sebkha.

A travers l'étude de l'évolution interannuelle, les résultats, nous montrons également qu'il y a une augmentation de la superficie des zones humides, qu'il s'agisse d'eau, de sol humide ou de sels dans les deux Sebkhas, c'est une évolution positive, mais le problème qui se pose c'est la qualité des eaux jetée dans ces Sebkhas, qui peut être une source de pollution, ce qui entraînera le déséquilibre écologique dans ces milieux, ceci de côté environnemental. A l'aspect

économique, Cela aura-t-il un impact ? sur l'exploitation de ces ressources minières dans à l'avenir, cette question reste posée.

Conclusion générale

L'étude comparative entre les deux zones d'étude a permis de connaître les caractéristiques de chaque région, que ce soit à l'échelle de géologie, hydrogéologie, géomorphologie et la qualité des eaux. En plus d'identifier les aspects des différences et similitudes dans les deux Oasis. Dans ce travail, nous sommes appuyés sur les références bibliographique existantes en plus du travail sur terrain.

Les deux Oasis sont similaires en termes climatiques. Où ils sont soumis à un climat désertique sec, caractérisé par une pénurie de pluie et une forte intensité d'évaporation, en plus des températures très élevées en été ; qui peut attendre 50°C. Cependant, nous avons enregistré une différence d'intensité des précipitations entre les deux régions, les précipitations annuelles à la région de Al Qassim sont de 135 mm/an. Quant à Ouargla, les précipitations annuelles ne dépassent pas 40 mm/an.

Du point de vue géologique, chacune des deux oasis se situe dans un bassin sédimentaire, occupent les lits des Oueds. Le bassin sédimentaire de la plateforme Arabe et le bassin de plateforme Saharien ont presque les mêmes caractéristiques géologiques, cependant, la région de Al Qassim est caractérisée par l'affleurement de socle précambrien à l'Ouest de la région, ce dernier est constitué des roches volcaniques et métamorphiques.

L'hydrogéologie des régions est caractérisée par la présence des systèmes aquifères énorme ; le SASS à la région de Ouargla et le système aquifère multicouche de la zone Saq à Al Qassim. Les formations aquifères important à Al Qassim sont contenu dans les formations Paléozoïques, par contre le CI est contenu dans les formations mésozoïques, et le CT est en formation tertiaire. On remarque aussi la vaste superficie de SASS en comparaison avec la zone de Saq (1/2 de SASS)

Les travaux de cartographie des Sebkhas et des chotts, et l'étude de changement et évolution saisonnière et interannuelle dans le temps a été faite à l'aide de l'outil télédétection, on a utilisé les images de Landsat de déférentes dates. Les cartes d'occupation de sol des zones étudiées ont une bonne précision de classification, Ceci est grâce au bon traitement des données, et le choix de la méthode appropriée (supervisée ; maximum de vraisemblance), cette méthode est l'un de plus efficace méthodes de cartographie des zones humides. Les résultats obtenus des défèrent évolutions de changement des zone humides montre l'influence directe des conditions climatique sur ses zone, sans oublier Le facteur humain, Où ces zones sont utilisés pour jeter des déchets industriels et urbains, ce qui conduit à une perte d'équilibre écologique d'une part, et à la perte de ressources minière très importantes, représentées dans certains éléments rares que se retrouve en abondance dans les Sebkhas et les chotts comme le lithium (Hacini et al

2010) et d'autres métaux rares. L'importance de la réalisation des cartes de l'occupation de sol réside dans la création d'une base de données pour faciliter le suivi de ces espèces, on peut aussi utiliser ces cartes dans plusieurs domaines. Prenez exemple, dans le domaine urbain, ces cartes permettent aux ingénieurs au choix de terrains et les sites de construction de logements ou d'usines, en plus la construction de voies ferrées ou d'autoroutes, où les terrains de Sebkha sont inappropriés à ces travaux sauf s'ils sont aménagés. Quant à l'exploitation minière, ces cartes permettent de sélectionner des lieux adaptés à l'exploitation du sel.

Notant bien que les Sebkhas et les chotts des régions d'étude sont très riche en matière minérale et demande ainsi une focalisation sur ces zones, pour mettre en évidence l'importance de ces milieux sur le plan minier.

Enfin, on recommande ce qui suit :

- Faire des recherches et des études sur les Sebkhas et les Chotts dans le territoire de Al Qassim, où les études réalisées sur ces zones restent insuffisantes.
- La protection des zones humides et l'exploitation des ressources en sels
- Diffuser l'utilisation des techniques modernes par services de l'états dans la gestion et le Suivi de l'environnement.
- Soutien l'utilisation des eaux phréatique dans l'industrie et l'agriculture.
- Valorisation des mines rares qui se trouve dans les Sebkhas et Chotts par le développement de technique extraction de ces éléments rares (lithium, par exemple).
- L'utilisation de technique développer pour aider à rationaliser l'irrigation.

Références Bibliographiques

ABDULLAH ALMISNID (2005). Climate change and water use for irrigation: a case study in the Gassim area of Saudi Arabia. A thesis submitted to the School of Development Studies at the University of East Anglia in fulfilment of the requirements for the degree of Ph.D. 245p

AHCÈNE S, HAKIM S, ABDERRAHMANE M (2013). Contribution of multivariate statistical techniques in the hydrochemical evaluation of groundwater from the Ouargla phreatic aquifer in Algeria. Arab J Geosci ; 2013. 6:3427–3436

AL-ASWAD, A.A., AL-BASSAM, A.M., 1997. Proposed hydrostratigraphical classification and nomenclature: application to the Palaeozoic in Saudi Arabia. J. Afr. Earth sci., 24,4, pp. 497- 510.

AL-BASSAM, A.M., AL-DABBAGH, M.E., TAHIR HUSSEIN, M., 2000. Application of a revised hydrostratigraphical classification and nomenclature to the Mesozoic and Cenozoic succession of Saudi Arabia. *J. Afr. Earth sci.*, 30, 4, pp. 917-927.

ALIEV M., (1972). Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara algérien. (Tome 1) SONATRACH -Alger, 275p.

AL-LABOUN, A.A., 1987, Unayzah Formation: A new Permian-Carboniferous unit in Saudi Arabia, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 71, no. 1, pp. 29-38.

AL-LABOUN, A.A., 1986, Stratigraphy and hydrocarbon potential of the Paleozoic succession in both Tabuk and Widyan basins, Arabia: in Future petroleum provinces of the world (Halbouty, M.T., ed.), American Association of Petroleum Geologists, Memoir no. 40, pp. 373-397.

AL-LABOUN, A.A., 1982, The subsurface stratigraphy of pre-Khuff formations in central and northwestern Arabia: Ph.D. Thesis, Faculty of Earth Sciences, King Abdulaziz University, Jeddah, 102 p.

ALSHARHAN, A.S., Nairn, A.E.M., 1997. Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier, Amsterdam, 942 p.

ANRH (2011) Agence Nationale des Ressources Hydrauliques : Hydrodynamic data

ANRH. (2004). Données sur les Logs stratigraphiques des forages de la Wilaya de Ouargla. Algérie. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Direction régionale Sud, Ouargla.

AYERS, R.S., WESTCOT, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. FAO, Rome

BALLAIS J L. 2010. Des oueds mythiques aux rivières artificielles, l'hydrographie de Bas-Sahara Algérien. Physio-Géo Revues, 4: 107-127. URL: http://physio-geo.revues.org/1173; DOI: 10.4000/physio-geo.1173.

BARTHELEMY, Y., BEON, O., LE NINDRE, Y.-M., MUNAF, S., POITRINAL, D., GUTIERREZ, A. VANDENBEUSCH, M., AL SHOAIBI, A., WIJNEN, M., 2007. Modelling of the Saq aquifer system (Saudi Arabia). In: Chery, L., De Marsily, G., Editors, Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage - Selected Papers on Hydrogeology 10, Taylor & Francis Group, Routledge, USA, Chap. 14, pp. 175-189.

Bélair G., Samraoui B., 1994. Death of a lake: Lac Noir in Northeastern Algeria. Environmental Conservation, 21 : 169-172.

BELLAOUER A (2008). Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et perspectives de solutions palliatives (Sahara Nord-est Septentrional - Algérie). Mémoire de Magister ; Université de Batna. 146p

BIG N°3. Initiation à la télédétection. Bulletin de l'Information Géographique appliquée aux activités de Recherche-Développement. http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p7774_9f5e71f0025c698de2ef82085d1c0e20big_3.pdf

Bisson J. 2003. Le Sahara : mythes et réalités d'un désert convoité. Paris : L'Harmattan, 479 p

BONNARD & GARDEL, 2005, Projet de protection de la cuvette d'Ouargla contre la remontée des eaux, études de reconnaissance et rapports internes.

BONNET, B., S. Aulong, S. Goyet, M. Lutz, and R. Mathevet. 2005. Gestion inte´gre´e des zones humides me´diterrane´ennes, 160 pp. Conservation des zones humides me´diterrane´ennes no. 13. Arles: Tour du Valat.

BRGM, 2006. Connaissance des eaux souterraines d'Arabie Saoudite - Evaluation des ressources du système aquifère du Saq. Compte-rendu de la présentation du 4 février 2005.

BRGM/ATC (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, with Abunayyan Trading (Corporation), 2008a. Investigations of Updating Groundwater Mathematical Model(s) for the Saq and Overlying Aquifers. *Main Report, Volume 1*, Ministry of Water and Electricity, (KSA).

BRGM/ATC (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, with Abunayyan Trading

Corporation), 2008b. Investigations of Updating Groundwater Mathematical Model(s) for the Saq and Overlying Aquifers. Geology, *Volume 13*, Ministry of Water and Electricity, (KSA). Extraits transmis par Ma'Aden.

BRAMKAMP. R, 1945, unpublished report *in* Powers, R.W., 1968, Lexique stratigraphique international : Saudi Arabia : v. III, Asie, fasc. 10b1 : Centre National de la Recherché Scientifique, Paris, 177 p.

BRAMKAMP. R, 1950, unpublished report *in* Powers, R.W., 1968, Lexique stratigraphique international : Saudi Arabia : v. III, Asie, fasc. 10b1 : Centre National de la Recherché Scientifique, Paris, 177 p.

BRAMKAMP, 1952 unpublished report *in* Powers, R.W., 1968, Lexique stratigraphique international : Saudi Arabia : v. III, Asie, fasc. 10b1: Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 177 p.

BRYANT R.G., 1999. Application of AVHRR to monitoring a climatically sensitive playa. Case study: Chott El Djerid, southern Tunisia. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 283- 302.

BRYANT R.G., Rainey M.P., 2002. Investigation of flood inundation on playas within the zone of Chotts, using a time-series of AVHRR. Remote Sensing of Environment, 82: 360-375.

Busson G. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Edit : Paris ; 1971. 464p.

BUSSON. G. (1971). Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Edit., Paris, 464p.

BYOUNG CHUL KO, Hyeong Hun Kim and Jae Yeal Nam. (2015). Classification of Potential Water Bodies Using Landsat 8 OLI and a Combination of Two Boosted Random Forest Classifiers., Sensors 2015, 15, 13763-13777, ISSN 1424-8220

CHAOUCHE-BENCHERIF MERIAMA, 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 doctorat Université de Constantine, 439 p.

CLOUET Y., DOLLE V., 1998. Aridité, oasis et petite production, exigences hydrauliques et Fragilités sociales : une approche par une analyse spatiale et socio-économique. Sécheresse 2, (9) : 83-94.

CORNET. A. (1964). Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. et Géol.Dyn., vol. VI.fasc. 1,5-72.

CORNET. A., et GOUSCOV.N. (1952). Les eaux du Crétacé inférieur continental dans le Sahara algérien (nappe dite « albien »). In « La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie 000 » XIXème congrès géologique international T.II, 30p

Costa, L.T., Farinha, J.C., Hecker, N. et Tomàs Vives, P., 1996, Mediterranean Wetland Inventory: A Reference Manual. MedWet / Instituto da Conservac.o da Natureza / Wetlands International Publication, Volume I., 102 p.

Côte, M. (2005). L'Urbanisation aujourd'hui au Bas Sahara. In Côte, M. (éd.). La ville et le Désert : Le bas-Sahara Algérien. Paris : Karthala et Iremam.

DEMNATI Fatma (2013), Biodiversité et Enjeux Socio-économiques des lacs salés (Chotts et Sebkhas) d'Algérie. Cas du Chott Merouane et Melghir. Thèse de Doctorat, Univ Biskra, 143p

DELACOURT C., Télédétection et Rayonnement ElectroMagnétique. Cours en Ligne, Université de Brest. http://perso-sdt.univ-brest.fr/~delacour/COURS/M2-10.1/Cours1_Teldet_REM/index.html

DIREY F., 1960. Géologie et géomorphologie et hydrogéologie souterraine. Colloque Général sur le problème de la zone aride, 11-18 mai, Paris.

DJIDEL.M. (2009). Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla, (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de Doctorat, Univ Badji Mokhtar, Annaba, 165p

DJIDEL MOHAMED, Labar Sofiane, Medjani Fethi, Bouafia Imadeddine, (2013), Etude des changements écologiques des zones humides en milieux désertiques en utilisant l'imagerie Landsat et le SIG. International Journal of Environment & Water, Vol 2, Issue 5, pp. 81-87. ISSN 2052-3408.

DJIDEL MOHAMED, Labar Sofiane, Medjani Fethi, DJORFI Samir, (2014), Cartographie des changements des zones humides désertiques sous influences anthropiques par utilisation de la télédétection et le SIG. International Journal of Environment & Water, Vol 3, Issue 1, 2014 pp. 103-107. ISSN 2052-3408.

DREUX P., (1980), Précis d'écologie vol 2. Ed. Presse. Université de France, paris, 231p.

E. NEZLI (2004). Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla). Mémoire de magister, Université d'Annaba, Algérie, 100p.

EMBERGER, L. (1955). Une classification biogéographique des climats. Trav. Inst. Bot., Montpellier, 7, 3-43.

FABRE. J. (1976). Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.

FASSI, D. 2017. Les oasis du Monde, carrefour des civilisations et modèle fondamental de durabilité. Cah. Agric. 26: 46001.

FERRY, M., Toutain, G. (1990). Concurrence et complementarite des especes vegetales dans les oasis. Options Mediterraneennes. Serie A: Seminaires Mediterraneens (CIHEAM). no. 11.

FETHI MEDJANI & Oualid Hamdaoui & Mohamed Djidel & Danielle Ducrot, Diachronic evolution of wetlands in a desert arid climate of the basin of Ouargla (southeastern Algeria) between 1987 and 2009 by remote sensing, Arab J Geosci 8: 10181.doi: 10.1007/s12517-

FOX, J.E., Ahlbrandt, T.S., 2002. Petroleum Geology and Total Petroleum Systems of the Widyan Basin and Interior Platform of Saudi Arabia and Iraq. U.S. Geol. Survey Bull. 2202-E,30 p.

GUENDOUZ A, Reghis Z, Moulla AS (1992) Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Rapport N°1, p 66

GUENDOUZ A. et MOULA. A.S (1992-1995) - Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla 1er rapport interne 1992 et 2ème rapport interne 1995 CDTN/DDHL- ALGER, 30p-60p.

GUENDOUZ. A. (1985). Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional, Algérie. Thèse Univ. Paris-Sud, Orsay, France.

GUENDOUZ. A., MICHELOT. JL. (2006). Chlorine-36 dating of deep groundwater from northern Sahara. Journal of Hydrology. 328, 572– 580

Guezoul, O., Chenchouni, H., Sekour, M., Ababsa, L., Souttou, K., Doumandji, S. (2013). An avifaunal survey of mesic manmade ecosystems "Oases" in Algerian hothyperarid lands. Saudi Journal of Biological Sciences, 20(1), 37-43. DOI: 10.1016/j.sjbs.2012.10.001

H, OUKBA KOUNTA. I, E, Nezli. M, Hacini. S, H, ASULTAN. (2018), The use of Remote Sensing and GIS for the mapping of diachronic evolution from wetlands to the Arid Regions. Recent Advance in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions, Advance in Science, Technology & Innovation, https/doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_515.

HACINI Messaoud 2006. Géochimie et comportement des éléments en trace durant l'évaporation complète du lac éphémère du chott Merouane : Sud est Algérie. Thèse De Doctorat. Université d'Annaba. Algérie. 290p

HACINI, Messaoud., Kherici, N., Oelkers, E.H., 2008. Mineral precipitation rates during the complete evaporation of Merouane Chott ephemera lake. Geochim. Cosmochim. Acta 72:1583-1597.

HACINI, M. and Oelkers, E.H. (2010), Geochemistry and behavior of trace elements during the complete evaporation of the Merouane chott ephemeral lake: southeast Algeria. Aquat Geochem (2011) 17:51–70.

HALIMA MANCER and al…., (2018). Effect of Irrigation Water Salinity on the Organic Carbon Mineralization in Soil (Laboratory Incubation), AIP Conference Proceedings 1968, 020007 (2018); doi: 10.1063/1.5039166

HAMDI-AÏSSA. B. (2001). Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micro morphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 283p

HOUARI Idir Menad, 2011, contribution a l'étude de l'évolution géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional. Mémoire Magister, Université Ouargla.

https://earthexplorer.usgs.gov

http://www.aps.dz/ar/sante-science-technologie/72118-2019-06-11-09-57-31

IDDER. T. 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse Doctorat., Université d'Angers, 284p.

IDDER T., Idder A. et Mensous M. (2011). « Les conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien (Cas de l'oasis de Ouargla) ». Colloque international usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée, université de Provence, Marseille, 20-21 janvier 2011. p.12.

JEAN- Louis Marçot, « Bensaâd Ali (dir.), L'eau et ses enjeux au Sahara, Iremam, Karthala, 2011, 242 p. », Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée [En ligne], 131 | juin 2012, mis en ligne le 21 novembre 2011, consulté le 10 juin 2020. URL : http://journals.openedition.org/remmm/7264

JEAN, D., Edmond, B. (2001). Les milieux désertiques. Paris : ARMOND COLIN. Chap. 5, L'homme et les milieux arides, p.229-230.

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.

LAOUINI HAMZA, 2011, Caractérisations géochimique des zones humides entre deux climats, Méditerranéen et aride par image satellitaire : cas des lacs d'El Taref et les chotts et Sebkhas d'Ouargla, mémoire de magister, univ. Ouargla, 140 p.

LABOUN, A.A., 2010. Paleozoic tectono-stratigraphic framework of the Arabian Peninsula.

Journal of King Saud University (Science), 22, pp. 41-50.

LITNHOUVONGS, M. N., & Ricaud, R. (2013). Premiers mois d'une maison de répit et de soins palliatifs pédiatriques. Médecine Palliative : Soins de Support-Accompagnement-Ethique, 12(1), 42-47.

MAGED M. SHOALA. Symposium of prof., Dr. Abu Ayana, 2005, Geography Dept., faculty of Arts, Alex Univ, Egypt. Geomorphological evaluation of the marsh basin Aushaziyah Qassim Saudi Arabia.

MAHOWALD N.M., Bryant R.G., Coral J.D., Steinberger L., 2003. Ephemeral lakes and desert dust sources. Geophysical Research Letters, 30 : 1-4.

MARGAT J (1990) Les gisements d'eau souterraine. Rech 221 :590–596

MARGAT J (1992) Quelles ressources en eau les grands aquifères offrent ils ? Observatoire du Sahara et du Sahel, Le Caire, p 14.

MATHEVET, R., 2000. Usages des zones humides Camarguaises : Enjeux et dynamiques des interactions Environnement/ Usages/Territoire. Thèse de Doctorat, Université Jean Moulin, Lyon 3 (France).

McClure, H.A., 1988a, The Ordovician-Silurian boundary in Saudi Arabia: Bulletin of the British Museum (Natural History, Geology Series), v. 43, pp. 155-163.

McClure, H.A., 1988b, Chitinozoan and Acritarch assemblages, stratigraphy and biogeography of the Early Paleozoic of Northwest Arabia: Review of Paleobotany and Palynology, v.56, pp.41-60.

M.E.A. (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. Ecosystems and human well-being: wetlands and water: Synthesis. Washington, DC : World Resources Institute edition.

MEDJANI Fethi. (2016). Variation des paramètres physicochimiques des eaux des Sebkhas de la région Ouargla-Touggourt (sud-est algérien). Thèse de Doctorat, Univ Badji Mokhtar, Annaba, 114p.

MICHEL, A.,Godeau, J-M., Malaisse, F., Oser, A., Yépez, I. (2002). Méthode de l'interdisciplinaire, le cadre méthodologique interdisciplinaire, un outil d'analyse intégrée de la gestion de ressource naturelles par les acteurs locaux. Belgique : Presses universitaires de louvain.p.47,48.

MIHI Ali, 2018. Etude écologique et cartographique de l'écosystème oasien par l'outil SIG et Télédétection : cas de l'oasis de Biskra, Algérie sud. Thèse doctorat, Univ Sétif 1, 217p

MINISTERE DES RESSOURCES EN EAU—Office National de l'Assainissement (2004) Etudes d'Assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique-Vallée de Ouargla. Mission II—Rapport final document référence 6029.01/RN097. Décembre 2004—Etude réalisé par le bureau d'études BG (Bonnard et Gardel) pour le compte du Ministère des Ressources en Eau et Maitre d'ouvrage ONA. p 110.

MOHAMED DJLDEL, SOFIANE LABAR, FETHI MEDJANI, IMADEDDINE BOUAFIA, (2013), Etude des changements écologiques des zones humides en milieux désertiques en utilisant l'imagerie Landsat et le SIG, International Journal of Environnent & Water, Vol 2, Issue 5, pp 81-87, ISSN 2052-3408.

MOHAMED ELHAG AND JARBOU A. BAHRAWI (2017), Soil salinity mapping and hydrological drought indices assessment in arid environments based on remote sensing techniques, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 6, 149–158, 2017, doi :10.5194/gi-6- 149- MOUSSA Kacem. (2006). Etude d'une Sebkha : la Sebkha d'Oran (Ouest algérien). Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 164p

MUHITTIN Senalp, Abdulaziz Al-Duaiji, 2001, Sequence stratigraphy of the Unayzah reservoir in central Saudi Arabia. Saudi Aramco journal of technology, summer 2001, pp 20-43.

MUTIN G, (1995), L'eau dans le Monde arabe, une resource rare, in Dossiers Images Economiques du Monde : Maghreb-Moyen-Orient : Mutations. SEDES/BORDAS, Paris 1995, 348 p.

MUTIN G.(2009). Le Monde arabe face au défi de l'eau Enjeux et Conflits.

NEZLI. IE. (2004). Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla), Mémoire de Magistère, Univ, Annaba, 152p.

NEZLI IE (2009). Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla), thèse de doctorat en sciences hydrauliques, Université de Biskra, 152p.

NEZLI.IE., ACHOUR.S., DJIDEL.M., ATTALAH.S (2009). Presence and origin of fluoride in the Complex Terminal water of Ouargla basin (Northern Sahara of Algeria). Science Publications. American Journal of Applied Sciences, N°06 Mai 2009, pp 876-881.

OMS. (1994). Organisation Mondiale de la Santé. Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 2è ed. Volume 2, pp 272-279

OSS (2003) : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p.

OULD BABA SY, M., BESBES. M. (2006). Holocene recharge and present recharge of the Saharan aquifers. A study by numerical modeling, Colloque international Gestion des grands aquifères - 30 mai-1er juin 2006, Dijon, France

OULD BABA SY.M.(2005) Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de Doctorat en Géologie. Faculté des Sciences de Tunis. Tunisie. 277p.

OZENDA P, 1979 - Flore du Sahara. Ed CNRS, Paris, 622 p.

PARKHURST. D.L., APPELO. C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC version2: a computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport and inverse geochemical calculations. USGS, Water-resources investigations report 99-4259.

PIPER AM (1944) A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Am Geophys Union Trans 25 :914–928

PONY O., Descombes X. et Zerubia J., 2000, Classification d'images satellitaires hyper-spectrales en zone rurale et périurbaine, ISRN INRIA/RR-4008-FR. ISSN 0249 6399.

POTCHTER, O., Goldman, D., Kadish, D., & Iluz, D. (2008). The oasis effect in an extremely hot and arid climate: The case of southern Israel. Journal of Arid Environments, 72(9), 1721- 1733.

POWERS, R.W., 1968, Lexique stratigraphique international : Saudi Arabia : v. III, Asie, fasc. 10 b 1 : Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 177 p.

POWERS, R.W., Ramirez, L.F., Redmond, C.D., and Elberg, E.L., Jr., 1966, Geology of the Arabian Peninsula: Sedimentary Geology of Saudi Arabia: U.S. Geological Survey Professional Paper, 560-D, 147 p.

RICHARDS, L.A., 1954. Diagnosis Improvement Saline Alkali Soils. US Department of Agriculture Handbook. No. 60.

RIOU, Ch. (1990). Bioclimatologie des oasis. CIHEAM- Options Méditerranéennes, Sér. A/nº11, 220 p.

RODIER J (2005) L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Dunod, p 1381

RODIER. J. (1984). L'analyse de l'eau, 7ème éd, 1353p

SAMRAOUI, B., G. De Be´lair, and S. Benyacoub. 1992. A much threatened lake: Lac des Oiseaux (N.E. Algeria). Environmental Conservation 19: 264–267, 276.

SAMRAOUI, F., Alfarhan A.H., Al-Rasheid K.A.S., Samraoui B., 2011. An appraisal of the status and distribution of waterbirds of Algeria: indicators of global changes? Ardeola, 58: 137-163

SAUDI STRATIGRAPHIC COMMITTEE SPECIAL PUBLICATION (2012) SGS-SP-2012-1 FIRST EDUTION. Phanerozoic stratigraphy of Saudi Arabia, part1. Palaeozoic succession of the Arabian shelf (cover rocks).74p

SAUDI STRATIGRAPHIC COMMITTEE SPECIAL PUBLICATION (2012) SGS-SP-2012-2 FIRST EDUTION. Saudi Arabian code of stratigraphic classification and nomenclature. 26p

Schuyt, D.K. 2005. Economic consequences of wetland degradation for local population in Africa. Ecological Economics 53: 177–190.

SHARLAND, P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R.B., Hall, S.H., Heward, A.P., Horbury, A.D., Simmons, M.D., 2001. Arabian plate sequence stratigraphy. GeoArabia Special Publication 2, 372 p.

SIMLER. R. (2009). D I A G R A M M E S. Logiciel d'hydrochimie multi langage, Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon. www.lha.univ-avignon.fr

SGHAIER, M. (1995). Les agrosystèmes de production oasiens et leur rôle socio-économique, cas des oasis tunisiennes. Désertification et Aménagement au Maghreb, L'Hartmann : Paris, 203-213.

SGHAIER, M. (1997). Modernisation agricole et impératifs de durabilité méditerranéenne. CIHEAM- Options Méditerranéennes, Sér. A / nº29. p.245.

SKOURI, M. (1990). Eléments de synthèse et conclusions. CIHEAM- Options Méditerranéennes, Sér. A/nº11, p.331.

SOUDANI K. (2005). TD Télédétection : Initiation à ENVI. Cours en ligne. Faculté des Sciences d'Orsay – Université Paris Sud XI. http://www.ese.u-psud.fr/bases/upresa/pages/soudani/fichiers/td1_teledec.pdf

TOUTAIN, G. (1990). Conservation des sols en palmeraies sahariennes et bordurières au Sahara. CIHEAM-Options méditerranéennes. n º25, p.65, 68.

TOUTAIN, G., Dollé, N., Ferry, M. (1998). Situation des systèmes oasiens en régions chaudes. Communication présentée au séminaire "les systèmes agricoles oasiens" Tozeur (Tunisie), 19- 21 novembre 1998, p.8-9.

UNESCO (1972) Projet Reg 100. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet. UNESCO, Paris, p 78

UNESCO. (1972). Projet Reg 100. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris.

VALLES V, COCKBORNE A M. 1992. Elaboration d'un logiciel de géochimie appliquée à l'étude de la qualité des eaux. In : Altération et Restauration de la Qualité des Eaux Continentales, Séminaire réuni à Port-Leucate les 1 et 2 Octobre : 27-30.

VASLET, D., 1987a, Early Paleozoic glacial deposits in Saudi Arabia: a lithostratigraphic revision: Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Technical Report BRGM-TR-07-1, 24 p., 5 figs., 2 tables, 1 pl.

VASLET, D., 1990, Upper Ordovician glacial deposits in Saudi Arabia: *Episodes*, v.13, no.3, pp.147-161.

VASLET, D., Janjou, D., Robelin, C., Al Muallem, M.S., Halawani, M.A., Brosse, J.M., Breton, J., Courbouleix, S., Roobol, J. and Dagain, J., 1994, Geologic map of the Tayma quadrangle, sheet 27C, Kingdom of Saudi Arabia: Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Geoscience Map GM-134, scale 1:250,000.

VASLET, D., Le Nindre, J.M., Vachard, D., Broutin, J., Crasquin-Soleau, S., Berthelin, M., Gaillot, J., Halawani, M., and Al-Husseini, M., 2005, The Permian – Triassic Khuff Formation of Central Saudi Arabia, Gulf PetroLink, Bahrain: GeoArabia, V.10, no.4, sheet 77

Vincent Bisson, « Kouzmine Yaël, Le Sahara algérien. Intégration nationale et développement régional, L'Harmattan, Paris, 2012, 341 p. Mcdougall James and SCHEELE Judith (Ed.), Saharan Frontiers. Space and Mobility in Northwest Africa, Indiana University Press, Bloomington, 2012, 291 p. », Revue des mondes musulmans et de la

Méditerranée [En ligne], 137 | mai 2015, mis en ligne le 23 mai 2014, consulté le 10 juin 2020. URL : http://journals.openedition.org/remmm/8568

Wanzie S.C., 2002. Wetland conservation and development in the Sahel of Cameroon. Actes du colloque, 27-31 mai, Garoua, Cameroun.

WEC, (2007). La géologie pétrolière de l'Algérie. In Sonatrach – Schlumberger Well Evaluation Conference - Algérie 2007, p. 1.6 – 1.8, Édité par Schlumberger, 2007.

Wilcox, L.V., 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. USDA.Circ 969, Washington, DC.

ZEMMOURI M. ET BESBES M. (1994). Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH—Ouargla, p 26. (Version 3) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport,

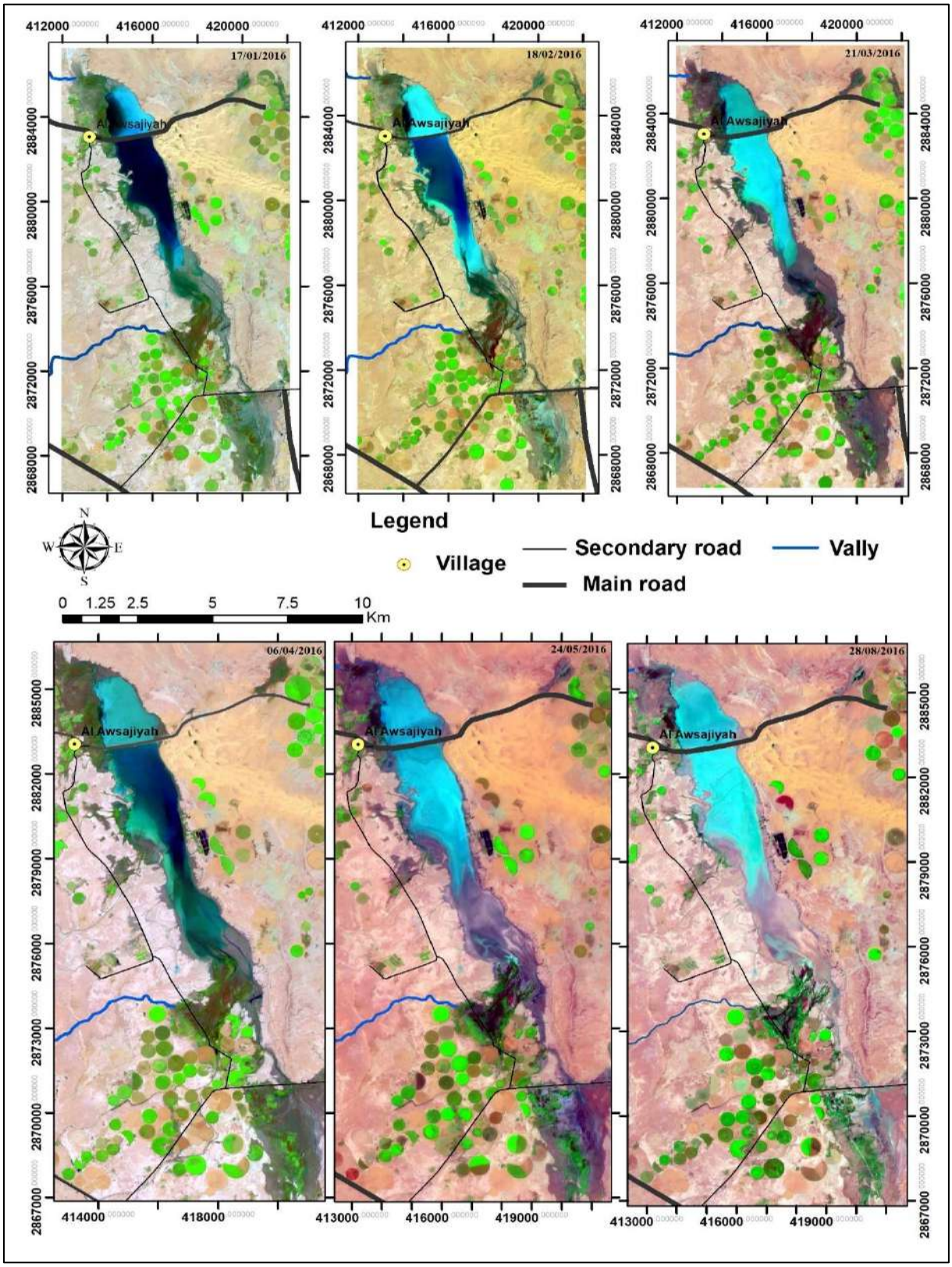
الآثار الاجتماعية والاقتصادية لطريق الحج العراقي على منطقة القصيم، إعداد صالح بن سليمان الناصر الوشمي، إشراف الاستاذ الدكتور عبد الله بن ناصر الوهيبي، ط1، مؤسسة الرسالة، بيروت، 1415هـ/1994 م، 109 ص.

هيئة المساحة الجيولوجية السعودية. 2012. المملكة العربية السعودية حقائق وأرقام. فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر. ردمك: 978-603—90323-0-4.

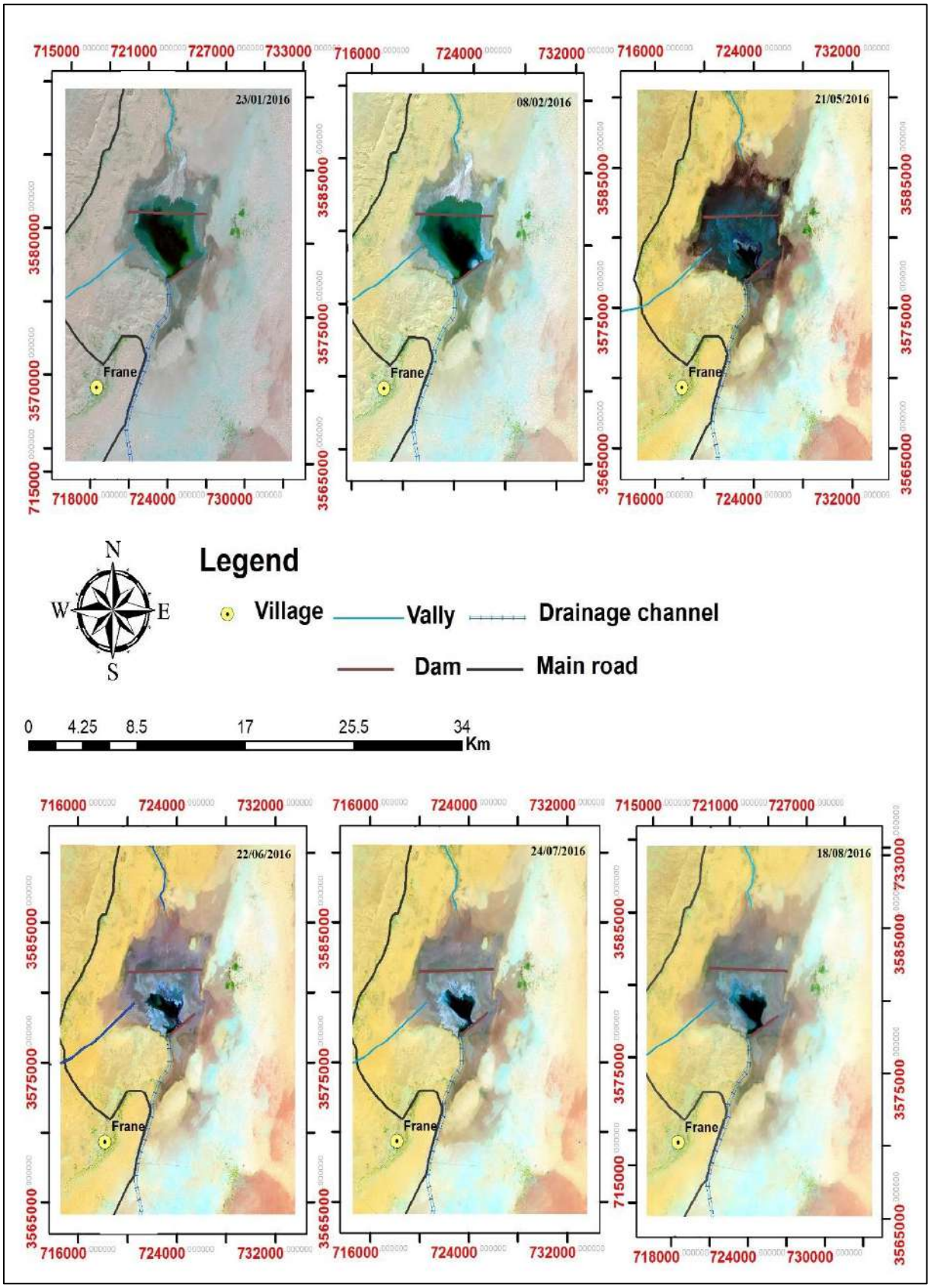
ANNEXES

***-Les images de Landsat utilisé dans la cartographie des Sebkhas et des Chotts.**

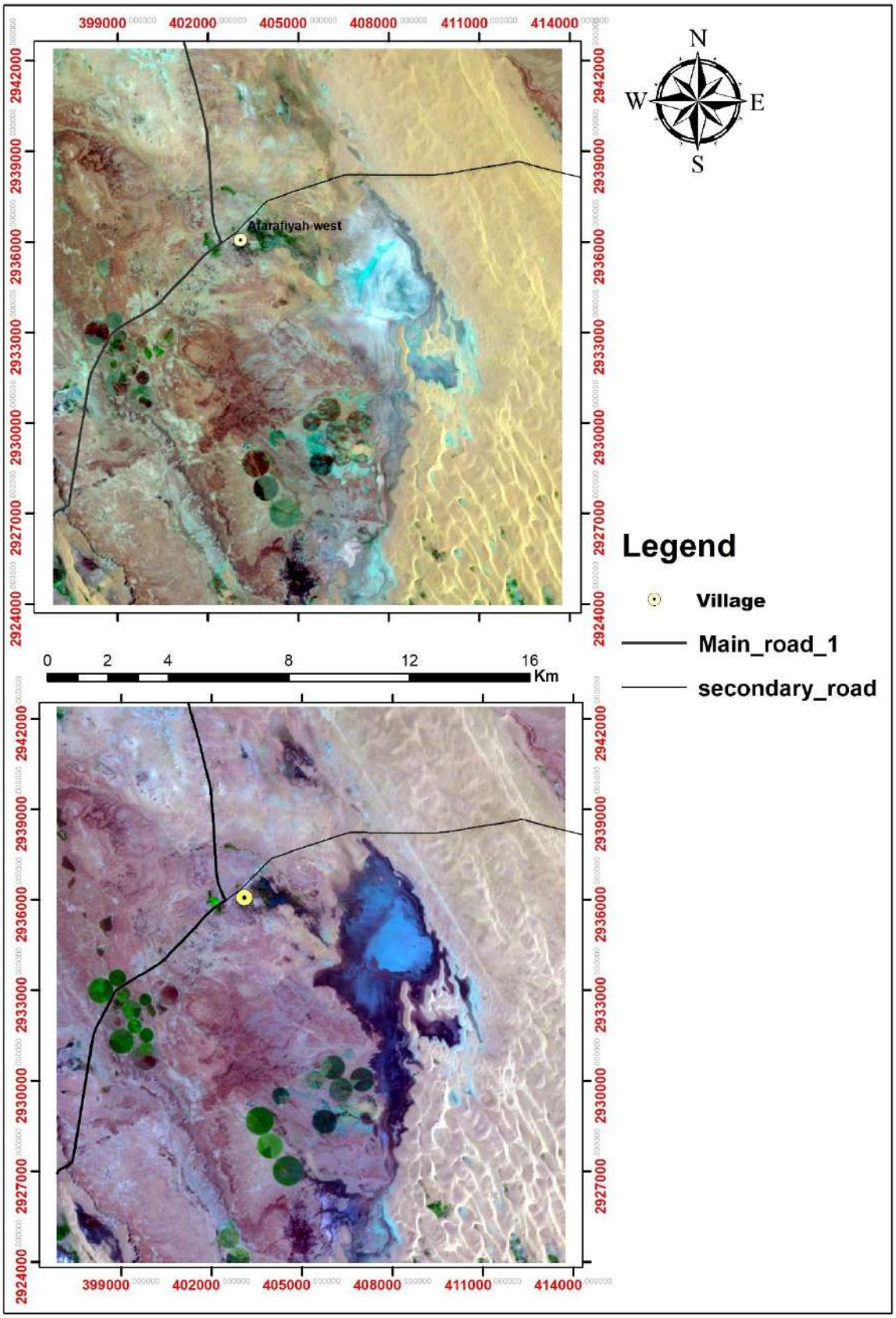
1- Les images de Landsat 8 OLI du Lac salé Al Aushaziyah de l'année 2016 (composition colorée RGB)

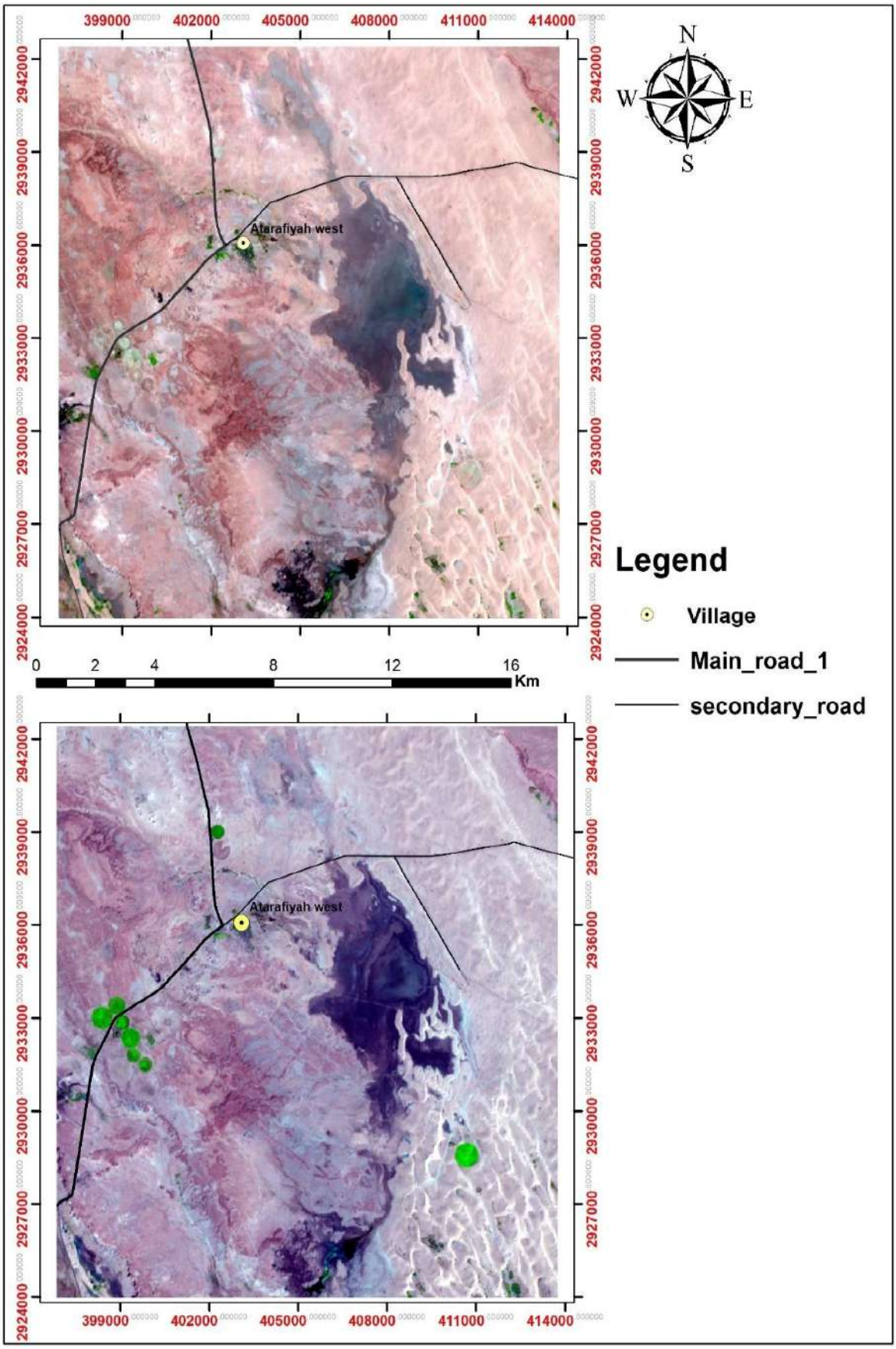


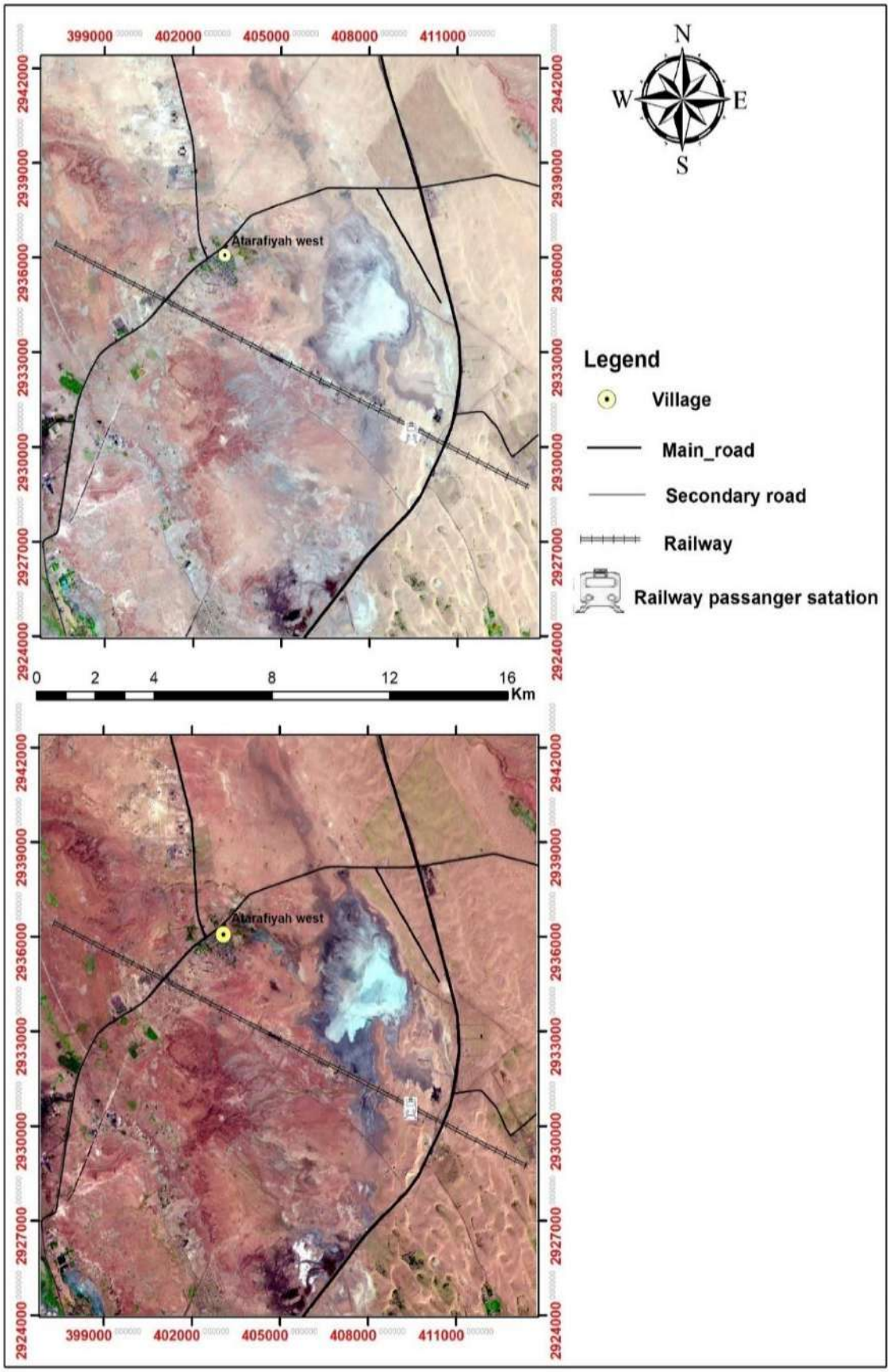
2- les images de Landsat 8 OLI de Sebkha Safioune de l'année 2016. (Composition colorée RGB)



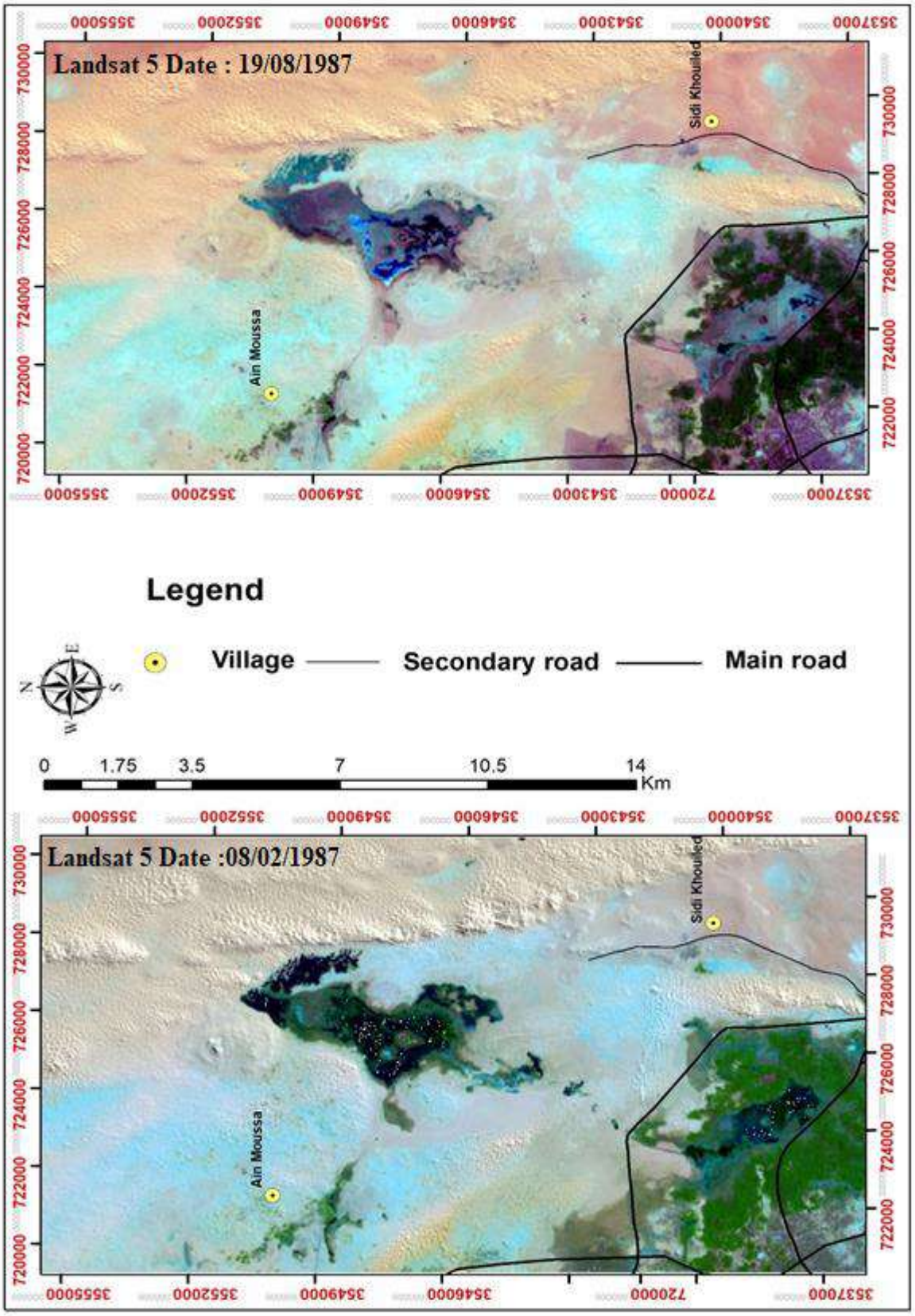
3- Les images de Landsat TM 5 et Landsat 8 OLI de Sabkhat Atarafiyah 1986,2000 et 2016. (Composition colorée RGB)

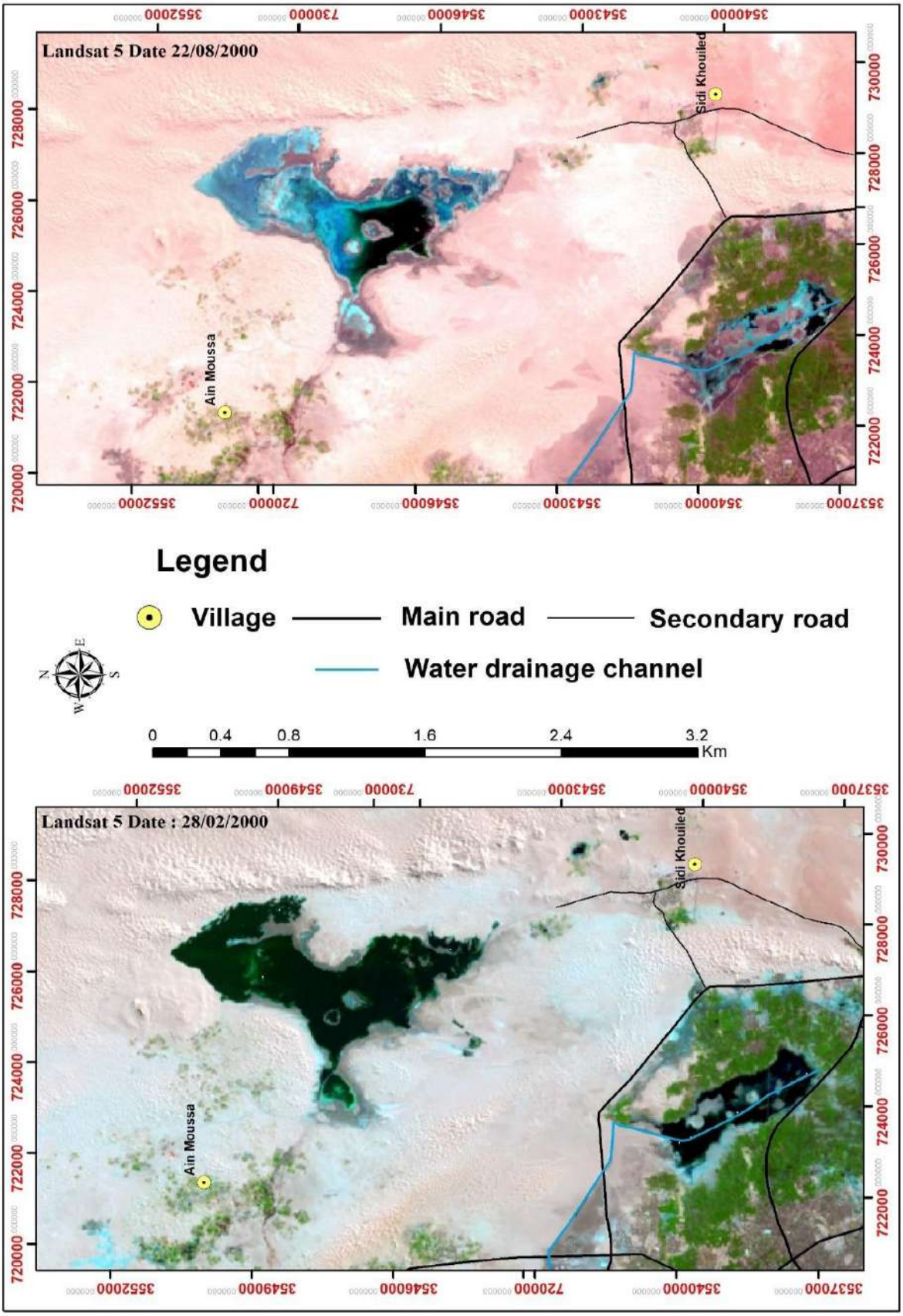


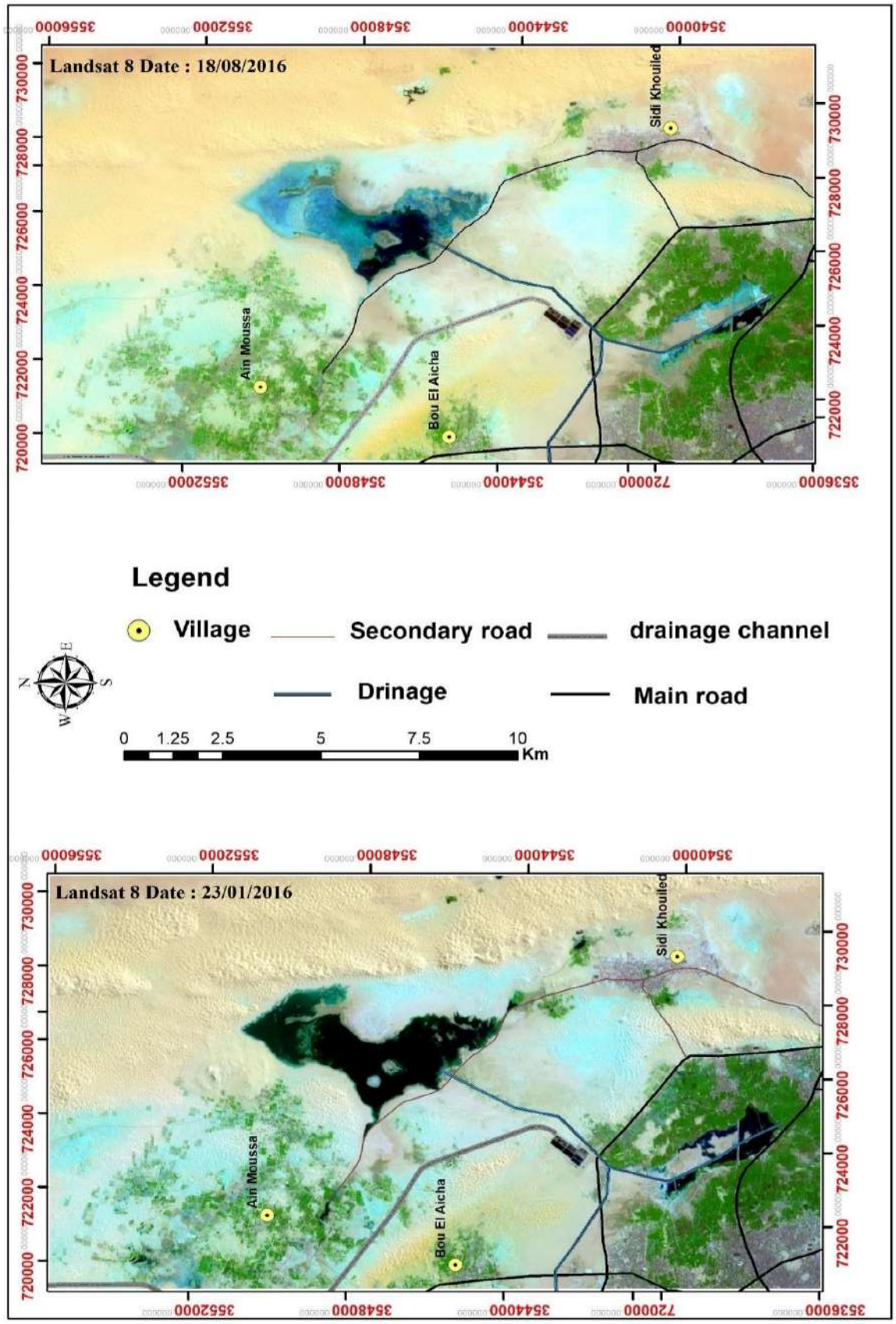
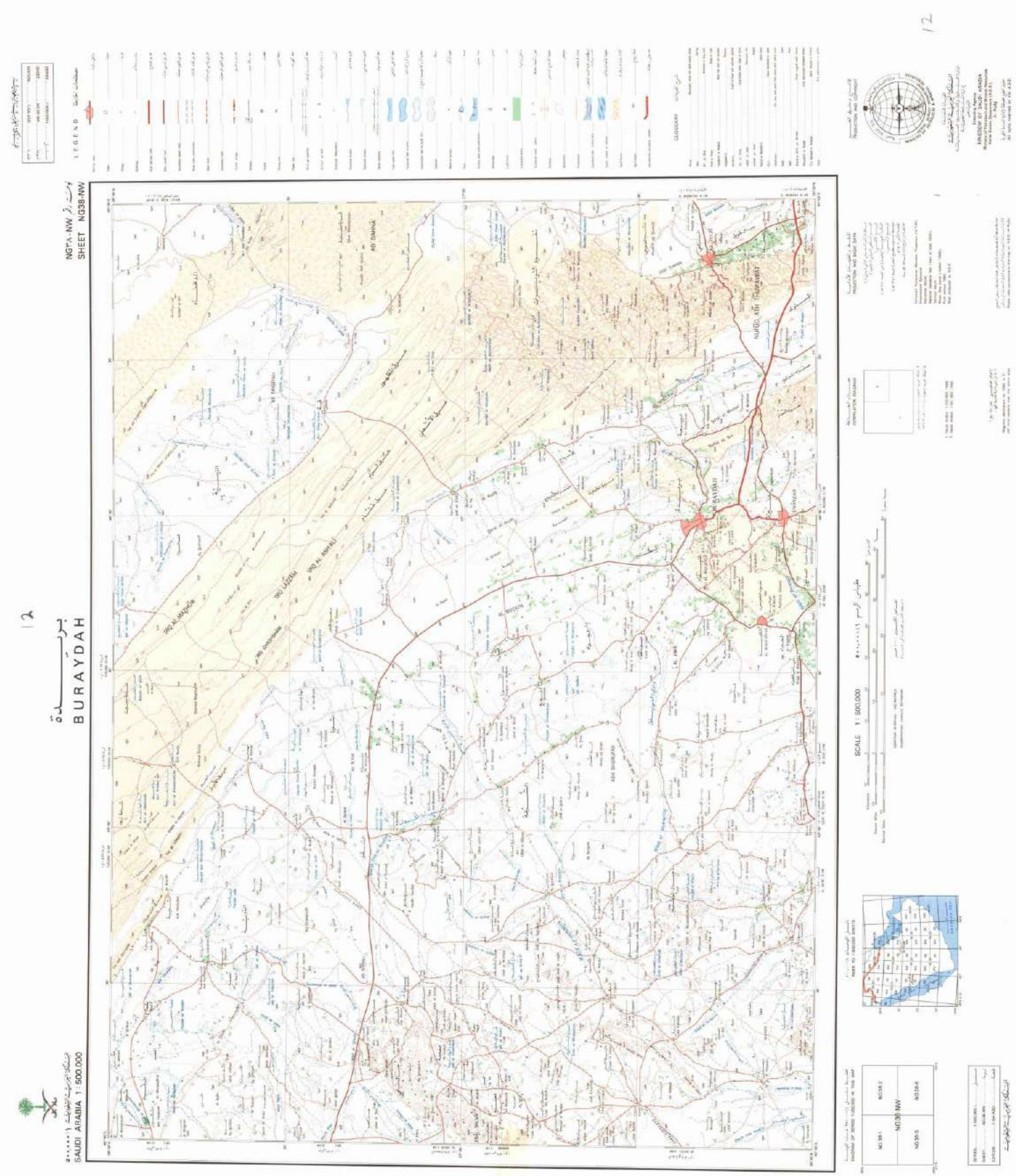

399000
402000
405000
408000
411000
414000
2942000
2939000
2936000
2933000
2930000
2927000
2924000
Atarafiyah west
N
W
E
S
0
2
4
8
12
16
Km
Legend
Village
Main_road_1
secondary_road


399000
402000
405000
408000
411000
2942000
2939000
2936000
2933000
2930000
2927000
2924000
Atarafiyah west
N
W
E
S
Legend
Village
Main_road
Secondary road
Railway
Railway passanger satation
0
2
4
8
12
16
Km

4-Les images de Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI de Sebkha Oum Erranebe et Chott Ain El Baida durant L'année 1987, 2000 et 2016. (Composition colorée RGB)




Landsat 5 Date 22/08/2000
Sidi Khouiled
Ain Moussa
Legend
Village
Main road
Secondary road
Water drainage channel
0
0.4
0.8
1.6
2.4
3.2
Km
Landsat 5 Date : 28/02/2000
Sidi Khouiled
Ain Moussa


Landsat 8 Date : 18/08/2016
Sidi Khouiled
Ain Moussa
Bou El Aicha
Legend
Village
Secondary road
drainage channel
Drinage
Main road
0 1.25 2.5 5 7.5 10
Km
Landsat 8 Date : 23/01/2016
Sidi Khouiled
Ain Moussa
Bou El Aicha

5. Carte 1/500.000 de la ville de Buraydah