

Table des matières

Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Introduction	1
I. Contexte général	4
I.1 Situation géographique	4
I.2 Géomorphologie	5
I.3 Géologie	6
I.3.1. Mio-Pliocène	8
I.3.2. Quaternaire	9
1.4 Tectonique	9
1.5 HYDROLOGIE :.....	10
1.5.1 Le Bassin du bas Sahara	11
1.5.2 Oued Righ, Souf et Ouargla	11
1.5.3 Le M'zab	12
1.5.4 Touat, Gourara et Tidikelt	12
I.6 Climatologie :	12
I.6.1. Etude des paramètres climatiques	13
<i>I.6.1.1. Température</i>	<i>13</i>
<i>I.6.1.2. Précipitation</i>	<i>14</i>
<i>I.6.1.3. Vents</i>	<i>14</i>
<i>I.6.1.4. Evaporation</i>	<i>14</i>
I.6.1.5. Humidité de l'aire	15
I.6.1.6. Durée de l'insolation	16
I.7 Pédologie	16
I.8 Hydrogéologie	16
I.8.1 Les nappes du Complexe Terminal	17
I.8.2 La nappe du Continental Intercalaire	18
I.8.3 Nappe superficielle (nappe phréatique) :	19
I.9 Présentation des zones humides	20
I.9.1 Cuvette d'Ouargla	20
<i>I.9.1.1 Sebkhâ Oum Raneb</i>	<i>20</i>
<i>I.9.1.2 Sebkhâ Safiounne</i> :	<i>21</i>
<i>I.9.1.3 Chott Ain Beida</i> :	<i>21</i>
<i>I.9.1.4. Les lacs Hassi Ben Abdallâh</i> :	<i>22</i>
I.9.2 Vallée d'Oued Righ	22

I.9.3 Les Chotts	25
I.9.3.1 Chott Merouane :	25
I.9.3.2 Chott Melghir :	25
I.9.3.3 Chott Baghdâd :	26
II- Matériels et méthodes	27
II.1- Cartographie des zones humides	27
II.1.1 Choix des images satellitaires.....	29
II.1.2. Analyse des données	29
II.1.2.1. Les prétraitements d'image.....	29
II.1.2.2. Photo-interprétation	30
II.1.2.3. Classifications des images.....	31
II.1.2.4. La détection des changements (Change detection).....	36
II.1.2.5. Cartographie par ArGis 10.1	36
II.2- Hydrogéochimie.....	37
II.2.1. Choix de la région d'étude.....	37
II.2.2. Localisation des points de prélèvement.....	38
II.2.3. Travail sur terrain.....	38
II.2.3.1. Echantillonnage	38
II.2.3.2. Matériels d'échantillonnage	38
II.2.3.3. Les mesures in situ	39
II.2.4. Travail au laboratoire.....	39
II.2.4.1. Matériels	39
II.2.4.2. Analyse au laboratoire	39
II.2.5. Géochimie.....	40
II.2.5.1. Propriétés physico-chimiques et changements de la qualité des eaux	40
II.2.5.1. Indice de saturation.....	41
II.3. Logiciels utilisés	42
II.3.1. ENVI 5.0.....	42
II.3.2. Arc Gis 10.1.....	42
II.3.3. Global Mapper	42
II.3.4. Google Earth.....	43
II.3.5. Diagramme.....	44
II.3.6. PhreeqC (Parkhurst and Appelo, 1990).....	44
III. Résultats et discussion.....	45
III.1. Répartition spatiotemporelle des surfaces d'eau	45
III.1.1 Cuvette Ouargla :	46
III.1.1.1 Sebkhâ Oum Raneb :	46
III.1.1.2 Sebkhâ Safiouna :	46

III.1.1.3 Chott Ain Beida :	47
III.1.1.4. Les lacs Hassi Ben Abdallâh :	47
III.1.2 Oued Righ nord et sud :	47
III.1.3 Les Chotts (Merouane et Melghir) :	51
III.1.3.1 Chott Merouane :	52
III.1.3.2 Chott Melghir :	52
III.1.3.3 Chott Baghdâd :	53
III.2. Evolution spatiotemporelle interannuelle des zones humides de la cuvette d'Ouargla	54
III.2.1. Répartition globale des surfaces humides	54
III.2.2. Etude de changement	55
III.2.2.1. Le taux de changement.....	55
III.2.2.2. Les changements de type “from-to”.....	56
III.2.2.3. Répartition des changements dans la zone	57
III.2.2.4. Les changements de type “from-to-to”	59
III.3. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebket Oum Raneb et chott Ain el baida	61
III.3.1 Classification supervisée	61
III.3.2 Classification supervisée par Support Vector Machine « SVM »	62
III.3.3 Evolution temporelle des états de surface (Change détection)	62
III.3.3.1 Les matrices de changement	62
III.3.3.2 Les changements entre 20/04/2013 et 09/07/2013.....	62
III.3.3.3 Les changements entre 09/07/2013 et 27/09/2013.....	64
III.3.3.4 Les changements entre 27/09/2013 et 01/01/2014.....	64
III.3.3.5 Le résultat final des évolutions temporelles durant les 4 saisons	65
III.3.4 La cartographie des changements.....	66
III.3.4.1 L'évolution temporelle durant l'année 2013	66
III.3.4.2 Evolution temporelle entre 20/04/2013 et 09/07/2013.....	67
III.3.4.3 L'évolution temporelle entre 09/07/2013 et 27/09/2013.....	67
III.3.4.4 L'évolution temporelle entre 27/09/2013 et 01/01/2014.....	68
III.3.4.5 L'évolution spatiotemporelle durant les 4 saisons	70
III.3.5 Conclusion	70
III.4. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebket Safioune	70
III.4.1. Validation des classifications	70
III.4.2. Matrices de changements des classes humides.....	71
III.4.3. Le rôle des facteurs climatiques sur les changements des classes humides	72
III.4.4. Cartographie des changements	74
III.4.5. Conclusion	75

III.5. Evolution spatiotemporelle saisonnière des chotts (Merouane et Melghir)...	76
III.5.1 Validation des classifications	76
III.5.2 Matrices de changements des classes humides.....	76
III.5.3 Le comportement des sels envers les différentes classes	78
III.5.4 Cartographie des changements	79
III.5.5 Conclusion	80
III.6 Hydrogéochimie.....	81
III.6.1 Comportement hydrochimique des eaux de surface de la cuvette d’Ouargla ..	81
<i>III.6.1.1 Paramètres physiques</i>	<i>81</i>
<i>III.6.1.2 Eléments majeurs :</i>	<i>81</i>
III.6.2 Comportement hydrochimique des eaux des lacs d’Oued Righ.....	86
<i>III.6.2.1 Analyse des paramètres physiques</i>	<i>86</i>
<i>III.6.2.2 Teneurs en éléments chimiques majeurs</i>	<i>88</i>
<i>III.6.2.3 Représentation graphique des faciès chimiques.....</i>	<i>92</i>
III.6.2.4 Aptitude des eaux à l’irrigation.....	93
III.6.2.5 L’oxydo-réduction.....	94
III.6.2.6 Géochimie de la vallée d’Oued Righ.....	97
III.6.3 Conclusion	104
Conclusion générale	107
Références bibliographiques.....	109

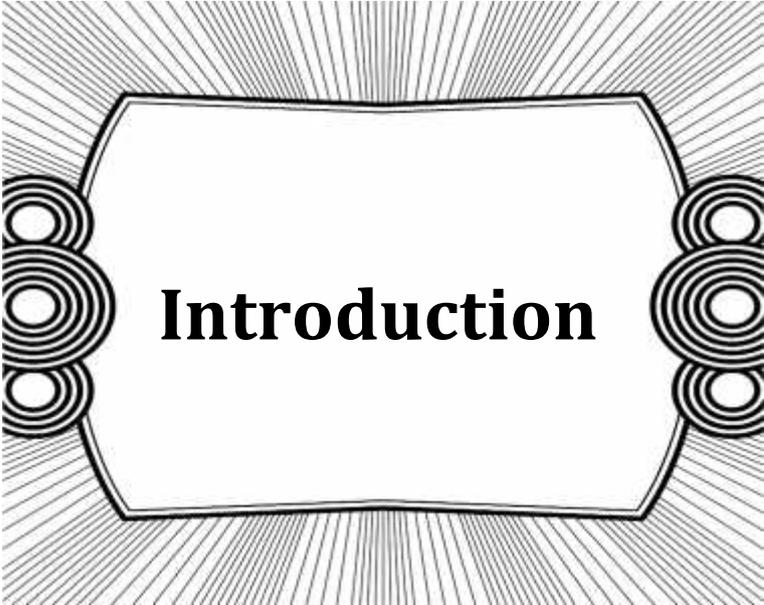
Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.....	4
Figure 2: Topographie du Bas-Sahara.....	6
Figure 3: Coupe géostructurale transversale régionale (WEC, 2007).....	7
Figure 4: Carte géologique du Bas-Sahara algérien (G. BUSSON 1967).....	8
Figure 5. Les grands bassins hydrographiques du Sahara (Zeddouri 2010).....	11
Figure 6. Variation de température mensuelle moyenne (1974-2013).....	13
Figure 7. Variation des précipitations moyennes mensuelles (1974 - 2013).....	14
Figure 8. Variation mensuelle de l'évaporation moyenne (1975-2013).....	15
Figure 9. Variation mensuelle de l'humidité moyenne (1975-2013).....	15
Figure 10. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	17
Figure 11. Historique de l'exploitation du CT à Ouargla (O.S.S, 2002).....	18
Figure 12. Historique de l'exploitation du CI à Ouargla (O.S.S, 2002).....	19
Figure 13. Zones humides de la cuvette d'Ouargla.....	21
Figure 14. Zones humides de la vallée d'Oued Righ sud.....	23
Figure 15. Zones humides de la vallée d'Oued Righ nord.....	24
Figure 16. Les Chotts (Merouane et Melghir).....	25
Figure 17. Chott Baghdâd.....	26
Figure 18. augmentation du contraste dans une image avant et après un rehaussement linéaire	31
Figure 19. Comparaison des signatures spectrales des classes humides en 1987, 2000 et 2009. Cuvette d'Ouargla.....	33
Figure 20. Carte de choix des classes.....	34
Figure 21. Une partie de carte classification avant et après Majority/Minority.....	35
Figure 22. Schéma méthodologique pour la réalisation d'une carte d'évolution.....	37
Figure 23. Carte des variations des surfaces d'eau de la cuvette d'Ouargla (mars-septembre 2014).....	45
Figure 24. Carte des variations des surfaces d'eau d'oued Righ nord (Mars –Septembre 2014)	48
Figure 25. Carte des variations des surfaces d'eau d'oued Righ sud (Mars-Septembre).....	49
Figure 26. Carte des variations des surfaces d'eau des chotts (Mars-Septembre 2014).....	51
Figure 27. Carte des variations des surfaces d'eau de chott baghdad (Mars-Septembre 2014)	53
Figure 28. Répartition surfacique des classes humides dans la cuvette d'Ouargla.....	55
Figure 29. La quantification des classes humides changées et inchangées.....	56
Figure 30. Les changements surfaciques des zones humides entre les trois années.....	56
Figure 31. Les changements des zones humides entre les années initiales et finales.....	57
Figure 32. Les changements des zones humides (from 1987 to 2000) et (from 2000 to 2009).....	58
Figure 33. Evolution des changements des sables dans les trois ans.....	59
Figure 34. Les changements des zones humides (from 1987 to 2000 to 2009).....	60
Figure 35. Classification par SVM des 4 dates.....	61
Figure 36. Evolution des états de surfaces entre Avril et Juillet 2013.....	66
Figure 37. Evolution des états de surfaces entre Juillet et Septembre 2013.....	68
Figure 38. Evolution des états de surfaces entre Septembre 2013 et Janvier 2014.....	69
Figure 39. Evolution des surfaces d'eau.....	71

Figure 40. Evolution des surfaces en sel	72
Figure 41. Le rapport entre les surfaces humides et les facteurs climatiques (température, précipitation et humidité)	73
Figure 42. Le rapport entre les surfaces humides et la vitesse du vent	74
Figure 43. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre Avril et Novembre 2013	75
Figure 44. Classification supervisée par « SVM » des 5 dates	76
Figure 45. Evolution des surfaces en eau	77
Figure 46. Evolution des surfaces en sel	78
Figure 47. Le rapport entre le sel et les différentes classes	79
Figure 48. Cartographie de l'évolution des sels depuis mai 2013 jusqu'à avril 2014	80
Figure 49. Variation de conductivité électrique et de pH au niveau chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)	81
Figure 50. Variation des anions au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)	82
Figure 51. Variation des cations au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)	84
Figure 52. Diagramme de Piper du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)	85
Figure 53. Indice de saturation au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)	85
Figure 54. Variation du Température (T°C) des eaux des lacs étudiés	86
Figure 55. Variation du pH des eaux des lacs étudiés	87
Figure 56. Variation de la Conductivité électrique des eaux des lacs étudiés	88
Figure 57. Teneurs en calcium dans les lacs d'Oued Righ	88
Figure 58. Teneurs en magnésium dans les lacs d'Oued Righ	89
Figure 59. Teneurs en sodium dans les lacs d'Oued Righ	89
Figure 60. Teneurs en potassium dans les lacs d'Oued Righ	90
Figure 61. Teneurs en chlorure dans les lacs d'Oued Righ	90
Figure 62. Teneurs en sulfate dans les lacs d'Oued Righ	91
Figure 63. Teneurs en sulfate dans les lacs d'Oued Righ	92
Figure 64. Diagramme de piper des eaux des lacs d'Oued Righ	93
Figure 65. Diagramme de Richards des eaux des lacs étudiés	94
Figure 66. Diagramme Eh-pH des formes de l'azote	95
Figure 67. Diagramme Eh-pH des formes du soufre	95
Figure 68. Diagramme Eh-pH des formes du carbone	96
Figure 69. Diagramme Eh-pH des formes du chlore	97
Figure 70. Diagramme d'équilibre des eaux des lacs avec la calcite	98
Figure 71. Relation entre log (Ion Activity) des minéraux sulfatés et chlorurés	98
Figure 72. Diagramme de concentration	100
Figure 73. Indice de saturation des carbonates	101
Figure 74. Indice de saturation des sulfates	102
Figure 75. Indice de saturation des chlorures	103

Liste des tableaux

Tableau 1. Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)	10
Tableau 2. Coordonnées des deux stations météorologiques	13
Tableau 3. Caractéristiques des principaux lacs de la vallée d’Oued Righ (CRSTRA, 2011)	22
Tableau 4. Bandes spectrales de Landsat Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	29
Tableau 5. Comparaison entre les différentes méthodes de classification supervisée appliquées dans la cuvette d’Oaurgla (20/12/2000)	35
Tableau 6. Les caractéristiques générales des zones humides de cuvette d’Ouargla.....	47
Tableau 7. Les caractéristiques générales des zones humides d’oued Righ	50
Tableau 8. Les caractéristiques générales des zones humides des chotts	52
Tableau 9. Les caractéristiques générales des zones humides de chott Baghdâd	54
Tableau 10. Validation des classifications supervisées.....	62
Tableau 11. La stabilité des classes dans les trois couples de changement	62
Tableau 12. Matrice des changements entre Avril et Juillet 2013	63
Tableau 13. Matrice des changements entre Juillet et Septembre 2013.....	64
Tableau 14. Matrice des changements entre Septembre 2013 et Janvier 2014.....	64
Tableau 15. Synthèse d’évolution de surfaces au cours de l’année 2013	65
Tableau 16. Tableau récapitulatif de la précision des classifications	71
Tableau 17. Tableau récapitulatif de la précision des classifications	76



Introduction

Introduction

L'Algérie abrite une gamme de zones humides très diversifiées : lacs, lagunes, marais, chotts, sebkhas. L'adhésion de l'Algérie à la convention de Ramsar a été effective en 1984, à ce jour, 42 sites sont classés sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale, couvrant une superficie de 2 958704 ha représentant 0.78% du territoire national contre 0.02% et 0.08% respectivement pour le Maroc et la Tunisie.

Les zones humides sont toutes zones de transition entre les systèmes terrestres et aquatiques où la nappe phréatique est proche de la surface du sol, ou dans laquelle cette surface est recouverte d'eau peu profonde de façon permanente ou temporaire. Ce sont des étendues, de marécage de tourbières, d'eau naturelle ou artificielle, permanente ou temporaire où l'eau est stagnante ou courante, douce ou saumâtre (RAMSAR, 1994). Ces zones représentent les meilleurs exemples d'écosystème du point de vue de leurs fonctions biologiques.

Les zones urbaines prennent une partie de l'écosystème de la terre, l'homme utilise l'environnement et le transforme à travers l'économie, la technique ...etc. ainsi il crée son espace vitale et assure ses besoins.

Le bas (sud-est algérien) Sahara algérien renferme une importante quantité de ressources en eau souterraines emmagasinées dans les deux grands aquifères du continentale intercalaire (CI) et du complexe terminale (CT)

L'eau de surface y rare et insignifiante, elle est pérenne et se limite seulement dans les zones humides (sebkhas, chotts ...) ces zones font partie intégrant du paysage de bas Sahara algérien, situées généralement dans les bas-fonds des bassins endoréiques auprès des oasis

Ces milieux humides servent comme exutoires aux eaux de drainage des palmeraies, d'écoulements de surface ou souterrain par inféroflux des oueds et de rejets d'eaux usées des agglomérations urbaines (ANRH, 2005).

Le complexe des zones humides au Bas-Sahara algérien est subdivisé en quatre entités géographiques : (i) Ziban, (ii) Souf, (iii) Oued Righ, et (iv) Oued Mya (Chenchouni & Si Bachir 2010).

Le bas-Sahara connaît récemment un problème très délicat concernant la remontée des eaux en surface (Idder, 2011), cela est dû aux effets anthropiques issus de l'augmentation de la population nécessitant une exploitation excessive des eaux profondes d'une part et la mauvaise canalisation des eaux usées qui se déversent d'une manière aléatoire dans le sol, ainsi qu'une irrigation abusive dans un sol sableux (perméable) d'autre part. Les eaux de cette

région sont caractérisées par une salinité élevée ce qui conduit directement par évaporation à l'accumulation des sels solubles dans le sol ou sur sa surface.

La vallée Oued M'ya (sa ville-centre : Ouargla) et la vallée d'Oued Righ (ayant comme ville-centre : Touggourt) sont des régions riches en zones humides d'importance internationale et nationale, L'excès des sels solubles dans ces milieux à une grande influence sur ces écosystèmes. De nombreuses de ces zones dégradées voire menacées de disparition suite aux actions anthropiques (rejeté des eaux usées et de drainage) sans négliger les effets de la sécheresse très fréquent en région désertiques ; La dégradation de ces zones se traduit par la détérioration de la qualité de ces eaux par la pollution ce qui influe directement sur la biodiversité, ainsi que une future utilisation comme des zones touristiques.

Dans ce contexte, le travail présenté dans cette thèse a deux objectifs principaux :

- Un inventaire et une cartographie d'évolution spatiotemporelle des zones humides dans le bas Sahara algérien (cuvette d'Ouargla et vallée d'Oued Righ).

Le suivi de l'évolution de ces zones humides nécessite une bonne connaissance de terrain, et une cartographie qui met en valeur les potentialités de cet environnement et ses contraintes. Cependant le travail de terrain dans une région saharienne est très difficile en raison des obstacles liés aux conditions climatiques (température élevée, vent de sable ...) et aux problèmes de repérage et d'accès dans un espace vaste et désertique. Ainsi l'utilisation de la télédétection apparait comme solution dans de telles situations afin d'identifier ces zones humides ainsi que la possibilité de suivre leur évolution dans le temps, et de connaître son origine et d'enrichir un système d'information géographique.

- Une étude de la qualité physico-chimique des eaux des zones humides (lacs, chotts et sebkhas) et de cerner les facteurs responsables de changement de leur qualité. Cette étude hydrochimique et suivi par un aperçu sur le comportement géochimique de ces eaux vis-à-vis le milieu encaissant.

Pour atteindre cet objectif, le travail est structuré en trois parties principales :

La première partie - *Contexte général* : est consacré à la description du cadre physique de notre région d'étude (situation géographique, étude géomorphologique, géologique, hydroclimatique et étude hydrogéologique).

La deuxième partie - *Matériels et méthodes* : nous présentons les différentes méthodes des traitements sur les images satellitaires, et aussi 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.

La troisième partie - Résultats et discussion : est consacrée à l'interprétation et la discussion des résultats obtenus, soit pour le travail de cartographie par l'outil télédétection avec l'interprétation des résultats de différents traitements multispectrales des images satellitaire, ainsi que la partie hydrochimie avec l'interprétation des résultats des analyses physicochimiques des eaux des zones d'études en déterminant les faciès chimiques, les indices de saturation afin d'identifier l'origine de ce chimisme.

A la fin une conclusion générale synthétise les résultats de cette étude.



1^{ère} Partie :

**Contexte
général**

I. Contexte général

I.1 Situation géographique

Le Bas-Sahara se confond presque avec le bassin versant théorique du chott Melrhir, soit environ 700000 km² (Ballais 2010). Il est limité :

- Au nord, par l'Atlas saharien.
- A l'ouest par la dorsale du M'Zab.
- Au sud par les plateaux du Tademaït et du Tinghert.
- A l'est par le revers du Dahar tuniso-libyen (Figure 1).

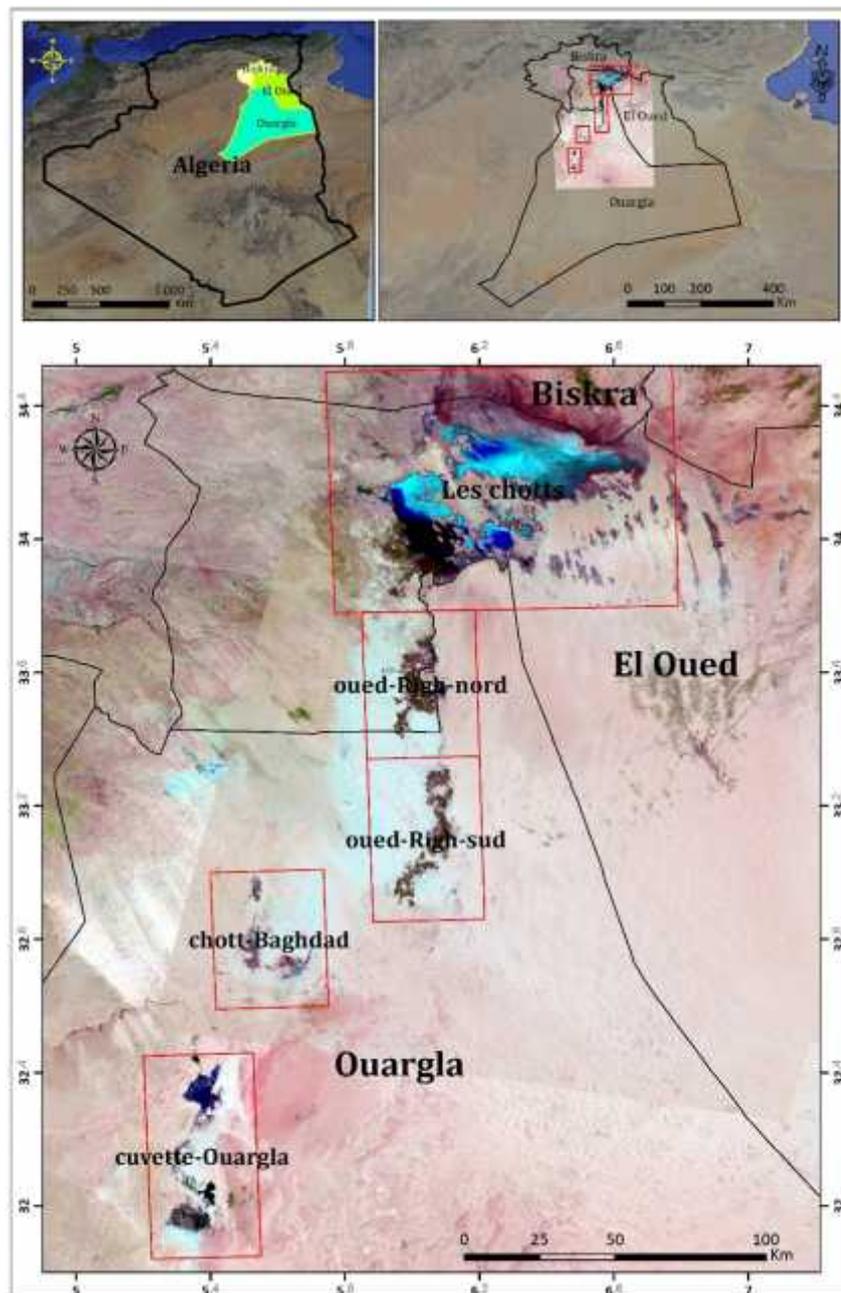


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

Le Bas Sahara avec sa couverture sédimentaire, composée de couches pétrolifères et aquifères, constitue la région la plus favorisée et la plus peuplée du Sahara et cela depuis longtemps grâce à l'abondance en eau et à la siccité de l'air permettant la culture des dattes (Deglet Nour) les plus prisées à la consommation. Aussi, ses ressources expliquent l'expansion des agglomérations, la mise en place d'un réseau routier conséquent, la dynamique de l'agriculture, tous les éléments qui accroissent le poids d'une région qui était déjà traditionnellement plus habitée que les autres. Aussi, le Bas-Sahara, appelé "le pays de palmiers et pétrole", représente la partie la plus active du Sahara, puisqu'il regroupe 2/3 des palmeraies et 2/3 des habitants du territoire saharien (Chaouche-Bencherif 2006).

Les zones humides au Bas-Sahara algérien est subdivisé en quatre entités géographiques (i) Ziban, (ii) Souf, (iii) Oued Righ, et (iv) Oued Mya (Chenchouni & Si Bachir 2010).

1.2 Géomorphologie

La cuvette du Bas-Sahara offre une topographie basse (Chott Melrhir à -40m en dessous du niveau de la mer) qui s'abaisse lentement vers le pied du massif de l'Aurès.

Le relief du Bas-Sahara (Figure 2) se présente comme une vaste dépression ayant la forme d'un synclinal ouvert vers le Nord. Il est homogène avec une pente très faible et des terrains plats (Kouzmine 2007).

L'étude géomorphologique de la de la cuvette d'Ouargla fait apparaître les éléments suivants :

- La *hamada Mio-Plio-Quaternaire* (plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses) : C'est une formation continentale détritique qui forme un plateau dont l'altitude moyenne est de 200 m. Ce plateau s'abaisse légèrement d'Ouest en Est où il est très fortement érodé et ne laissant que quelques buttes témoins appelées « goure ».

- Les *glacis* sur les versants ouest de la cuvette s'étagent du plus ancien au plus récent, d'Ouest en Est sur quatre niveaux de 200 à 140 m d'altitude. Les glacis situés à 180 et 160 m se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio-Pliocène. L'Est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier situé à 150 m d'altitude.

- Les *sebkhas* : marécages salés, le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression. Le *chott* (ou *sebkha*) constitue le point le plus bas. Il est constitué de sable siliceux et/ou gypseux à croûte gypseuse de surface et de sub-surface. Le bas fond se caractérise par une nappe phréatique permanente très peu profonde de 1 à 5 m. En aval d'Ouargla, diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à Sebkha Safioune qui est à 103 m d'altitude point le plus bas de la région.

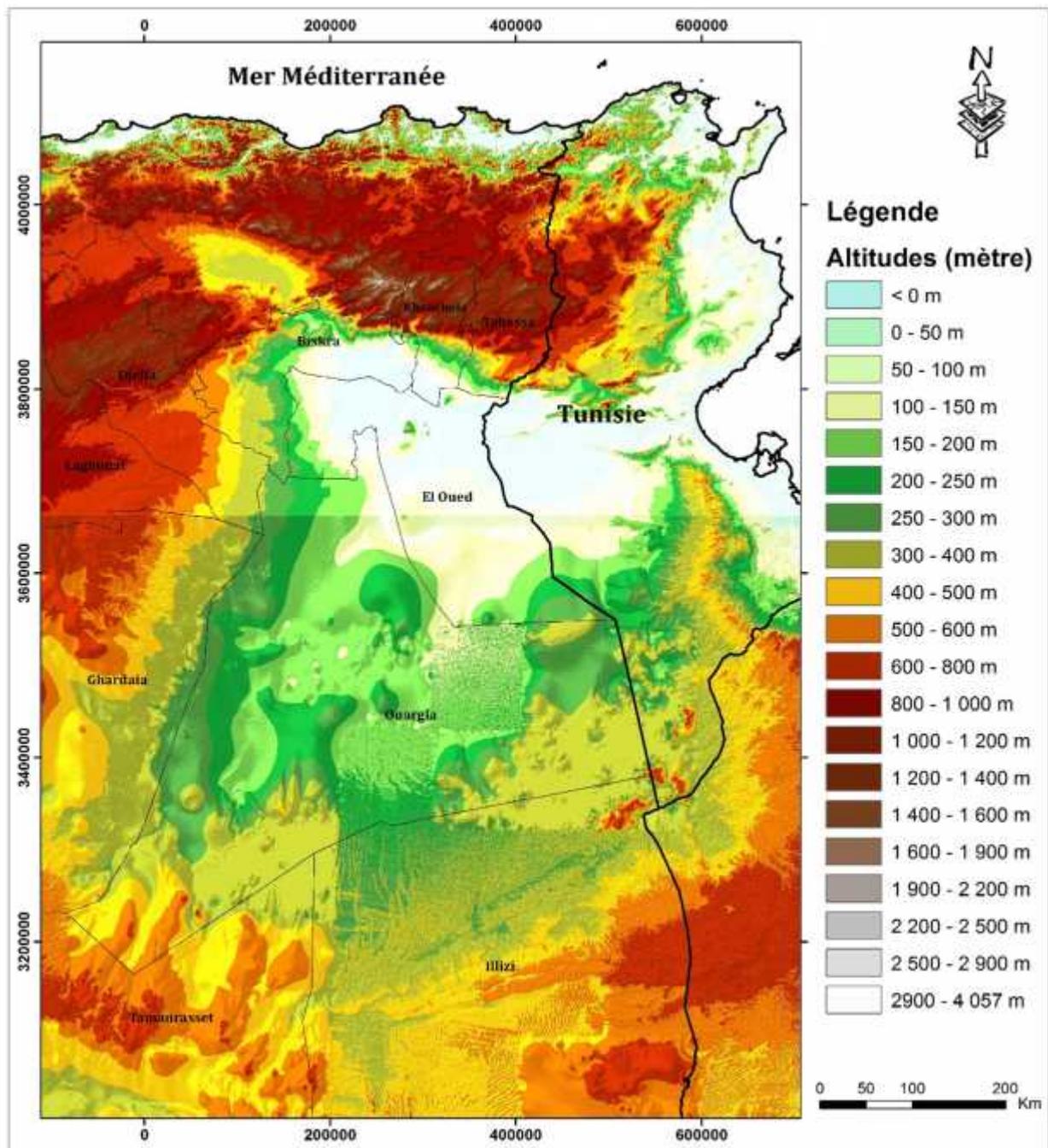


Figure 2: Topographie du Bas-Sahara

I.3 Géologie

La géologie c'est un autre facteur contribuant à l'existence et à la répartition des zones humides.

La région d'étude fait partie du Bas-Sahara qui se présente en cuvette synclinale dissymétrique. Elle est caractérisée par un remplissage sédimentaire constitué d'une alternance de terrains perméables et imperméables. Dans la région d'étude seuls les terrains du Mio-Pliocène affleurent, ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaire. (Figure 3).

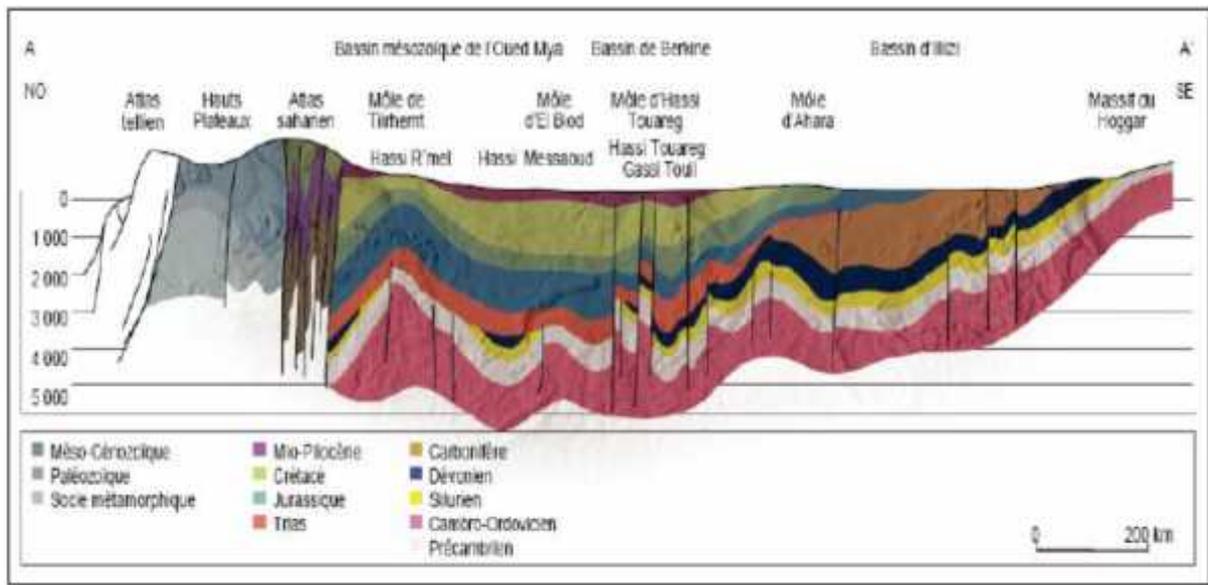


Figure 3: Coupe géostructurale transversale régionale (WEC, 2007)

L'étude géologique s'intéresse à l'histoire et l'évolution des formations géologiques qui caractérisent notre zone d'étude, pour l'hydrogéologie joue un rôle très important pour la description lithologique et stratigraphique des formations dans un aquifère.

D'après les travaux menés par Bel et Demargne (1966), Busson (1970) et Fabre (1976) et qui constituent les références de base pour comprendre la géologie de la région on peut constater qu'à une profondeur de plus de 3000 m se trouve le socle le plus ancien, ce dernier surmonté par les grès primaires plus ou moins plissés et érodés. Au-dessus, s'entassent les grès du Continental Intercalaire qui contiennent l'aquifère du même nom.

Le Sahara septentrional se caractérise par des affleurements d'âges Tertiaire et Quaternaire ; des conglomérats de base et des encroulements de calcaires du Villafranchien supérieur, des calcaires blanchâtres lacustres du Pliocène continental, et des dépôts Mio-pliocène qui se constituent des sables, des argiles, des limons et du gypse. Ces formations Tertiaires et Quaternaires dénotent l'existence d'un réseau de discontinuités qui se traduit principalement à l'échelle des affleurements par des diaclases et des fissures de dimension variables allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres.

La circulation et l'infiltration des eaux de surface, principalement ; les eaux d'irrigations et surtout les eaux des crues se fait à travers les discontinuités existantes, ce sont les lieux privilégiés pour que l'altération hydrique débute. L'eau et ses actions de dissolution et d'érosion provoquent une dégradation de la résistance mécanique des terrains traversés et génère une porosité secondaire dans les matériaux originellement non poreux. Il conduit ainsi à l'élargissement des fissures et par conséquent la création et le développement des cavités souterraines, donc le processus finit par l'apparition d'effondrements à la surface.

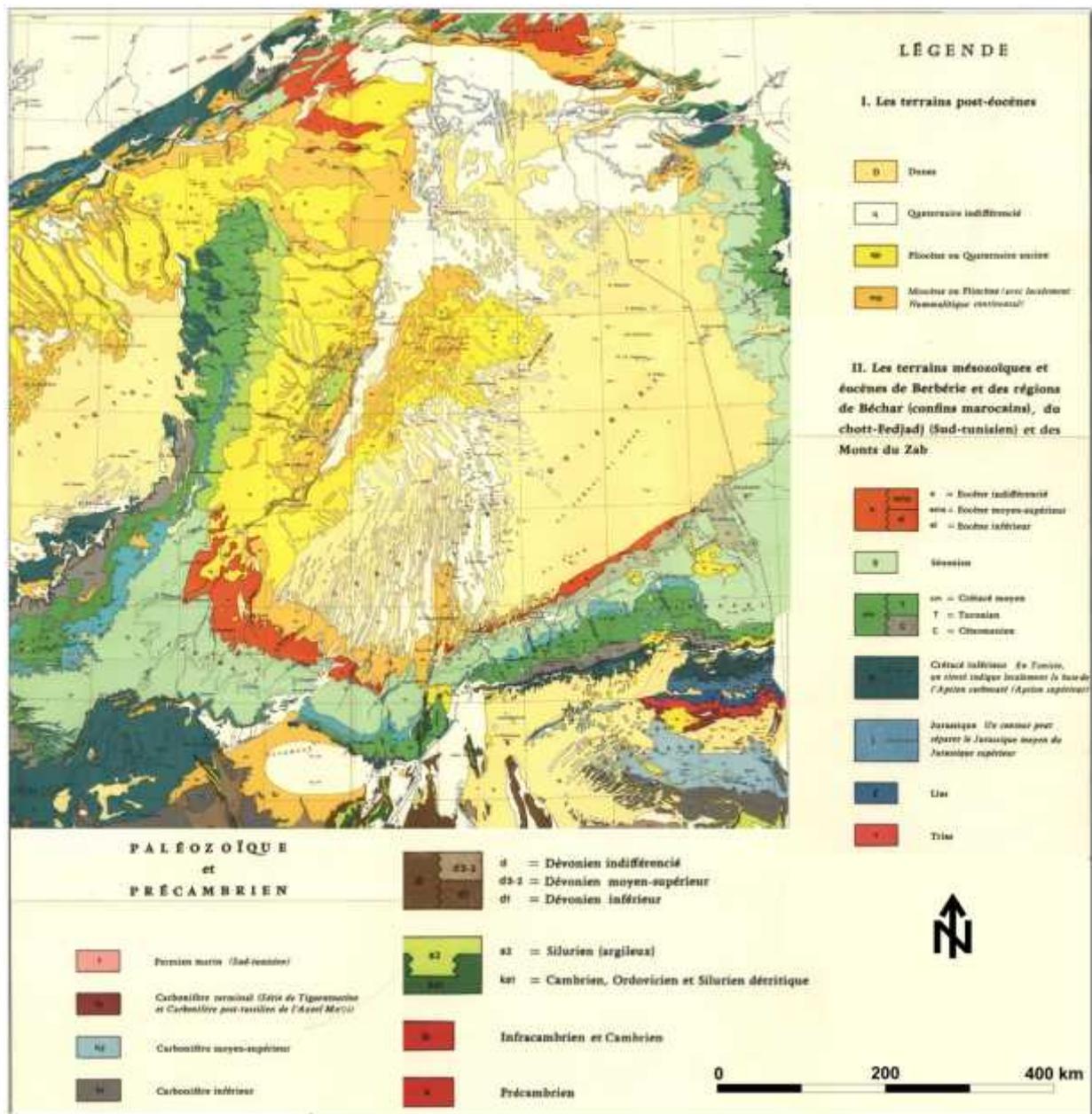


Figure 4: Carte géologique du Bas-Sahara algérien (G. BUSSON 1967)

I.3.1. Mio-Pliocène

Le Mio-Pliocène correspond à la partie supérieure du Complexe Terminal. C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénonien et l'Eocène. On distingue quatre niveaux différents dans le Mio-Pliocène :

- A la base, un dépôt argileux peu épais se retrouve dans la partie centrale de la cuvette, et suivant une bande Nord-Sud, le Sénonien et l'Eocène.
- Deuxième niveau : C'est un dépôt grésosableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais et le plus constant ; ce niveau est le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène.

- Troisième niveau : C'est une formation argilo-sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche n'apparaît que dans certains endroits.
- Quatrième niveau : C'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène. On ne peut le distinguer que lorsqu'il repose sur le niveau 3 ; d'ailleurs les niveaux 2 et 4 sont confondus. Il est très épais dans la zone des chotts, le sommet du niveau 4 affleurant sur de grandes surfaces ; le niveau 4 est souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux.

I.3.2. Quaternaire

À la base du quaternaire, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Ce niveau met en charge les aquifères du Mio-Pliocène. Le niveau le plus superficiel est constitué de sable éolien parfois gypseux et des produits de remaniement des terrains Mio-Pliocène. Les nappes phréatiques sont généralement contenues dans ce dernier niveau. Les sondages superficiels (profondeur moins de 30 m) effectués dans différentes localités de la cuvette de Ouargla, ont permis de rencontrer les ensembles suivants :

- Sur le plateau, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région ; jusqu'à 8 m de profondeur il ne présente aucun niveau d'encroûtement ; entre 25 et 75 cm de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.
- Sur les chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de sebkhas associés à une végétation gypso halophiles. De 15 à 20 cm d'épaisseur on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. En dessous un tuf présente une teneur de gypse décroissante.
- Les Sebkhas sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.
- Les dunes sont de sable éolien d'origine gréseux provenant de Hamada Mio-Pliocène. Il existe dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhas, et sur les versants rocheux.

1.4 Tectonique

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

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

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

Tableau 1. Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952)

Age	Style
1- Antécambrien	Plis très aigus, failles.
2- Paléozoïque	Mouvements amples d'axes est-ouest Formations de chaînes orientées N-S, NNE-SSW ou NW-SE sur des axes antécambriens
3- Poste Eocène et Ante Miocène	Rejeu des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne
4- Post-Miocène	Premiers plis d'axe NW-SE
5- Post Pliocène	Mouvements peut être dans la région Nord seule Plis en Genous de l'Aurès d'axe E-W
6- Fini Quaternaire Ancien	Plis affectant le Moi-Pliocène seul ou accompagne du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux dont l'axe NW-SE est le principal.
7- Néolithique	Mouvements de grande amplitude à plis faibles et Localisés.

1.5 HYDROLOGIE :

Le bassin hydrographique du Sahara couvre une superficie de 2018054 km² et une population de 3,5 millions. Il se compose en plus du bassin versant de Chott Melrhîr de trois autres bassins : le Sahara septentrional, la Saoura-Tindouf et le Hoggar-Tassili. (Figure 5)

Le premier se situe sur l'atlas saharien et constitue la transition entre les domaines atlasiques plissés du Nord et les étendues plates et désertiques du Sahara au Sud.

Quant au territoire saharien, il est l'un des déserts le plus chaud et le plus aride du globe. Il se caractérise par des précipitations très peu abondantes et irrégulières entre 50 mm au Nord et 12 mm au Sud,

1.5.1 Le Bassin du bas Sahara

Elle couvre une superficie de 700000 km² et regroupe plusieurs wilayas : Biskra, Ouargla, Ghardaïa, El Oued, Adrar, Tamanrasset (Ain Salah) et Illizi (Deb Deb). Il se distingue principalement par des ressources en eau importantes caractérisées par deux importants aquifères, qui sont la nappe du Continental Intercalaire (CI) et celle du Complexe Terminal (CT).

Les régions du bas Sahara sont principalement : Oued Rhir, Souf et Ouargla (à l'Est) ; le M'zab (au Centre) ; le Gourara, Touat et Tidikelt (à l'Ouest).

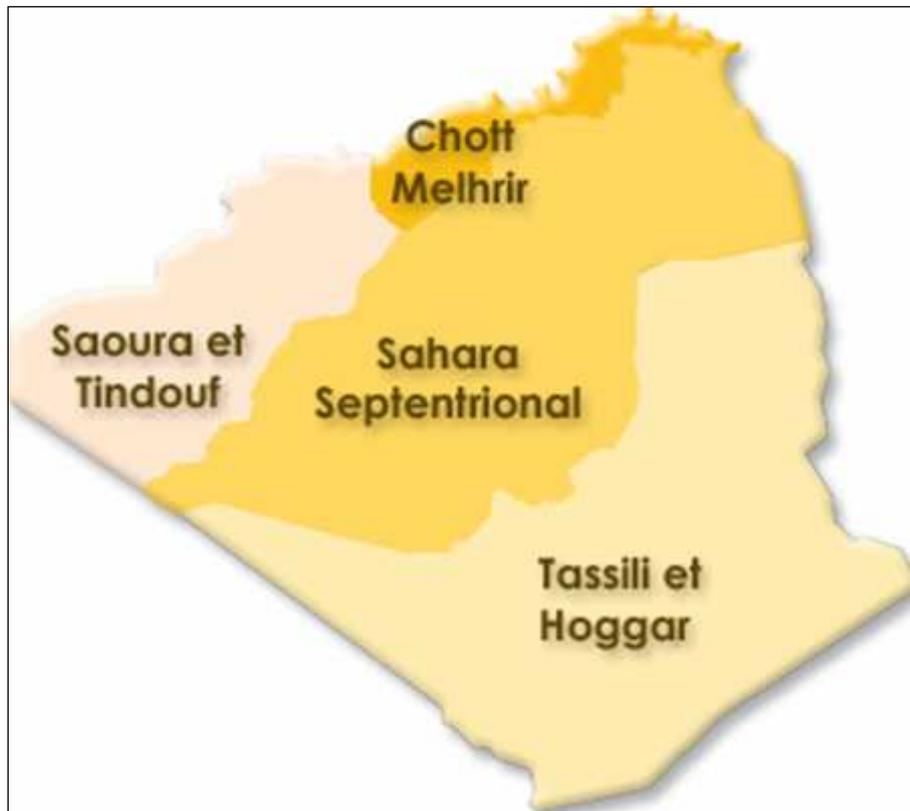


Figure 5. Les grands bassins hydrographiques du Sahara (Zeddouri 2010)

1.5.2 Oued Righ, Souf et Ouargla

Ces trois régions se trouvent en situation d'intense exploitation des ressources en eaux souterraines avec de forts impacts négatifs ressentis dans certaines zones.

Les prélèvements dans ces trois unités représentent plus d'un tiers des prélèvements totaux du Sahara, sauf dans les régions de Hassi Messaoud et Gassi touil et ce, pour La nappe du CT.

Les conséquences de cette exploitation sont multiples. Le rabattement des nappes souterraines (jusqu'à plus de 80 m à Touggourt) mais surtout la remontée de la nappe phréatique et la salinisation de l'eau et du sol due à l'accumulation des eaux d'irrigation mal drainées

1.5.3 Le M'zab

Les ressources en eau de la région sont principalement d'origine souterraine. elles sont essentiellement du Continental Intercalaire avec les caractéristiques de profondeur, de température et de salinité spécifiques à ce type de formation (Zelfana, Grara) présentant un gradient du sud-ouest vers le nord-est (de 400 à 1000 m de profondeur, de 30 à 45°C de température) à l'exception de la zone d'El Menâa, toute la région du M'zab présente un rabattement important du à une surexploitation de la nappe (Zeddouri 2010).

1.5.4 Touat, Gourara et Tidikelt

Cette zone présente un potentiel en eau relativement important par rapport aux autres zones du Sahara Septentrional.

Certes, les ressources en eau proviennent exclusivement du Continental Intercalaire, mais à des profondeurs faibles.



Photo 1 : Fougara de Timimoun : système de captage et d'irrigation (Zeddouri 2010).

L'eau présente une salinité faible (Adrar) à moyenne (In Salah) et des basses températures de l'ordre de 25°C. Ces trois régions du sud-ouest se distinguent par leur système de captage et d'irrigation qui est celui de la Fougara (photo1). Le choix de ce mode de captage et d'irrigation est déterminé par des considérations économiques et de climat. Il faut reconnaître aussi que l'hydrogéologie spécifique à la région a concouru à cette ingénieuse réalisation.

1.6 Climatologie :

De sens large, le Sahara algérien est caractérisée par des périodes de sécheresse prolongées, il correspond à un désert zonal dans la typologie des zones désertiques (FAURIE et al, 1980). Le climat de la vallée de l'Oued Righ est un climat désertique, caractérisé par des précipitations faibles et irrégulières, des températures accusant des amplitudes journalières et

annuelles importantes, par une faible humidité de l'aire ainsi que des vents de sable parfois très violents.

I.6.1. Etude des paramètres climatiques

Pour déterminer les caractéristiques climatiques de la région, une synthèse des données climatiques de 39 ans (de 1974 à 2013) sur différents paramètres du climat, tels que les précipitations, les températures et l'évapotranspiration acquises de l'office national de météorologie (ONM) au niveau de deux stations (Ouargla et Touggourt) dont les coordonnées sont dans le tableau 2 :

Tableau 2. Coordonnées des deux stations météorologiques

Station	Ouargla	Touggourt
Latitude	33,93°N	33,11°N
Longitude	5,4°E	06,13°E
Altitude	141m	85m

I.6.1.1. Température

La température joue un rôle décisif sur le climat, elle a plus d'ampleur et influe grandement sur les autres paramètres météorologiques tels que l'évaporation et le taux d'humidité de l'atmosphère, elle est donc un paramètre déterminant dans le calcul du bilan hydrique.

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 33.5°C (station de Touggourt) et 36°C (station d'Ouargla). Janvier est le mois le plus froid avec des valeurs de l'ordre 10.11 et 11.9°C respectivement pour la station de Touggourt et d'Ouargla (Figure 6).

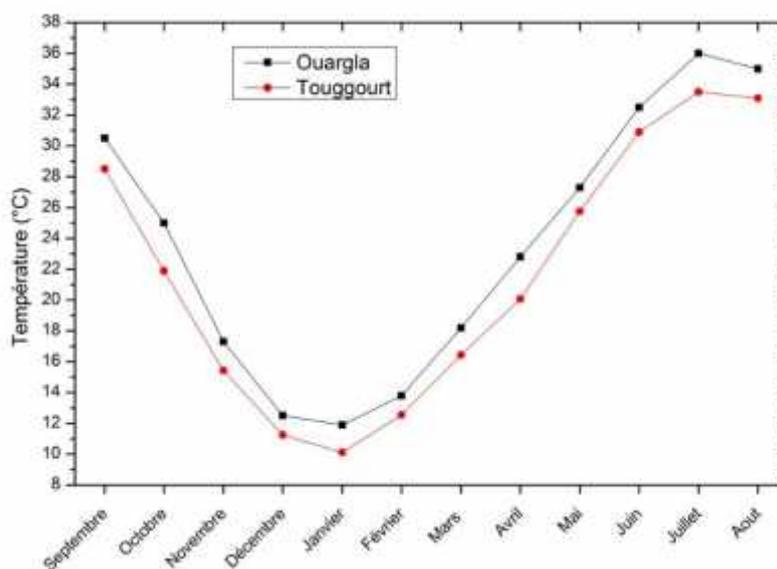


Figure 6. Variation de température mensuelle moyenne (1974-2013)

1.6.1.2. Précipitation

Dans notre région d'étude, les précipitations sont très rare et irrégulières à travers les saisons et les années, elle reçoit un cumule annuel de l'ordre de 66 mm (station de Touggourt) et 29 mm (station d'Ouargla). La répartition est marquée par une sécheresse presque absolue au mois juillet de l'ordre 0.2 et 0.4 mm pour les deux stations, et le maximum est enregistré au mois de janvier.

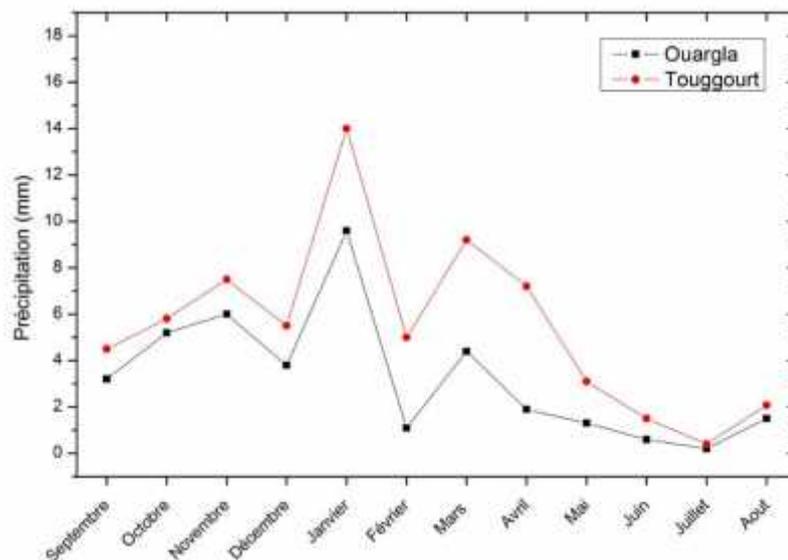


Figure 7. Variation des précipitations moyennes mensuelles (1974 - 2013)

1.6.1.3. Vents

Les vents sont relativement fréquents dans. En hiver, ce sont les vents d'Ouest qui dominent, tandis qu'au printemps se sont ceux du Nord - est, alors qu'en été se sont ceux du Sud-Ouest. (O.N.M, 2010).

Le mouvement de l'air le plus élevé se produit en Mars avec 3.09 m/s à juillet 3.27 m/s. il est plus faible en décembre avec 2 m /s. La moyenne annuelle de la vitesse du vent est de 2.83 m/s.

1.6.1.4. 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 région de l'Oued Righ l'évaporation est très importante, le maximum est de l'ordre de 405,57 mm (station de Touggourt) enregistré au mois de juillet et le minimum est marqué au mois de janvier avec 100,08 mm.

Dans la cuvette d'Ouargla, l'évaporation est très élevée : en effet, elle est en moyenne de 91 mm au mois de Décembre et de 470,5 mm au mois de Juillet, soit 3070,94 mm /an.

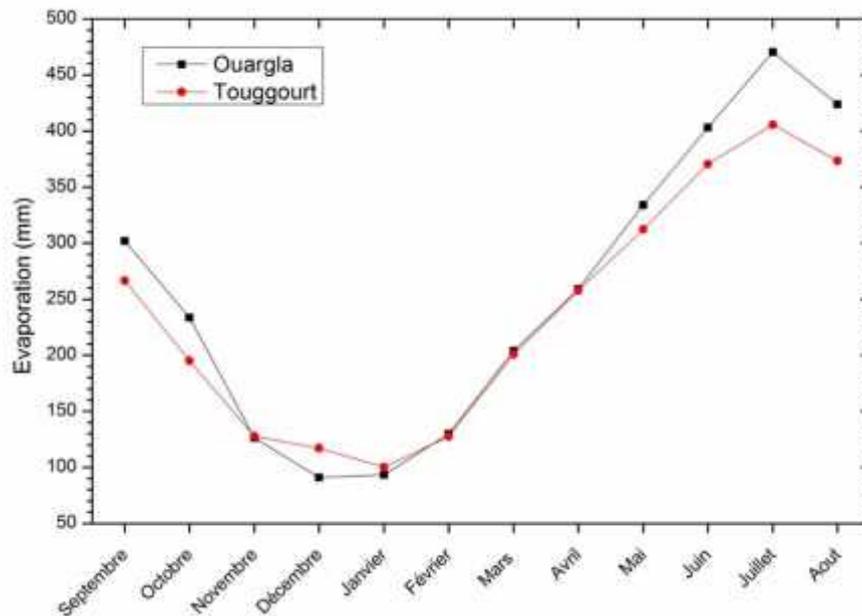


Figure 8. Variation mensuelle de l'évaporation moyenne (1975-2013)

1.6.1.5. Humidité de l'aire

Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative de la région d'étude varient entre 35% et 65% pour les deux stations. Juillet est le mois le plus sec et Décembre est le mois le plus humide pour la station de Touggourt tandis que Janvier est le mois le plus humide de la station d'Ouargla.

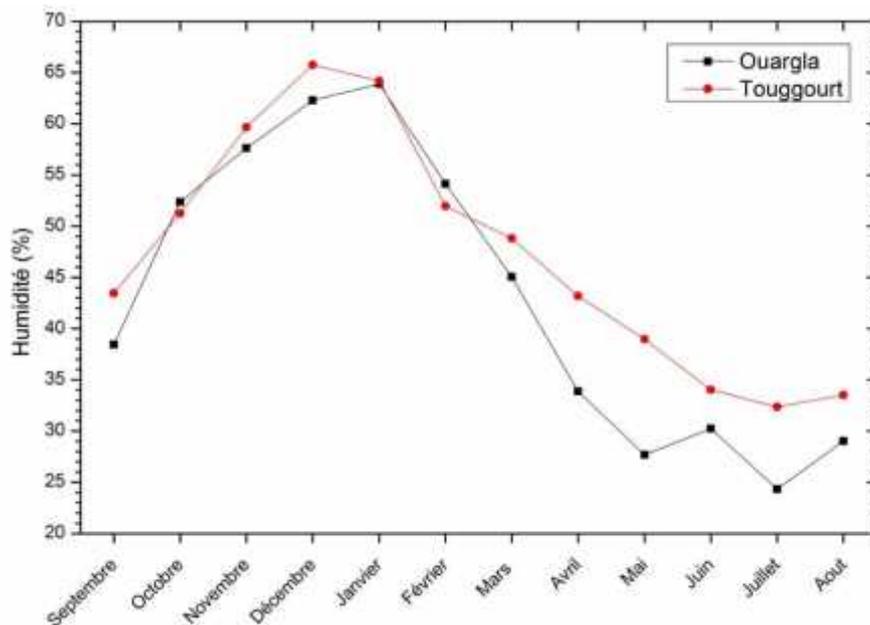


Figure 9. Variation mensuelle de l'humidité moyenne (1975-2013)

I.6.1.6. Durée de l'insolation

L'insolation est la durée d'apparition du soleil, elle est exprimée en heures. Elle varie en fonction de l'altitude qui détermine la longueur des jours et le degré d'obliquité des rayons solaires. La vallée de l'Oued Righ reçoit une quantité d'enseillier relativement très forte, le maximum est atteint au mois de juillet avec une durée de 358 heures et le minimum au mois de janvier avec une durée de 228 heures. (Ben Hamida R et al 2004).

I.7 Pédologie

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

La couverture pédologique au Sahara présente une grande hétérogénéité et elle se compose de sols minéraux, sols peu évolués, sols halomorphes et sols hydro morphes (Dubost 1991). Le sol est caractérisé par une texture sableuse à sablo-limoneuse avec une forte perméabilité, structure particulière, un fort degré de salinité et un taux faible de matière organique. Il est caractérisé également par la présence de nappe phréatique proche de la surface (Khadraoui 2006).

La texture des sols est très grossière par endroits et la teneur en sable fin et grossier peut dépasser les 90%. La détermination de la composition granulométrique des agrégats de certains profils a été perturbée par la présence importante de gypse.

I.8 Hydrogéologie

Le Bas-Sahara algérien est un bassin sédimentaire, en forme de synclinal dissymétrique, particulièrement bien doté en couches perméables favorables à la circulation souterraine des eaux. Certaines, recouvertes de terrains imperméables, assurent l'existence de nappes captives alors que d'autres, situées au sommet des dépôts et sans couverture étanche, permettent la formation de nappes phréatiques (Figure10).

Bénéficiant de cette structure, les eaux souterraines constituent plusieurs ensembles superposés : la puissante nappe artésienne du Continental intercalaire gréseux, la nappe artésienne des calcaires marins du Sénonien et de l'Eocène, les nappes artésiennes du Continental terminal sableux (Mio-Pliocène) regroupées avec la précédente sous le nom de Complexe Terminal, enfin des nappes phréatiques largement étalées dans les formations continentales superficielles.

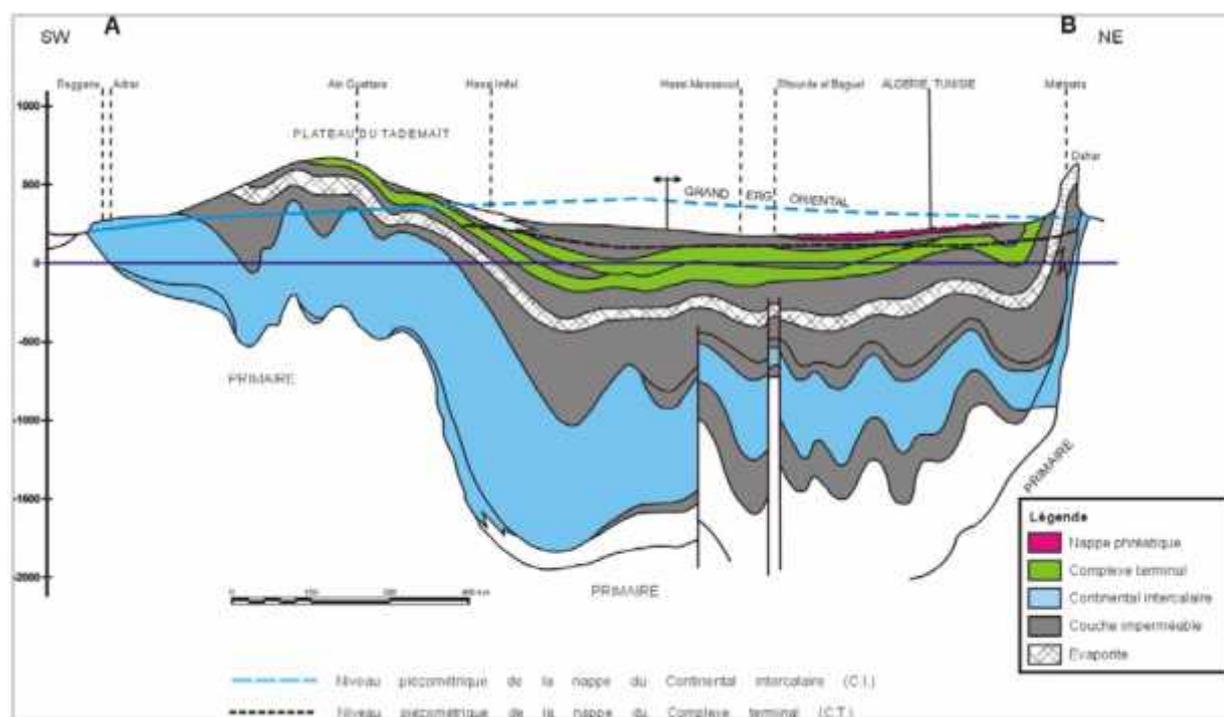


Figure 10. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

I.8.1 Les nappes du Complexe Terminal

Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes. Elles englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En fait, il est possible d'y distinguer trois corps aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois corps sont représentés par les calcaires et dolomies du Sénonien et de l'Eocène Inférieur, par les sables, grès et graviers du Pontien, et par les sables du Mio-Pliocène. La profondeur du Complexe Terminal est comprise entre 100 et 600 mètres et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m. Selon une étude récente du SASS les prélèvements dans le Complexe Terminal étaient de 16,3 m³/s pour le territoire algérien en 1998. Le niveau piézométrique est en baisse générale. Cette baisse deviendra catastrophique dans une trentaine d'années dans les zones les plus exploitées où elle pourrait dépasser 200 mètres d'après une simulation de la même étude.

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

« Le secteur le plus exposé est celui des chotts algéro-tunisiens au C.T. C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte....La simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres...sur l'oued Rhir... le Souf...

Une telle situation serait inacceptable... : le risque de percolation du chott vers la nappe serait fatal pour cette dernière en terme de salinité. La simple poursuite de l'existant, du moins dans

le CT, serait donc tout à fait inacceptable pour la région des Chotts. Là il faudra sérieusement envisager la réduction des prélèvements comme un scénario plausible, et s'y préparer d'ores et déjà...La simple poursuite des rythmes de prélèvements actuels y constitue un danger potentiel majeur. »

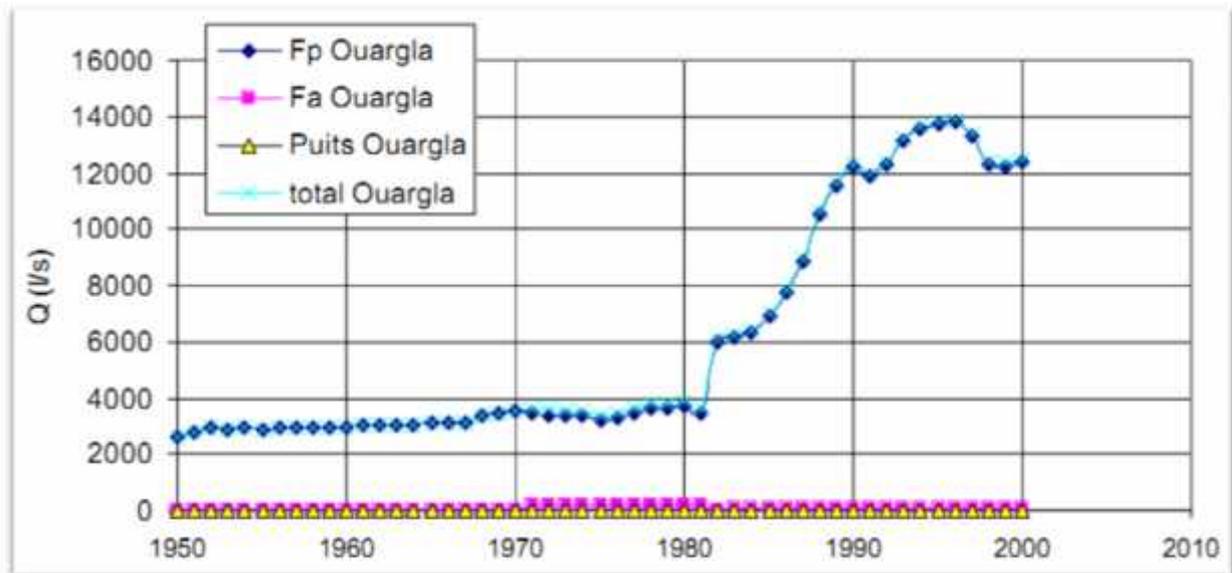


Figure 11. Historique de l'exploitation du CT à Ouargla (O.S.S, 2002)

I.8.2 La nappe du Continental Intercalaire

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouches dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. A Ouargla, il est exploité entre 1'150 m et 1'350 m de profondeur.

La recharge actuelle de la nappe du Continental Intercalaire estimée à $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le territoire algérien s'effectue par infiltration des précipitations sur les bordures du bassin, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas saharien au Nord-Ouest et du Dahar à l'Est. Des ruissellements en bordure de plateaux peuvent également participer à l'alimentation de la nappe sur le bord du Tademaït et sur le bord du Tinhert, de même que, d'après le SASS, l'infiltration des pluies sur le Grand Erg Occidental.

Les prélèvements s'élevaient en 1998 à $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Ils s'effectuent principalement aux dépens des réserves. La nappe déstocke à raison de $16,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui provoque une baisse des niveaux piézométriques, de l'artésianisme et une réduction du débit des foggaras aux exutoires.

La simulation Zéro du SASS, basée sur la poursuite des prélèvements actuels, sans aucune augmentation, indique que les rabattements augmenteront d'une cinquantaine de mètres en 2050 à Ouargla par rapport à l'état en 2000. Ces rabattements supplémentaires produiront une diminution des débits artésiens de l'ordre de 25% sur les forages existants.

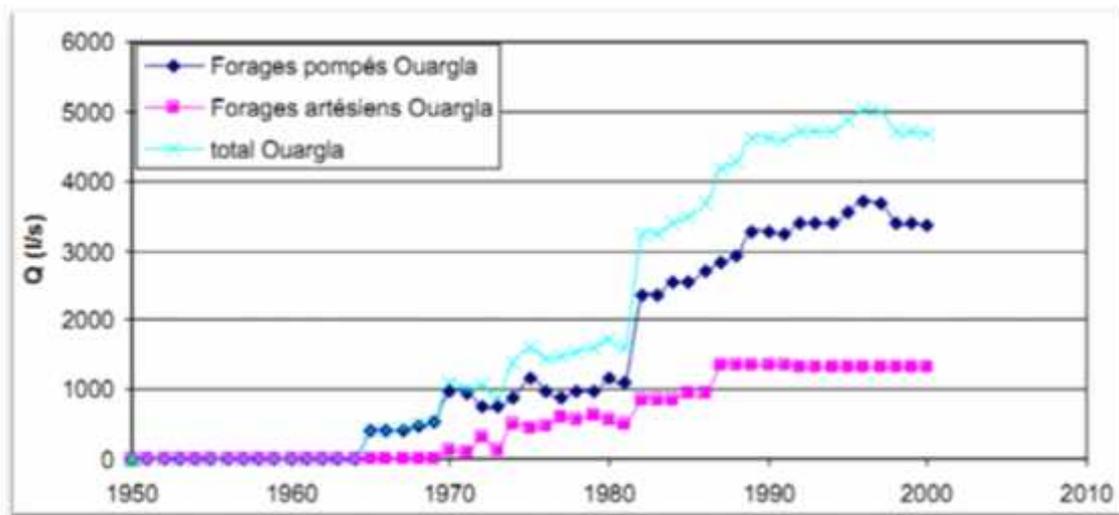


Figure 12. Historique de l'exploitation du CI à Ouargla (O.S.S, 2002)

I.8.3 Nappe superficielle (nappe phréatique) :

Cet aquifère est constitué par des sables plus ou moins fins et argile gypseuse. Son substratum est formé d'argile formant en même temps le toit de la première nappe du (CT). Son épaisseur moyenne est de 7 à 60 m. elle est caractérisée par :

- des eaux de fortes salinités ; les analyses des eaux de cette nappe montrent qu'elles sont très salées,
- la conductivité électrique est de l'ordre de 10mmhos/cm à 36 mS/cm dans la majorité des cas.

Cette nappe n'est plus exploitée en raison de la forte salinité des eaux (DERAI et al, 2000)

Cette nappe a connu une remontée du niveau d'eau ayant provoqué de graves problèmes d'écologie dans les zones urbaines et agricoles. Ce phénomène a engendré des affaissements de terrain et la création d'un milieu anaérobique néfaste pour les cultures et le palmier.

La salinité des eaux varie d'une zone à une autre, elle est de moins 50g/l dans la ville d'Ouargla et de ses environs, la concentration en sel augmente dans le sens des écoulements des eaux ou elle peut atteindre plus de 190 g/l dans les zones proches des chotts.

La forte salinité est due essentiellement au lessivage des formations salifère et argileuses par les eaux de la nappe, tandis que la faible minéralisation est due à la dilution par les eaux d'irrigation provenant des nappes sous-jacentes et à l'absence de niveaux gypseux dans la formation sableuse qui caractérise la nappe phréatique.

Une des causes principales de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla est d'ordre morphologique, une topographie très plane conjuguée à un manque d'exutoire naturel. L'alimentation de la nappe provient essentiellement :

- des rejets d'eaux usées d'origine domestique

- de l'eau excédentaire liée à une irrigation irrationnelle des palmeraies
- des eaux de ruissellement venant des parties hautes et des apports de crues des trois Oueds dans la cuvette (N'sa, M'zab et M'ya)

I.9 Présentation des zones humides

Les zones humides du bas-Sahara sont réparties en en trois zones :

- Cuvette Ouargla englobe les zones humides suivantes : (sebkha Oum Raneb, sebkha Safioune, chott Ain Beida, chott Baghdâd et les lacs hassi Ben Abdallâh).
- Oued righ (sud et nord).
- Les chotts (Merouane et Melghir).

Ces zones sont des écosystèmes aquatiques au Sahara septentrional algérien, classées sur la liste de la convention de Ramsar des zones humides, d'importance internationale, remplissant plusieurs fonctions. : Ces milieux humides servent comme exutoires aux eaux de drainage des palmerais, d'écoulements de surface ou souterrain d'Oued M'ya ainsi qu'aux rejets d'eau usée. Ces actions anthropiques influent directement sur l'état quantitatif et qualitatif de ces surfaces d'eau

I.9.1 Cuvette d'Ouargla

La cuvette d'Ouargla correspond à une grande dépression d'une superficie de 750 Km² 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 de 40 kms au Nord de la ville d'Ouargla. L'Oued M'ya converge avec Oued Igharghar venant d'une source très loin au sud (Ahaggar) pour constituer la vallée de l'Oued Righ qui aboutit au Chott Melrhir (Ballais, 2010).

Dans la région d'Ouargla, la largeur de l'Oued Mya varie entre 4 à 30 km. La pente moyenne de la vallée est très faible (1‰), à partir de la ville d'Ouargla jusqu'à sebkha Safioune.

Cette zone renferme beaucoup de de zones humides dont les principaux sont :

- Chott Ain Beida.
- Sebkha Oum Ranab.
- Lacs Hassi Ben Abdellah.
- Sebkha Safioune.

I.9.1.1 Sebkha Oum Raneb

C'est une zone humide d'une surface totale d'ordre (1085.99ha), située loin de 12km à la ville d'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 Raneb 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.

1.9.1.2 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, oued N'sa au nord et oued M'zab au sud-est.

1.9.1.3 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.

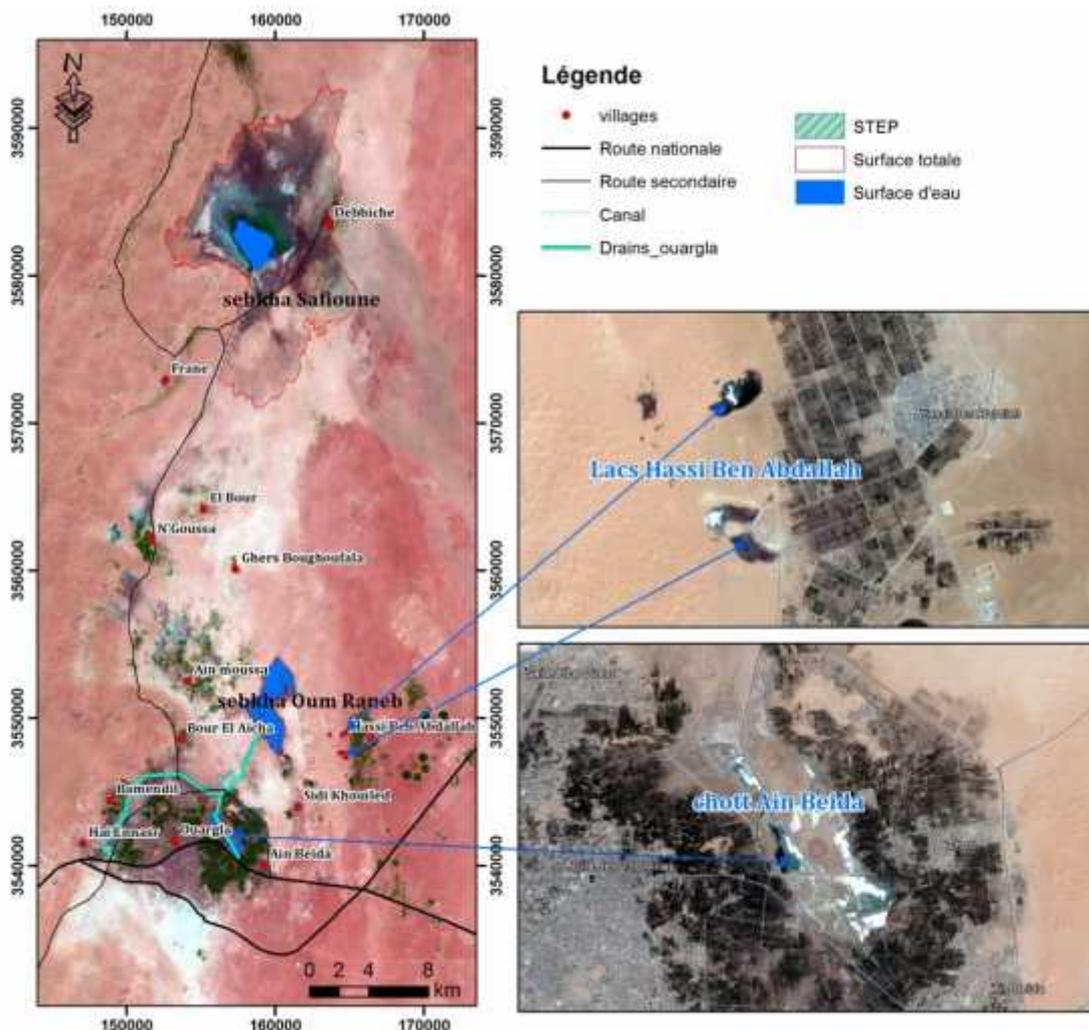


Figure 13. Zones humides de la cuvette d'Ouargla

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).

I.9.1.4. Les lacs Hassi Ben Abdallah :

Ils ont une superficie de 39.8ha, avec une surface d'eau de 9.79ha, et une profondeur maximale de 4.7 m, ils sont loin de 15 km à Ouargla et 2 km à la ville de Hassi Ben Abdallah. Situés au fond de creux à l'ouest de la commune (32 " 01' N. et 5" 44' E.). Et bordés par des dunes de sable au Nord (Ergs), au Sud et à l'Est par la route national N56 (HALFAOUI, 2008)

I.9.2 Vallée d'Oued Righ.

La vallée de l'Oued Righ est une entité économique bien précise qui regroupe près de 50 oasis situées au Nord- Est du Sahara du grand erg oriental et au Sud du Massif des Aurès.

Elle s'étend sur un axe Nord-Sud d'environ 150 Km entre les latitudes Nord 32°54' et 34°9' et couvre 15000ha environ des palmeraies ; la vallée de l'Oued Righ plus souvent nommée simplement Oued Righ débute au Nord à Oum El Tiour à plus de 500 Km au Sud D'Alger et à 330 Km au sud de Constantine et elle se termine à 150 Km au Sud de la palmeraie d'El Goug. Elle est divisée souvent en Oued Righ nord et sud (Fig14 et 15). Cette zone est la plus riche des zones humides dans le Sahara algérien.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des principaux lacs dans cette région.

Tableau 3. Caractéristiques des principaux lacs de la vallée d'Oued Righ (CRSTRA, 2011)

Site	Commune	Périmètre km	Superficie km ²	Type d'alimentation	Pérennité
El Goug	Blidet Ameer	3.60353	0.593893	ED+ER	Selon la saison
Lac Témacine	Témacine	0.960574	0.038363	ED +EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Merdjaja	Nezla	1.60488	0.0308611	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Tataouine	Nezla	0.308227	0.00482274	EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Megarine	Megarine	1.3354	0.0335897	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Zerzaïne	Megarine	-	-	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac sidi slimane 1	Sidi Slimane	0.238062	0.00426276	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac sidi slimane2	Sidi Slimane	0.703517	0.0332348	ED + EC +ER	Existence sur toute l'année
Lac Tamarigh	Sidi Amrane	0.104078	0.000840941	ER	Existence sur toute l'année
Lac Khanana	Sidi Amrane	0.151011	0.00173342	ER	Existence sur toute l'année
Lac El Aryass	Sidi Amrane	0.208439	0.00329252	ER	Existence sur toute l'année
Lac Ghilane	Sidi Amrane	0.166637	0.00217117	ER	Existence sur toute l'année
Lac Ayata	Sidi Amrane	3.15543	0.48249	ED +EU + ER	Existence sur toute l'année
Lac Ain Zerga	Tégdidine	0.190032	0.00271672	ER	Existence sur toute l'année
Lac Sidi El Abed	Tindla	0.926515	0.037291	ED+ER	Existence sur toute l'année
Lac Tindla	Tindla	36.9023	26.2089	EC+ER	Selon le niveau du Canal

EC : Eau du canal principal

ER : Eau issue de la Remontée

ED : Eau de drainage

EU : Eaux usées

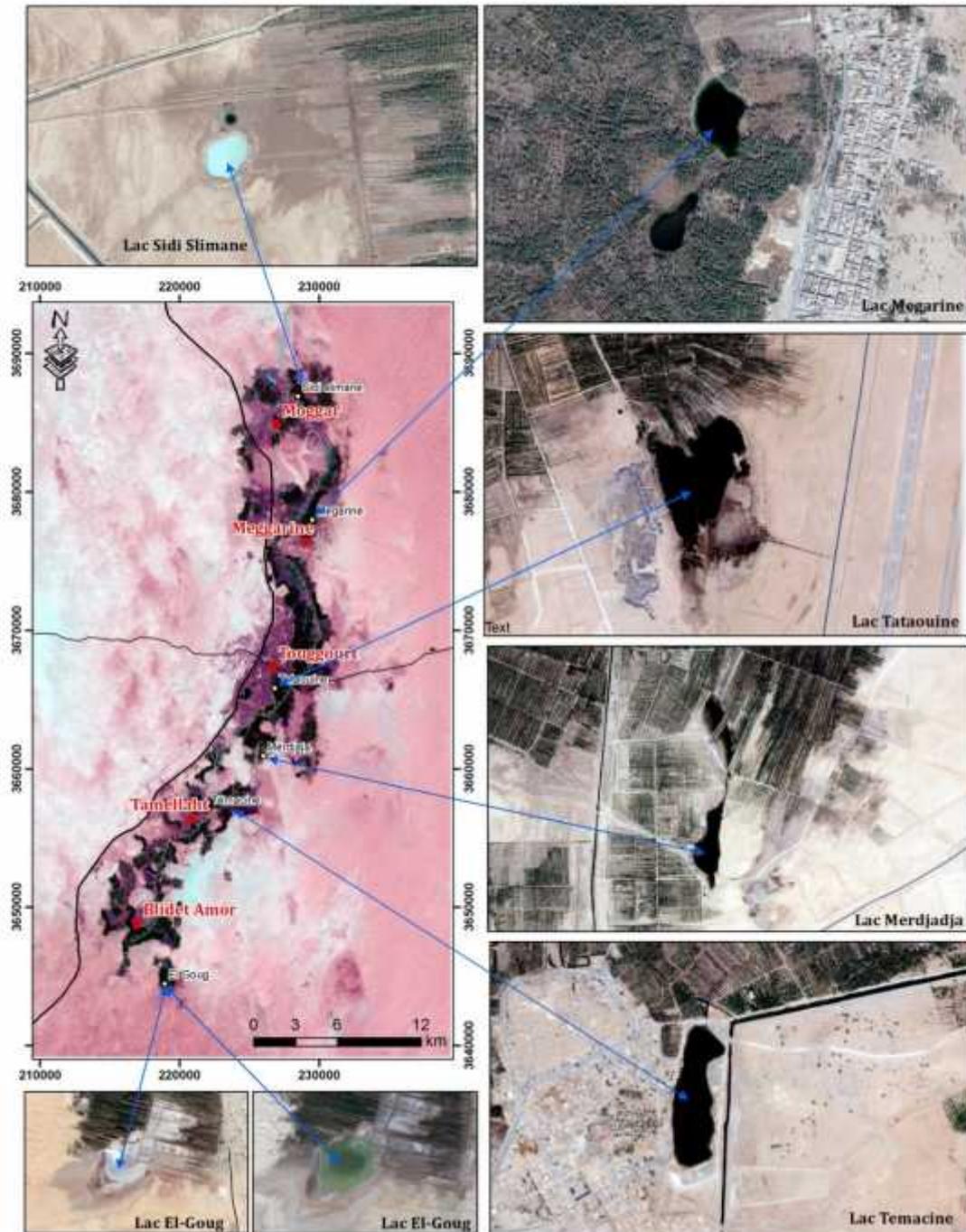


Figure 14. Zones humides de la vallée d'Oued Righ sud

Cette zone s'inscrit dans le domaine aride, caractérisée par une température importante, un apport des pluies et humidité faibles et des vents fréquents. Ces conditions favorisent une évaporation intense des eaux, et constituent un facteur influant directement ou indirectement sur le fonctionnement de ces écosystèmes.

L'alimentation du canal est en effet, hors les quelques orages annuels, se fait par des Écoulements de drainage en provenance des palmeraies, donc le canal joue le rôle de collecteur principale de ces eaux qu'il achemine jusqu'à chott Merouane.

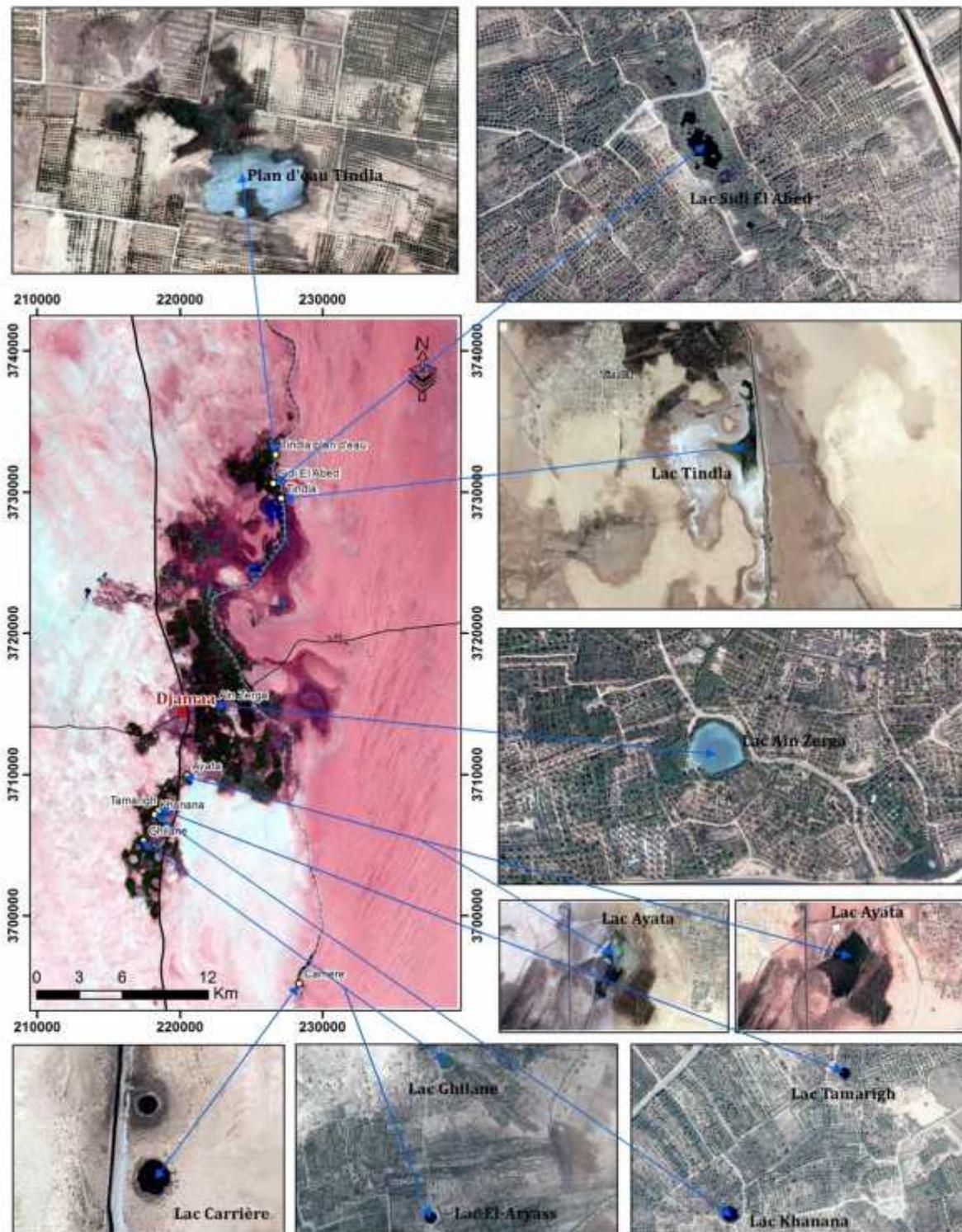


Figure 15. Zones humides de la vallée d'Oued Righ nord

On note que les lacs d'Oued Righ prennent généralement deux formes bien distinguées : une forme arrondie et l'autre allongée. On peut interpréter ça, que les lacs allongés occupent les dépressions topographiques, alors que les autres arrondis sont dus probablement à des effondrements, mais il reste à prouver cette hypothèse par des méthodes géophysiques.

I.9.3 Les Chotts

I.9.3.1 Chott Merouane :

Chott Merouane est situé au Nord-est du Sahara septentrional, qui fait partie administrativement de la Wilaya d'El-Oued et la Daïra d'El-Maghaire (loin de 100km à l'oued et 5km à la Daïra d'El-Maghaire), situé à environ 9Km du chef-lieu de la daïra, dans le village de N'sigha, de coordonnées géographiques ; 33°55'N et 06°10'E. Il est considéré comme la plus basse altitude du nord de l'Afrique (40m au-dessous du niveau de la mer). Ce chott est classé selon RAMSAR comme zone humide, d'importance internationale, avec une superficie de l'ordre de 74543.11ha.

Chott Merouane est alimenté par trois sources principales, celle du canal collecteur de l'Oued Righ appelé couramment Oued Kherouf, les eaux souterraines de la nappe CT et les eaux de pluie qui sont généralement négligeables (Hacini et al, 2006, 2009, 2010).

I.9.3.2 Chott Melghir :

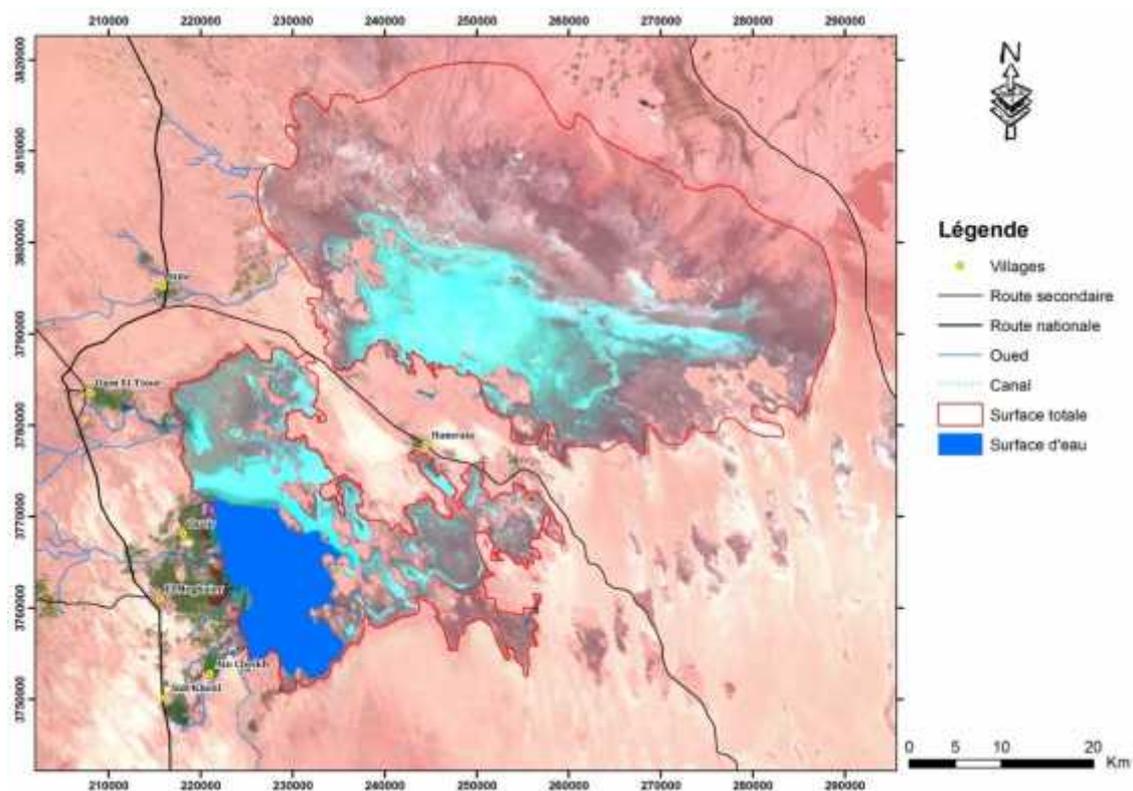


Figure 16. Les Chotts (Merouane et Melghir)

Le Chott Melghir est l'un des plus grands lacs salés d'Algérie. Sa teneur en sel est très élevée, situé au nord-est du Sahara septentrional entre trois wilayas (EL Oued, Biskra et Khenchela) loin de 115km à EL Oued, et 45 km à EL- Maghaire, la plus grande partie de cette zone est localisée dans la wilaya d'El Oued et de Biskra. Le lac est limité au Nord par la commune d'El Haouch et EL Feidh, et à l'ouest par le lieudit M'guibra (commune de Hamraia) et à l'est

la wilaya de Khenchela et au sud par le chef-lieu de Hamraia. C'est une dépression qui atteint dans certain endroit 24 m au-dessous du niveau de la mer.

Il est alimenté en eau, principalement par les oueds Djeddi, Biskra, EL Arab et EL Abiod qui se caractérisent par des écoulements intermittents, les crues de ces oueds terminent leurs courses dans le Chott (Benkhaled et al, 2008). Les oueds qui fournissent des volumes d'eaux très conséquent proviennent selon Ballais (2010) de l'Atlas Saharien, depuis les Monts des Ksour à l'ouest par Oued Djeddi jusqu'aux Mont de Némemcha à l'est en alimentant l'oued El Arab. Ce sont essentiellement les Aurès qui alimentent les principaux cours d'eau, ces oueds sont fonctionnels.

1.9.3.3 Chott Baghdâd :

Est une dépression endoréique saline appartient au zone d'EL Hadjira (situé à proximité de la ville d'El Hadjira 100Km de distance dans la partie nord de chef-lieu Willaya de Ouargla) fait partie de plateforme saharienne et se localise dans la partie orientale du Sahara Algérienne

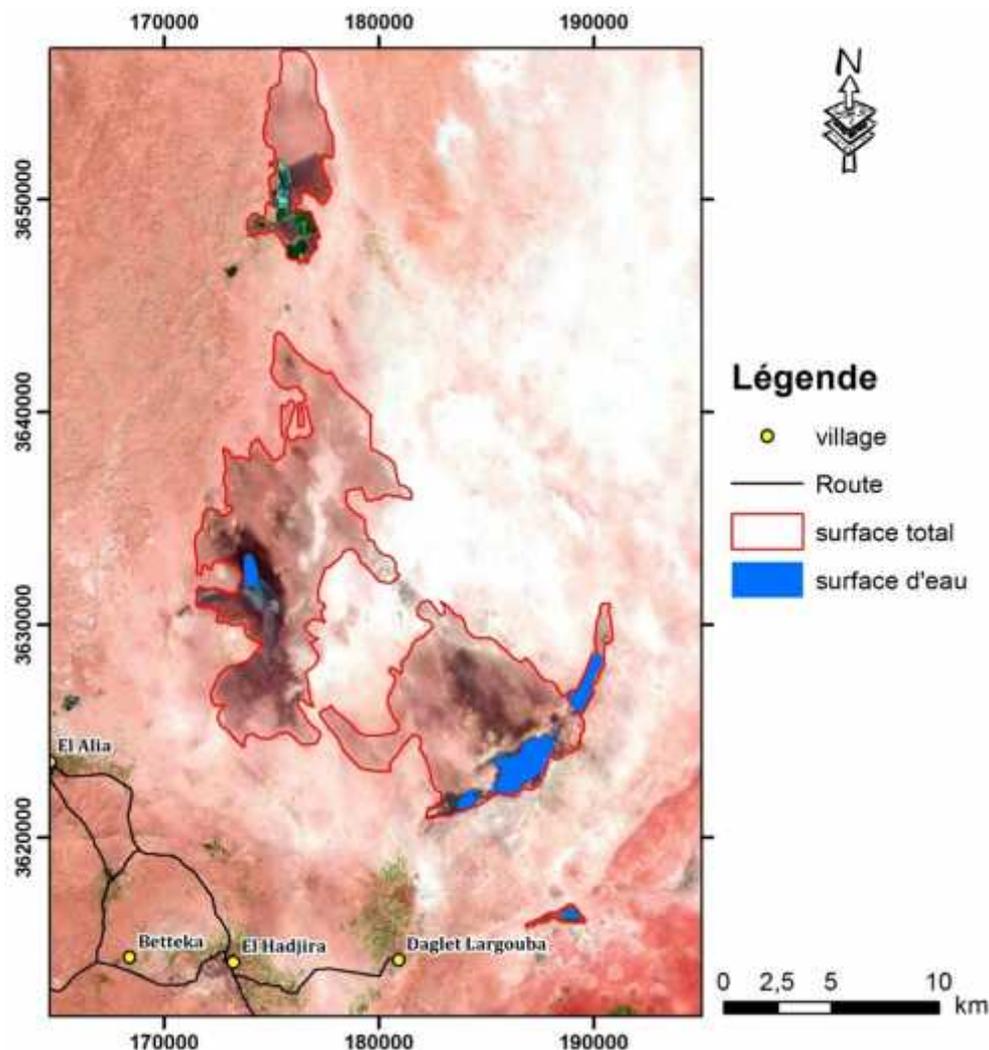
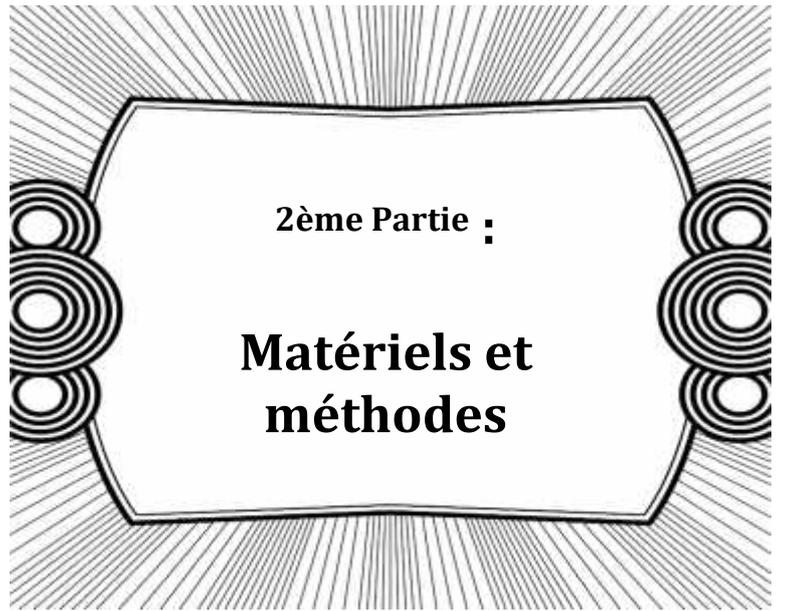


Figure 17. Chott Baghdâd



2ème Partie :

**Matériels et
méthodes**

II- Matériels et méthodes

II.1- Cartographie des zones humides

Les progrès technologiques réalisés lors de ces deux dernières décennies, la télédétection est devenue une discipline à part entière pour l'observation et l'étude de la surface de la terre. En effet, les satellites de type héliosynchrone tels que les satellites optiques (Landsat, 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 (chaîne 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 inclut les photographies aériennes et la vidéographie (Chorowicz, 1980).

Beaucoup de travaux de recherches ont conduit à la cartographie des zones humides, mais peu de travaux concernent les zones humides sahariennes salifères. Une étude d'évolution et de dégradation des zones humides (région Hoor Al Azim dans le sud-ouest de l'Iran) ont été réalisées par des classifications d'images Landsat (MSS1985) et (ETM+1999,2002, 2011). Toutes les cartes résultantes ont été évaluées à partir de système d'information géographique (SIG). Les résultats ont montré qu'il y a une diminution spatiale dans la zone humide (72%) due à l'augmentation des terres agricoles, et la demande en eau, et aussi à des activités anthropiques dans les zones en amont des zones humides (Ghobadi et al., 2012).

La détection de changement des zones humides (lac Hongze) situées dans la province du Jiangsu Nord en Chine (RUAN et al., 2008) a été effectuée pour l'évaluation du potentiel d'une série temporelle de trois images MSS et TM de Landsat acquises en 1979, 1988 et 2002. La distribution des eaux émergentes et son évolution au fil de temps et dans l'espace ont été utilisées comme indicateurs de l'évolution de l'environnement des zones humides. Les résultats ont montré qu'une grande perte de terres humides a eu lieu dans la zone pendant une période de plus de 20 ans.

A partir des images satellitaires à très haute résolution (Quick bird et Corona) au mois de juin pour les années 1972 et 2008 à Kallar Kahar en Pakistan, des classifications ont permis d'analyser la détection des changements de zones humides (Sheikh Saeed Ahmad et al., 2012). Les résultats obtenus permettent la prise de décision dans le but de l'aménagement du territoire et de mieux évaluer les implications des changements observés dans la région pour formuler des recommandations appropriées.

Pour quantifier la dynamique et estimer la perte des zones humides dans la chaîne de montagne Choke dans le bassin supérieur du Nil Bleu en Ethiopie (Teferi et al., 2010), des classifications d'images satellitaires TM et ETM+ de Landsat (1986-2005) ont montré que les zones humides sont soumises à une dégradation continue qui nécessite une intervention pour les conserver avec de plans de gestion des bassins versants.

Dans les pays du Maghreb, les zones humides en milieux arides sont caractérisées par de fortes salinisations. Les sels accumulés dans les horizons des sols ont engendrés une dégradation de leurs caractéristiques physiques. Ces dommages de la salinisation se réfèrent généralement à la mauvaise gestion des eaux d'irrigation.

Au sud algérien, l'exploitation des eaux souterraines est importante à cause du déficit hydrique ($ETP > 200$ mm/an et $P < 50$ mm/an). La rareté de la pluie a contraint les agriculteurs à utiliser les eaux des nappes profondes fossiles qui sont fortement minéralisées. Les périmètres irrigués sont largement affectés par une salinisation secondaire (Djili K. et al., 2003) qui participe aux chutes des rendements agricoles.

En outre la surexploitation des nappes profondes a causé une remontée de la nappe superficielle. Cette remontée des eaux affleure dans les zones basses (dépressions) formant des surfaces d'eau salées (chotts et sebkhas).

Le suivi de l'évolution de ces zones humides nécessite une bonne connaissance de terrain, et une cartographie qui met en valeur les potentialités de cet environnement et ses contraintes.

II.1.1 Choix des images satellitaires

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 petits lacs. Pour traiter ces données, un ensemble de logiciels sont utilisés.

Afin de couvrir la zone d'étude, on a utilisé trois scènes d'images (p193r036, p193r037, p193r038) de Landsat, de plusieurs dates dont :

- Trois images multispectrales : une de type TM de Landsat-5 daté le 08/02/1987 et deux ETM+ (20/12/2000 et 01/04/2009) de Landsat-7 (USGS) ont été utilisées pour étudier l'évolution interannuelle des zones humides dans la cuvette d'Ouargla.
- Quatre images multispectrales : OLI-TIRS de Landsat-8 (20/04/2013, 09/07/2013, 27/09/2013, 01/01/2014) pour étudier l'évolution saisonnière de chott Ain el Baida et Sebkhia Oum Erraneb.
- Deux images multispectrales de Landsat-8, de deux dates (06/03/2014, 14/09/2014) représentant deux saisons de la même année 2014 (hautes et basses eaux),

Tableau 4. Bandes spectrales de Landsat Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Band	Name	Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)		Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	
		Wavelength (µm)	Resolution (m)	Wavelength (µm)	Resolution (m)
1	Blue	0.45 - 0.52	30	0.45 - 0.52	30
2	Green	0.52 - 0.60	30	0.52 - 0.60	30
3	Red	0.63 - 0.69	30	0.63 - 0.69	30
4	Near Infrared	0.76 - 0.90	30	0.77 - 0.90	30
5	Shortwave IR-1	1.55 - 1.75	30	1.55 - 1.75	30
6	Thermal IR	10.40 - 12.50	120* (30)	10.40 - 12.50	60* (30)
7	Shortwave IR-2	2.08 - 2.35	30	2.09 - 2.35	30
8	Panchromatic			0.52 - 0.90	15

II.1.2. Analyse des données

II.1.2.1. 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 :

a. Empilement

C'est l'empilement des bandes de chaque scène à partir de la commande <layer stacking> dans le logiciel de traitement d'images satellitaires (*Envi 5.1*), cette étape est utilisée pour simplifier le mozaiking et le découpage des 3 scènes étudiées.

b. Mozaiking

L'opération est de réaliser un agencement de 3 scènes à l'aide de la commande mozaiking et cela pour avoir une seule carte :

- La première scène (p193r036) : englobe les chotts (chott Merouane, chott Melghir).
- La deuxième scène (p193r037) : englobe les zones humides d'Oued Righ (Sud et Nord), chott Baghdâd.
- La troisième scène (p193r038) : englobe les zones humides de la cuvette d'Ouargla.

c. Découpage (Resize data)

Le traitement d'image commence par l'extraction du secteur d'intérêt et la correction géométrique de l'image Landsat dans le système de référence UTM/WGS 84, fuseau 31 N. Un empilement spectral puis un redimensionnement spatial de l'image pour cerner que la zone d'intérêt.

d. 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.

II.1.2.2. Photo-interprétation**a. 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 colorées 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.

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.

b. 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).

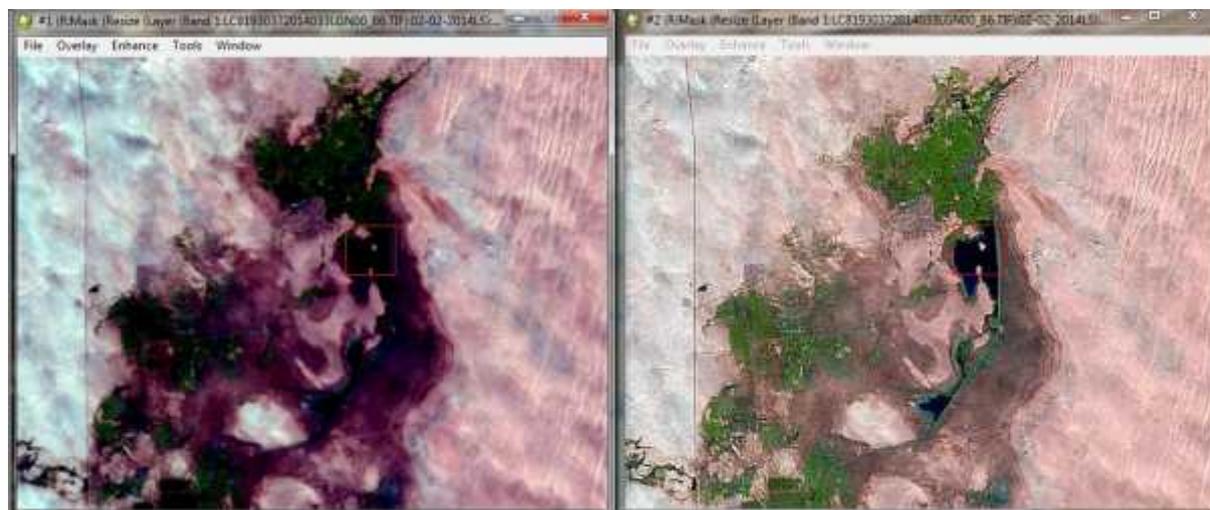


Image avant filtrage

Image après filtrage

Figure 18. augmentation du contraste dans une image avant et après un rehaussement linéaire

II.1.2.3. Classifications des images

Un des objectifs de traitement d'images satellitaires est d'obtenir une carte des états de surface. Ce plan s'obtient par classification des données de télédétection. La classification consiste à regrouper des pixels en catégories les plus homogènes possibles, c'est-à-dire créer des classes contenant le plus de pixels similaires. La partition de l'image en ensembles de pixels représentant une même occupation du sol.

a. La classification supervisée (SVM)

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).

La méthode « Support Vector Machine » SVM » qui a de solides bases théoriques et d'excellents succès empiriques. Le SVM a été appliqué à des tâches telles que la reconnaissance de chiffres manuscrits, la reconnaissance d'objets et la classification de texte (Tong and Koller, 2001). Depuis son introduction dans le domaine de la reconnaissance de

formes, plusieurs travaux ont pu montrer l'efficacité de ces techniques principalement en traitement d'image (Hanifi, 2009).

Généralement dans la zone d'étude, cinq classes caractérisant la zone humide et une classe « surfaces minérales» qui regroupe les différentes surfaces sèches :

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 :
 - ✓ Palmeraie : située à proximité des agglomérations, représentée essentiellement par les palmiers dattiers, et/ou des cultures intercalaires.
 - ✓ Surface irriguée : parcelles de cultures irriguées par aspersion (pivot).
 - ✓ Roseau : plante des sols humides occupant une partie des chotts et sebkhas.
6. Surfaces minérales (sable) qui regroupent :
 - ✓ Croute grès-calcaires : représenté par le plateau gréseux dans la rive ouest et quelques butes témoins (garas) dans la rive Est.
 - ✓ Grés rouge : le plus dominant, est représenté sous une forme érodée par l'effet du vent dominant dans la rive Est de l'oued et les talus de la rive ouest.
 - ✓ 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.
 - ✓ Agglomérations : représentée par la ville d'Ouargla et les villages dans la cuvette.

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 (Fig19).

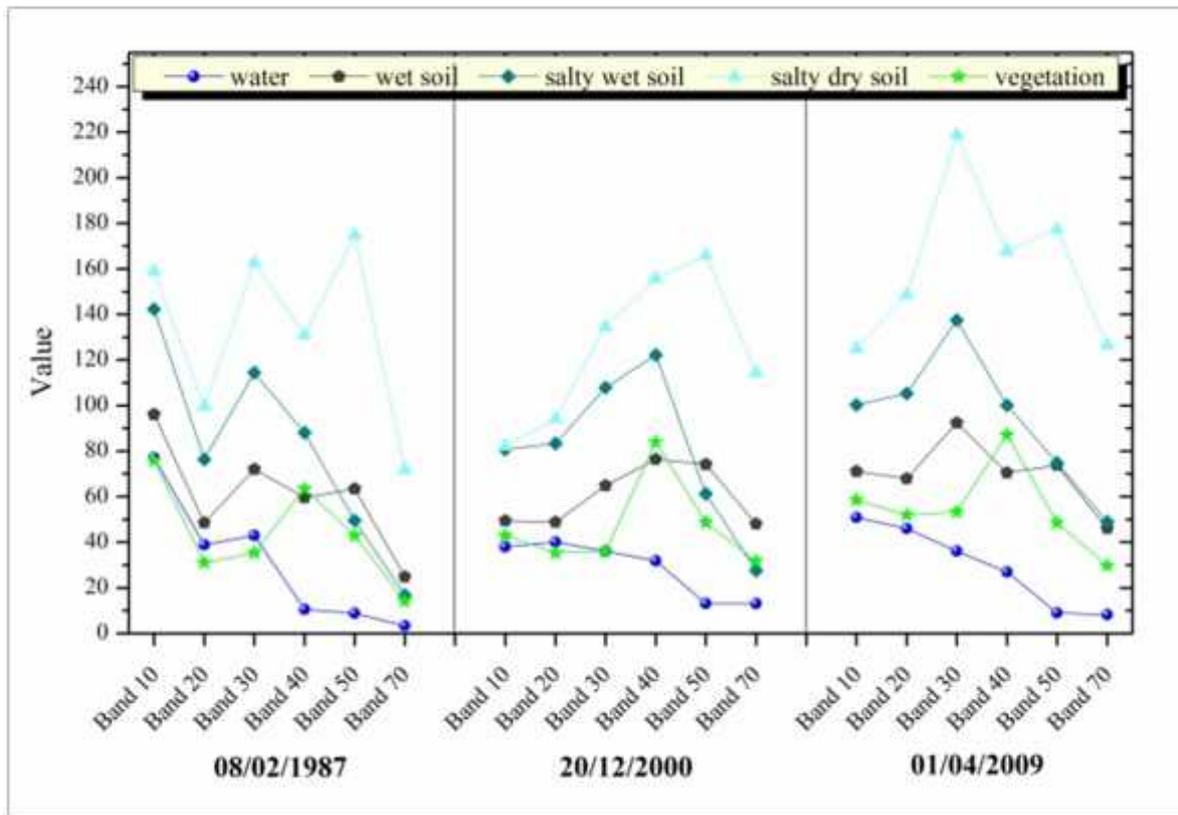


Figure 19. Comparaison des signatures spectrales des classes humides en 1987, 2000 et 2009. Cuvette d'Oaurgla

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

ENVI permet de tracer et de sélectionner des formes (polygones, polygones, 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 n premier lieu, ainsi que à l'aide des images de Google map 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.

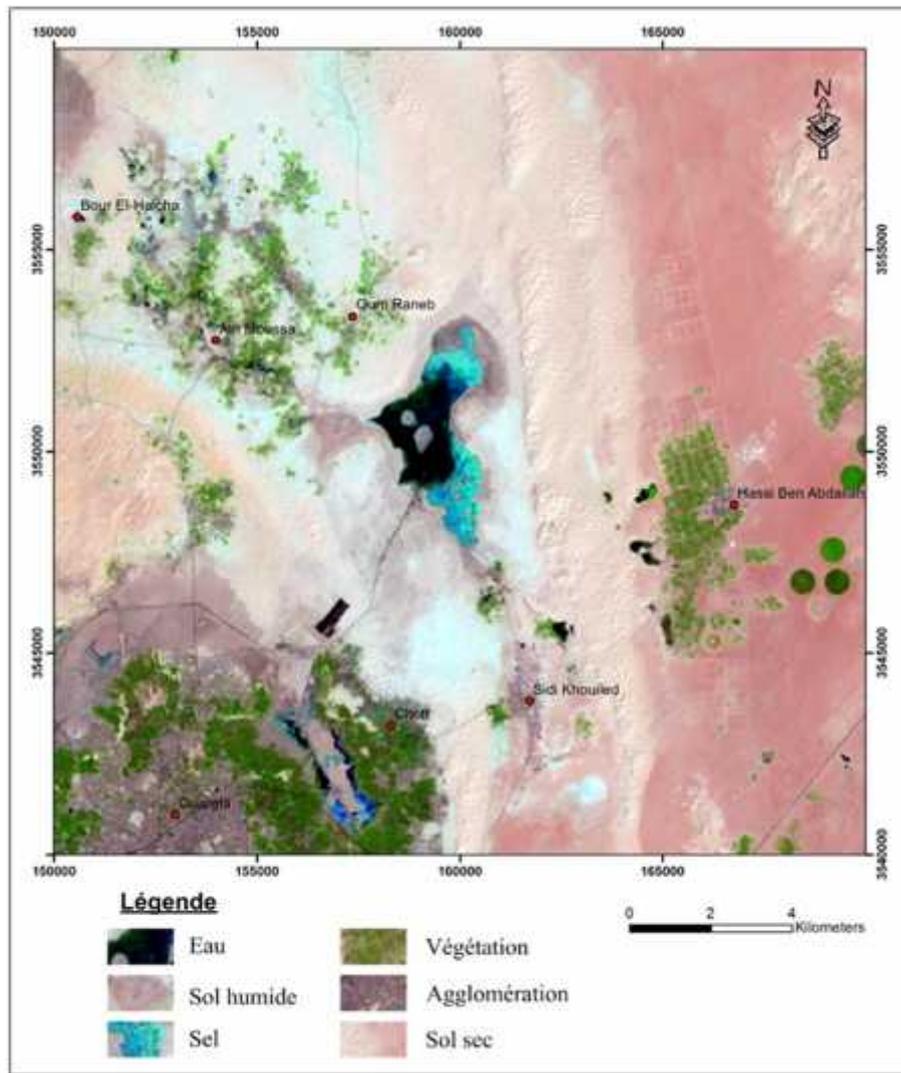


Figure 20. Carte de choix des classes

c. 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.
- Le coefficient 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 ».

d. Le filtre Majoritaire

Le filtre majoritaire sur une fenêtre 3*3 a été appliqué après chaque classification afin d'éliminer les pixels isolés (classés différemment de la classe majoritaire).

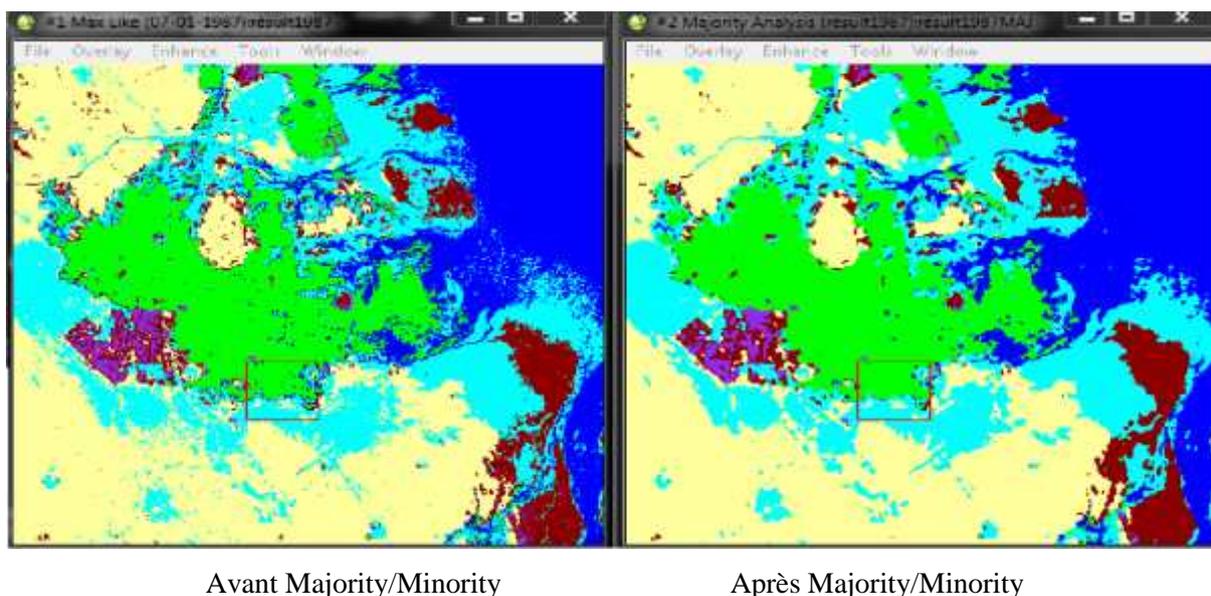


Figure 21. Une partie de carte classification avant et après Majority/Minority

Le choix de la classification supervisée (SVM) se fait après une comparaison entre les résultats de différentes méthodes de classification, où cette dernière présente moins de confusion, et donne plus de précision surtout dans les classes des zones humides.

Tableau 5. Comparaison entre les différentes méthodes de classification supervisée appliquées dans la cuvette d'Oaurgla (20/12/2000)

Classes	Accuracy (%)				Observation	
	Support Vector Machine (SVM)	Maximum Likelihood (ML)	Spectral Angle Mapper (SAM)	Neural Net (NN)		
Humid zone	Water	99.42	97.74	86.78	96.52	SVM
	Wet soil	87.89	81.88	41.28	82.41	SVM
	Wet salt soil	90.58	78.58	47.78	91.36	NN
	Salt dry Soil	96.37	89.89	95.25	94.77	SVM
	Vegetation	98.47	97.78	37.7	95.63	SVM
Mineral surfaces	Sand	99.08	96.82	95.36	98.69	SVM
	Sandy limestone crust	94.87	86.75	95.07	95.73	NN
	Agglomeration	69.96	98.63	98.63	23.29	ML & SAM
	Red sandstone	98.90	95.37	83.73	99.46	NN

II.1.2.4. 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 (ENVI help).

a. 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 (m²). C'est cette dernière qu'on va utiliser dans notre travail pour construire la matrice « change detection difference map ».

b. 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.

II.1.2.5. Cartographie par ArGis 10.1

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.

- Transfert des différentes couches extraites d'ENVI vers ArcGis 10.1, d'une part, sous forme vecteur (shape file) pour les différentes classes. D'autre part, sous forme raster pour les compositions colorées (Géotiff).
- La mise en page afin d'organiser les éléments cartographiques (bloc de données, barre d'échelle, légende ... etc.) pour l'impression de la carte.

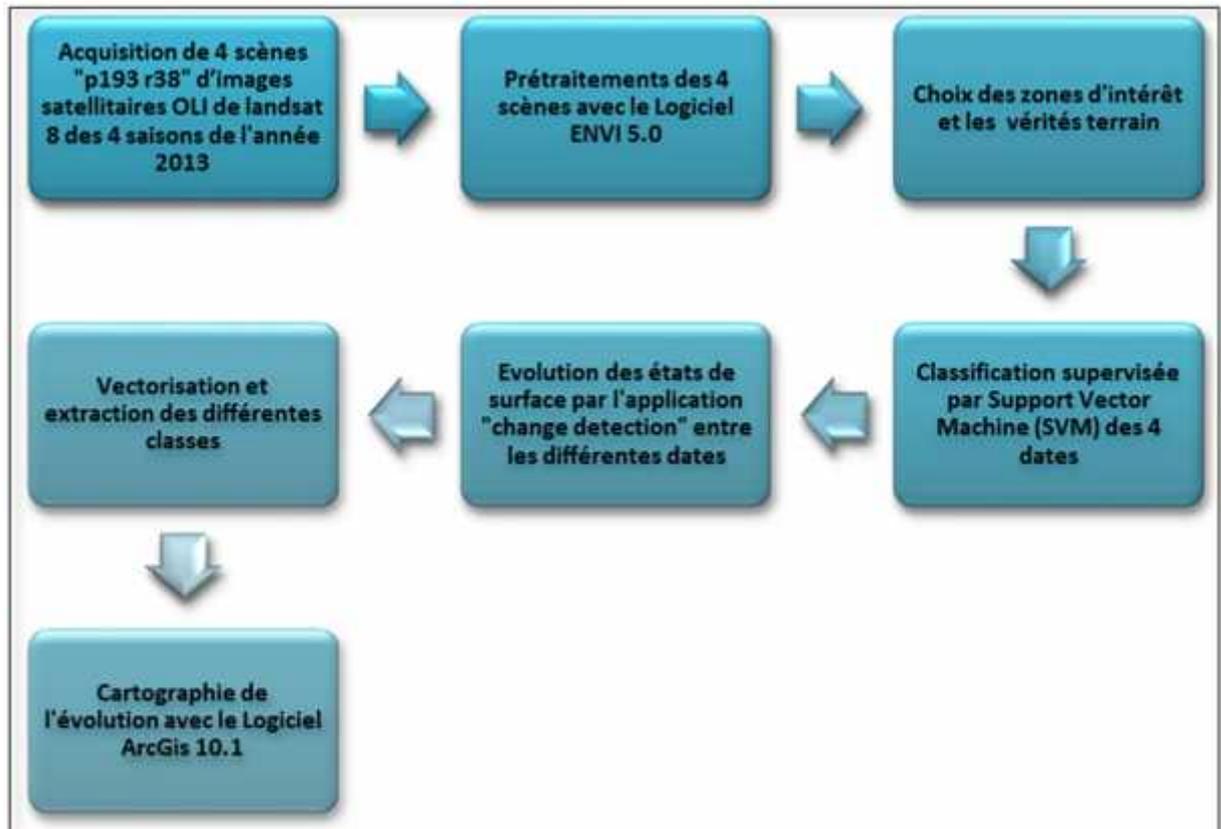


Figure 22. Schéma méthodologique pour la réalisation d'une carte d'évolution

II.2- Hydrogéochimie

Avant de traiter et discuter les différents résultats d'analyse des données obtenus dans les zones humides étudiées on a besoin de définir les principales méthodes à suivre avec bien sur les différents matériels basant spécialement sur les conditions et le mode d'échantillonnage, ainsi que les techniques de mesure et d'analyse des échantillons sans oublier l'outil informatique.

II.2.1. Choix de la région d'étude

Le Bas Sahara constitue une zone de convergence des Oueds secs à écoulement souterrain (inféro-flux). L'Oued Mya converge avec Oued Igharghar venant d'une source très loin au sud (Ahaggar) pour constituer la vallée de l'Oued Righ qui aboutit au Chott Melrhir (Ballais, 2010). La nappe superficielle affleure dans les dépressions sous forme de zones humides salées (Chotts et Sebkhas). Ces zones humides sont influencées par différents facteurs qui

dégradent leur environnement : facteur naturel et surtout le facteur anthropique, menant à une fluctuation du niveau statique et une augmentation de la salinité des eaux et des sols influant directement sur l'écosystème oasien.

II.2.2. Localisation des points de prélèvement

Pour les zones humides de la cuvette d'Ouargla, on a repris seulement les analyses faites par LAOUINI Hamza (2011). Par contre, au niveau de vallée d'Oued Righ, trois campagnes d'analyse ont été réalisées datées du mois d'octobre et décembre de l'année 2012, et la troisième du mois de février de l'année 2013.

Les échantillons d'eau sont prélevés de 17 lacs répartis le long de la vallée, et font l'objet des différentes analyses physiques et chimiques. Les résultats des analyses sont traités ensuite pour tirer des conclusions.

II.2.3. Travail sur terrain

II.2.3.1. Echantillonnage

Dans le souci de rapporter au mieux les propriétés caractérisant les eaux de surfaces de la vallée d'Oued Righ, la collecte des échantillons s'est déroulée dans le respect des étapes suivantes :

- Remplissage des flacons destinés aux analyses physico-chimiques.
- Étiquetage des flacons, afin de faciliter leur identification.
- Transmission des échantillons d'eau ainsi prélevés et transportés 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 flacons 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 lacs, pour éviter toutes erreurs. Après le prélèvement des échantillons, les bouteilles sont fermées pour éviter l'évaporation et transportés au laboratoire dans une glacière.

II.2.3.2. Matériels d'échantillonnage

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

- ✓ Un Bloc not : pour noter toute les informations.
- ✓ Des flacons : pour importer les échantillons de l'eau.
- ✓ Un pH mètre : pour mesuré le pH de l'eau.

- ✓ GPS : pour déterminer les coordonnées géographiques.
- ✓ Un conductimètre : pour mesurer la conductivité électrique.
- ✓ Une thermos : pour conserver les échantillons de l'eau.

II.2.3.3. Les mesures in situ

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 introduit dans l'eau à analyser ensuite on lit la CE et la température affichées après la stabilité de l'appareil. Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre portable pH-mV (HI 9025).

II.2.4. Travail au laboratoire

II.2.4.1. Matériels

- ✓ Verriers (Entonnoirs ; Bêchers de différent volume ; les éprouvettes ...etc.)
- ✓ Les capsules en porcelaine.
- ✓ Une balance numérique : pour mesure le poids des échantillons.
- ✓ Un spectrophotomètre à flamme : pour mesure la concentration des cations.
- ✓ Un réfrigérateur : pour conserve les échantillons.
- ✓ Four à moufle pour l'estimation de la teneur en sulfate.

II.2.4.2. Analyse au laboratoire

a. Les cations

- ✓ Dosage du sodium (Na^+) et du potassium (K^+) par photométrie de flamme.
- ✓ Détermination du calcium (Ca_2^+) et du magnésium (Mg_2^+).

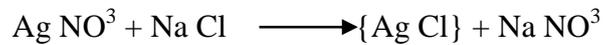
b. Les anions

- ✓ Détermination des chlorures (Cl^-).
- ✓ Les sulfates (SO_4^{-2}).
- ✓ Détermination de l'alcalinité (HCO_2^-).

c. Méthodes d'analyses

- Détermination des chlorures (Cl^-)

La réaction des ions de chlorures avec des ions d'argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage. Durant le titrage, le pH est maintenu entre 5 et 9.5 afin de permettre la précipitation.



- Détermination du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+})

On a utilisé le spectrophotomètre à flamme pour le dosage de potassium (K^+) et de sodium (Na^+), On établit une gamme étalon pour chaque élément dosé et l'on s'y réfère pour déterminer une concentration inconnue, où on fait filtration des eaux analysée dans des fioles avant la mesure, les résultats sont affichées sur le spectre.

- Détermination des sulfates (SO_4^{-2})

La teneur en sulfates dans les eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation, les sulfates proviennent essentiellement de l'anhydrite (CaSO_4) et de gypse (Ca SO_4) en contact avec l'eau (RODIER, 1996). La méthode gravimétrique utilisée pour le dosage des sulfates est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous forme de sulfate de baryum.

- Détermination de l'alcalinité (HCO_3^-)

Ils proviennent de la dissolution des roches carbonatées dont l'eau est fonction de la tension en CO_2 , de la température, du pH et de la nature lithologique des terrains traversés. Ce sont les résultats de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le CO_2 selon l'équation suivante (Rodier, 1996) :



L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates et hydroxydes.

II.2.5. Géochimie

II.2.5.1. Propriétés physico-chimiques et changements de la qualité des eaux

Dans les études hydrogéologiques, les caractéristiques chimiques de l'eau varient avec le temps et l'espace ; et les sources de ces écarts sont nombreuses. L'augmentation de la minéralisation de l'eau est due à l'augmentation du temps de contact avec les sédiments du lit du cours d'eau ou le substratum, d'amont en aval, est un processus commun (Langbein et Dawdy, 1964 ; Meybeck, 1975 ; Peters, 1984 ; Kilham, 1990). Les conditions de l'eau aérée et

l'hétérogénéité lithologique des bassins versants associés sont des sources supplémentaires responsables de la variation spatiale des caractéristiques hydrochimiques dans les aquifères (O'Connor, 1967 ; Phillips et Van Denburgh, 1971 ; Peters, 1984 ; Cook et al, 1989).

a. Calculs d'activité et les facteurs de concentration

- Calcul des activités et diagramme d'équilibre

Les activités des ions en solutions ont été calculées à partir des concentrations totales grâce au modèle d'association ionique du logiciel "AQUA" (Valles et De Cockeborne, 1991) issu de "GYPSOL" (Valles, 1987) fondé sur la loi de Debye-Hückel étendue par la fonction de déviation de Scatchard (1936).

La pression partielle de CO₂ équilibrante a été estimée à partir de la mesure du pH et de l'alcalinité carbonatée (Bourrié, 1976 ; Keller et al, 1987).

- Estimation du facteur de concentration

L'étude de la chimie des solutions lors de processus de concentration permet de mettre en évidence des comportements différents selon les éléments (Al-Droubi, 1976 ; Fritz, 1981 ; Gac, 1980 ; Valles, 1987). Dans la gamme de concentration étudiée, le chlorure peut être considéré comme inerte par rapport à la matrice poreuse, il peut constituer un critère d'estimation du facteur de concentration (FC). Ce dernier peut être estimé égal au rapport entre la teneur en chlorures de l'échantillon et celle de l'eau la plus diluée.

II.2.5.1. Indice de saturation

Il est exprimé par le rapport de produit l'activité ionique (IAP) à la constante d'équilibre (Ks) à une température donnée. Cet indice montre les tendances des phases minérales à se dissoudre ou précipiter, et en ce sens ils permettent de suivre ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport aux minéraux présents ou ceux susceptibles de se précipiter dans l'aquifère. Si un minéral (D) dans le milieu se dissout de façon congruente pour produire (U+ + V-) alors l'indice de saturation (IS) peut s'écrire :

$$IS = \log \left[\frac{P}{K} \right]$$

où Ks (constante d'équilibre) est le produit de [U+] x [V-], et PAI le Produit d'Activité Ionique.

Si IS > 0 : l'eau est dite sursaturée à l'égard du minéral D qui a tendance à se précipiter,

Si IS < 0 : l'eau est sous-saturée vis-à-vis du minéral D,

Si IS = 0 : la solution est de ce fait saturée vis-à-vis du minéral D.

II.3. Logiciels utilisés

Dans cette étude, on a utilisé 4 logiciels pour la digitalisation des zones humides, et le calcul de leurs périmètres et surface.

II.3.1. ENVI 5.0

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 dé mixage 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.

En général, le logiciel dispose essentiellement de tous les outils nécessaires au traitement d'images dans différentes disciplines, et permet pour chacun d'implémenter sa propre stratégie d'analyse.

II.3.2. Arc Gis 10.1

Arc GIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées : ArcMapp, ArcCatalogue 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.

Arc Mapp représente l'application centrale dans Arc GIS 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.

II.3.3. Global Mapper

L'ergonomie, la capacité de traitement, et l'accessibilité (coût, disponibilité dans les services,...) du logiciel Global Mapper ont été comparées à celles d'autres logiciels disponibles sur le marché (tests comparatifs non exhaustifs). Ce logiciel s'avère être particulièrement adapté aux conditions D'utilisations attendues par les services pour leurs

missions en matière de prévention des risques littoraux et hydrauliques et de gestion du trait de côte.

La présente notice d'accompagnement s'articule autour de 6 cas d'usages de base, jugés les plus classiques, précédés de quelques recommandations pour une prise en main rapide du logiciel :

- ✓ Création d'un catalogue de MNT : Fonctions de base, chargement des référentiels, création D'espaces de travail pré-chargés.
- ✓ Manipulation 1 : Générer des courbes de niveau (plan topographique, lecture simplifiée du MNT, continuité d'un système de protection...)
- ✓ Manipulation 2 : Sélectionner les objets d'une couche situés sous une cote donnée (Évaluation des enjeux situés en zones basses vulnérables,...)
- ✓ Manipulation 3 : Déterminer le profil (en long et en travers) d'un ouvrage et sa volumétrie Sur une longueur donnée (points bas ou continuité d'un système de protection, vulnérabilité D'un cordon dunaire...)
- ✓ Manipulation 4 : Visualisation 3D du MNT (détermination des zones protégées, des Systèmes de protection,...)
- ✓ Manipulation 5 : Visualisation de variation altimétrique entre deux MNT (évolution D'estran, rehaussement d'ouvrage,...)
- ✓ Manipulation 6 : Visualiser une zone située sous un niveau de référence

II.3.4. Google Earth

Est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellites. Anciennement produit par Keyholeinc., alors d'accès payant, 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 3 dimensions des constructions, initialement réalisée à l'aide du logiciel Sketch Up, est maintenant créée automatiquement à l'aide d'algorithmes utilisant pour une part les prises de vue Street View et des données d'altitude.

II.3.5. Diagramme

À l'aide de ce logiciel, on peut réaliser par le diagramme de Piper, et Reverside pour tester le faciès chimique des eaux, leurs aptitudes à l'alimentation en eau potable, et à l'irrigation.

II.3.6. PhreeqC (Parkhurst and Appelo, 1990)

L'étude hydro-chimique a été effectuée par simulation à l'évaporation naturelle (température de l'échantillon), en utilisant le logiciel thermodynamique chimique, Phreeq-ci. Le calcul de l'indice de saturation ($IS = \log(Q) / \log(Kps)$) des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye-Hückel, en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de (-0,5 à +0,5).



3^{ème} Partie :

**Résultats et
discussion**

III. Résultats et discussion

Dans cette partie on illustre les différents résultats du travail de cette thèse avec une interprétation discussion de ces derniers, soit pour le travail de cartographie par l'outil télédétection avec l'interprétation des résultats de différents traitements multispectrales des images satellitaire, ainsi que la partie hydrochimie avec l'interprétation des résultats des analyses physicochimiques des eaux des zones d'études, et on termine avec un aperçu sur la géochimie afin d'avoir une idée sur le comportement géochimique de ces eaux vis-à-vis le milieu encaissant.

III.1. Répartition spatiotemporelle des surfaces d'eau

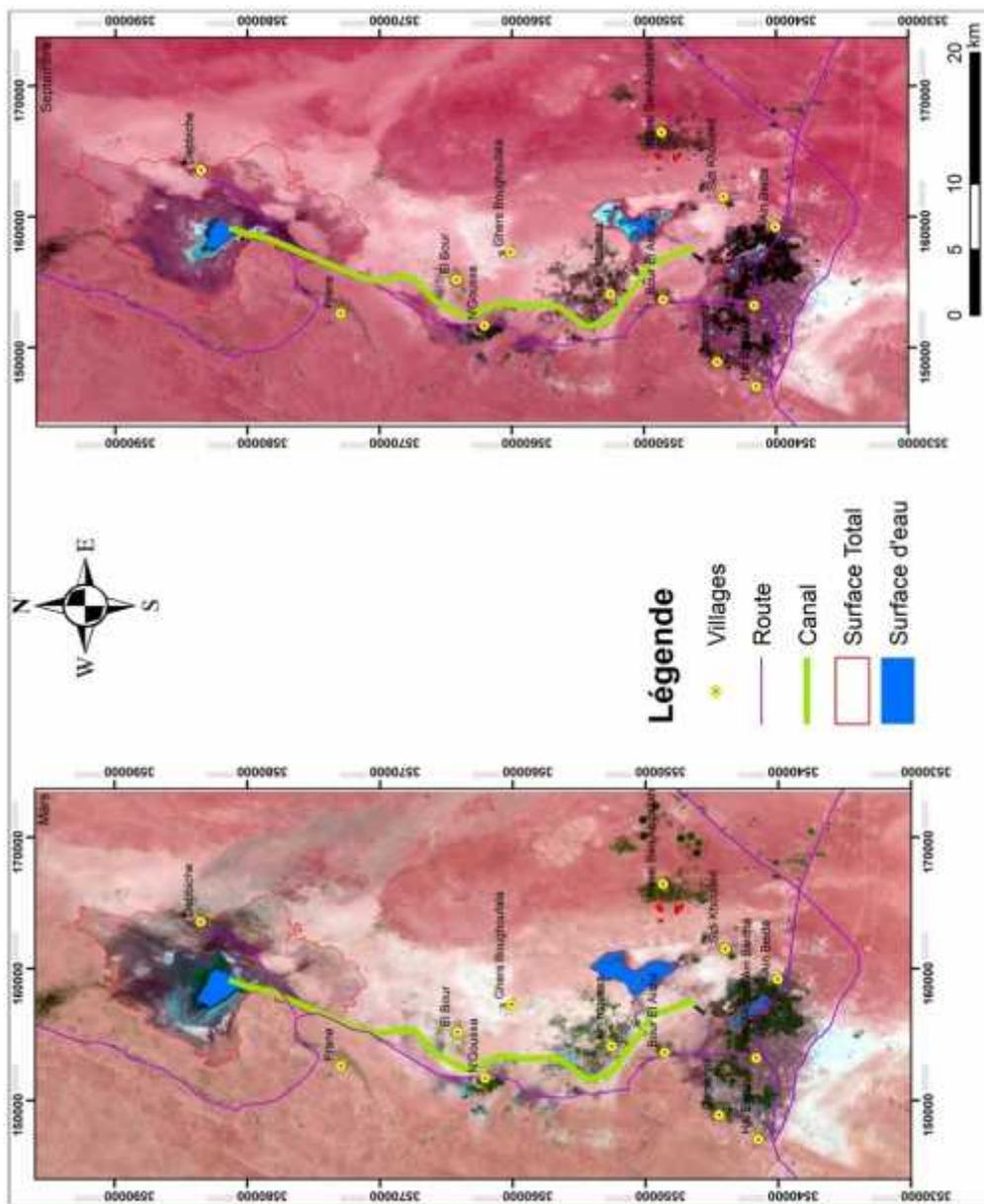


Figure 23. Carte des variations des surfaces d'eau de la cuvette d'Ouargla (mars-septembre 2014)

On va déterminer les variations et les changements des zones humides de notre région (bas Sahara algérien) et faire une comparaison des surfaces d'eau de ces zones entre le mois de mars (saison de printemps) et le mois de septembre (saison de l'automne) de même année 2014.

Si la distinction entre les deux périodes : basses et hautes eaux se fait à la base des précipitations et recharge dans les zones tempérées. Cette distinction est basée sur la variation de température dans les zones arides et sahariennes.

Notre zone d'étude renferme trois scènes :

- Cuvette d'Ouargla englobe les zones humides suivantes : (sebkha Oum Raneb, sebkha Safioune, chott Ain Beida, chott Baghdâd et les lacs hassi Ben Abdallâh).
- Oued Righ (sud et nord).
- Les chotts (Merouane et Melghir).

Ces zones sont des écosystèmes aquatiques au Sahara septentrional algérien, classés sur la liste de la convention de Ramsar des zones humides, d'importance internationale, remplissant plusieurs fonctions. : Ces milieux humides servent comme exutoires aux eaux de drainage des palmerais, d'écoulements de surface ou souterrain d'Oued M'ya ainsi qu'aux rejets d'eau usée. Ces actions anthropiques influent directement sur l'état quantitatif par l'évolution spatiotemporelle de ces surfaces d'eau.

III.1.1 Cuvette d'Ouargla :

III.1.1.1 Sebkha Oum Raneb :

Les surfaces d'eau ont été diminuées continuellement, depuis le printemps jusqu'à l'automne de 181.24ha au mois de mars à 135.06 ha au mois de Septembre avec une diminution de 25.49%.

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 hyperaride.

III.1.1.2 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 Nsa au nord et oued Mzab au sud-est.

Les surfaces d'eau ont été diminuées continuellement, depuis le printemps jusqu'à l'automne, de 561.42 ha au mois de mars et 280.20 ha au mois de Septembre, avec une diminution de 50.1 %.

III.1.1.3 Chott Ain Beida :

Les surfaces d'eau ont été diminuées, allant du printemps jusqu'à l'automne avec une valeur de 111.82 ha au mois de mars, et 11.87 ha au mois de Septembre, soit une diminution totale de 89.39 %

III.1.1.4. Les lacs Hassi Ben Abdallah :

D'une manière générale, les variations des surfaces d'eau sont semblables des autres zones humides de la cuvette d'Ouargla, autrement dit une diminution du printemps jusqu'au mois de Septembre. Malheureusement on n'arrive pas à quantifier cette diminution en raison de l'absence d'une image de haute résolution (Google Earth) dans datte de Septembre 2014.

Le tableau 6 récapitule l'évolution de différentes zones humides de la cuvette d'Ouargla

Tableau 6. Les caractéristiques générales des zones humides de cuvette d'Ouargla

Name	Surface totale (ha)	Surface d'eau mars (ha)	Surface d'eau septembre (ha)	Altitude (m)
Chott Ain Beida	442.64	11.88	118794.28	130
Sebkha Safioune	14505.42	561.43	280.20	110
Sebkha Oum Raneb	1086.00	881.25	135.06	128
Chott Hassi Ben Abdallah	38.87	9.81	/	140

Les résultats obtenus ont montrés Les facteurs qui ont influé sur cette région durant la période étudiée sont :

- Les facteurs climatiques sévères d'un bilan hydro-climatologique constamment déficitaire favorisent une évaporation intense menant à une diminution de son niveau statique et la formation des croutes et des efflorescences salifères en surface. Ainsi que les vents de sable qui assèchent et transportent les particules des sels et les grains de sables.
- L'alimentation de la nappe alluviale par l'écoulement des trois oueds conduisait à une remontée de son niveau statique augmentant ainsi le taux d'humidité et dissoudre les cristaux de sel. Et les eaux domestiques et de drainage.

III.1.2 Oued Righ nord et sud :

La région d'Oued Righ, est la partie la plus riche du Sahara en écosystèmes aquatiques, est une zone dépressionnaire, Située au sud du massif des Aurès, à la partie Nord du Sahara septentrional. Elle referme un nombre important des lacs répartis le long du canal d'Oued Righ.

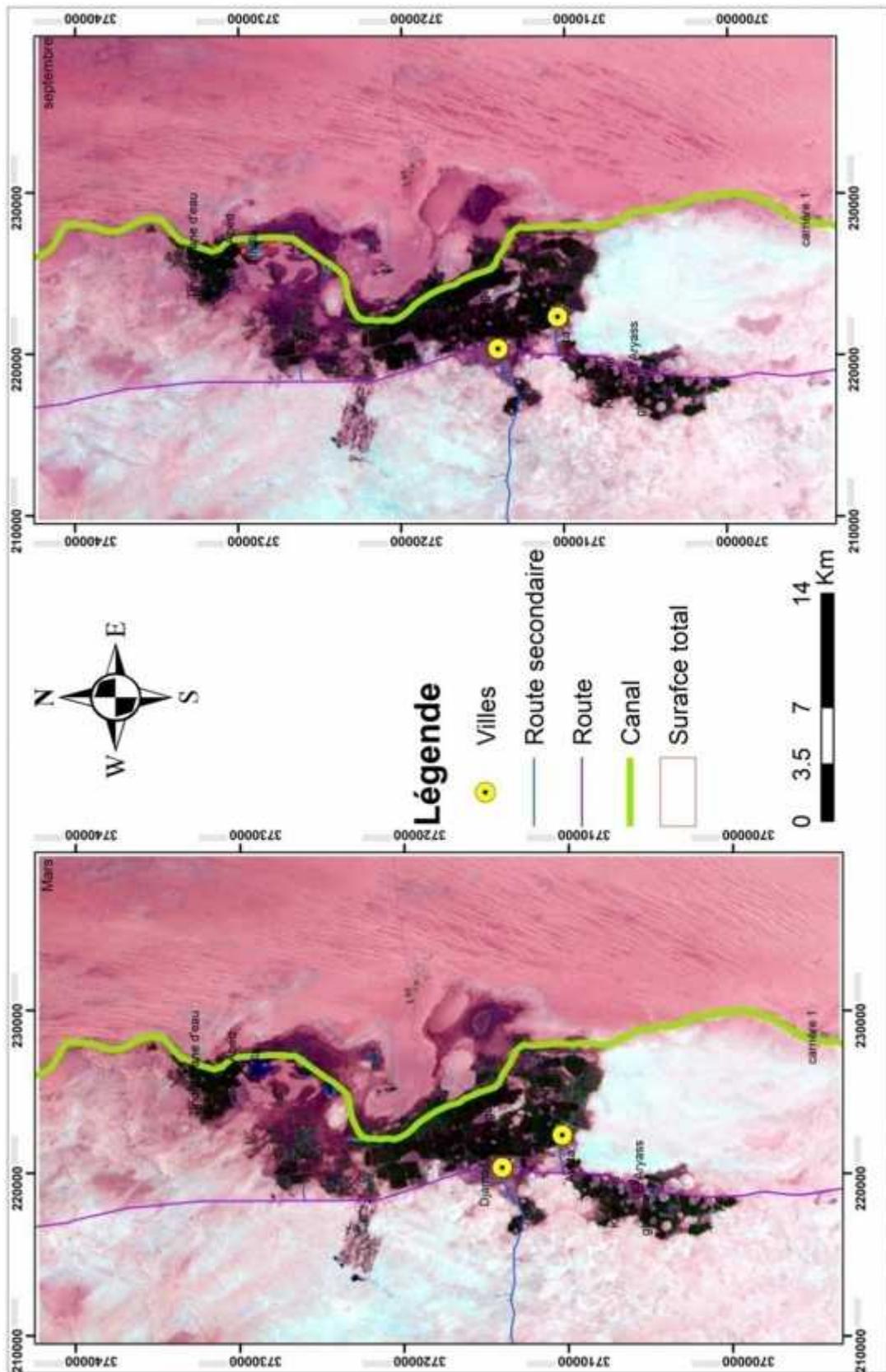


Figure 24. Carte des variations des surfaces d'eau d'oued Righ nord (Mars –Septembre 2014)

Et 34° Sud

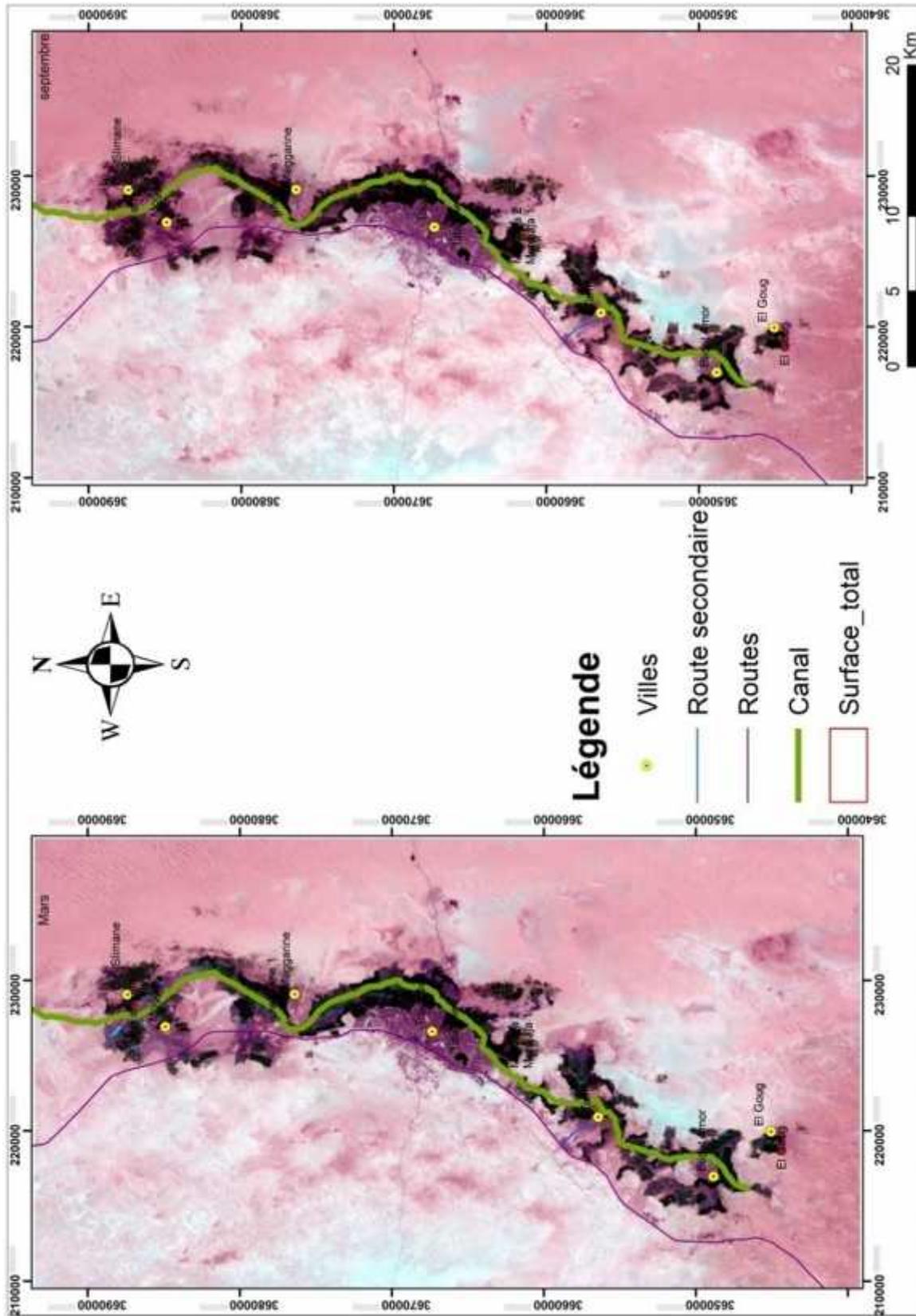


Figure 25. Carte des variations des surfaces d'eau d'oued Righ sud (Mars-Septembre)

Suite à leurs surfaces limitées on n'arrive pas à suivre les variations des surfaces d'eau de ces zones humides. Par contre un inventaire de différents lacs a été réalisé avec une caractérisation concernant la surface totale et l'altitude de chaque lac (table 7).

Tableau 7. Les caractéristiques générales des zones humides d'oued Righ

Name	surface totale (ha)	Altitude (m)
Megarine 2	1.02	60
Megarine 1	1.74	60
Tataoine	0.31	68
Sidi slimane2	1.40	54
El Goug	16.84	84
Merdjaja 1	2.46	70
Ghilane	0.15	52
Merdjaja 2	1.78	70
Ayata	17.57	40
Ain Zarga	0.17	38
Carriere 1	0.26	50
Carriere 2	0.11	50
Khanana	0.11	50
Tamarigh	0.05	48
El Aryass	0.18	48
Sidi El Abed	0.28	14
Tindla	212.75	12
Sidi slimane 1	0.25	54
Temacine	3.03	78

III.1.3 Les Chotts (Merouane et Melghir) :

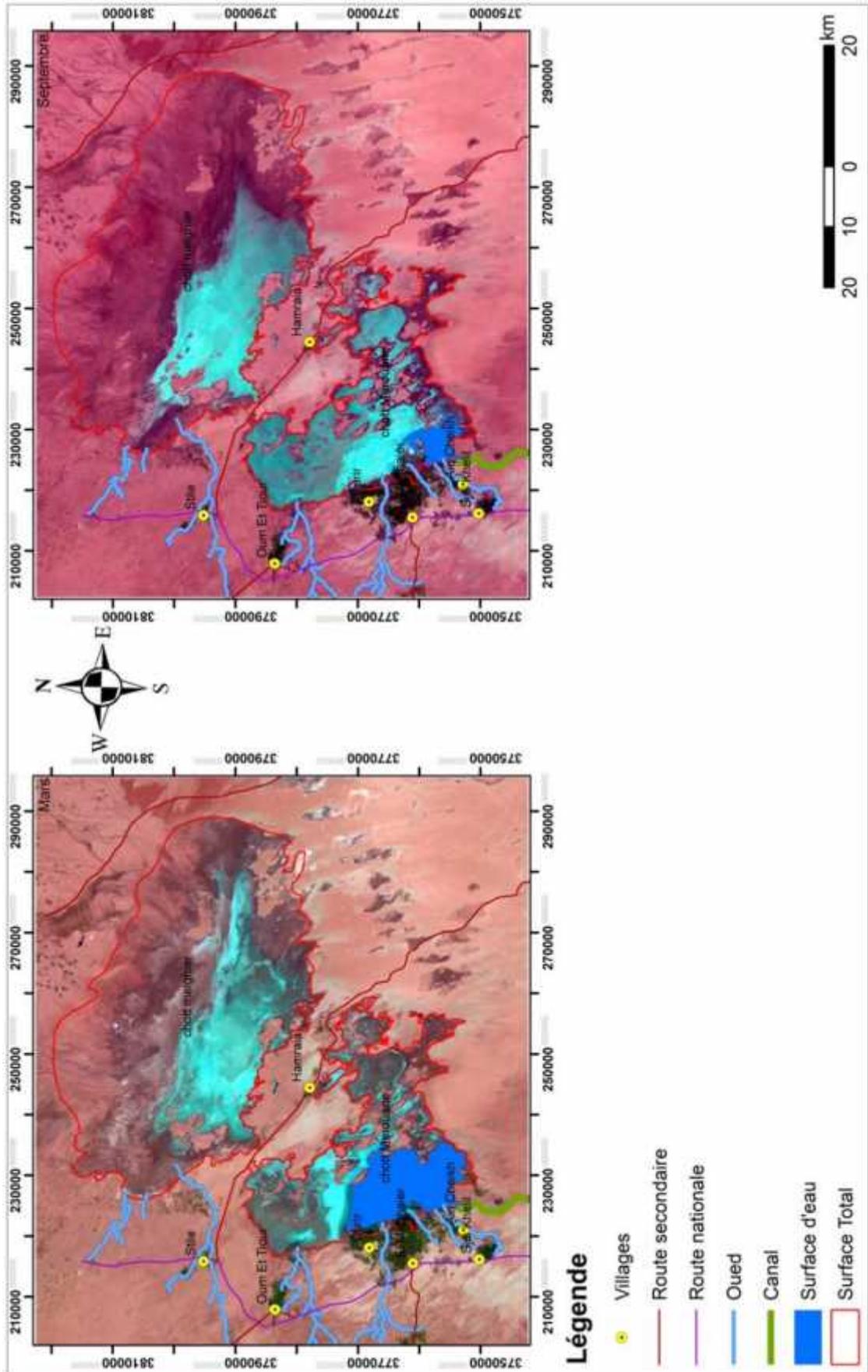


Figure 26. Carte des variations des surfaces d'eau des chotts (Mars-Septembre 2014)

III.1.3.1 Chott Merouane :

Chott Merouane est considérée comme la plus basse altitude du nord de l'Afrique (40m au-dessous du niveau de la mer). Ce chott est classé selon RAMSAR comme zone humide, d'importance internationale, avec une superficie de l'ordre de 74543.11ha. Les surfaces d'eau ont été diminuées continuellement, depuis le printemps jusqu'à l'automne de 16979.62ha en mois de mars et 3828.21ha en mois de Septembre avec une diminution de 77.46 %. Ces changements sont sous l'effet des facteurs climatiques. Le niveau d'eau change selon l'altitude (-25m).

Chott Merouane est alimenté par trois sources principales, celle du canal collecteur de l'Oued Righ appelé couramment Oued Kherouf, les eaux souterraines de la nappe CT et les eaux de pluie qui sont généralement négligeables (Hacini et al, 2006, 2009, 2010).

III.1.3.2 Chott Melghir :

Le Chott Melghir est l'un des plus grands lacs salés d'Algérie. Sa teneur en sel très élevée, situé au nord-est du Sahara septentrional. C'est une dépression qui atteint dans certains endroits 24 m au-dessous du niveau de la mer. Cependant dans cette étude on n'arrive pas à suivre les variations des surfaces d'eau dans les deux mois choisis (mars et septembre) puisque elles sont devenues presque totalement des sels.

Ce chott est alimenté en eau, principalement par les oueds Djeddi, Biskra, EL Arab et EL Abiod qui se caractérisent par des écoulements intermittents, les crues de ces oueds terminent leurs courses dans le Chott (Benkhaled et al., 2008). Les oueds qui fournissent des volumes d'eaux très conséquents proviennent selon Ballais (2010) de l'Atlas Saharien, depuis les Monts des Ksour à l'ouest par Oued Djeddi jusqu'aux Monts de Némemcha à l'est en alimentant l'oued El Arab. Ce sont essentiellement les Aurès qui alimentent les principaux cours d'eau, ces oueds sont fonctionnels.

Tableau 8. Les caractéristiques générales des zones humides des chotts

Name	Surface totale (ha)	Surface d'eau mars (ha)	Surface d'eau septembre (ha)	Altitude (m)
Chott Melghir	174557.03	/	/	-25
Chott Marouane	74543.11	16979.62	3828.22	-25

III.1.3.3 Chott Baghdad :

L'évolution de surface d'eau dans ce chott est apparue par une diminution allant du printemps jusqu'au l'automne, c'est le caractère de différentes zones humides étudiées. Dans cette période le chott a perdu une surface d'eau de l'ordre de 89.38ha

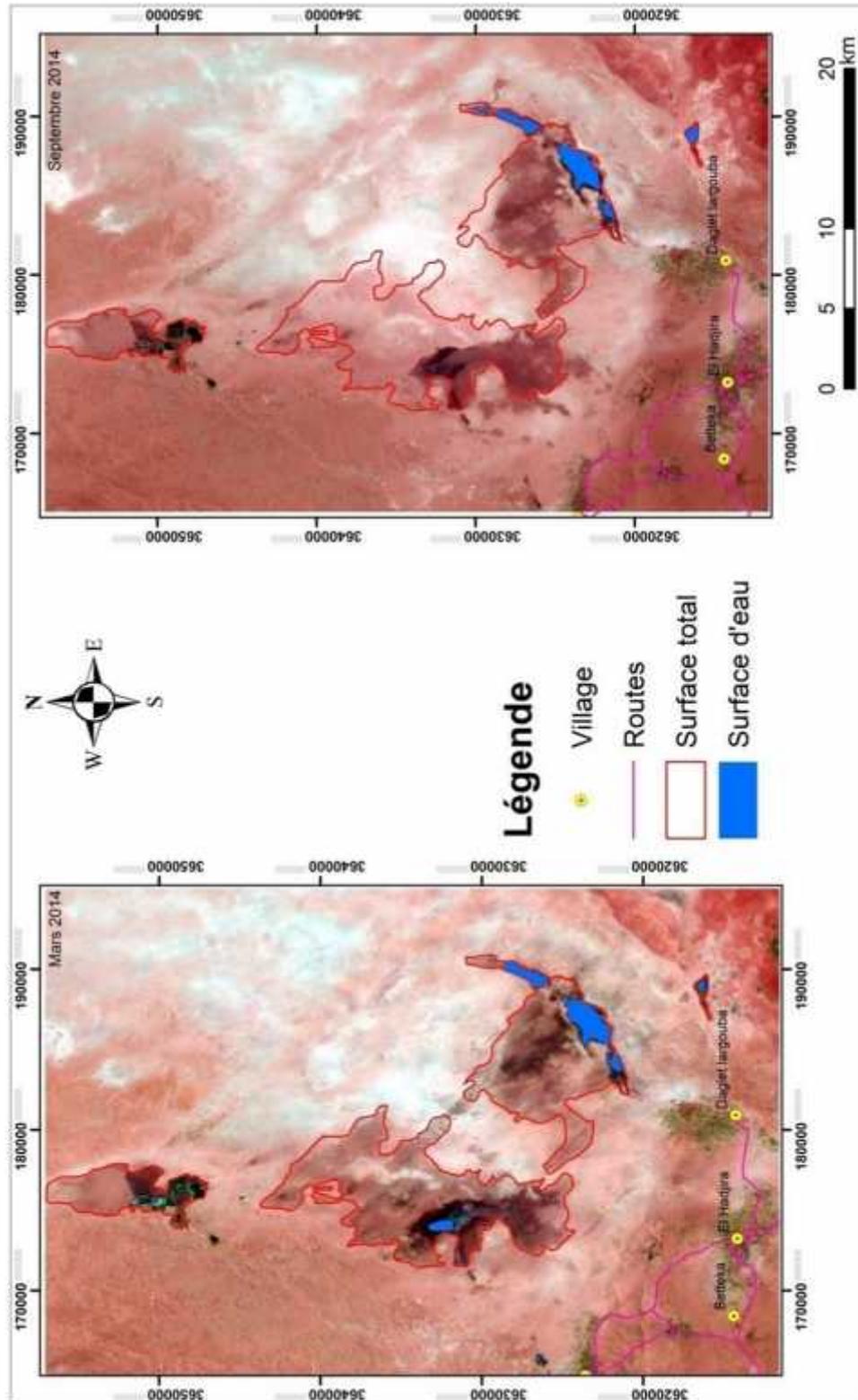


Figure 27. Carte des variations des surfaces d'eau de chott baghdad (Mars-Septembre 2014)

Ce résultat montre clairement l'influence des conditions climatiques sévères dans une telle région saharienne provoquant une évaporation intense et favorisent la précipitation des sels

Tableau 9. Les caractéristiques générales des zones humides de chott Baghdâd

Name	Surface Totale (ha)	Surface 'eau mars (ha)	Surface d'eau septembre (ha)	Altitude (m)
Chott Baghdâd	17285.58	744.89	655.51	100

Dans ce chapitre, nous avons en premier lieu déterminé les variations de surfaces d'eau des zones humides de notre région entre les deux saisons automne et printemps.

On remarque qui il y a une diminution de la surface d'eau dans toutes ces zones humides. Par l'évaporation intense des eaux de surface sous l'effet de la température et le vent.

Les résultats obtenus à partir de la comparaison entre les deux cartes de classification d'occupation de sol de chaque zone humide nous donnent une notion sur l'évolution spatiotemporelle entre les saisons dans la région complète. Donc on peut conclure que :

- Les conditions climatiques ont une influence importante sur les changements des zones humides durant l'année.
- Les facteurs anthropiques n'influent que sur des sites bien déterminés. Cet effet local est lié aux différents endroits des sources d'alimentation de la nappe superficielle et leurs débits. Mais cette influence anthropique reste toujours liée aux conditions climatiques et aux conditions de terrain (topographie et lithologie).

III.2. Evolution spatiotemporelle interannuelle des zones humides de la cuvette d'Ouargla

III.2.1. Répartition globale des surfaces humides

Les classifications validées par la matrice de confusion obtiennent une précision globale pour les années 1987, 2000 et 2009 de 86,83%, 92,84% et 88,23% respectivement. Le coefficient kappa est de 0,7028, 0,8311 et 0.8164 respectivement.

La figure 28 illustre les surfaces occupées par chaque classe humide dans les trois dates, où on a :

- La classe : « eau » représente la plus faible surface des zones humides de 790 ha soit 0,35% de la surface totale en 1987, avec une augmentation dans le temps à 949 ha soit 0.42% en 2000 et à 1424 ha soit 0.63% en 2009.

- La classe « végétation » de 3515 ha représente 1.55% de la surface totale en 1987, avec une augmentation dans le temps à 5709 ha en 2000 et à 7194 ha en 2009 soit respectivement 2.52% et 3.18% de la totalité du terrain.
- La classe « sol salé sec » occupe une grande partie de la zone avec 34207 ha (15.12%) en 1987. Elle diminue dans le temps à 33241 ha (14.69%) en 2000 et à 19744 ha (8.73%) en 2009.
- La classe des sols humides montre une évolution inverse que celle du sol salé humide à cause du phénomène « dissolution précipitation » des cristaux de sel (Berné, 1978).

Sur une surface totale de 226270 ha, la zone humide occupe 54920 ha en 1987, 61235 ha (2000) et 50427 ha (2009), et représente en ordre 24,27%, 27,06% et 22,29%, le reste est sable.

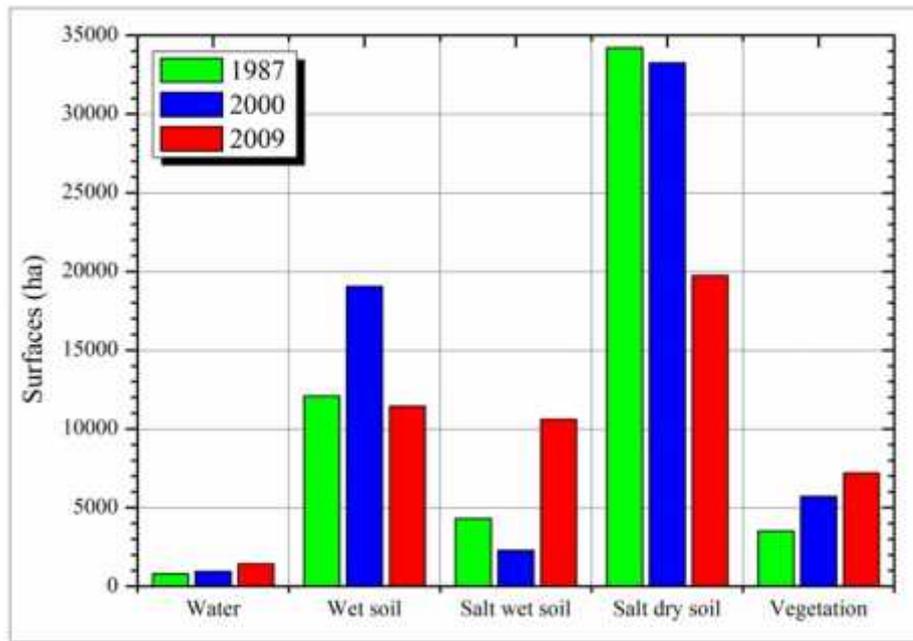


Figure 28. Répartition surfacique des classes humides dans la cuvette d'Ouargla

III.2.2. Etude de changement

Le calcul des matrices des changements a donné une estimation quantitative des surfaces des classes inchangées entre deux et trois dates d'une part, et celles qui ont changé par une augmentation ou une diminution d'autre part.

III.2.2.1. Le taux de changement

D'une manière générale, peu de changement sont affecté la surface de chaque classe. La stabilité apparait comme un caractère majeur à l'exception de deux classes qui ont un taux de changement élevé :

- « sol humide » entre 2000-2009 (Figure 29).
- « sol salé humide » entre 1987-2000-2009 (Figure 30).

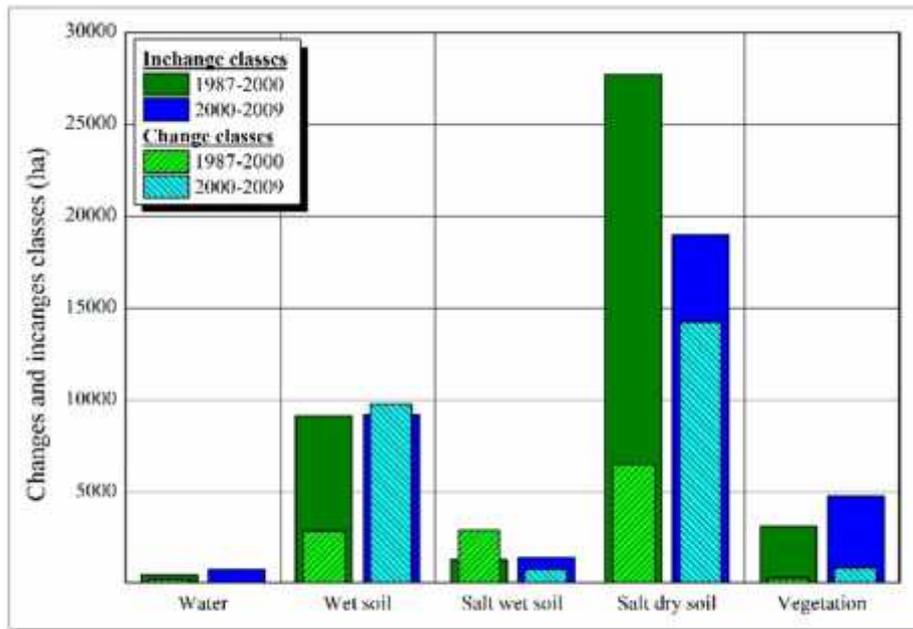


Figure 29. La quantification des classes humides changées et inchangées

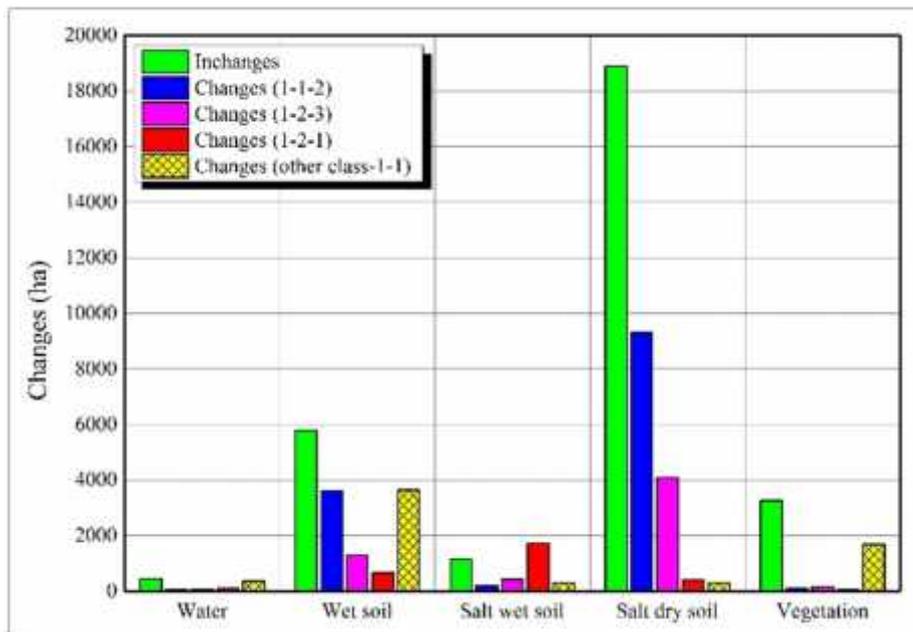


Figure 30. Les changements superficiels des zones humides entre les trois années

III.2.2.2. Les changements de type “from-to”

L'évolution des zones humides, entre les années initiales et les années finales (Figure 31), montre :

- ✓ Une augmentation de la classe « eau » égale à 21,58% par rapport à sa surface initiale entre 1987-2000 puis de 47,56% entre 2000-2009. Cet apport est lié aux quantités d'eau usées et de drainage rejetés dans les chotts qui jouent le rôle d'un exutoire naturel.
- ✓ La classe « végétation » augmente de 61,98% de sa surface initiale, puis de 28,15%. La forte augmentation entre 1987 et 2000 est liée à la création de nouvelles exploitations agricoles et le développement des surfaces irriguées existantes.
- ✓ Une diminution de surface dans la classe « sol salé sec » de 4,08% et de 39,79% due à une augmentation de l'humidité du sol provoquant la dissolution des cristaux de sel.
- ✓ Le changement entre la classe « sol humide » et « sol salé humide » se fait généralement entre elles. L'enrichissement de surface augmentation d'une classe est accompagnée par la diminution dans l'autre classe et vice versa. L'enrichissement de 58,42% dans la surface « sol humide » entre 1987 et 2000 est poursuivi par la diminution de 46,39% dans la classe « sol salé humide ». Par contre entre 2000 et 2009, 40% de surface « sol humide » est remplacé par l'autre classe.

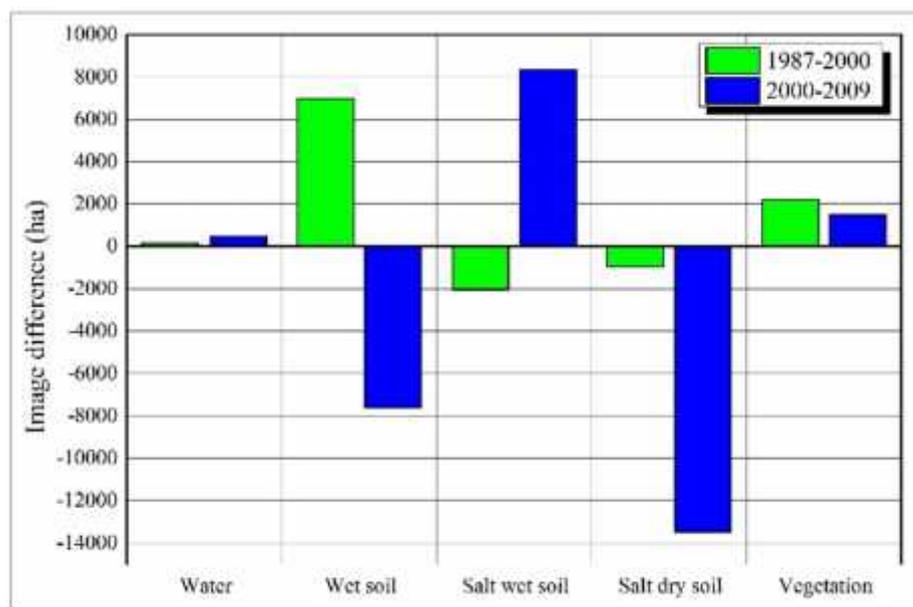


Figure 31. Les changements des zones humides entre les années initiales et finales

III.2.2.3. Répartition des changements dans la zone

Après cette quantification des changements de surfaces dans chaque classe, il est préférable d'avoir une idée sur la répartition de ces changements sur terrain afin de bien localiser les endroits affectés, surtout les surfaces d'eau et donner mieux d'explication pour chaque cas.

La figure 32 montre la dynamique des échanges de surface entre les différentes classes et surtout au niveau des trois zones dépressionnaires (chott « Ain Baida », sebkha « Oum Raneb » et sebkha « Safioune ») on peut déduire :

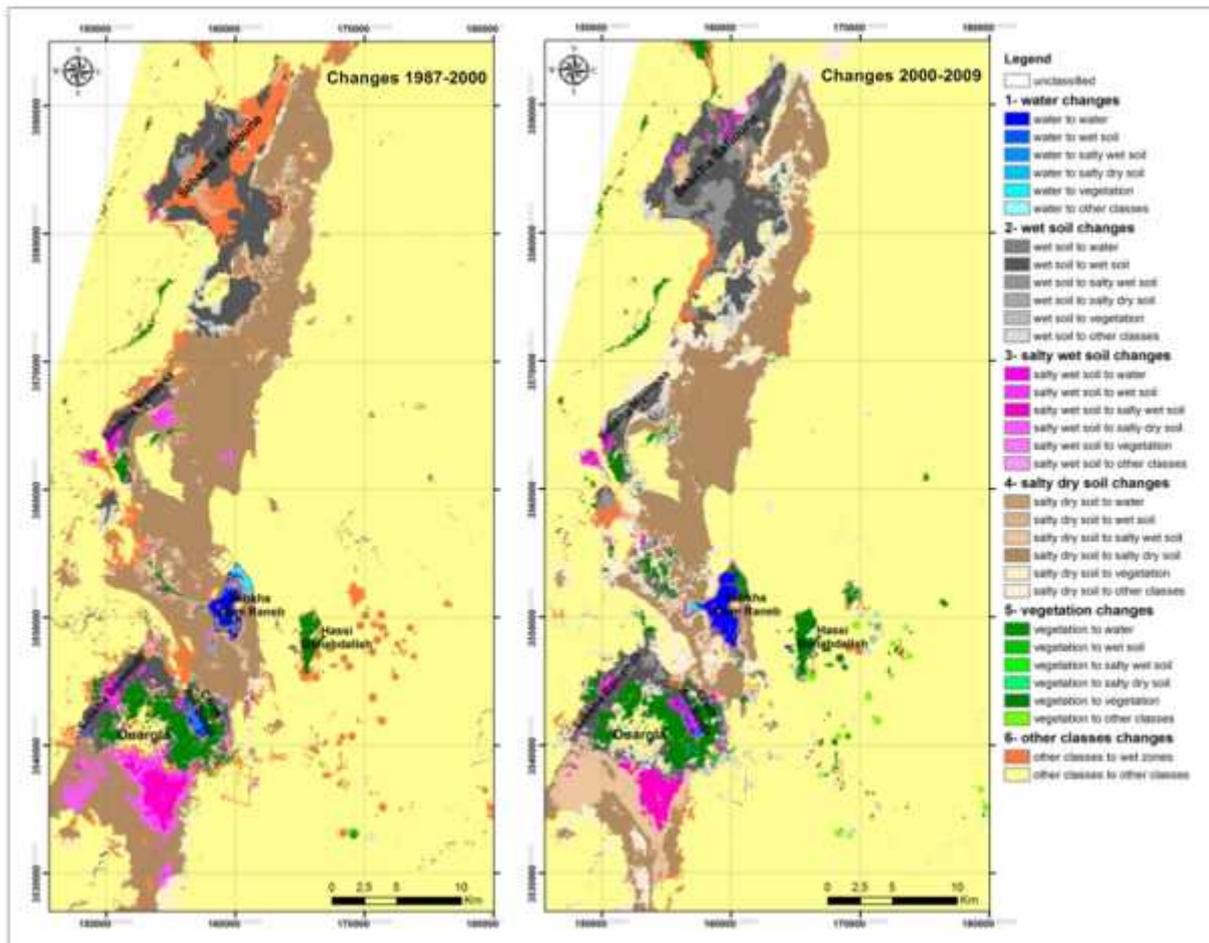


Figure 32. Les changements des zones humides (from 1987 to 2000) et (from 2000 to 2009)

- Le gain de surface d'eau dans la sebkha « Oum Raneb » est plus grand par rapport à la perte remarquée dans le chott « Ain Baidha ». parce qu'elle représente le récepteur direct du réseau de drainages de la ville d'Ouargla. Par ailleurs, la sebkha « Safioune » se présente comme des surfaces humides, bien que cette zone représente la plus basse et vaste dépression dans la région avec une convergence de trois oueds (Mya, Mezab et Nsa), la classe « eau » reste toujours inexistante durant cette période étant donné les conditions climatiques fortement déficitaires (Djidel, 2013), la surface de la végétation et la surface de sol salé ont été augmentés. Par contre, la surface des sables, du sol humide et du sol salé humide ont été diminués.
- L'apparition de nouvelles exploitations agricoles au niveau de Hassi Ben Abdallah proche de la sebkha Oum Raneb ce qui participe à l'alimentation de cette dernière par l'excès d'eau d'irrigation.
- A l'exclusion des sables les surfaces humides et salines occupent la majorité du terrain.

III.2.2.4. Les changements de type “from-to-to”

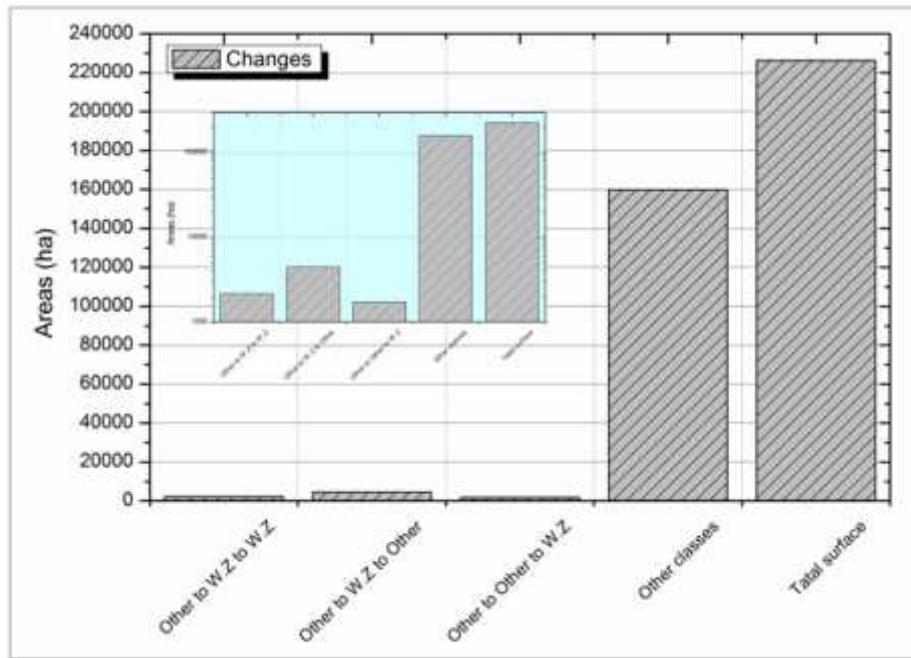


Figure 33. Evolution des changements des sables dans les trois ans

Les changements entre trois dates “from-to-to” avec 1, 2, 3 représentent les états de surfaces liés aux 3 dates successives, ont montré quatre types de changement :

- type « 1-1-3 » : montre un changement seulement dans la troisième date.
- type « 1-2-2 » : montre un changement seulement dans la deuxième date.
- type « 1-2-3 » : montre un changement continu dans les trois dates.
- type « 1-2-1 » : montre un retour à l’état initial d’un changement.

La classe sable (other) change peu, toute fois on observe une légère fluctuation (Figure 33) :

- ✓ 0.95 % vers des zones humides.
- ✓ 1.96 % vers des zones humides puis un retour vers les sables.
- ✓ 0.76 % vers des zones humides qu’en troisième année.

L’évolution spatio-temporelle des états de surfaces humides entre trois années (Figure 34) montre :

- Une surface de 29539 ha restée stable : elle englobe la classe « eau » au niveau de la sebkha « Oum Raneb » avec de petites surfaces du chott « Ain Baidha ». La végétation occupe les oasis aux alentours des agglomérations. Les sols humides occupent les dépressions où le niveau statique de la nappe est proche de la surface du sol (<50 cm). Les sols salés humides occupent les alentours des surfaces d’eau par évaporation de l’eau et précipitation du sel. Les sols salés secs occupent les dépressions où le niveau statique est

supérieur à 50 cm de la surface du sol avec la formation d'une couche blanchâtre de cristaux de sel en surface.

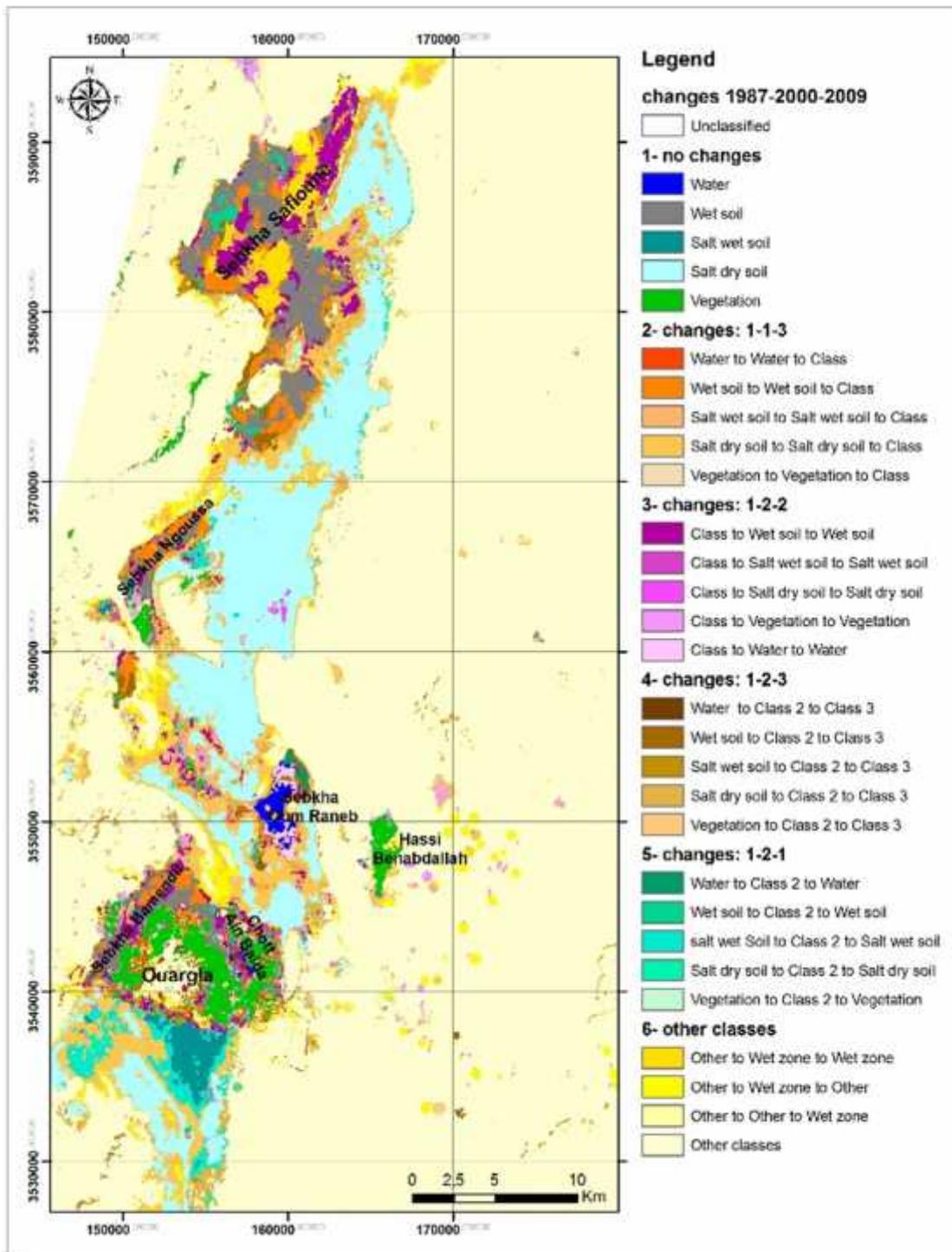


Figure 34. Les changements des zones humides (from 1987 to 2000 to 2009)

- 13300 ha des changements type « 1-1-3 » : ils sont répartis au niveau des dépressions humides d'oued Mya.
- 6317 ha des changements type « 1-2-2 » : ils occupent surtout les sebkhhas et les extensions agricoles.

- 6009 ha des changements type « 1-2-3 » : ils se présentent dans les limites des dépressions humides d'oued Mya.
- 2958 ha des changements type « 1-2-1 » : ils occupent généralement les sols salés en raison de leur sensibilité envers la présence d'eau.

168146 ha des changements entre les surfaces minérales sèches.

III.3. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebket Oum Raneb et chott Ain el baida

III.3.1 Classification supervisée

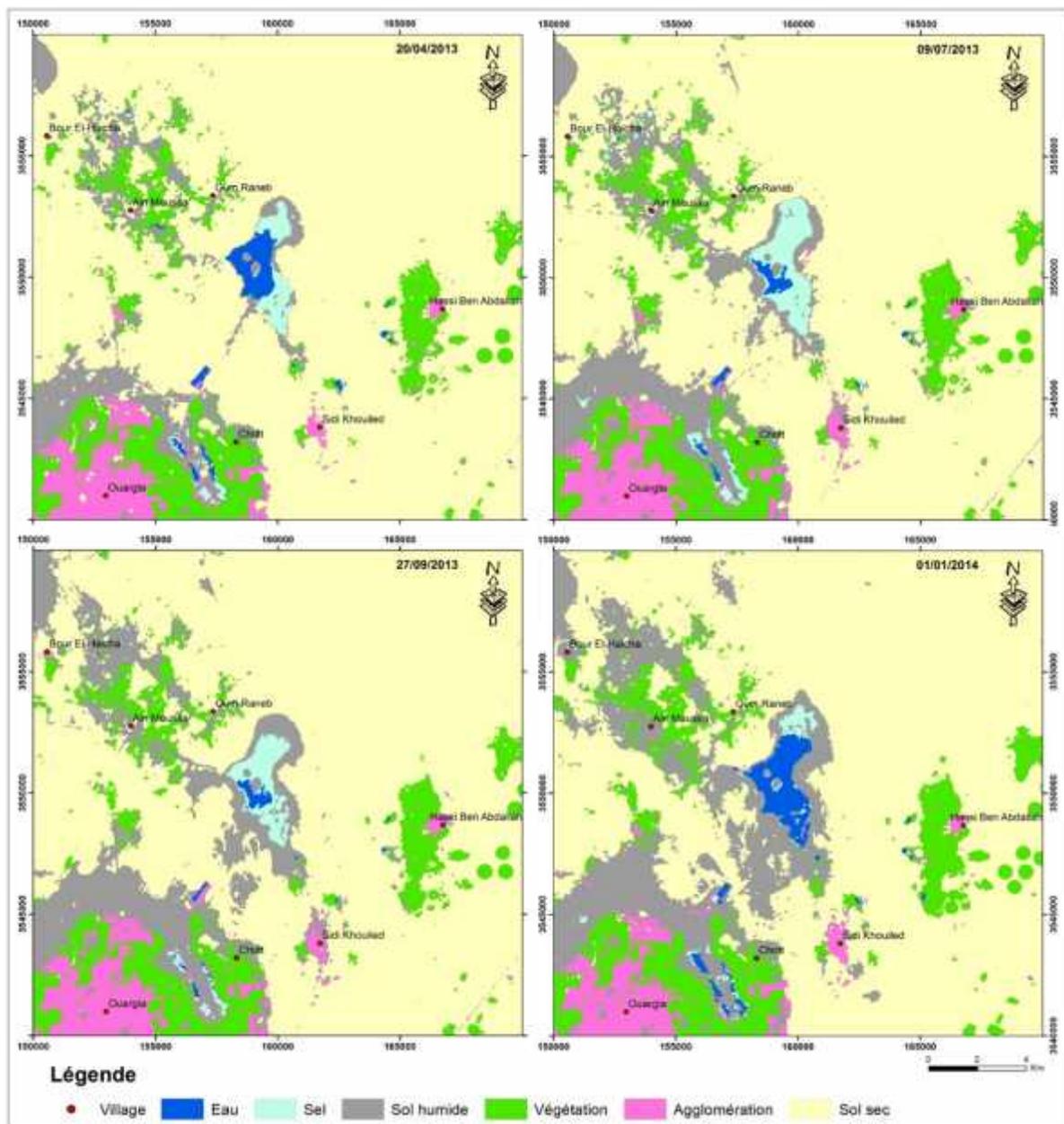


Figure 35. Classification par SVM des 4 dates

Après la détermination des 6 classes selon la thématique de notre travail et à l'aide de la reconnaissance des échantillons sur terrain, on arrive à effectuer la phase d'apprentissage par positionnement des différents échantillons (ROI) sur l'image.

III.3.2 Classification supervisée par Support Vector Machine « SVM »

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 suivant : on a utilisé les matrices de confusion durant l'année 2013.

Tableau 10. Validation des classifications supervisées

Date	20/04/2013	09/07/2013	27/09/2013	01/01/2014
Précision globale	77,42%	89,76%	88,57%	98,66%
Coefficient Kappa	0,6678	0,8534	0,8339	0,9702

D'après le tableau on constate :

- La précision globale est bonne (rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total des pixels)
- Une excellente correspondance entre la cartographie et les observations de terrain (Coefficient Kappa).

III.3.3 Evolution temporelle des états de surface (Change détection)

Afin d'étudier l'évolution entre les quatre dates (4 saisons) on a utilisé les trois intervalles avril-juillet, Juillet-Septembre et Septembre-Janvier. Puis l'intervalle de changement entre quatre saisons (avril-juillet-Septembre-Janvier) permet la comparaison entre les trois couples de changement précédent.

III.3.3.1 Les matrices de changement

Cette étude statistique a donné une estimation des surfaces inchangées entre les quatre saisons (tableau 11). Cette étape indique un taux de stabilité global qui dépasse 90% entre les saisons.

Tableau 11. La stabilité des classes dans les trois couples de changement

Surface (ha)	Eau	Sel	Sol humide	Végétation	Agglomération	Sol sec
Avril-Juillet	159,30	398,79	2676,51	3644,19	1553,22	29086,02
Juillet-Septembre	110,61	498,42	3880,71	3736,26	1590,12	28212,21
Septembre-Janvier	111,69	23,04	4454,10	3880,17	1508,85	26367,93

III.3.3.2 Les changements entre 20/04/2013 et 09/07/2013

Les différents changements d'occupation de sol sont quantifiés 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. Si on prend par exemple la matrice de changement mentionnée dans le tableau 12. La colonne d'eau occupe une surface totale au mois d'Avril de 426,69 ha (class total) où 159,30 ha sont restés d'eau, 256,77 ha devenus des sels, ainsi que les autres évolutions. Cependant chaque ligne montre l'état final de chaque classe. La ligne d'eau par exemple montre que sa surface au mois de Juillet est 166,50 ha.

Tableau 12. Matrice des changements entre Avril et Juillet 2013

Area (Ha)	Eau	Sel	Sol humide	Végétation	Agglomération	Sol sec	Class Total
Eau	159,30	2,07	1,44	0,27	1,89	1,53	166,50
Sel	256,77	398,79	133,29	8,01	18,54	18,54	833,94
Sol humide	4,68	16,20	2676,51	100,71	104,76	1354,5	4257,36
Végétation	3,42	0,18	149,67	3644,19	19,98	205,47	4022,91
Agglomération	2,52	0,00	21,69	45,90	1553,22	61,02	1684,35
Sol sec	0,00	0,09	161,64	63,63	4,05	29086,02	29315,43
Class Total	426,69	417,33	3144,24	3862,71	1702,44	30727,08	
Class Changes	267,39	18,54	467,73	218,52	149,22	1641,06	
Image Difference	-260,19	416,61	1113,12	160,20	-18,09	-1411,65	

Le tableau 12 fait ressortir une nette évolution temporelle des surfaces d'eau au cours de l'année 2013, avec notamment une progression du « sol humide », du « sel » et de la « végétation » au détriment des eaux et du sol sec.

✓ **Les surfaces d'eau inchangées :**

Les plans d'eau n'ont que 159 ha de la surface initiale inchangée entre avril et juillet avec un taux de stabilité de 37%. Ce changement important est lié aux effets climatiques et leurs écarts entre le printemps et l'été.

✓ **Les changements d'eau :**

Le changement des surfaces d'eau montre une perte de 267 ha soit 63%, soit une chute de deux tiers de leur état initial. Cette perte d'eau entre le printemps et l'hiver est presque complètement précipitée en sel après son évaporation.

✓ **Les autres classes :**

Les autres classes qui sont le sel, le sol humide, la végétation, l'agglomération et le sol sec occupent des surfaces inchangées de 37358 ha avec un taux de stabilité très important (94%). Ces surfaces montrent des changements relatifs entre eux. Elles montrent seulement un taux de changement de 6% mais dans ce cas-là on ne peut pas le négliger car seule la surface changée de 2488 ha représente six fois la surface totale de l'eau.

III.3.3.3 Les changements entre 09/07/2013 et 27/09/2013

Le tableau 13 résume l'évolution temporelle des surfaces d'eau entre le mois de juillet et le mois de septembre 2013. Elle présente une diminution de l'eau, du sel et du sol sec, au profit des sols humides.

Tableau 13. Matrice des changements entre Juillet et Septembre 2013

Area (Ha)	Eau	Sel	Sol humide	Végétation	Agglomération	Sol sec	Class Total
Eau	110,61	5,85	0,00	0,27	0,00	0,00	116,73
Sel	32,13	498,42	0,00	0,45	0,00	0,00	531,00
Sol humide	8,73	315,72	3880,71	146,43	61,02	964,53	5377,14
Végétation	0,90	0,81	103,68	3736,26	21,24	134,82	3997,71
Agglomération	13,86	10,62	63,99	45,99	1590,12	3,87	1728,45
Sol sec	0,27	2,52	208,98	93,51	11,97	28212,21	28529,46
Class Total	166,50	833,94	4257,36	4022,91	1684,35	29315,43	
Class Changes	55,89	335,52	376,65	286,65	94,23	1103,22	
Image Difference	-49,77	-302,94	1119,78	-25,20	44,10	-785,97	

✓ **Les surfaces d'eau inchangées :**

Les plans d'eau présentent 110 ha de la surface inchangée entre juillet et septembre, indiquant une stabilité de 66%. Ces deux tiers d'équilibre des surfaces d'eau sont dues aux conditions climatiques presque les mêmes avec de faibles écarts.

✓ **Les changements d'eau :**

Le changement est de 56 ha, cela représente une perte de 34% des surfaces d'eau. Donc une chute d'un tiers de son état au mois de juillet. Cette perte d'eau est toujours transformée en sel après son évaporation.

✓ **Les autres classes :**

Elles occupent toujours des surfaces inchangées importantes de 37917 ha ce qui indique 95% de stabilité. Elles montrent seulement un taux de changement de 5% mais et une surface changée de 2190,15 ha. Ces changements ne montrent pas une variation que celle du premier couple de changement.

III.3.3.4 Les changements entre 27/09/2013 et 01/01/2014

L'évolution temporelle des surfaces d'eau entre le mois de septembre 2013 et le mois de janvier 2014 (tableau 14) présente une augmentation de l'eau, des sols humides et de la végétation au détriment du sel et du sol sec.

Tableau 14. Matrice des changements entre Septembre 2013 et Janvier 2014

Area (Ha)	Eau	Sel	Sol humide	Végétation	Agglomération	Sol sec	Class Total
Eau	111,69	494,37	62,91	7,20	16,92	0,63	693,72
Sel	4,86	23,04	160,11	0,18	2,61	28,71	219,51
Sol humide	0,09	13,50	4454,10	46,62	74,88	1775,34	6364,53

Végétation	0,00	0,00	188,01	3880,17	103,41	352,53	4524,12
Agglomération	0,00	0,00	141,03	8,82	1508,85	4,32	1663,02
Sol sec	0,09	0,09	370,98	54,72	21,78	26367,93	26815,59
Class Total	116,73	531,00	5377,14	3997,71	1728,45	28529,46	
Class Changes	5,04	507,96	923,04	117,54	219,60	2161,53	
Image Difference	576,99	-311,49	987,39	526,41	-65,43	-1713,87	

✓ **Les surfaces d'eau inchangées :**

Les surfaces d'eau ont 111 ha de la surface inchangée entre septembre et janvier, ce qui indique une stabilité de 16%. Cette faible stabilité est le résultat des variations des conditions climatiques entre septembre et janvier dans un milieu saharien.

✓ **Les changements d'eau :**

Les plans d'eau changent de 582 ha de la surface totale des eaux. Ce changement représente un gain d'eau de 84%. Ce qui indique une augmentation des surfaces d'eau à la place des sels par dissolution.

✓ **Les autres classes :**

Elles occupent des surfaces inchangées importantes de 36234 ha ce qui indique 92% de stabilité. Elles montrent un taux de changement de 8% mais et une surface changée de 3347 ha. Ces changements montrent quand même une variation entre eux et avec une diminution de ses surfaces au profit de l'eau.

III.3.3.5 Le résultat final des évolutions temporelles durant les 4 saisons

Tableau 15. Synthèse d'évolution de surfaces au cours de l'année 2013

Area (Ha)	Avril-Juillet	Juillet -Septembre	Septembre -Janvier
Eau inchangée	159,30	110,61	111,69
Perte d'eau	267,39	55,89	5,04
Gain d'eau	7,20	6,12	582,03
Différence image	-260,19	-49,77	576,99
Classe changée	267,39	55,89	5,04

L'évolution temporelle de l'eau durant l'année 2013 dans la région de la sebkha « Oum Raneb » (tableau 15) montre une stabilité d'une surface de 105 ha, et traduit une pérennité de cette surface durant toute l'année. Le changement affectant ces surfaces d'eau depuis avril jusqu'à septembre a montré une perte de 323 ha sous l'influence des facteurs climatiques hyperarides sévères surtout pendant cette période estivale trop sèche. En allant du mois de septembre vers le mois de janvier où les conditions climatiques changent par une diminution

de la température et de l'évaporation et une augmentation de l'humidité. On remarque un gain d'eau d'une surface de 582 ha.

III.3.4 La cartographie des changements

III.3.4.1 L'évolution temporelle durant l'année 2013

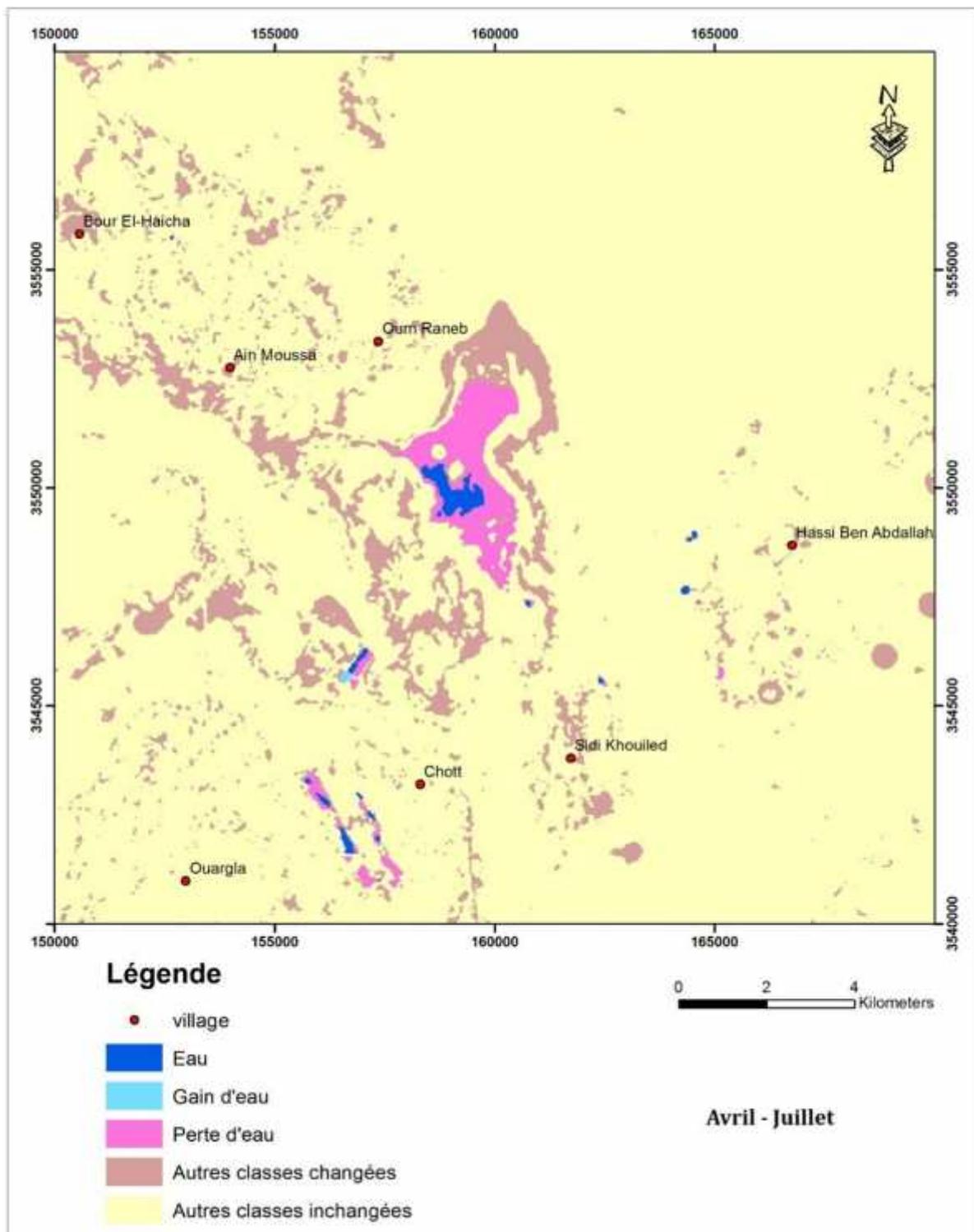


Figure 36. Evolution des états de surfaces entre Avril et Juillet 2013

La présentation de 3 cartes fait ressortir visuellement une nette évolution de surfaces d'eau dans l'année 2013 en trois couples de changements (avril-juillet) (juillet-septembre) et (septembre-janvier) dans la zone d'Oum Raneb. A l'aide du logiciel ArcGis 10.1 on a réalisé les cartes d'évolution après extraction des différentes classes issues d'ENVI sous forme vecteurs (Shape).

III.3.4.2 Evolution temporelle entre 20/04/2013 et 09/07/2013

- Les surfaces d'eau inchangées

La surface d'eau stable entre le printemps et l'été (Figure 36) montre la plus grande surface au niveau de la sebkha « Oum Raneb » de 77 ha, puis à chott « Ain Baida » de 20 ha, aux petits lacs de Hassi Benabdallah de 9 ha et enfin 7 ha au niveau de la station d'épuration (STEP). Ces eaux sont essentiellement issues d'irrigation, du réseau de drainage et des eaux usées.

- La perte d'eau

L'évaporation des eaux de surface par l'effet de la température estivale présente une perte d'une surface de 497 ha au niveau de la sebkha « Oum Raneb », puis de 62 ha à chott « Ain Baida », de 14 ha à la STEP et 10 ha aux petits lacs de Hassi Benabdallah.

- Le gain d'eau :

La période estivale n'a montré aucune augmentation des surfaces d'eau dans la zone d'étude à part un apport d'eau usée au niveau des bassins de la STEP (5 ha) pour l'épuration.

III.3.4.3 L'évolution temporelle entre 09/07/2013 et 27/09/2013

- Les surfaces d'eau inchangées

Les surfaces d'eau qui n'ont pas été changés entre le l'été et l'automne (Figure 37) occupent 76 ha au niveau de la sebkha « Oum Raneb », 18 ha à chott « Ain Baida », 12 ha au niveau de la station d'épuration (STEP) et enfin 8 ha aux petits lacs de Hassi Benabdallah. Ce qui indique un équilibre entre les deux couples de changement entre les conditions climatiques et les apports anthropiques.

- La perte d'eau

L'évaporation des eaux de surface continue encore mais faible par rapport à la précédente par l'effet de la température conduit à une perte de surface de 20 ha à la sebkha « Oum Raneb », de 13 ha à chott « Ain Baida », de 9 ha à la STEP et 4 ha aux petits lacs de Hassi Benabdallah.

- Le gain d'eau :

Cette période n'a montré aucune augmentation des surfaces d'eau dans la zone d'étude. Ce qui explique même les apports anthropiques ont un seuil spatial géré par les conditions climatiques et le débit.

III.3.4.4 L'évolution temporelle entre 27/09/2013 et 01/01/2014

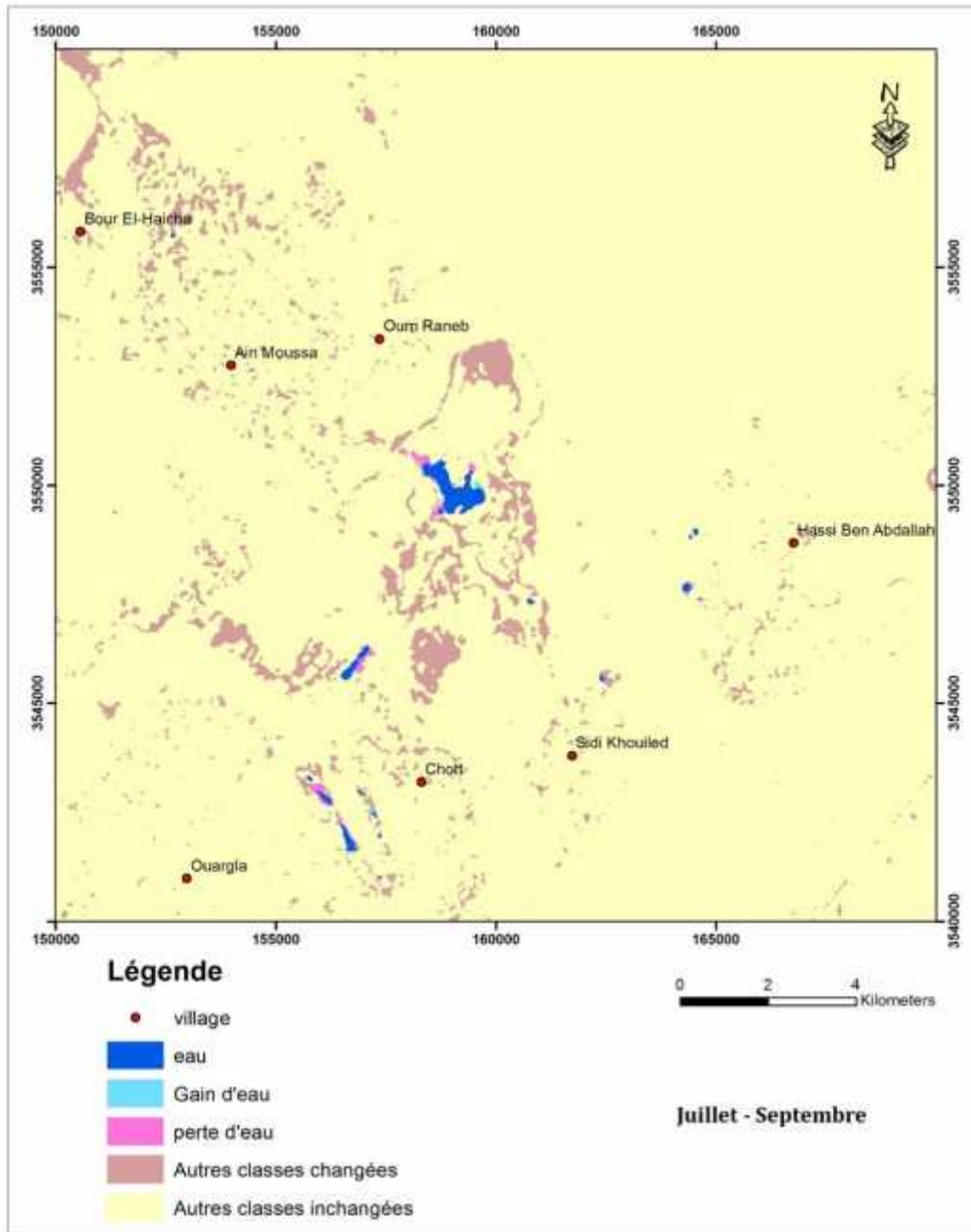


Figure 37. Evolution des états de surfaces entre Juillet et Septembre 2013

- Les surfaces d'eau inchangées

La surface d'eau stable entre le printemps et l'été (Figure 38) montre toujours une surface de 77 ha au niveau de la sebkha « Oum Raneb », puis à chott « Ain Baida » de 20 ha, aux petits

lacs de Hassi Benabdallah de 9 ha et enfin 7 ha au niveau de la station d'épuration (STEP). Ce qui indique une conservation des surfaces stables à cause des conditions climatiques favorise une augmentation.

- **La perte d'eau**

Cette période n'a montré aucune diminution des surfaces d'eau dans la zone d'étude.

- **Le gain d'eau :**

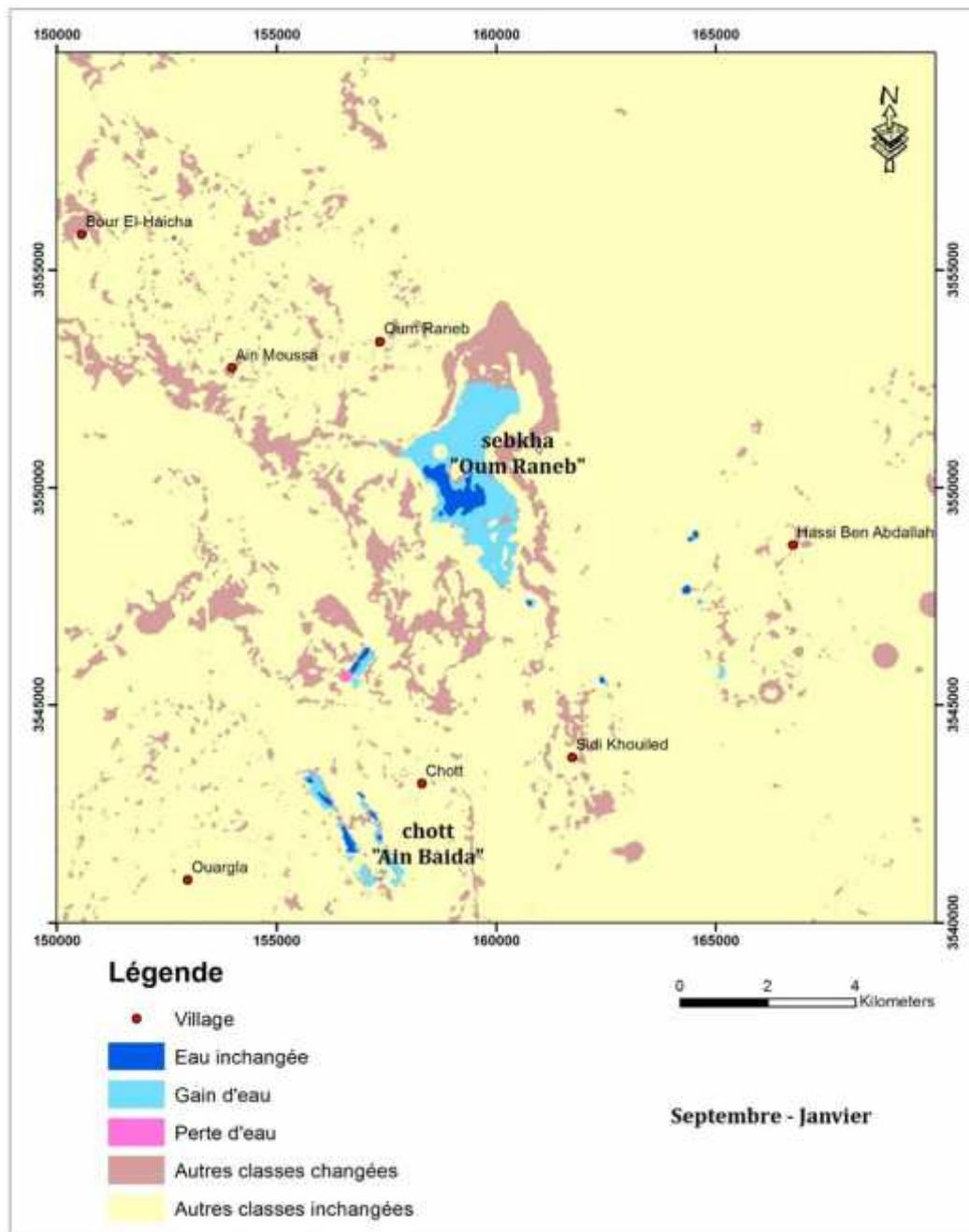


Figure 38. Evolution des états de surfaces entre Septembre 2013 et Janvier 2014

Les surfaces d'eau présente entre l'automne et l'hiver une augmentation d'une surface de 511 ha au niveau de la sebkha « Oum Raneb », puis de 68 ha à chott « Ain Baida » et 12 ha aux

petits lacs de Hassi Benabdallah. Cela est dû aux conditions climatiques hivernales par des faibles températures et une faible évaporation et d'une humidité relative élevée et une précipitation, ce qui contribuent directement sur la recharge de la nappe superficielle.

III.3.4.5 L'évolution spatiotemporelle durant les 4 saisons

Les surfaces d'eau dans la zone d'étude montrent une stabilité entre le printemps et l'hiver d'une surface total de 105 ha par contre les changements affectent ces zones avec un taux très élevé montrant deux phénomènes distincts.

- Le premier entre le printemps et l'automne avec diminution des surfaces sous l'effet de l'évaporation intense des eaux de surface par l'effet de la température et le vent.
- Le second entre l'automne et l'hiver avec une importante augmentation de surface. Cela est dû aux conditions climatiques hivernales par des faibles températures et une faible évaporation et d'une humidité relative élevée et une précipitation, ce qui contribuent directement sur la recharge de la nappe superficielle et n'influent pas sur les apports anthropiques

III.3.5 Conclusion

- Dans la zone Oum Raneb, on voit bien que le milieu urbain a une influence anthropique majeure sur toutes les autres classes.
- La végétation dans la zone d'Oum El Raneb à une influence directe par l'effet des surplus de l'irrigation sur les surfaces d'eau, par contre le sol salé et sol humide ont une relation inverse due aux effets climatiques.
- Les résultats obtenus auprès de La zone de Sebkhet Oum Raneb montrent d'une part, que le « Sol sec» influe directement sur la surface du salé et sol humide par les effets naturels, soit hydrogéologique (zone de convergence des eaux souterraines) ou climatique (évaporation), et d'autre part le Sol humide ont une relation inverse avec le salé par l'effet des mêmes facteurs.

La class d'eau L'eau est en train de changer vers autre classes, Mais l'inverse ne se produit pas.

III.4. Evolution spatiotemporelle saisonnière de Sebkhet Safioune

III.4.1. Validation des classifications

L'ensemble des classifications ont été 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 bonne correspondance entre la cartographie et les observations de terrain.

Tableau 16. Tableau récapitulatif de la précision des classifications

Classification	Précision Globale	Coefficient Kappa
20-04-2013	96.5190%	0.9427
07-06-2013	97.4297%	0.9540
14-06-2013	97.8286%	0.9545
30-06-2013	98.0711%	0.9507
09-07-2013	96.2128%	0.9188
14-11-2013	96.4902%	0.9407

III.4.2. Matrices de changements des classes humides

La détection des changements (change detection) entre les six classifications font ressortir une nette évolution des états de surface des classes humides dans la sebkha « Safioune ».

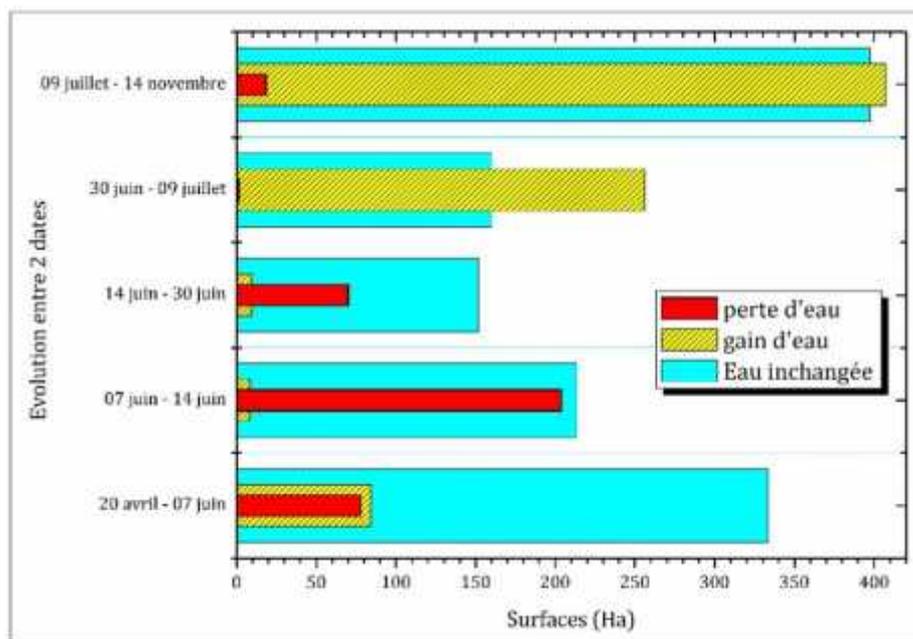


Figure 39. Evolution des surfaces d'eau

Les matrices de changements (Figure 39) montrent l'évolution des surfaces d'eau avec :

- un gain de 20% de la surface totale de l'eau d'un côté et une perte de 19% de l'autre côté entre 20 avril et 7 juin. Ceci indique qu'il existe une égalité entre les apports anthropiques et les pertes par évaporation ;
- une perte d'eau de 49% et 32% respectivement durant le mois de juin (entre 7 juin et 14 juin et entre 14 juin et 30 juin), par contre il existe quand même un gain de 4% et 6% ce qui indique l'influence anthropique par les rejets du canal ;
- un gain depuis le mois de juillet jusqu'à novembre indiquant une augmentation des débits de rejets pendant la période estivale et la diminution des conditions climatiques en

automne.

L'évolution des surfaces en sel (Figure 40) a montré :

- Une perte de 79% de la surface totale initiale en sel est visible entre 20 avril et 07 juin. Cela est dû à l'érosion des cristaux de sel par le vent.
- Une remarquable fluctuation en mois de juin et juillet caractérise la surface en sel par un gain de 37% entre le 07 et le 14 juin puis des pertes de 48% et 85% entre le 14 et le 30 juin et entre le 30 juin et le 09 juillet. Cette fluctuation est le résultat du phénomène « dissolution précipitation ».
- Un gain de 89% de la surface totale finale est remarquable entre le 09 juillet et le 14 novembre. Cette augmentation du sel est liée aux effets conjugués des apports en eau et les influences climatiques.

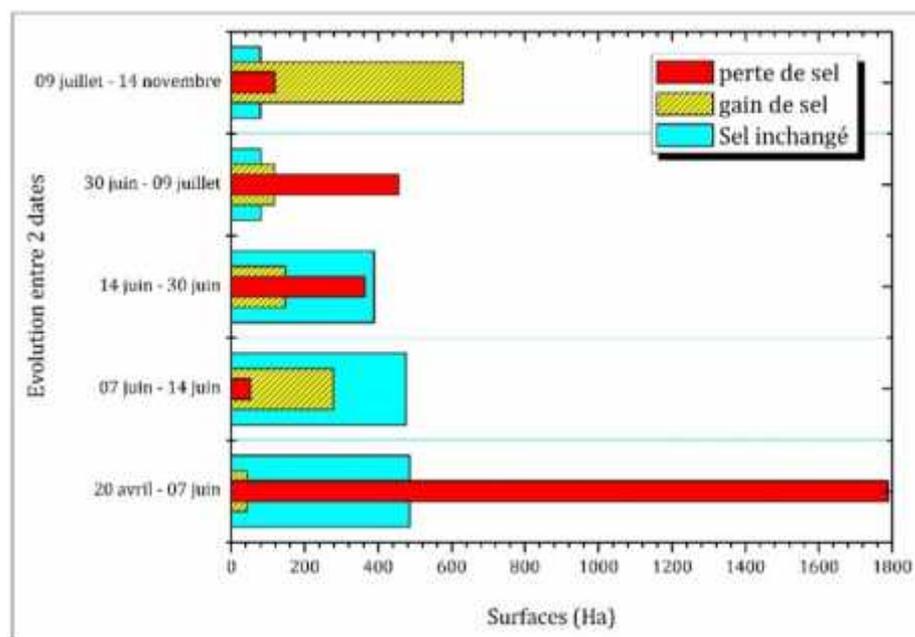


Figure 40. Evolution des surfaces en sel

III.4.3. Le rôle des facteurs climatiques sur les changements des classes humides

Les facteurs climatiques dans les zones hyperarides sahariennes présentent un effet global sur les états de surfaces humides de la région. Par contre les apports anthropiques n'ont que des effets ponctuels au niveau des points de rejets.

Les variations journalières des paramètres météorologiques (la température, la précipitation et l'humidité) présentent une étroite relation entre eux (figure 41). Des moyens journaliers de température augmentent de 15°C (avril) à 43°C (juillet) puis une diminution à 10°C (novembre), cette allure montre son inverse en humidité par l'effet d'assèchement de l'aire. Durant les huit mois il n'y a que quatre enregistrements de précipitation qui sont 6 mm en avril, 2 mm fin août

et 5 mm à novembre. Par conséquent l'allure générale de l'évolution des surfaces d'eau suit celui de l'humidité, à l'exception de celles du 07 juin et du 09 juillet qui ont des surfaces relativement élevés mais elles respectent la tendance climatique. Ces faibles élévations de surfaces s'expliquent par d'autres facteurs (anthropiques) contribuant à leur alimentation.

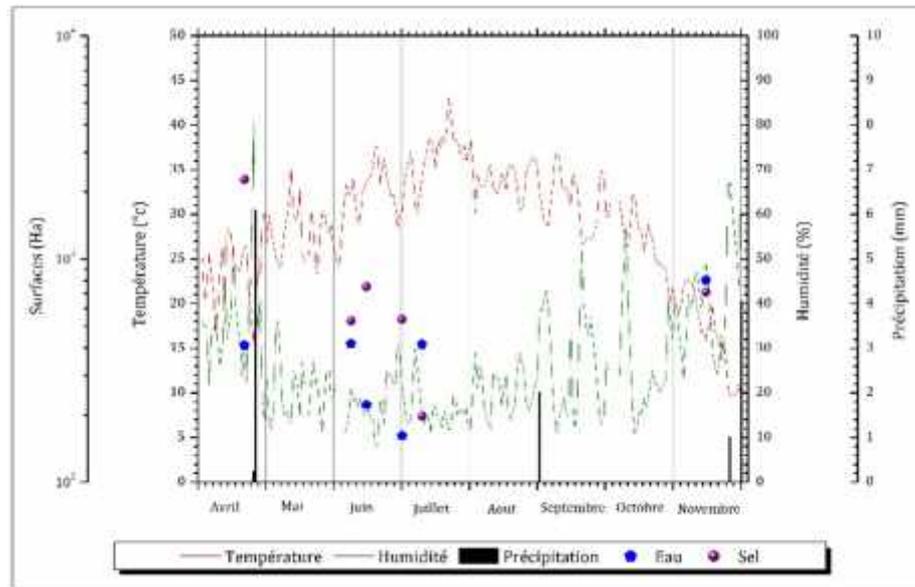


Figure 41. Le rapport entre les surfaces humides et les facteurs climatiques (température, précipitation et humidité)

Une deuxième relation entre l'évolution des surfaces humides et la vitesse du vent (Figure 42) fait apparaître quatre piques du vent de sable en mois de mai, juin et août ainsi que d'autres piques de la vitesse du vent max dépassant les 50 km/h en mois d'avril. Ces dernières d'une période d'une semaine avant le 20 avril accélèrent l'évaporation des eaux à 411 Ha conduisant à la précipitation des sels (2274 Ha). Le vent de sable des mois de mai et juin n'a pas influé sur l'eau mais il y a une diminution des surfaces en sel (le 07 juin) indiquant leur érosion et/ou ensablement en changeant leurs états de surfaces en sable. Par contre le 14 juin on remarque une augmentation de la surface d'eau et une diminution de la surface du sel indiquant une alimentation par les eaux du canal ce qui provoque la dissolution des sels.

Généralement l'évolution des surfaces d'eau dans un climat aride loin des facteurs anthropiques est influée directement par les facteurs climatiques conduisant à un assèchement total dans la période estivale (Djidel et al, 2013). Etant donné que la surface d'eau dans la sebkha « Safioune » a montré une pérennité de 150 Ha ce qui indique la source d'alimentation en eau par le canal d'eau usée et de drainage avec un débit de 60000 m³/j.

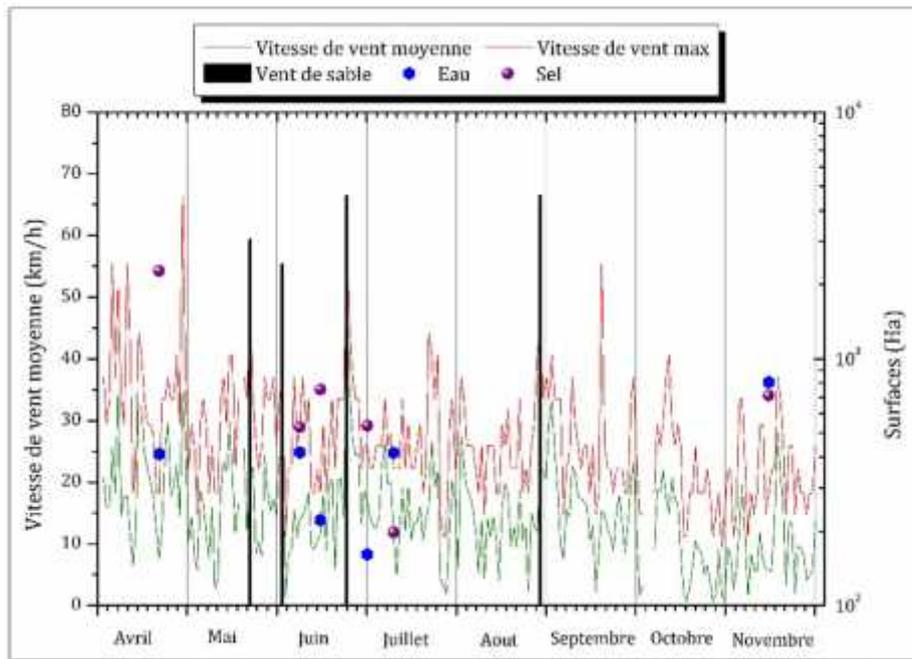


Figure 42. Le rapport entre les surfaces humides et la vitesse du vent

III.4.4. Cartographie des changements

La carte d'évolution des états de surfaces, des six dates de l'année 2013 (Figure 43), a montré une nette évolution des états de surfaces humides avec une stabilité de 150 Ha d'eau au niveau de la source des rejets par le canal, de 80 Ha de sel dans la limite la plus proche du canal et de 3180 Ha de sol humide au niveau des oueds. Les classes de changements situent en pourtour de la surface d'eau stable comme noyau limité au sud par une digue. Elles sont comme suit :

- La classe « gain d'eau » est une surface de 652 Ha montrant l'extension de la classe « eau » en périphérie de la surface inchangée durant la période d'étude. Les états de surfaces fluctuent entre l'eau et le sel par le phénomène dissolution/précipitation.
- La classe « gain de sel » est une surface 696 Ha située au pourtour de la classe « gain d'eau ». elle représente le changement du sel vers le sol humide par le phénomène érosion/sédimentation éolienne.
- La classe « gain de sol humide » est une surface de 4410 Ha entourant la classe « sol humide inchangé ». Elle représente la zone de fluctuation entre le sol humide et le sol sec en limites externes par le phénomène évaporation. 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.

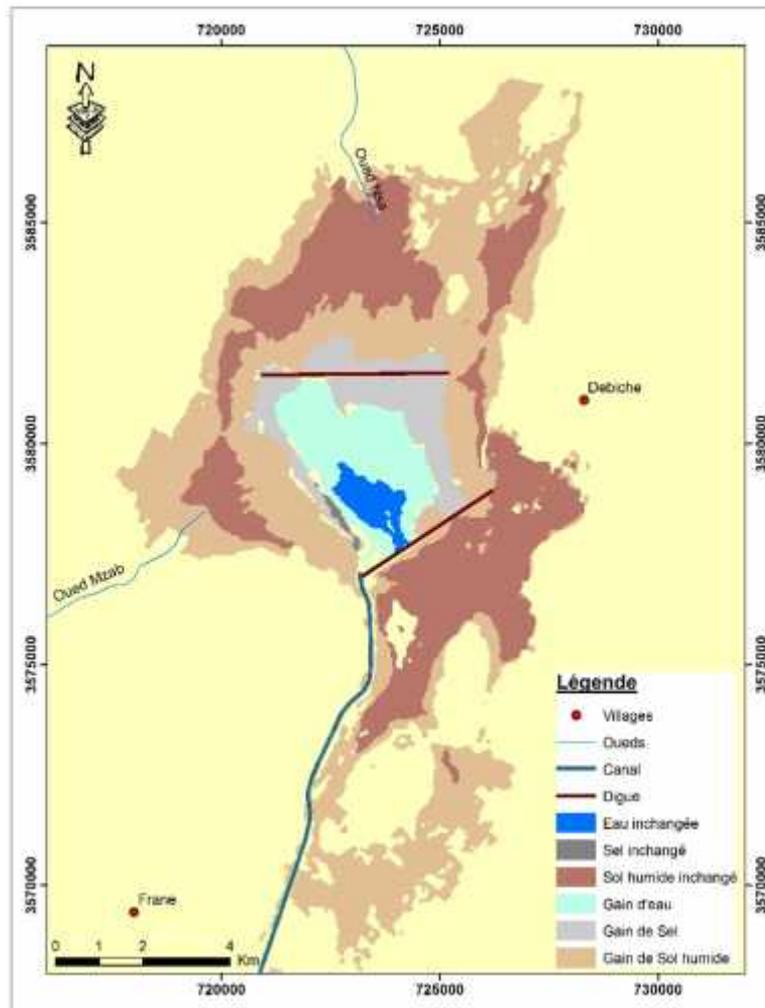


Figure 43. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre Avril et Novembre 2013

III.4.5. Conclusion

Les changements importants sur les classes des états de surface de la sebkha « Safioune » affectent essentiellement la classe des eaux issue du déversement par le canal des eaux de rejets épurés et les eaux de drainage.

La classe des « eaux » montre une diminution de 411.30 Ha au mois d'Avril jusqu'au 161.37 Ha au fin juin sous l'influence des conditions climatiques extrêmes. D'une part, des températures atteignant parfois 47°C favorisant une intense évaporation. D'autre part, des vents de sable d'une vitesse de 68,4 km/h qui contribuent à l'assèchement des eaux en diminuant l'humidité du sol et masquant les sels. Puis une augmentation à 782.46 Ha au mois de Novembre, vu la diminution de la température et de l'évaporation.

L'étude de détection des changements des six dates à la fois montre que la surface d'eau inchangée au cours de l'année est de 150 Ha. Cette situation montre une pérennité des eaux de surface de sebkha Safioune avec le débit actuel du canal (60000 m³/j). Ce qui peut créer un écosystème d'une importance mondiale avec une diversité faunistique et floristique.

III.5. Evolution spatiotemporelle saisonnière des chotts (Merouane et Melghir)

III.5.1 Validation des classifications

L'ensemble des classifications ont été 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 17. Tableau récapitulatif de la précision des classifications

Classification	Précision Globale	Coefficient Kappa
22/05/2013	92.52%	0.90
09/07/2013	93.43%	0.91
27/09/2013	93.83%	0.91
14-11-2013	94.07%	0.91
07/04/2014	92.21%	0.88

III.5.2 Matrices de changements des classes humides

La détection des changements (change detection) entre les cinq classifications (Figure 44) font ressortir une nette évolution des états de surface des saumures et des sels dans les chotts « Melghir et Merouane ».

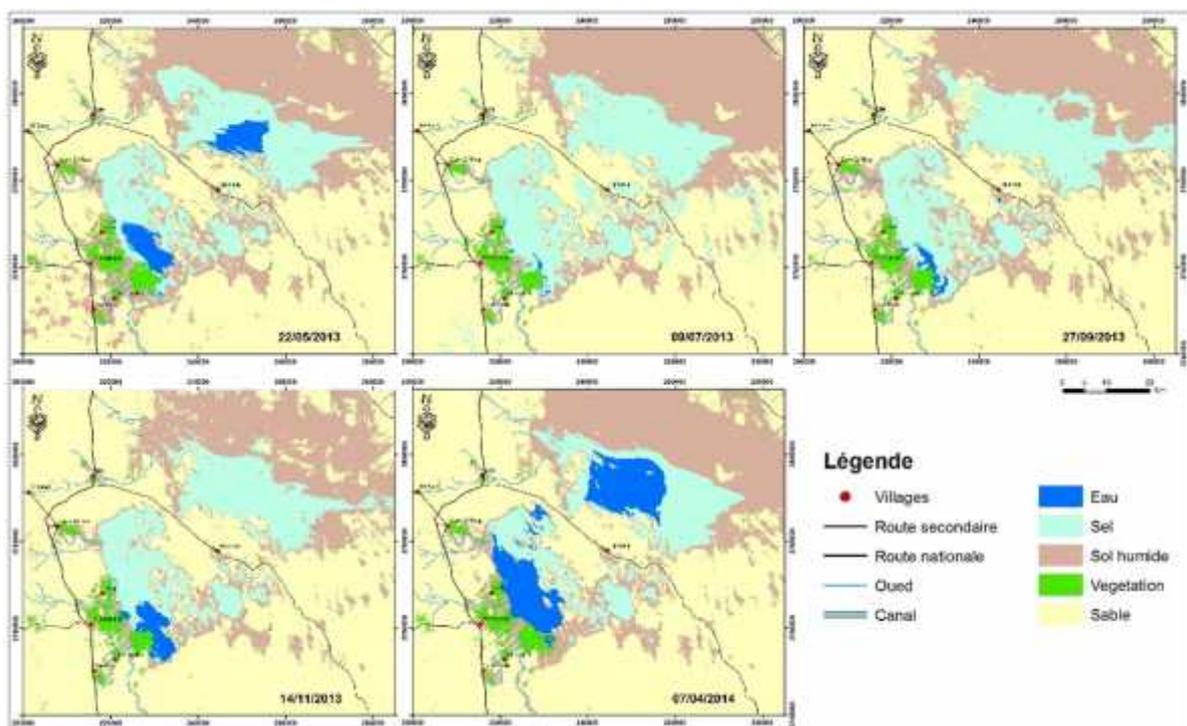


Figure 44. Classification supervisée par « SVM » des 5 dates

On remarque une diminution des surfaces d'eau depuis le mois de mai jusqu'au juillet puis une augmentation pour atteindre son maximum au mois d'avril. Cette évolution suit deux phénomènes distincts, le premier au niveau du chott Merouane qui montre une pérennité

d'eau même a de faibles surfaces au niveau du point de rejet du canal. Le deuxième au niveau du chott Melghir qui se présente à l'état sec sauf les saisons humides. Ce qui met en évidence la différence entre le phénomène naturel et anthropique.

Les matrices de changements montrent l'évolution des surfaces d'eau (Figure 45) avec :

- une perte de 98% de la surface totale initiale de l'eau (14266 Ha) entre mai et juillet, ce qui indique l'influence climatique par évaporation conduisant à un assèchement total du chott Melghir et presque la totalité du chott Merouane. Mais il y a aussi un gain de 3% au niveau du chott Merouane traduisant les apports anthropiques des rejets du canal ;
- un gain d'eau de 76%, 65% et 89% respectivement entre le mois de juillet, septembre et avril. Ce qui indique l'influence climatique par une diminution de la température (34°C, 29°C et 23°C) et une augmentation de l'humidité (30%, 43% et 49%) et la précipitation (0mm, 7mm et 16mm) avec les rejets du canal au niveau du chott Merouane.

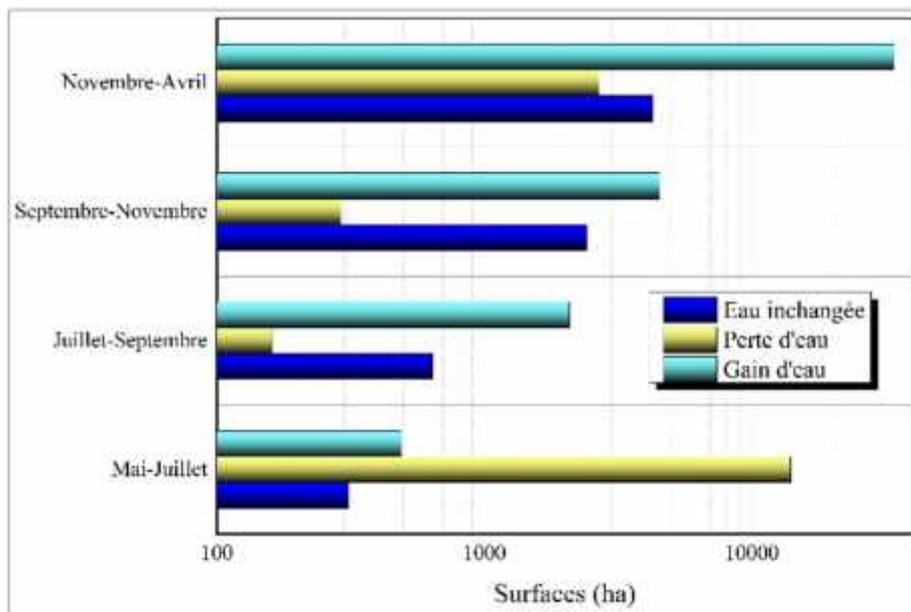


Figure 45. Evolution des surfaces en eau

L'évolution des surfaces en sel (Figure 46) a montré :

- Une précipitation du sel de 13% de la surface totale initiale en sel seulement entre mai et juillet. Cela est dû à l'évaporation d'eau par augmentation de la température moyenne entre 26 et 34°C et avec un maximum entre 33 et 41°C.
- Une dissolution du sel surtout depuis septembre à novembre de 16% et entre novembre et avril de 47%. Cela est le résultat du climat hivernal.

- Une érosion de 14% du sel de la surface totale finale entre juillet et septembre. Cette érosion du sel est liée au vent du sable du 27 aout qui couvre le sel par les grains de sable et emporte les cristaux de sel.

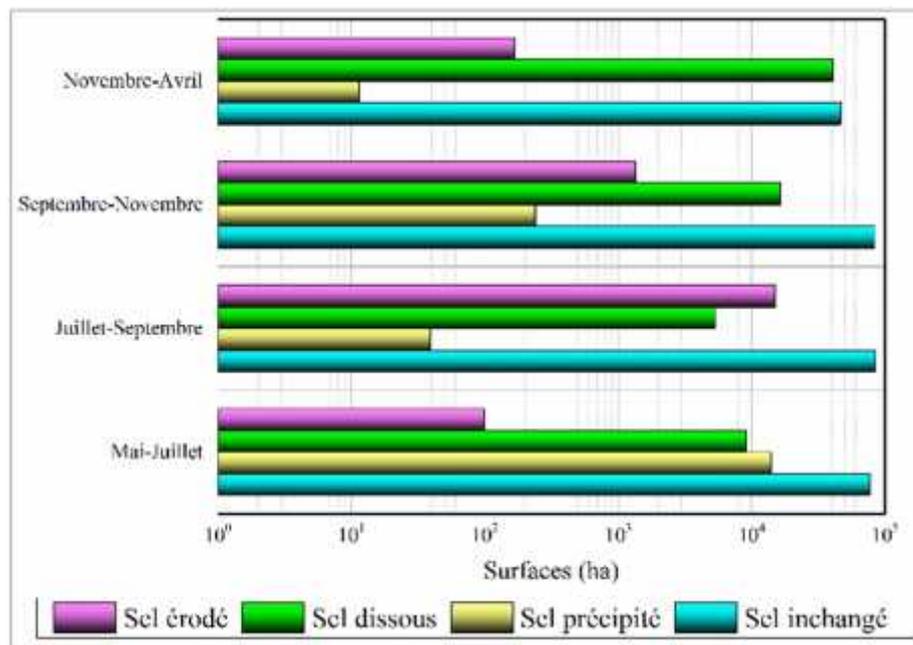


Figure 46. Evolution des surfaces en sel

III.5.3 Le comportement des sels envers les différentes classes

Les facteurs climatiques dans les zones hyperarides sahariennes présentent un effet global sur les états de surfaces humides de toute la région. Par contre les apports anthropiques n'ont que des effets ponctuels au niveau des points de rejets.

Les variations de surfaces entre les différentes classes (Figure 47) sont en relation directe entre eux sous l'influence des conditions climatiques et anthropiques. Il existe 3 types de relation entre les classes selon des phénomènes bien distincts :

- ✓ Le phénomène d'humidité du sol caractérise la classe « Sable » (caractérise le sol sec) et la classe « Sol humide ». ces deux classes représentent les surfaces les plus importantes dans un milieu saharien désertique pareil.
- ✓ Le phénomène dissolution/précipitation entre la classe « Eau » et la classe « Sel » généré par les facteurs climatiques saisonniers, avec une dissolution des sels pendant la saison hivernale relativement humide et une précipitation pendant la saison estivale trop chaude par une évaporation intense.
- ✓ La classe « végétation » ne montre presque aucune variation. Etant donné que les exploitations agricoles sont dominées par des palmiers dattiers, donc elle ne change ni de paysage ni d'extension au cours de l'année.

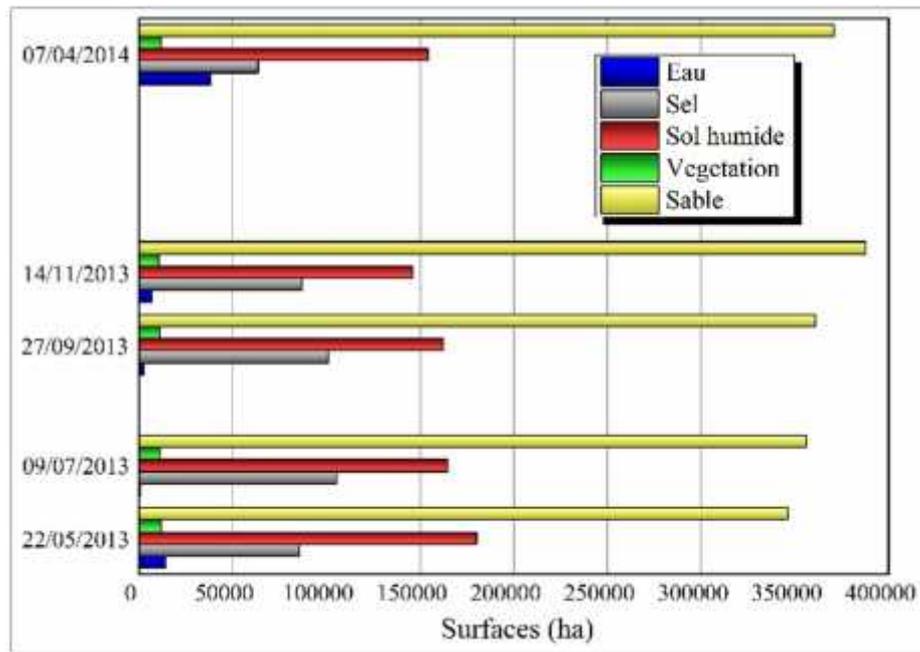


Figure 47. Le rapport entre le sel et les différentes classes

III.5.4 Cartographie des changements

La carte d'évolution des états de surfaces des sels et des saumures, de cinq dates de l'année 2013-2014 (Figure 48), a montré une nette évolution, avec une stabilité de 235 Ha d'eau au niveau de la source des rejets par le canal, ce qui indique une pérennité de cette surface d'eau anthropique au niveau de chott Merouane. Il y a 434 km² de surface en sel inchangé entre les deux chotts au cours de l'année avec les conditions actuelles. Les classes de changements des sels sont situées par rapport aux sels inchangés, soit en pourtour par le sable sec et humide, soit au centre par l'eau. Elles sont réparties comme suit :

- La classe « sel précipité » est une surface de 140 km² montrant l'évaporation des eaux au niveau du centre des deux chotts dans la période chaude (été).
- La classe « sel dissous » est une surface de 400 km². Elle représente la zone d'émergence des eaux de la nappe phréatique au niveau des centres des chotts avec des altitudes très basses. C'est une zone de convergence des eaux de surfaces et souterraines (exutoire) du Bas-Sahara dans la période relativement humide (hiver).
- La classe « sel érodé » est une surface de 150 km² entourant la classe « sel inchangé ». Elle représente la zone de fluctuation entre le sol humide, le sol sec et le sel sous l'influence du vent de sable par arrachement des cristaux de sel et le recouvrement de la surface par les grains de sable.

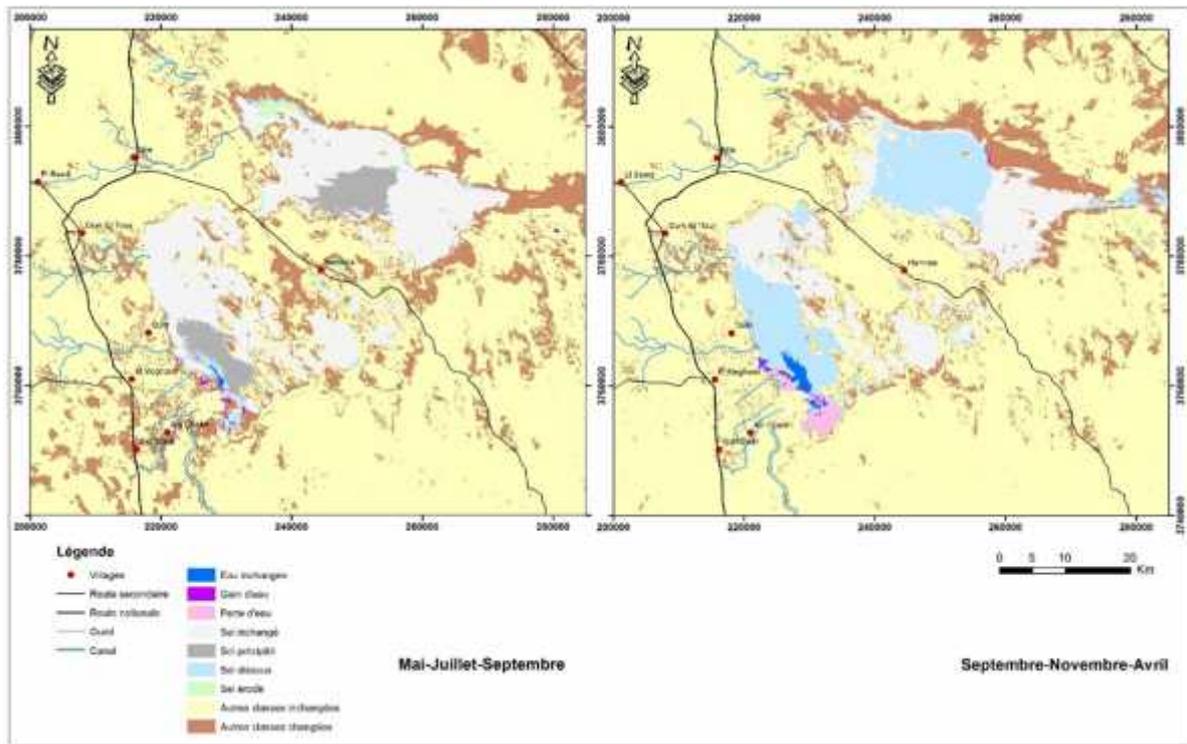


Figure 48. Cartographie de l'évolution des sels depuis mai 2013 jusqu'à avril 2014

III.5.5 Conclusion

Les changements importants sur les classes des états de surface des sels et des saumures dans les deux chotts « Merouane et Melghir » affectent essentiellement la classe des eaux par le phénomène « dissolution/précipitation » au cours d'une année.

La classe des « eaux » montre une diminution de 140 km^2 du mois d'Avril jusqu'au mois de septembre sous l'influence des conditions climatiques extrêmes. D'une part, des températures atteignant parfois 47°C favorisant une intense évaporation. D'autre part, des vents de sable d'une vitesse de $55,4 \text{ km/h}$ qui contribuent à l'assèchement des eaux en diminuant l'humidité du sol et masquant les sels par le sable. Puis une augmentation à 440 km^2 au mois d'avril 2014, vu la diminution de la température et de l'évaporation et augmentation de l'humidité et la précipitation.

L'étude de détection des changements des cinq dates à la fois montre que la surface de sel inchangée au cours de l'année 2013-2014 est de 434 km^2 . Ceci indique la vaste étendue en sel dans cette région dépressionnaire qu'on peut bénéficier d'une surface sous forme d'exploitations minière en sel qui dépasse les 680 km^2 .

III.6 Hydrogéochimie

III.6.1 Comportement hydrochimique des eaux de surface de la cuvette d'Ouargla

III.6.1.1 Paramètres physiques

D'une façon générale, la température des eaux superficielles varie en fonction de la température de l'air. Les valeurs de ce paramètre varient entre 20 et 30°C au niveau de chott d'Ain Beida, et entre 16 et 29°C au sebkhet Oum Raneb.

La conductivité est très élevée dans tous les points de prélèvement particulièrement dans les bordures de chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb, ce qui signifie une forte salinisation, cette salinité est visible par les dépôts de sels résultants de l'évaporation excessive des eaux. La conductivité électrique des eaux du chott Ain Beida varie entre 15,4 ms/cm et 270,3 ms/cm, et varie entre 17,8 ms/cm et 320,6 ms/cm dans sebkhet Oum Raneb (Figure 49).

La salinité du chott Ain Beida varie entre 11‰ et 43,2‰ et allant de 10,6‰ à 45,6‰ dans sebkhet Oum Raneb.

Les valeurs du pH dans tous les échantillons varient généralement entre 7,85 et 9,2 dans les eaux du chott Ain Beida, Elles varient entre 7,88 et 8,25 dans sebkhet Oum Raneb.

Le pH le plus élevé est mesuré au niveau du chott Ain Beida où il atteint 9,2 cela est expliqué par l'effet des eaux usées dans le chott (Figure 49).

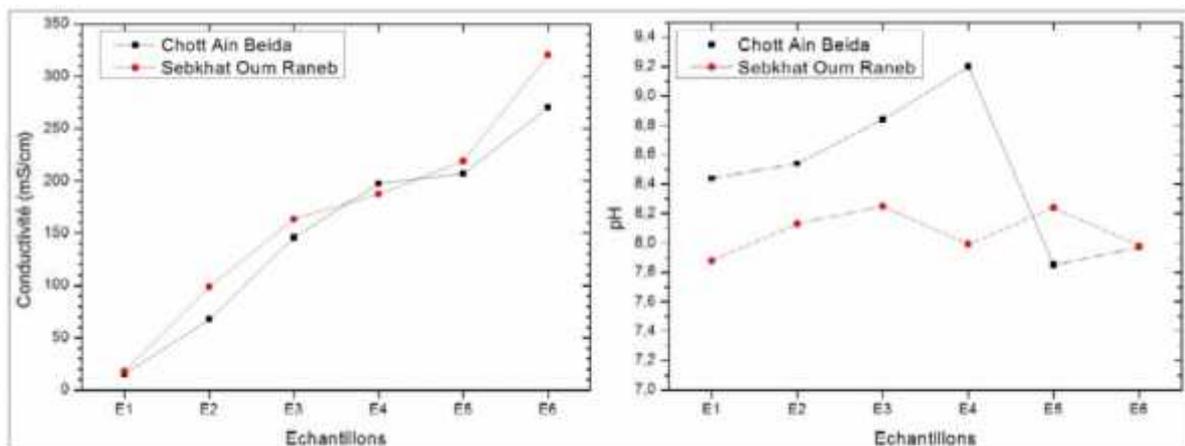


Figure 49. Variation de conductivité électrique et de pH au niveau chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUNI H, 2011)

III.6.1.2 Eléments majeurs :

a. Les anions :

L'eau contient presque toujours les chlorures, mais en proportion variables. Il provient de la dissolution des sels naturels par lessivage de terrains.

La teneur du Chlorure est variable d'une station à une autre, dans les saumures et les sels. Ainsi les valeurs obtenues dans le chott Ain Beida sont variable entre 18262.6mg /l à 121560mg/l dans les saumures. Dans sebkhet Oum Raneb les valeurs varient entre 24358.1mg/l et 176912.5mg/l (Figure 50).

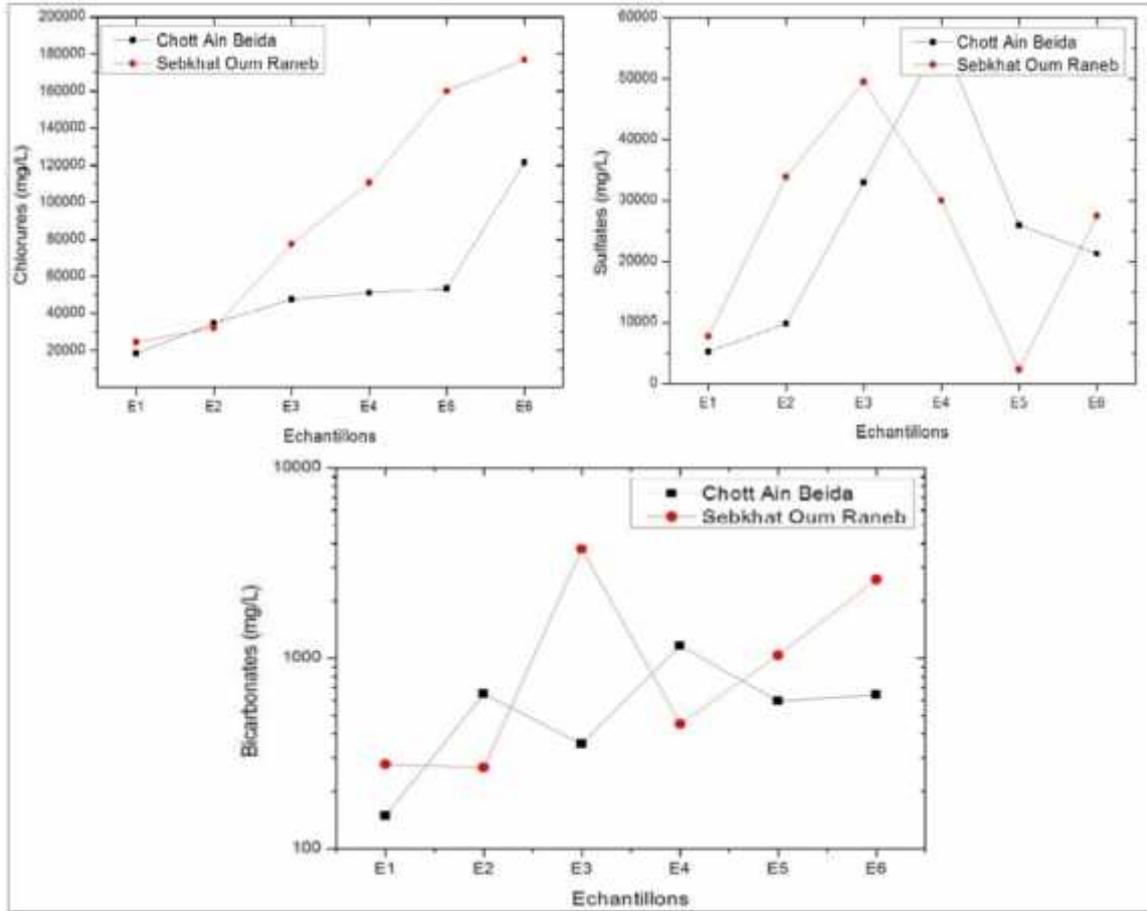


Figure 50. Variation des anions au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUINI H, 2011)

Lors de l'évaporation des eaux on remarque une augmentation de la concentration, qui résulte de la sur saturation des eaux au chlorure ce qui favorise la précipitation des sels minéraux chloruré à savoir la Halite (NaCl), la Sylvite (KCl) et l'Hydrophilite (CaCl₂).

Les sulfates sont toujours présent dans les eaux naturelles, leur présence dans le l'eau résulte de la solubilité relativement faible du sulfate de calcium (CaSO₄) des roches gypseux.

Dans les échantillons des eaux du chott Ain Beida les sulfates varient entre 5218 mg/l et 56800 mg/l. dans le sebkhet Oum Raneb la concentration des sulfates varient entre 7730mg/l et 49500mg/l (Figure 50)

Les bicarbonates se présentent avec des teneurs plus ou moins faibles comparativement avec les autres éléments majeurs.

D'après les résultats obtenus (Figure 49) la teneur du HCO₃ dans le chott Ain Beida varie entre 148.66 mg/l et 1159 mg/l. dans sebkhet Oum Raneb les bicarbonates varient entre 266.11 mg/l et 3750 mg/l.

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

- Tension de CO₂ dissous.
- Température de l'eau.
- Concentration de l'eau en sel et la nature lithologique des terrains.

b. Les cations :

Le Sodium est l'élément le plus dominant dans les cations. Les concentrations du Sodium sont variables d'une station à une autre. Dans les échantillons des eaux du chott Ain Beida les concentrations du sodium varient entre 13500 mg/l et 81250 mg/l. dans sebkhet Oum Raneb elles varient entre 21500 mg/l et 125000 mg/l (Figure 51).

Lors de l'évaporation des eaux on remarque une augmentation de concentration, cette augmentation résulte de la saturation des eaux en sodium qui favorise la précipitation des minéraux sodique à savoir la halite (NaCl), la mirabillite (Na₂SO₄, 10H₂O) ou la thenardite (Na₂SO₄, 7H₂O).

Plusieurs types des formations géologiques sont à l'origine de calcium parmi lesquelles nous citons : les roches carbonatées et les roches gypseuses. Les roches carbonatées libèrent le calcium par l'attaque des eaux en présence de gaz carbonique (CO₂) et par dissolution dans le cas des roches gypseuses.

Dans les échantillons des eaux du chott Ain Beida la concentration du calcium varie entre 561.05mg/l et 2540 mg/l. Dans sebkhet Oum Raneb elle varie entre 320.64 mg/l et 3767.52mg/ L'ion de magnésium est présent dans l'eau par deux origines principales :

- La dissolution des formations dolomitiques en présence de l'acide carbonique.
- Il peut provenir également de la dissolution duMgSO₄ dans les terrains gypseux.

La concentration de magnésium dans chott Ain Beida varie entre 150.5 mg/l et 10172.57mg/l. Dans sebkhet Oum Raneb il varie entre 138.54mg/l et 5261 mg/l .

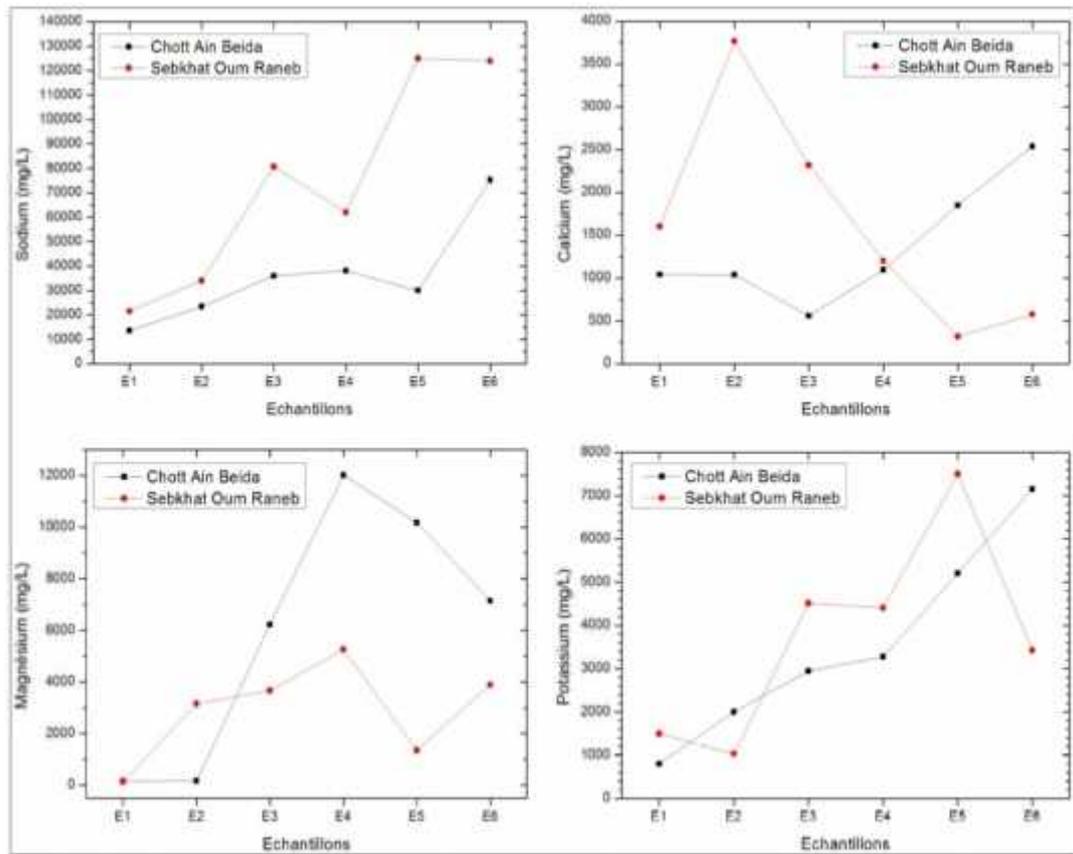


Figure 51. Variation des cations au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkhet Oum Raneb (LAOUNI H, 2011)

Les concentrations du potassium dans les différents échantillons sont très importantes, dans chott Ain Beida les teneurs varient entre 800 mg/ et 7153 mg/l. Dans sebkhet Oum Raneb ils varient entre 1034 mg/l et 7500 mg/l.

Le potassium provient de l'altération des formations argileuses des alluvions quaternaire et de la dissolution des engrais chimiques retrouvée dans les eaux agricoles.

c. Détermination du facies chimique :

La représentation des analyses chimique des eaux des chotts sur ce type de diagramme losangique de piper permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux du chott Ain Beida et sebkhet Oum Raneb.

La projection des eaux du chott Ain Beida et sebkhet Oum Raneb dans le diagramme de piper (Figure 51) permet de distingué une seule famille :

- Chlorurée sodique avec une abondance de sodium

On peut conclure que les anions montrent une évolution dans le sens de l'augmentation des anions chlorurés et sulfatés, pour les cations ce sont les ions sodium et magnésium.

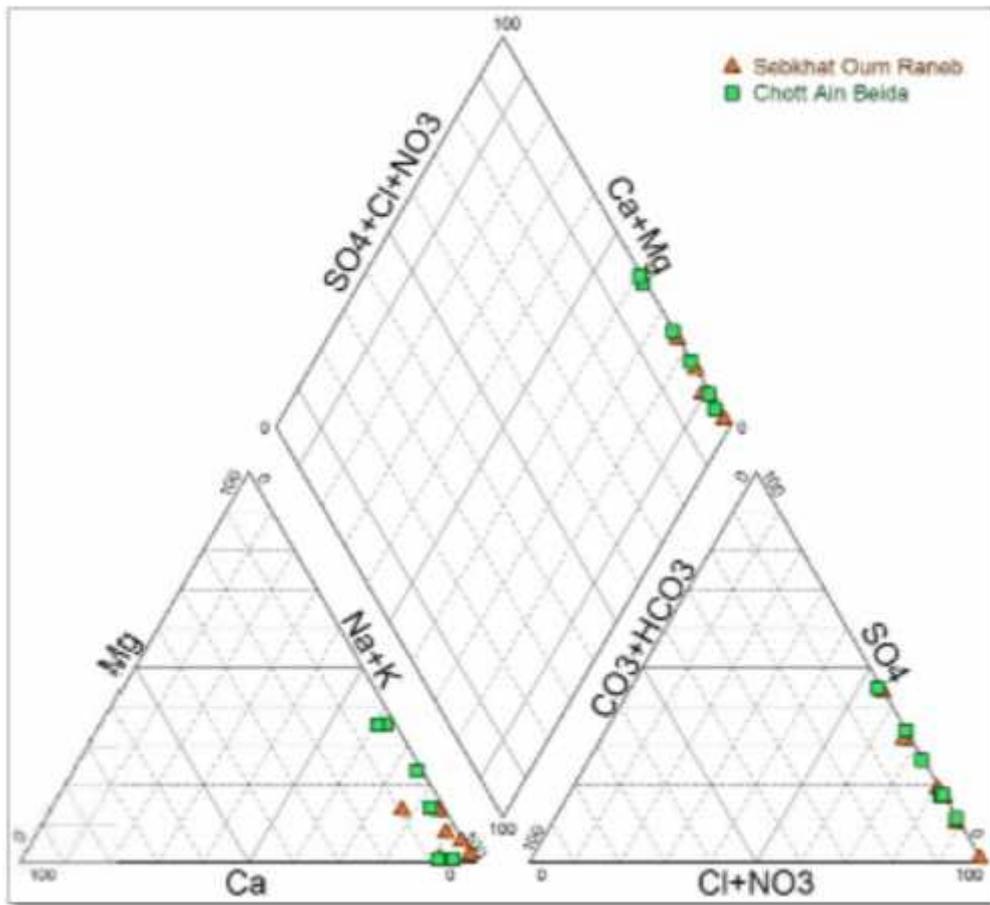


Figure 52. Diagramme de Piper du chott d'Ain Beida et de sebkheth Oum Raneb (LAOUNI H, 2011)

d. Indice de saturation (IS) :

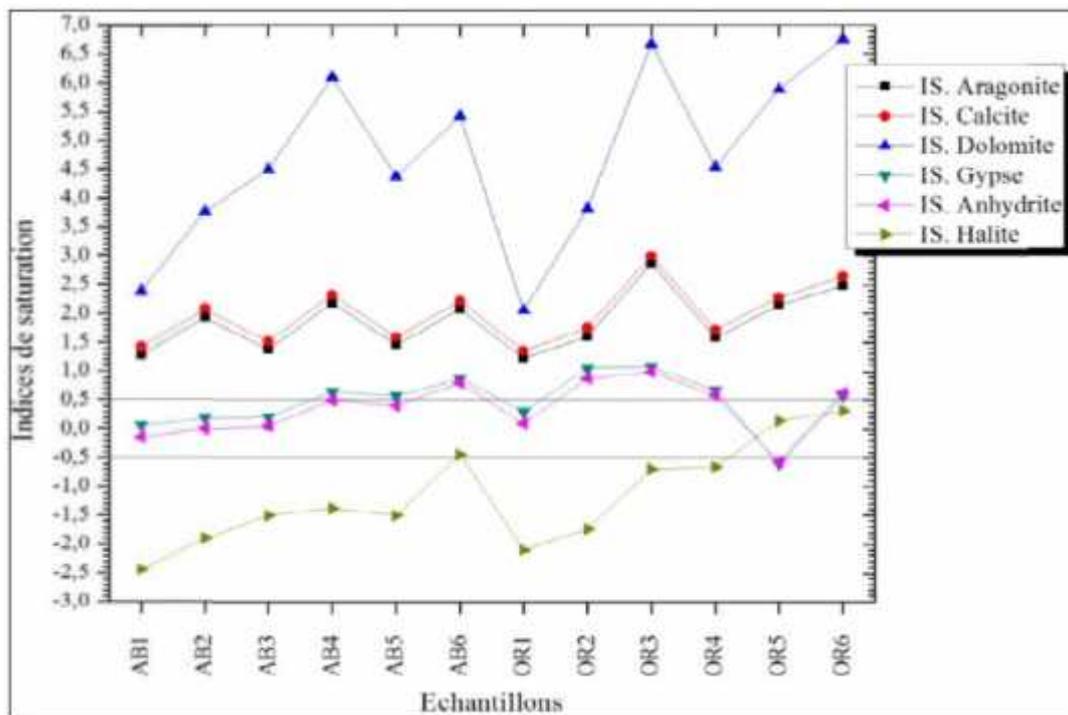


Figure 53. Indice de saturation au niveau du chott d'Ain Beida et de sebkheth Oum Raneb (LAOUNI H, 2011)

Le calcul de l'indice de saturation fait par le logiciel Phreeqc, montrent que les eaux du chott Ain Beida et sebkhet Oum Raneb sont sursaturés vis-à-vis des minéraux carbonatés (Dolomite (CaMgCO_3)₂), Calcite (CaCO_3), et Aragonite (CaCO_3) sont en phase de précipitation. Les minéraux sulfatés (Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et Anhydrite (CaSO_4) dans les points AB1, AB2, AB3, OR1 sont à l'équilibre, par contre les points AB4, AB6, OR2, OR3, OR4 et OR6 sont sursaturés. Pour la Halite l'indice de saturation montre que les eaux du chott Ain Beida et sebkhet Oum Raneb sont sous-saturés par la Halite sauf les points AB6, OR5 et OR6 sont à l'équilibre (Figure 53).

III.6.2 Comportement hydrochimique des eaux des lacs d'Oued Righ

Les résultats d'analyses physiques et chimiques des eaux des lacs étudiés de l'Oued Righ ont été l'objet d'un traitement chimique, dont le but d'interpréter ces résultats et comprendre le fonctionnement géochimique de ces écosystèmes aquatiques (les lacs) et de tirer les signes de dégradation de ces derniers.

III.6.2.1 Analyse des paramètres physiques

a. La température

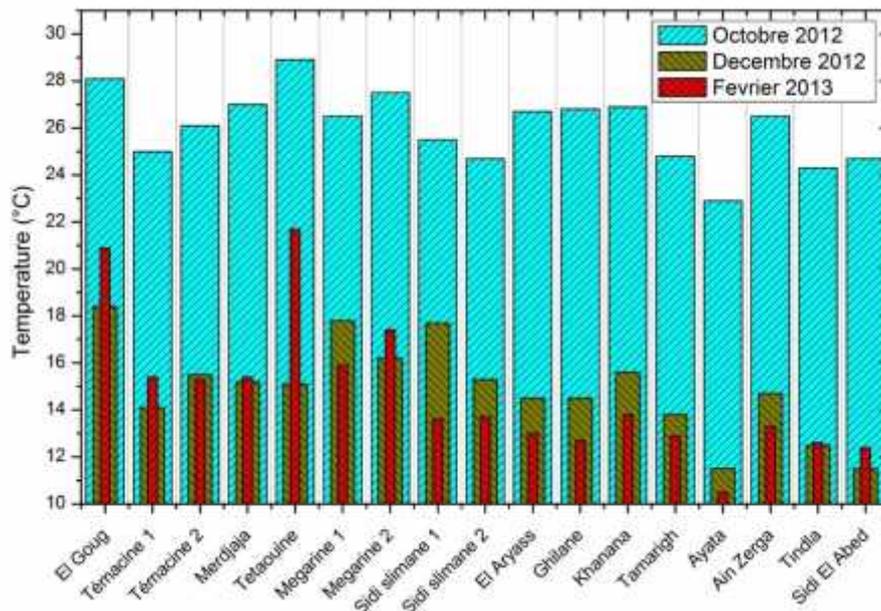


Figure 54. Variation du Température (T°C) des eaux des lacs étudiés

La température étant un facteur très important pour la fonction des écosystèmes, pour les eaux superficielles, elle est due aux influences atmosphériques et particulièrement les changements de la température de l'air. La variation de la température agira sans doute sur les réactions métaboliques qui se produisent dans les eaux des lacs, mais aussi la période de prélèvement des eaux joue un rôle important, généralement la température de l'eau des 17 stations étudiés

suit celle de l'air qui dépend du climat régional de type saharien. La température des eaux prélevées des 17 lacs étudiés varient entre 10 C° et 28C° (Figure 54)

b. Le Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH correspond à la concentration d'ions hydrogène, il mesure l'acidité ou la basicité d'une solution, les résultats d'analyses des eaux montrent qu'il existe une légère variation du pH d'une station à l'autre.

Les valeurs du pH des eaux oscillent entre 8 et 10.8 pour toutes les eaux des lacs, qui peuvent être classées selon l'échelle comme des eaux à pH alcalins, Cette alcalinité peut être expliquée par la nature géologique des terrains, aussi elle peut être liée à la qualité des eaux usées et de drainage évacuées dans les lacs.

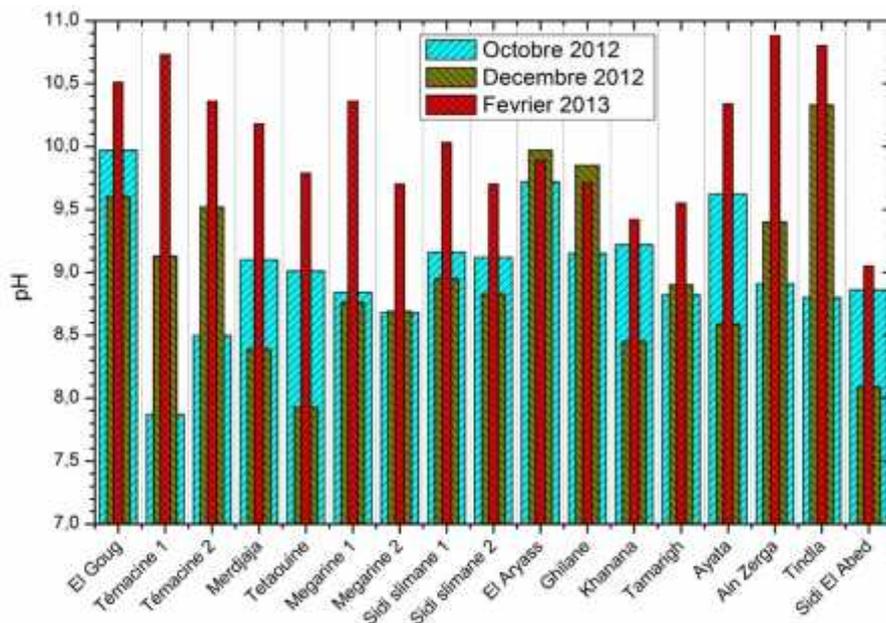


Figure 55. Variation du pH des eaux des lacs étudiés

c. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique augmente avec la teneur en sels dissous, elle augmente encore avec la mobilité des ions et avec la température. Cette teneur augmente donc quand des terrains en contacts avec l'eau sont chargés en sels en fonction de la durée de contact de la surface et parfois de la vitesse d'écoulement. Les valeurs de la conductivité électrique varient d'un lac à l'autre mais elles sont toujours élevées (Figure 55). Cette variation est due aux conditions climatiques où les hautes températures accentuent l'évaporation des eaux et par conséquent augmentent la concentration des sels solubles dans l'eau. Les eaux des lacs sont classées comme eaux fortement salées.

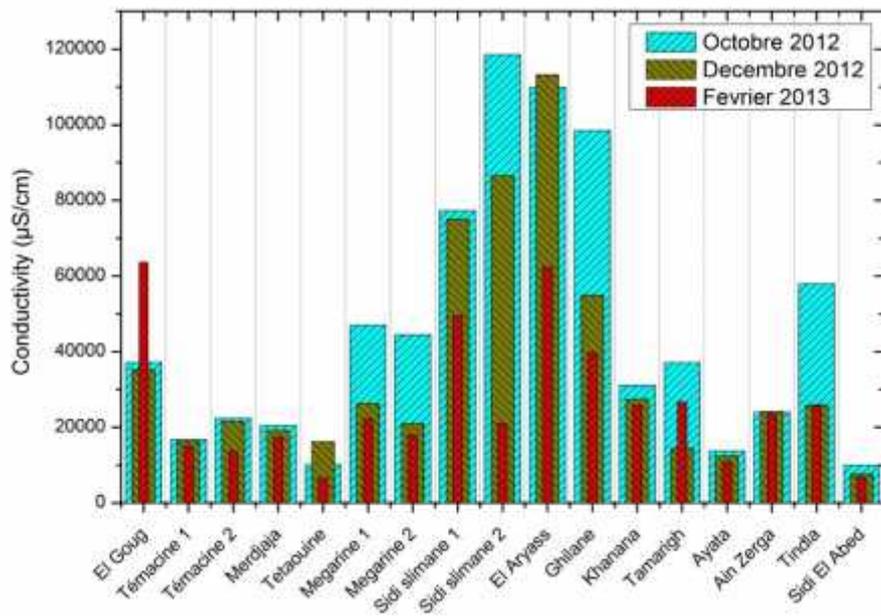


Figure 56. Variation de la Conductivité électrique des eaux des lacs étudiés

III.6.2.2 Teneurs en éléments chimiques majeurs

a. Les Cations :

* Calcium (Ca^{2+})

Les teneurs en calcium varient d'une campagne à l'autre et d'un site à l'autre, mais elles sont élevées toujours et dépassent les normes dans tous les lacs étudiés. Les valeurs les plus élevées caractérisent les lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane. Ces teneurs sont liées aux facteurs climatiques engendrant une forte évaporation et concentration de cet élément, ainsi qu'au lessivage des formations évaporitiques (gypse)

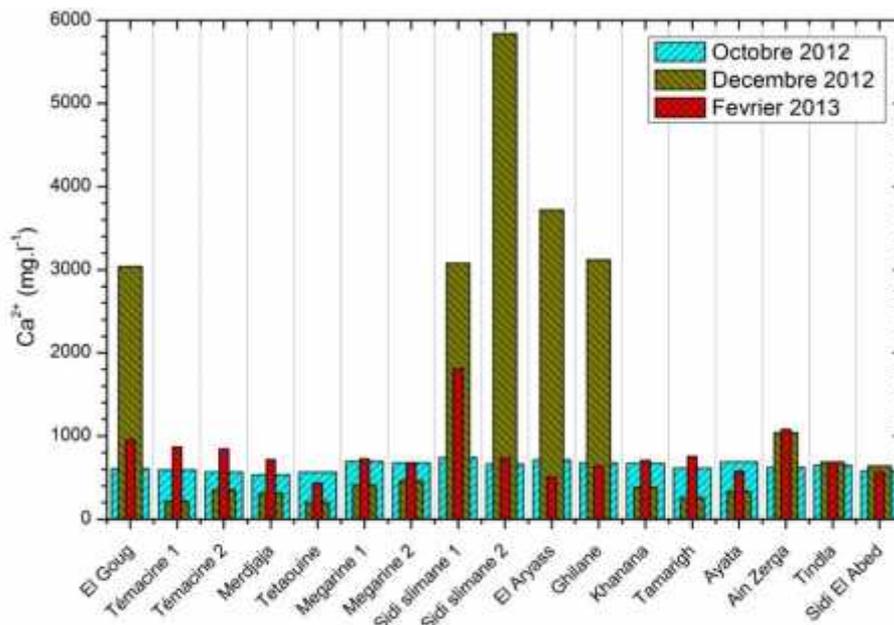


Figure 57. Teneurs en calcium dans les lacs d'Oued Righ

* Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium prend aussi des teneurs élevées et dépassent les normes dans la majorité des sites étudiés, il est très élevé presque dans les mêmes sites que le calcium (El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass, El Ghilane)

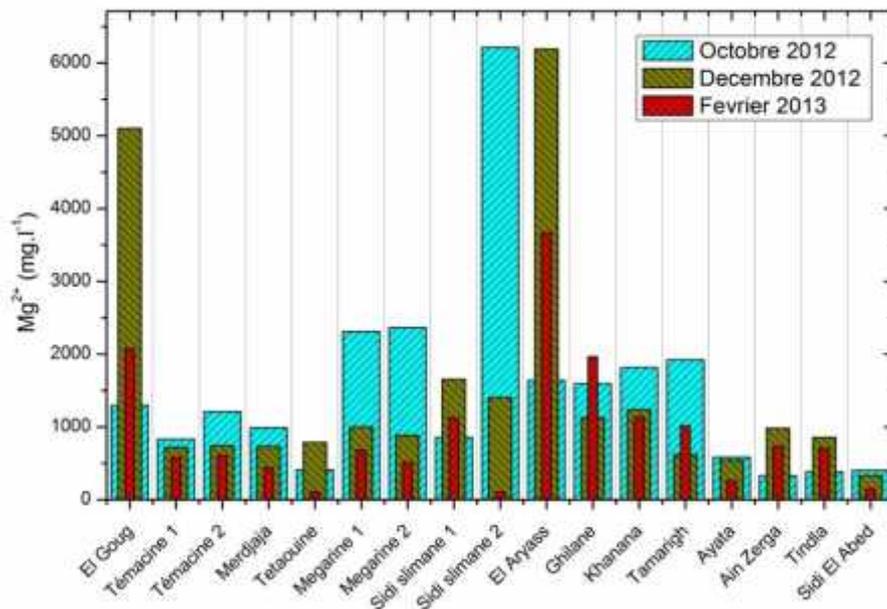


Figure 58. Teneurs en magnésium dans les lacs d'Oued Righ

* Sodium (Na⁺)

L'existence de cet élément est liée, essentiellement, à la dissolution de la Halite. En effet le sodium affiche des teneurs élevées et non homogènes dans les eaux de différents lacs, avec des valeurs maximales dépassant largement les normes de potabilité (200 mg.l⁻¹). Les valeurs les plus élevées sont toujours remarquées dans les lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass, El Ghilane. C'est l'élément le plus dominant dans les cations.

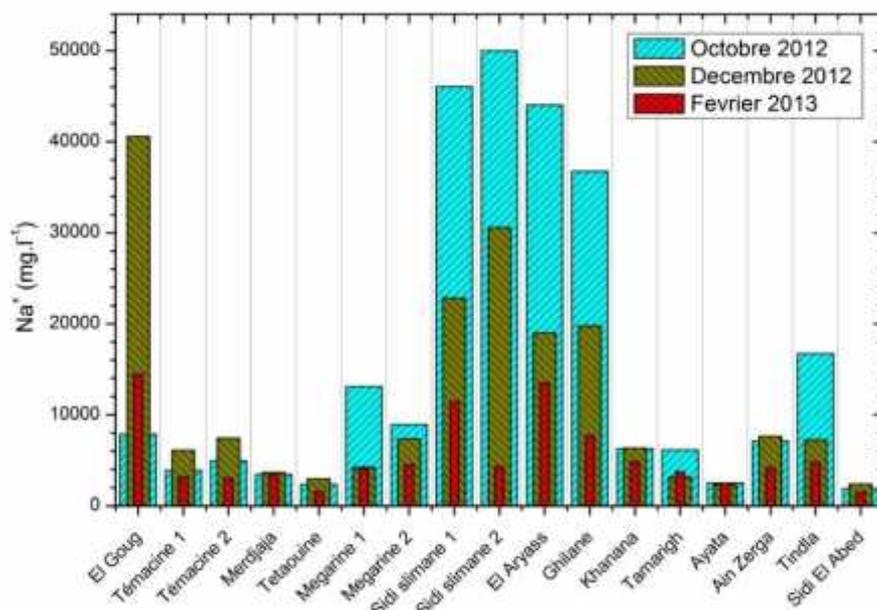


Figure 59. Teneurs en sodium dans les lacs d'Oued Righ

* Potassium (K^+)

Il provient, essentiellement, des évaporites, en l'occurrence la Sylvite (KCl), ou par suite d'altération des argiles potassiques.

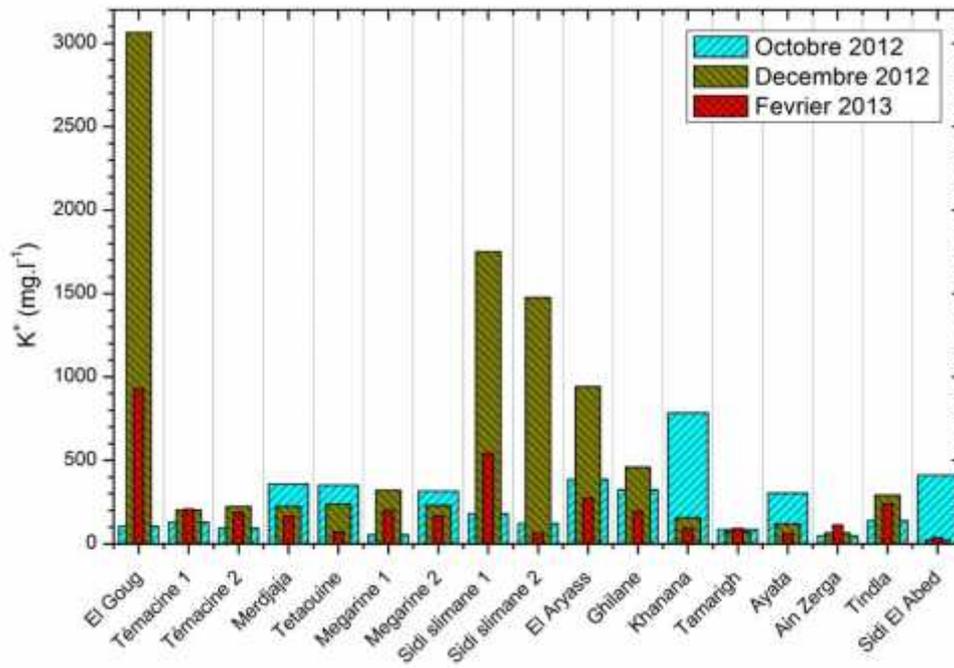


Figure 60. Teneurs en potassium dans les lacs d'Oued Righ

Les teneurs en potassium observées dans les eaux des lacs étudiés dévoilent des valeurs élevées, en dépassant les normes (12 mg.l^{-1}), surtout dans les eaux des lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass, El Ghilane et le lac Tindla en plus.

b. Les anions

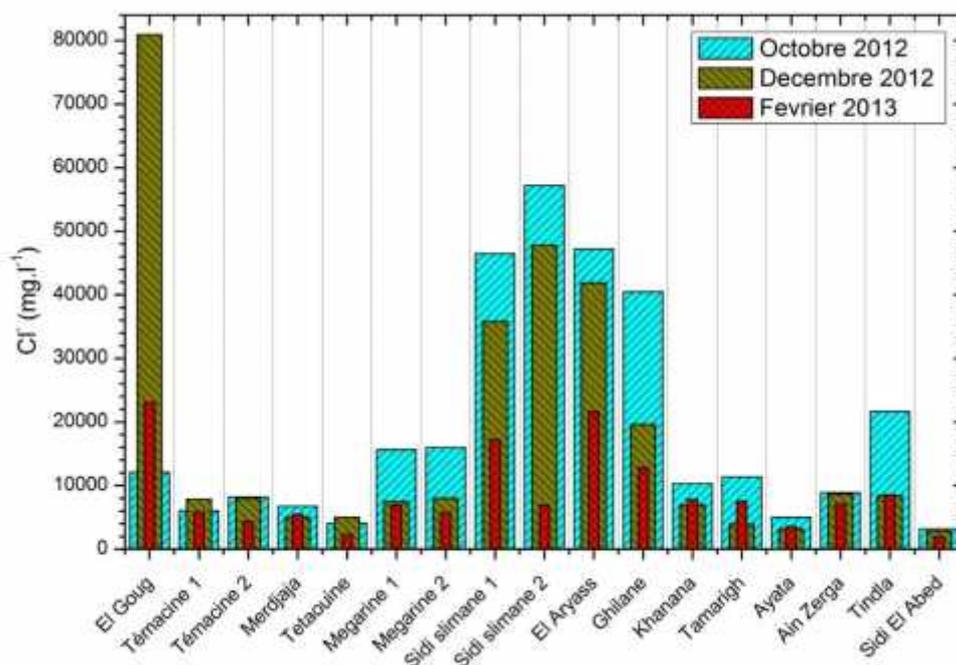
* Chlorure (Cl^-)

Figure 61. Teneurs en chlorure dans les lacs d'Oued Righ

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution de la Halite.

Cet élément montre des amplitudes importantes dans les eaux de différents lacs étudiés et dans toutes les campagnes avec des valeurs dépassant la norme (250 mg.l⁻¹). C'est l'élément le plus dominant dans les anions.

Les lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane prennent les valeurs les plus élevées.

* Sulfates (SO₄²⁻)

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, selon la relation

Les concentrations des sulfates observées dépassent les normes (500 mg.l⁻¹) En effet, Les eaux des lacs étudiés, renferment des concentrations élevées. Ceci montre l'importance des terrains gypsifères dans la concentration des lacs par les sulfates.

On remarque toujours que les lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane enregistrent les valeurs les plus élevées.

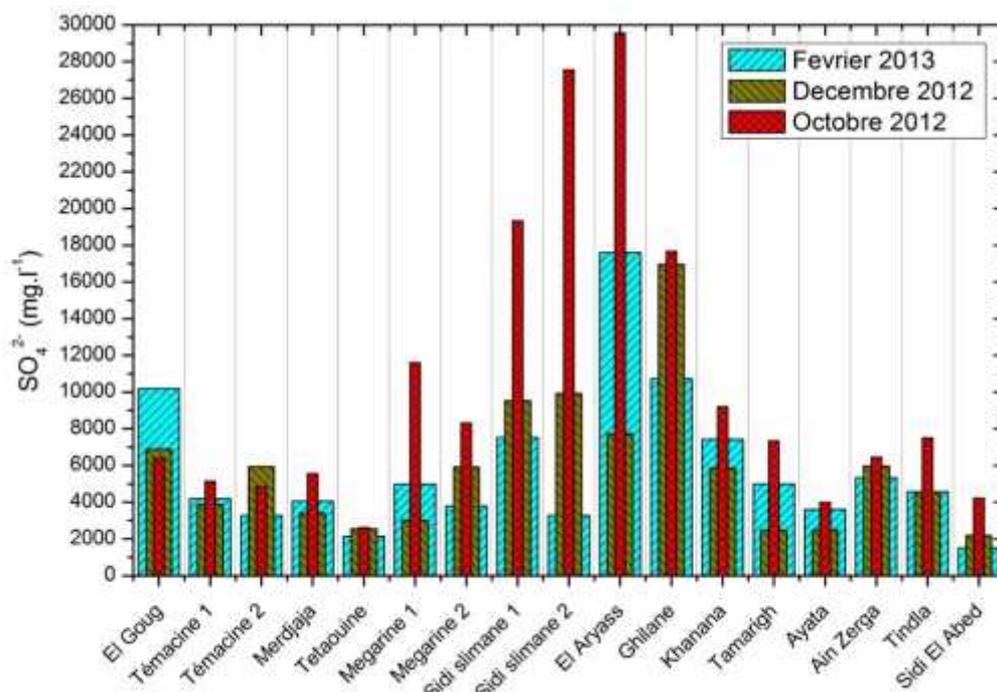


Figure 62. Teneurs en sulfate dans les lacs d'Oued Righ

* Bicarbonates (HCO₃⁻)

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.

Dans l'ensemble des eaux des lacs étudiés, les concentrations en bicarbonates observées dépassent la valeur guide (30 mg.l⁻¹).

Les eaux les plus bicarbonatées sont, évidemment, celles des lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane.

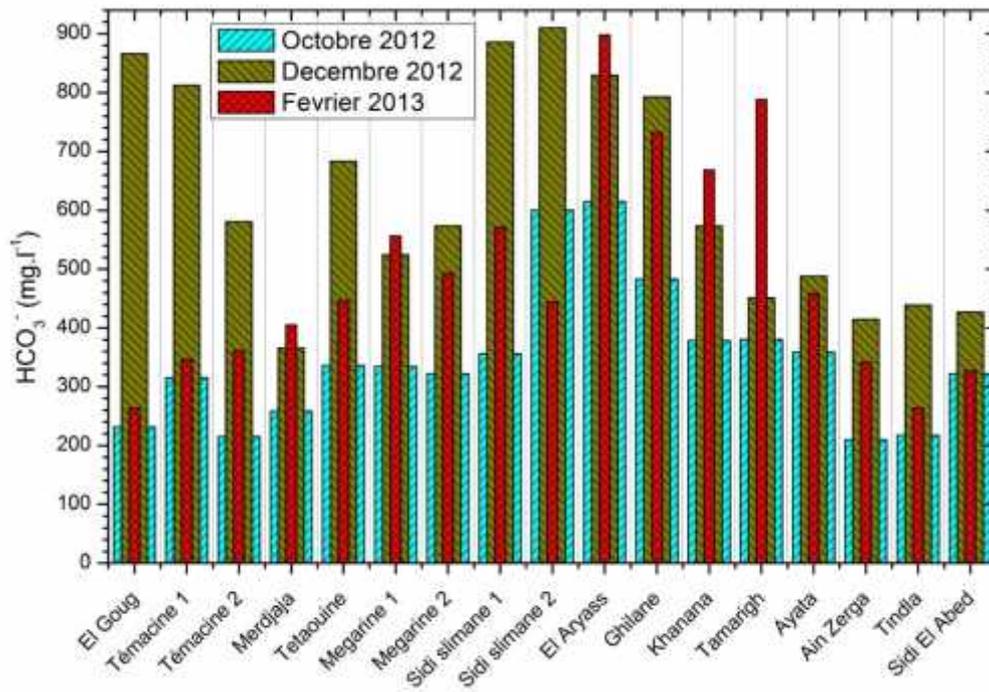


Figure 63. Teneurs en sulfate dans les lacs d'Oued Righ

L'étude des eaux des lacs de l'Oued Righ a montré de teneurs en sels solubles très fortes.

Les chlorures et le sodium et sont les prédominant.

Tous les lacs de la vallée de Oued Righ présentent un faciès chimique des eaux " **chloruré sodique** "

On observe que les lacs d'El-Goug, Sidi Slimane 1 et 2, l'Arayas, Ghilane présentent toujours les concentrations les plus élevées, parce que ce sont des sites fermés(BOUCHAHM et al, 2013) c'est-à-dire ils ne sont alimentés que par la remontée capillaire des eaux par rapport aux autres sites qui ont d'autres sources d'alimentation telle que les eaux de drainage des palmeraies, les eaux du canal (le cas du lac Tindla) ou les eaux usées (le cas du lac Tataouine).

III.6.2.3 Représentation graphique des faciès chimiques

a. Diagramme de Piper

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant 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.

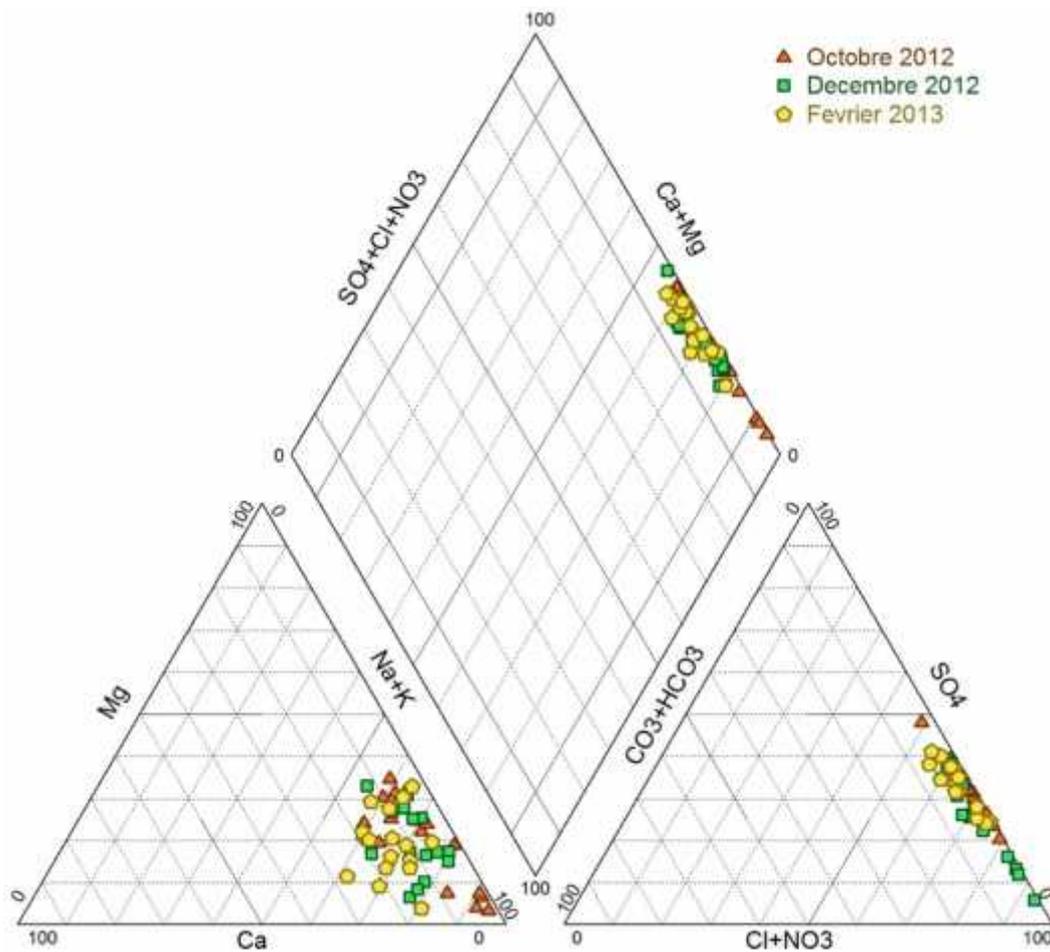


Figure 64. Diagramme de piper des eaux des lacs d'Oued Righ

Les résultats d'analyses hydro-chimiques pour toute la période d'observation ont permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux des lacs de la région de l'Oued Righ. Dans notre cas, les points des eaux représentés sur le diagramme de Piper (Figure 63) montrent un faciès chimique hyper chlorurée sodique. Les teneurs en chlorures 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 chloruré, les chlorures sont dominants par leur origine géologique, précisément à la forte évaporation des eaux.

III.6.2.4 Aptitude des eaux à l'irrigation

a. Diagramme de Richards

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.

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.

D'après le diagramme de Richards, les eaux des lacs étudiés de la région de Oued Righ ont dépassées classes de Richard pour la majorité des points, c'est-à-dire Ces eaux ne convenant pas à l'irrigation, elles ont une salinité exagérée (très élevée) (Figure 65).

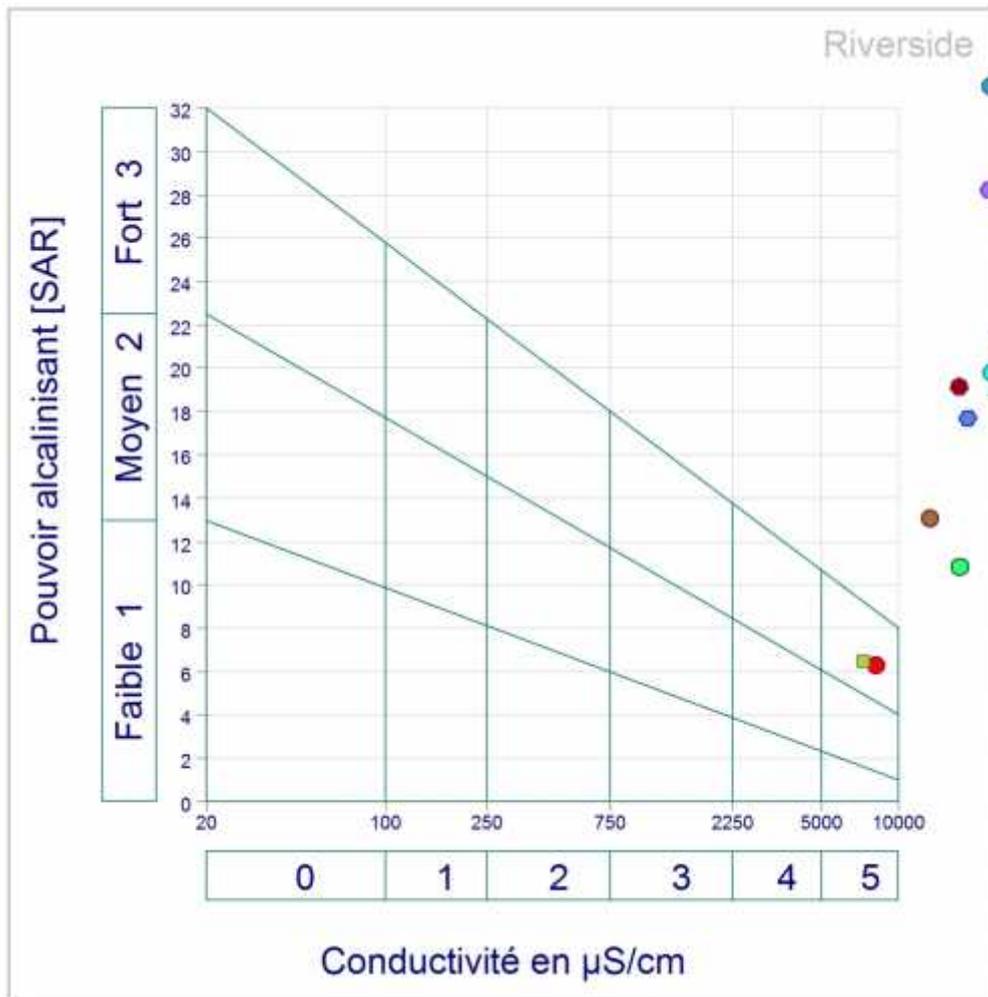


Figure 65. Diagramme de Richards des eaux des lacs étudiés

III.6.2.5 L'oxydo-réduction

a. Formes de l'azote

La forme la plus stable de l'azote est le diazote N_2 , c'est donc une forme très répandue d'azote. Si l'on s'intéresse aux formes de l'azote en solution et en excluant N_2 , les espèces les plus fréquentes sont NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+ et NH_4OH , deux formes ammoniacales (Djidel 2008).

Le diagramme de pourbaix de l'azote (Figure 65) montre que les eaux de la cuvette représentent la forme de l'azote réduit (deux formes ammoniacales NH_4 et NH_4OH). Ce qui indique que les eaux représentent un milieu réducteur.

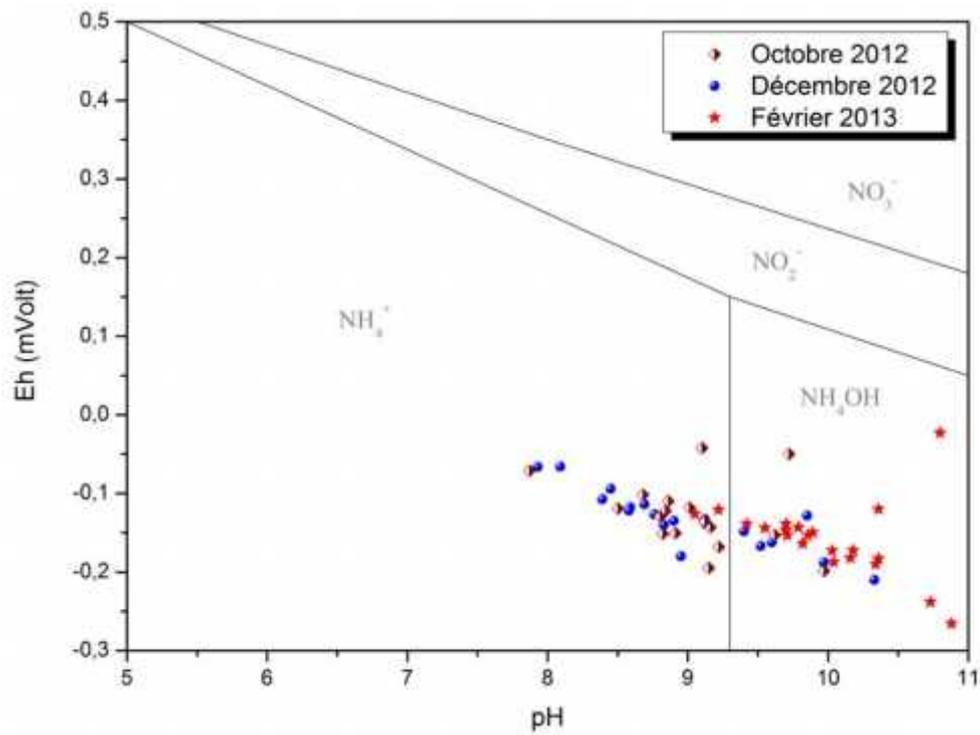


Figure 66. Diagramme Eh-pH des formes de l'azote

b. Formes du soufre

Le diagramme des principales formes du soufre a été représenté ici.

Le Soufre VI (SO_4^- et HSO_4^-) domine en conditions oxydantes (Djidel 2008).

Le passage Soufre VI/ Soufre -II se situe dans des niveaux très bas de potentiel redox.

Le diagramme de pourbaix du soufre (Figure 66) montre que les eaux des lacs d'Oued Righ représentent la forme du soufre IV (SO_4^-) qui domine en conditions oxydantes.

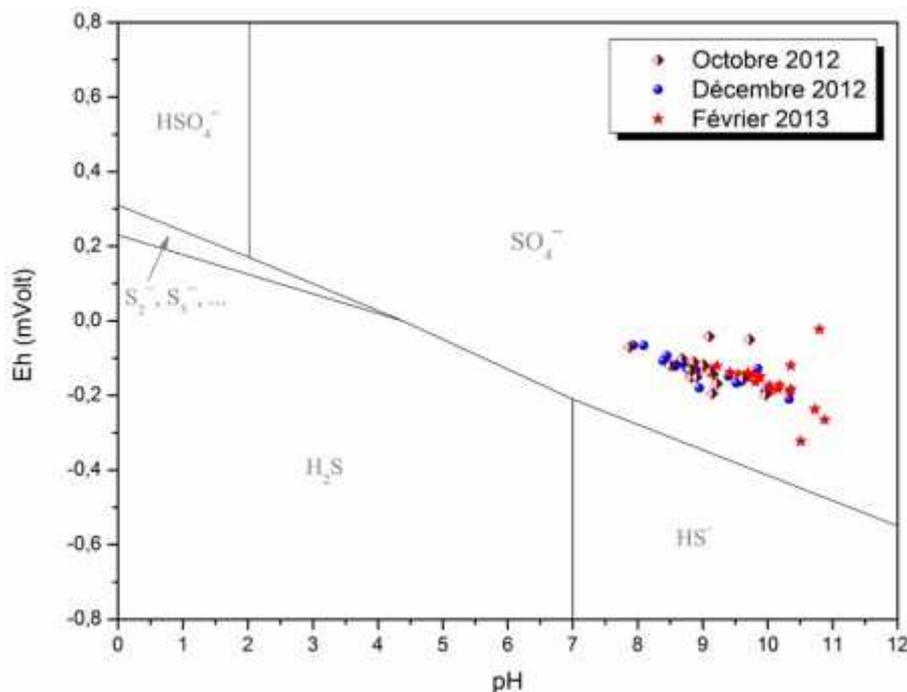


Figure 67. Diagramme Eh-pH des formes du soufre

C. Formes du carbone

En conditions oxydantes, les formes prédominantes du carbone inorganique sont : CO_2 aqueux (soit pour partie H_2CO_3), HCO_3^- qui est l'espèce habituellement dominante de l'alcalinité carbonatée si l'on considère ses formes libres ou complexes, et CO_3^{2-} qui ne devient prédominante que dans les eaux ultrabasiques, c'est à dire dans les faciès carbonatés sodiques salés. Ces trois formes occupent un vaste domaine de conditions pH/Eh.

En conditions très réductrices, le méthane CH_4 devient la forme dominante (Djidel 2008).

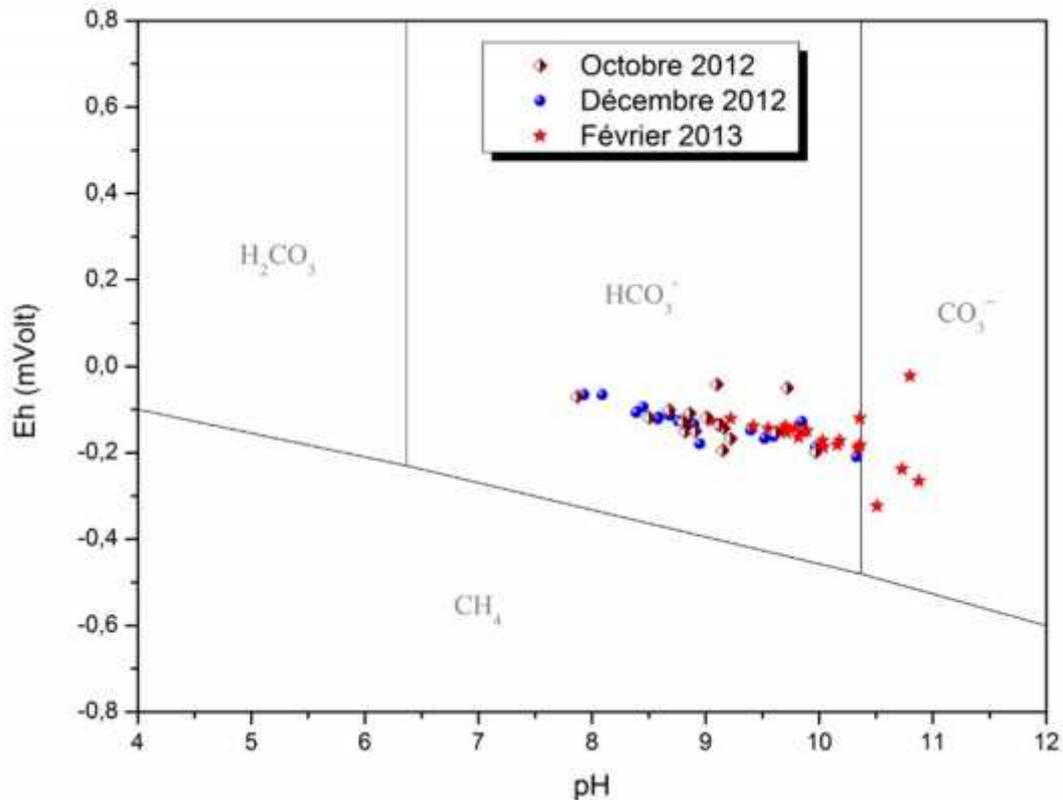


Figure 68. Diagramme Eh-pH des formes du carbone

Les formes du carbone (Figure 67) montrent que les eaux de différents lacs étudiés représentent en majorité la forme bicarbonatée HCO_3^- (l'espèce dominante de l'alcalinité carbonatée).

Ce qui indique que les eaux représentent un milieu oxydant pour le carbone.

e. Formes du chlore

Ce diagramme permet de discuter, pour toute valeur de pH et de potentiel électrochimique, de la stabilité relative des espèces chlorées en solution aqueuse. L'idée est de diviser le plan (Eh, pH) en zones où une espèce prédomine sur les autres.

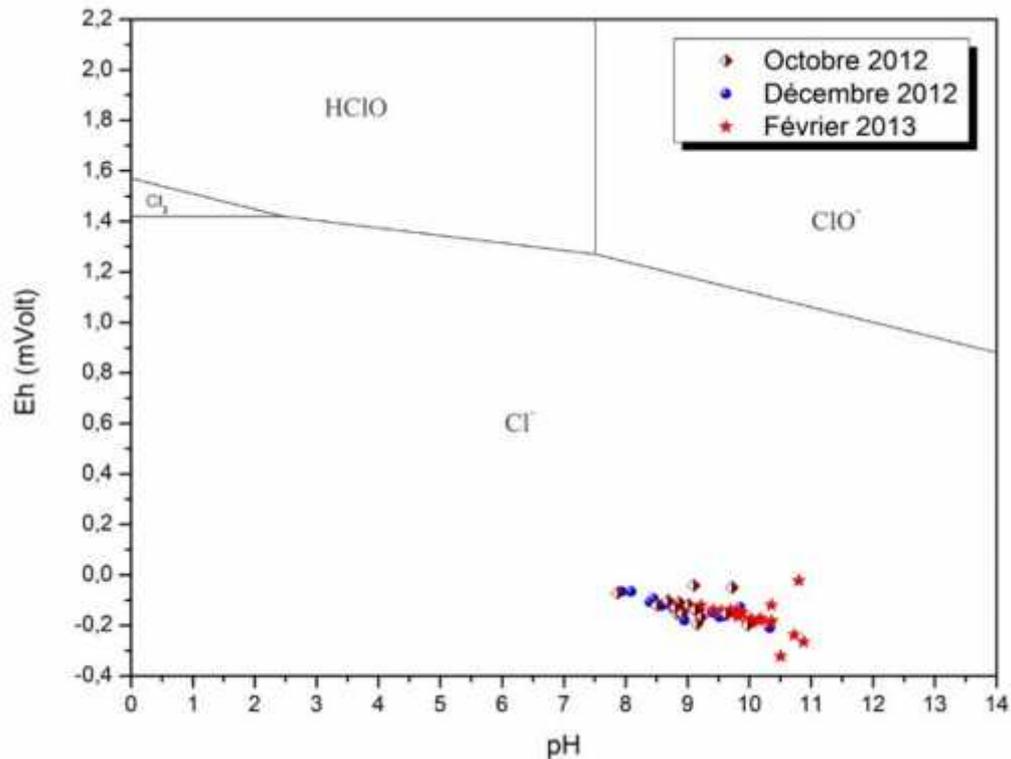


Figure 69. Diagramme Eh-pH des formes du chlore

On remarque en premier lieu que les composés Cl_2 , HClO et ClO^- sont des oxydants très puissants quel que soit le pH. Leurs domaines d'existence sont au-dessus de celui de l'eau, cela signifie donc que, d'un point de vue thermodynamique, Cl_2 , HClO et ClO^- sont capables d'oxyder l'eau, ce qui entraînerait un dégagement de dioxygène O_2 (Djidel 2008).

Dès que le milieu n'est plus très acide, Cl_2 se dismute en HClO et Cl^- pour les pH inférieurs à 7,5 et en ClO^- et Cl^- pour les pH supérieurs à 7,5. Les formes du chlore (Figure 68) montrent que les eaux des lacs d'Oued Righ représentent la forme Cl^- (la forme stable du chlore en solution aqueuse).

Ce qui indique que les eaux représentent un milieu réducteur pour le chlore.

III.6.2.6 Géochimie de la vallée d'Oued Righ

a. Diagramme d'équilibre des eaux

*Équilibre des eaux avec la calcite

Le calcul de l'activité chimique des espèces aqueuses permet de tracer le diagramme d'équilibre entre les eaux de différents lacs et la calcite (figure 69).

Les résultats montrent que les eaux des lacs sont situées au voisinage de l'équilibre thermodynamique avec la calcite. Ce résultat est cohérent avec la présence générale de ce minéral sur l'ensemble de la zone étudiée.

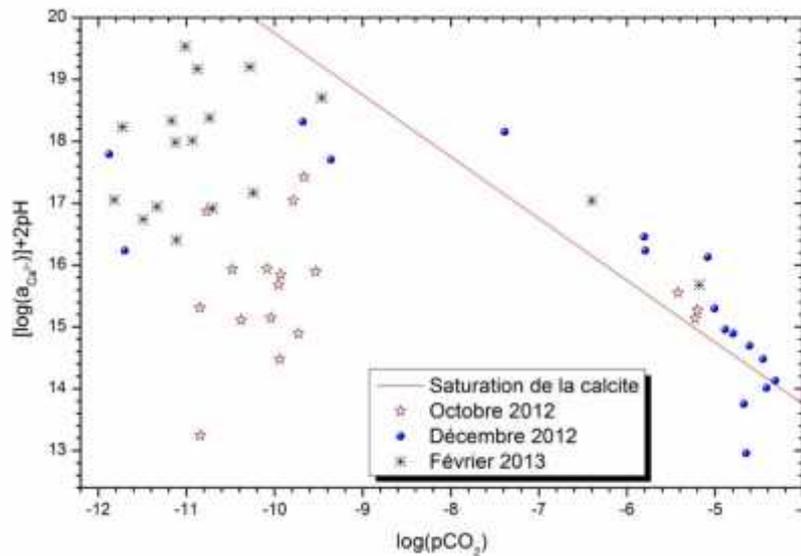


Figure 70. Diagramme d'équilibre des eaux des lacs avec la calcite

***Equilibre avec les minéraux sulfatés et chlorurés**

Les eaux atteignent pour la plupart l'équilibre avec le gypse, sauf une partie des solutions du mois de Décembre (dilution). Les solutions les plus concentrées (lacs fermés) s'approchent de l'équilibre avec la halite et la sylbite qui semble ne pas être atteint dans les eaux de différents lacs.

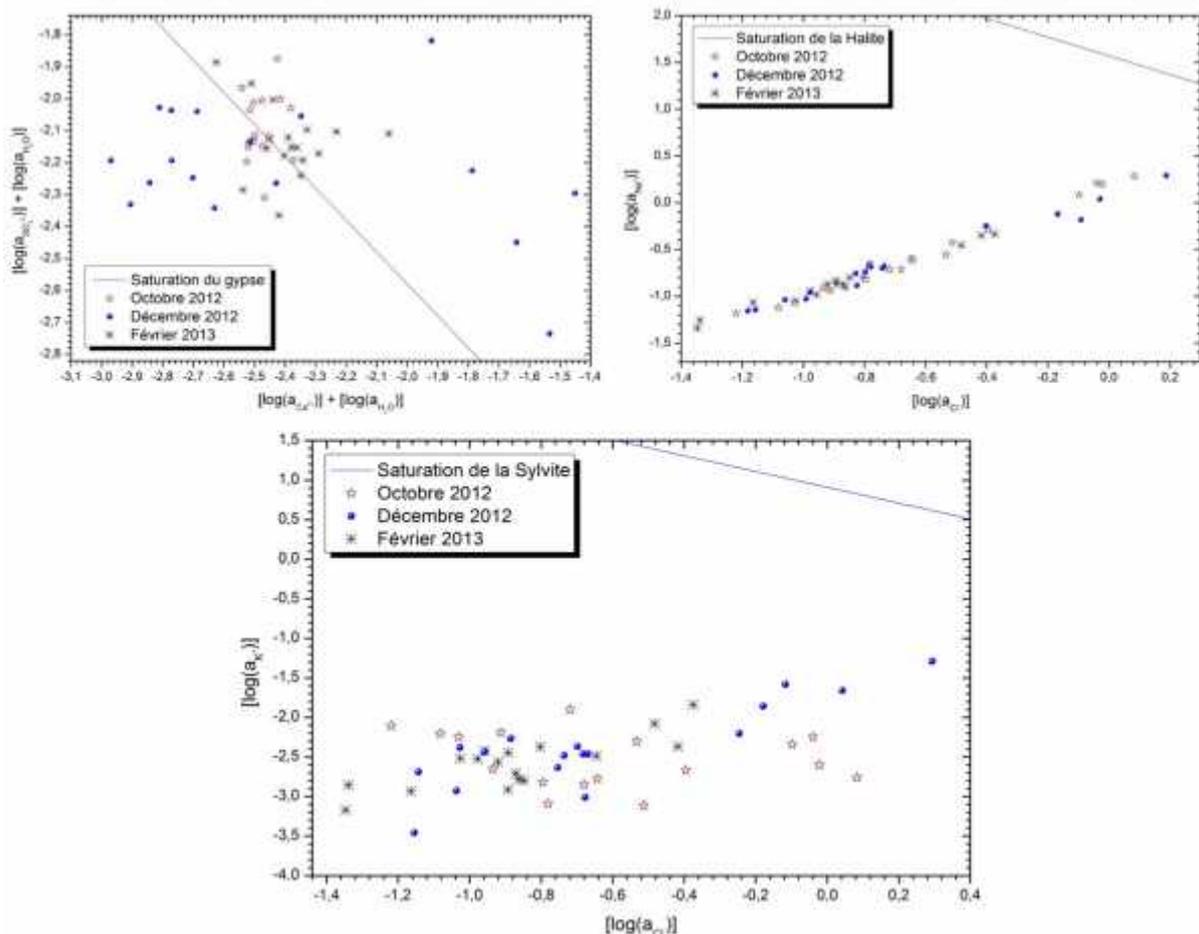


Figure 71. Relation entre log (Ion Activity) des minéraux sulfatés et chlorurés

b. Diagrammes de concentration

L'équilibre avec la halite est presque atteint pour quelques échantillons les plus concentrés, le chlorure peut être considéré comme l'élément majeur le plus conservatif. Cet élément a été utilisé pour estimer un facteur de concentration (FC) comme rapport entre la teneur en chlorure de la solution et la teneur minimale observée dans la série d'échantillons (Valles et al, 1987).

La minéralité des eaux dépend principalement de la concentration des eaux sous l'effet évaporant du climat, processus qui affecte les eaux de ces lacs.

Les chemins d'évolutions des caractéristiques chimiques sont dans l'ensemble similaires (Figure 71). Dans les eaux diluées, la molalité en sodium augmente moins vite que celle du chlorure. Ce processus devient négligeable qui diminue la quantité de sodium dissous devient négligeable par rapport au stock dissous des eaux concentrées et l'évolution des teneurs en chlorure et en sodium devient alors identique.

L'alcalinité des solutions étant inférieure en moles de charges de calcium dissous. L'alcalinité résiduelle calcite est de ce fait négative et lorsque les eaux se concentrent, la teneur en calcium augmente alors que l'alcalinité est stable.

Avec la précipitation du gypse, l'alcalinité résiduelle calcite + gypse est positive (i.e. $SO_4 + \text{alcalinité} > Ca$ en moles de charges). La teneur en sulfate augmente alors que celle du calcium se stabilise, ce qui revient à considérer que l'activité chimique du calcium diminue qu'avec l'augmentation de force ionique. La précipitation successive de calcite et de gypse conduit à une augmentation du rapport Mg/Ca lorsque la salinité des eaux augmente.

L'étape suivante est la précipitation de sulfates de sodium (mirabilite) et sulfates de magnésium (hexahydrate) ou de sulfates mixtes (bloedite), notamment en période hivernale pendant laquelle le sulfate de sodium est moins soluble.

La précipitation partielle de halite intervient dans les eaux les plus concentrées, c'est-à-dire dans les saumures. Tous ces processus ont été décrits par Valles et al (1987).

Toutefois, autour de ces variations générales des éléments dissous, une certaine variabilité paraît autour des tendances générales précédemment décrites.

On peut conclure que les concentrations en éléments majeurs étaient régies par une interaction entre de nombreux facteurs et mécanismes de nature très diverses.

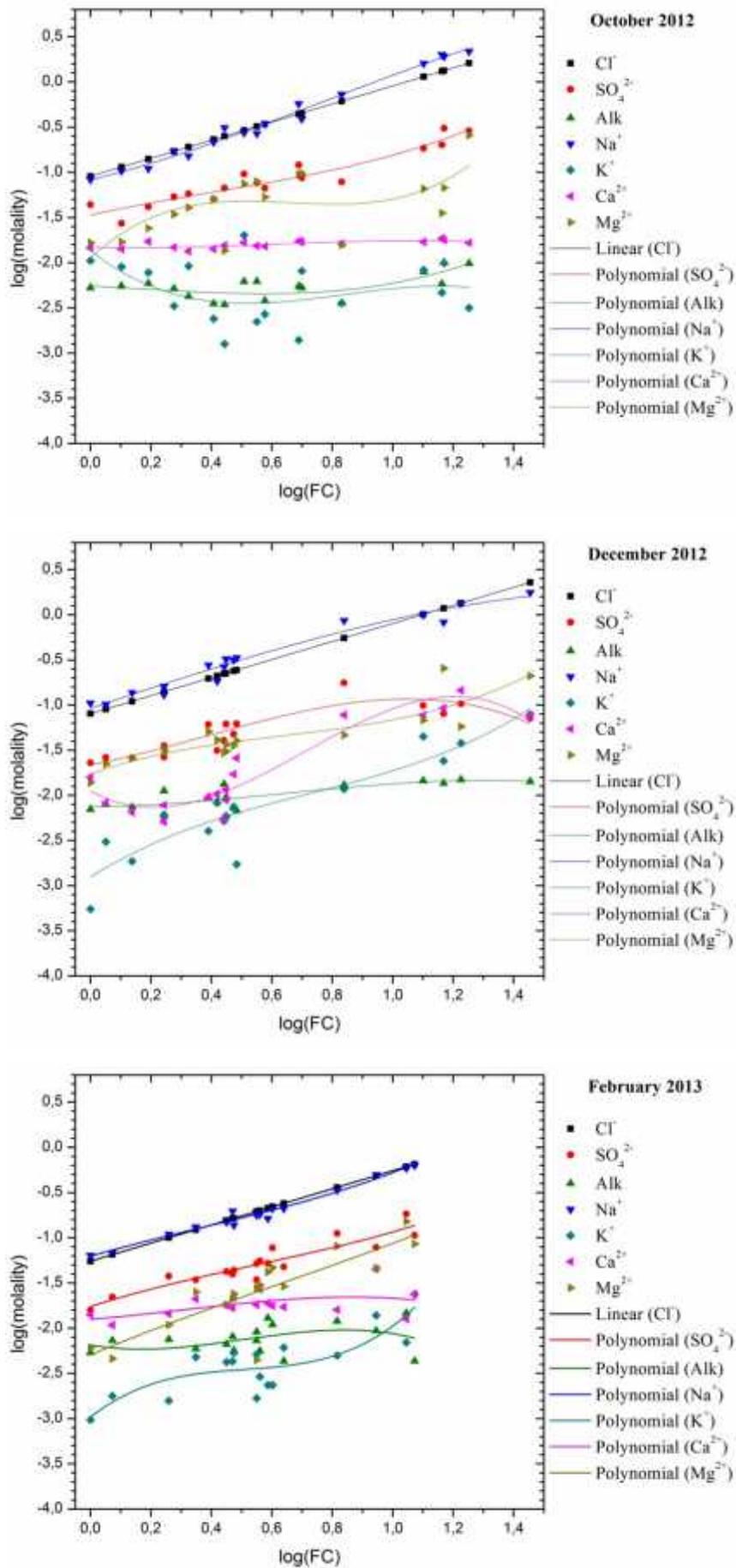


Figure 72. Diagramme de concentration

Le caractère aride du climat induit une forte concentration des eaux des lacs, provoquant la formation de solutions de type saumures. Les mécanismes physico-chimiques qui en résultent sont les échanges ioniques sodium/calcium, les précipitations successives de calcite, gypse, sylvite et halite.

Ainsi, les mécanismes responsables de la variabilité de la composition chimique des eaux sont nombreux, de nature et d'intensité très variable. Ils sont parfois intriqués par exemple pour les équilibres carbonatés, la pression partielle en CO₂ étant influencée par l'activité biologique, par la température et la profondeur qui sont par ailleurs corrélées entre elles.

c. La dissolution / précipitation

* Les carbonates

L'indice de saturation des carbonates au niveau des eaux de surface (Figure 72) sont tous sursaturés dans toutes les campagnes d'analyses cela est due à la concentration élevée en bicarbonates ainsi que le degré de solubilité très faible dans l'eau pure (de l'ordre de 15 à 20 mg·L⁻¹ à 25 °C)

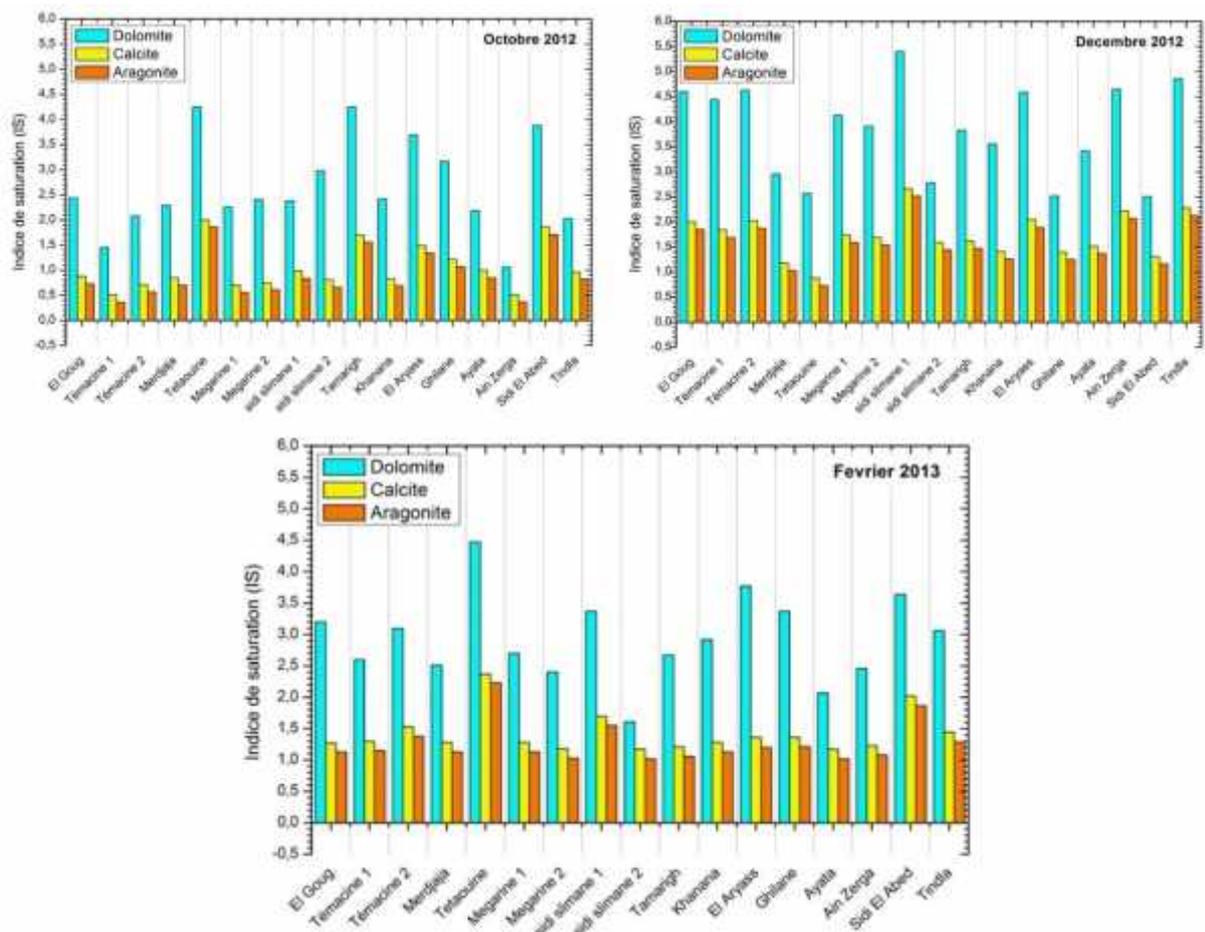


Figure 73. Indice de saturation des carbonates

* Les sulfates

L'indice de saturation (Figure 74) montre que les gypses et l'anhydrite sont proches de l'équilibre dans les eaux de différents lacs étudiés.

On note qu'au niveau des lacs : El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane, les gypses et l'anhydrite sont généralement saturés. Cela est lié à la forte concentration, puisque ces lacs sont des sites fermés loin de toute source d'alimentation sauf la remonté de la nappe superficielle.

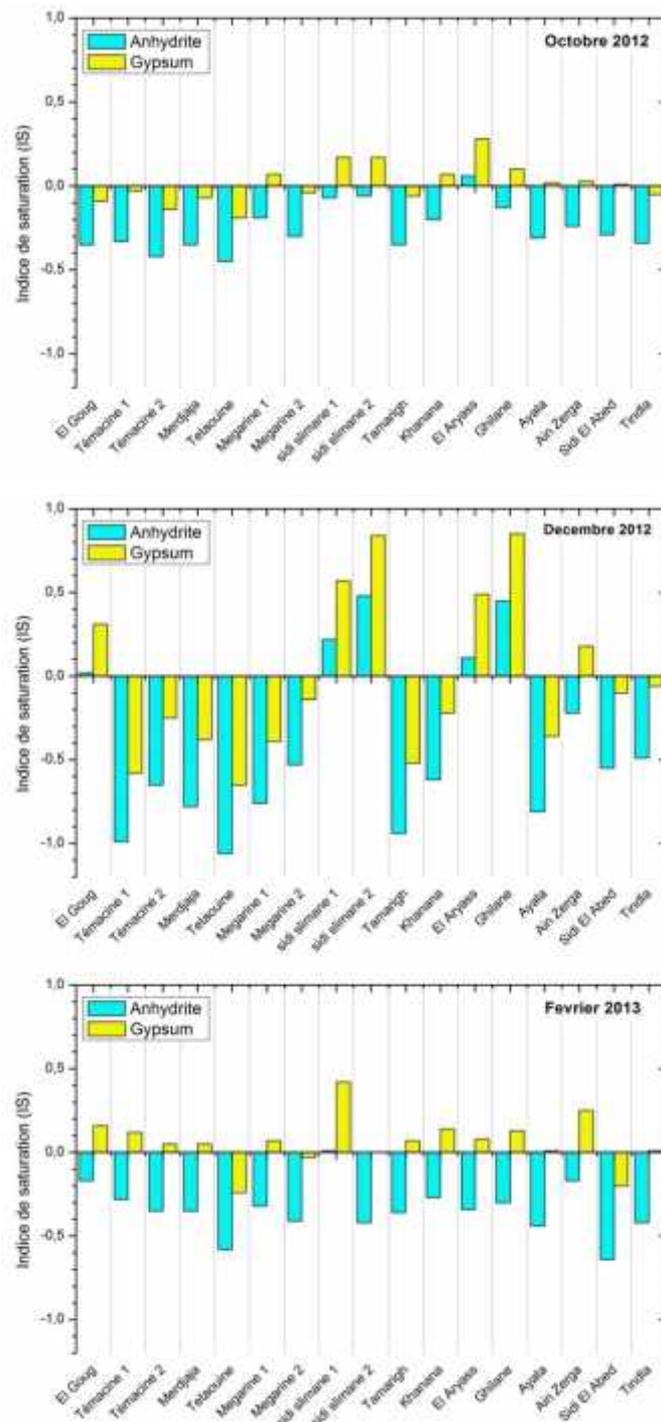


Figure 74. Indice de saturation des sulfates

*** Les chlorures**

L'indice de saturation (Figure 74) montre que les deux minéraux sont sous-saturés.

Au niveau des lacs El Goug, Sidi slimane1, Sidi slimane2, El aryass et El Ghilane, la halite et le sylvite sont proche de l'équilibre. Cela est lié à l'évaporation qui rend l'eau trop salée jusqu'à la saturation (sites fermés)

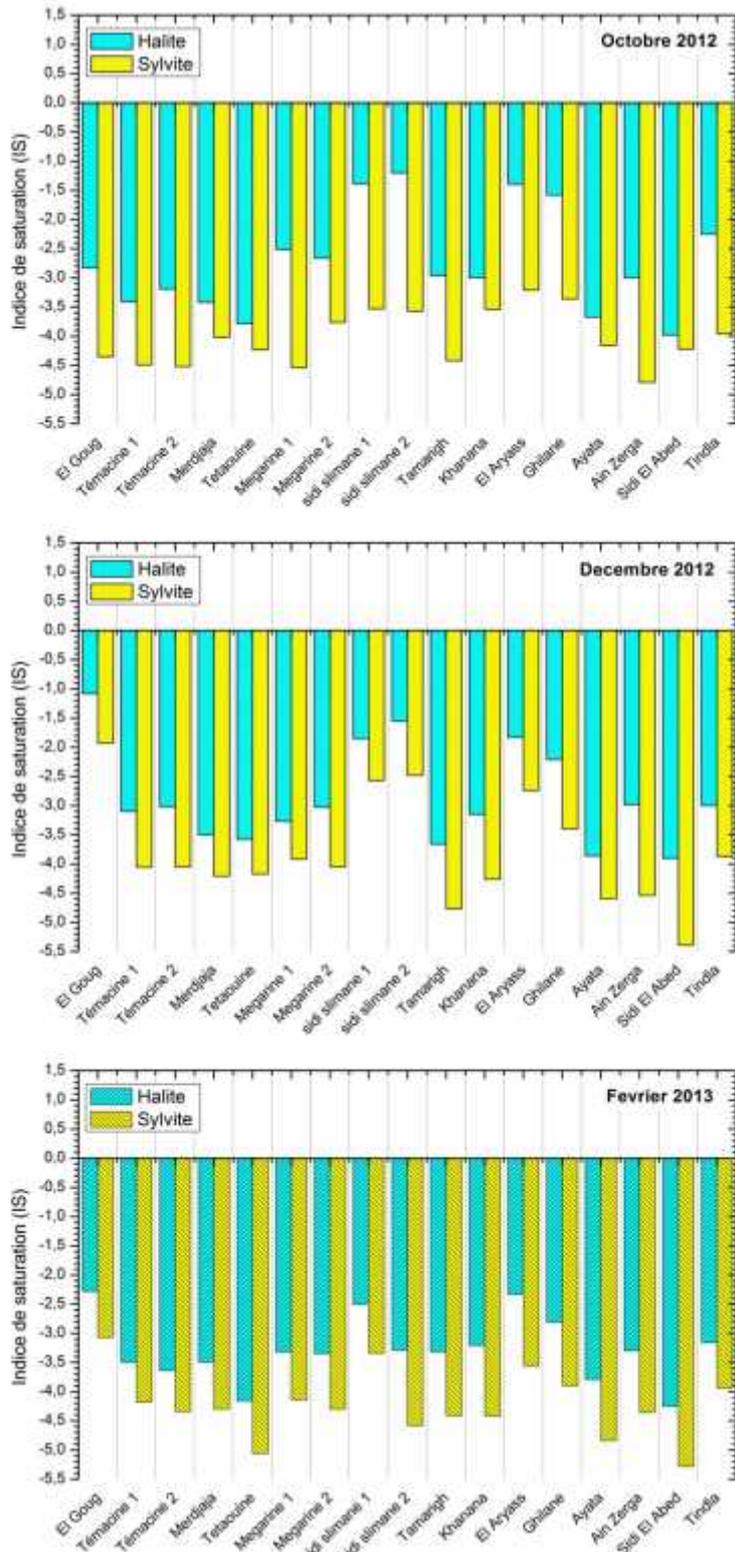
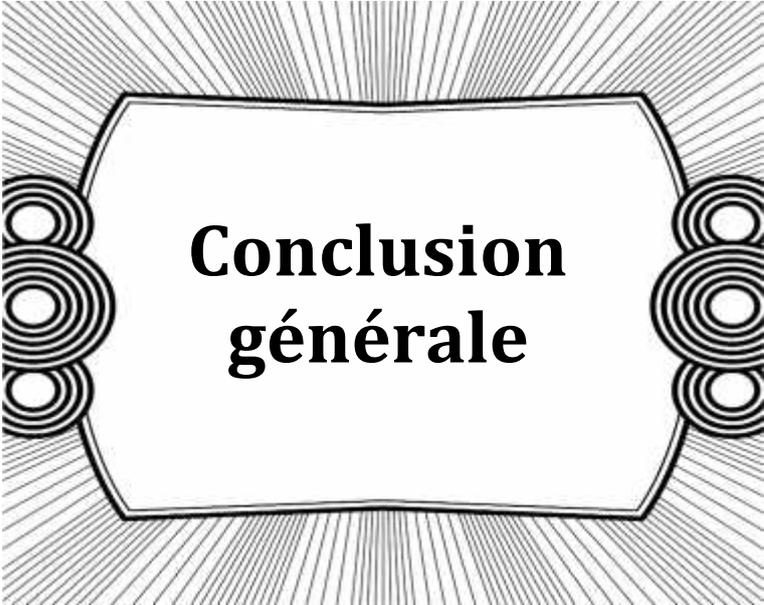


Figure 75. Indice de saturation des chlorures

III.6.3 Conclusion

On peut conclure que le chimisme des eaux est influencé par les conditions climatiques sévères. Le caractère aride du climat induit une forte concentration des eaux des lacs, provoquant la formation de solutions de type saumures. Ces concentrations de différents éléments sont apparues beaucoup plus dans des sites fermés. Tous les éléments majeurs dépassent largement les normes déterminant un faciès chloruré sodique pour toutes les eaux soit de la cuvette d'Ouargla ou bien les différents lacs d'Oued Righ et donnant une salinité très élevée qui rend ces eaux inconvenables pour l'irrigation.

Le caractère aride du climat induit une forte concentration des eaux des lacs, provoquant la formation de solutions de type saumures. Les mécanismes physico-chimiques qui en résultent sont les échanges ioniques sodium/calcium, les précipitations successives de calcite, gypse, et partiellement la sylvite et halite.



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

La cuvette d'Ouargla et la vallée d'Oued Righ, renferment plusieurs zones humides d'importance internationale. Sur le plan climatique, cette zone s'inscrit dans le domaine aride, caractérisée par une température importante, un apport des pluies et humidité faibles et des vents fréquents. Ces conditions influent directement sur l'évaporation des eaux. Ils constituent un facteur influant directement ou indirectement sur le fonctionnement de ces écosystèmes.

Les zones humides représentent les meilleurs exemples d'écosystème du point de vue de leurs fonctions biologiques : productivité biologique, habitat et richesse écologique pour les espèces animale et végétale, leur fonctions écologiques et hydrologiques et de leur importance socio-économique. Les Sebkhass et les chotts sont des écosystèmes fragiles, soumis à des conditions sévères.

L'étude effectuée a montré que la qualité des eaux de ces zones humides est influencée par des facteurs climatiques (évaporation, température) et les effets anthropiques (utilisées comme exutoire pour évacuation des eaux usées et les eaux de drainage et les déchets urbains et domestiques).

Les eaux sont troubles, très salées avec une conductivité électrique élevée. Le pH est généralement alcalin. Les eaux sont très chargées en sel solubles (chlorures, sulfates, sodium, magnésium...etc.) avec un faciès chloruré sodique.

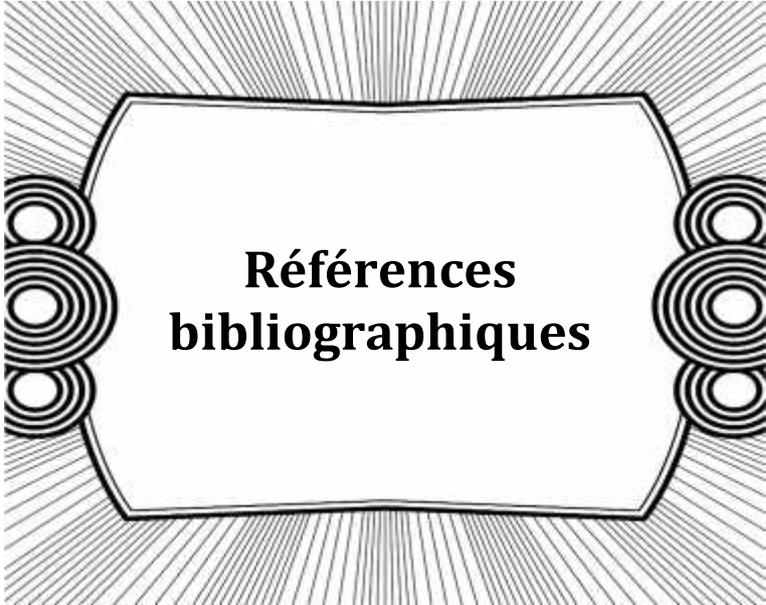
L'étude de l'évolution des zones humides fait ressortir que :

- Les conditions climatiques ont une influence importante sur les changements des zones humides.
- Les facteurs anthropiques n'influent que sur des sites bien déterminés. Cet effet local est lié aux différents endroits des sources d'alimentation de la nappe superficielle.

La protection de ces écosystèmes sensibles contre la pollution est une nécessité pour sa préservation et sa durabilité. Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence : Il faut :

- Face à la situation actuelle de ces zones humides, il est nécessaire de préparer un plan d'action urgent de sauvegarde et de reconquête de ces zones humides.

- Assurer une exploitation rationnelle et une gestion durable, dynamique et participative des zones humides (ressources naturelles).
- Renforcer la lutte contre les activités anthropiques destructrices des ressources biologiques.
- Assurer la conservation des écosystèmes et des espèces menacées et/ou d'importance marquée.
- Faire des publications et des annonces sur la protection ces zones humides contre la pollution.
- Assainir le terrain durant la période d'assèchement, puis le renouvellement du système d'alimentation du chott par la création de canaux d'évacuation à partir de la station d'épuration. Cette méthode très difficile avec les pouvoirs très limités, mais très intéressante pour conserver ces chères écosystèmes.



**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- Al-Droubi A. 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation ; application aux sols salés du Tchad. Sciences géologiques Mémoire, 46. Strasbourg : Université de Louis-Pasteur, Bibliothèque de l'Institut de Géologie.
- Amharref M, Aassine S, Bernoussi A S, et al. 2007. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : application à la Plaine du Gharb (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, 20(2) : 185-199. DOI : 10.7202/015812ar
- Anderson M P. 2005. Heat as a Groundwater Tracer. *Groundwater*, 43(6) : 951-968. DOI : 10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Aumassip G, Dagonne A, Estorges P, et al. 1972. Aperçu sur l'évolution du paysage quaternaire et le peuplement de la région de Ouargla. *Libyca*, XX(1) : 205-257.
- Aumassip G., Dagonne A., Estorges P., Lefebvre-Witier Ph., Mahrour M., Marmier F., Nesson C., Rouvillois-Brigol M. et Trecolle G., (1972), « Aperçu sur l'évolution du paysage quaternaire et le peuplement de la région de Ouargla ». *Libyca A/P/E*, XX, pp 205-257.
- 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.
- Barbiero L, Valles V, Regearg A. 1995. Precipitation of fluorite and geochemical control of calcium in alkaline soils of Niger. Consequences for a quantitative estimate of the evolution of geochemical soil. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 321: 1147-1154.
- Bonnard & Gardel, 2005, Projet de protection de la cuvette d'Ouargla contre la remontée des eaux, études de reconnaissance et rapports internes.
- Bourrié G. 1976. Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. *Science du Sol*, 3: 141-159.
- Burullet P F. 1991. Structures and Tectonics of Tunisia. *Tectonophysics*, 195: 359-369. DOI : 10.1016/0040-1951(91)90221-D
- Busson G., 1971, Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien, Edit., Paris, 464p.
- 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.
- Chidambaram S, Prasanna M V, Karmegam U, et al. 2011. Significance of pCO₂ values in determining Carbonate Chemistry in Groundwater of Pondicherry Region, India. *Frontiers of Earth Science*, 5(2): 197–206. DOI: 10.1007/s11707-011-0170-5

- Chidambaram S, Prasanna M V, Singaraja C, et al., 2012. Study on the Saturation Index of the Carbonates in the Groundwater Using WATEQ4F in Layered Coastal Aquifers of Pondicherry. *Journal of the Geological Society of India*, 80(6) : 813-824. DOI : 10.1007/s12594-012-0210-0
- Chorowicz et Paul Deroin, 1980, *La Télédétection et cartographie géomorphologique et géologique* université Paris- France 223p.
- Congalton R.G., Green K. (2009) - *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- Congalton R.G., Macleod R.D. (1994), « Change detection accuracy assessment on the NOAA Chesapeake Bay Pilot Study”. *Proceedings of the International Symposium on the Spatial Accuracy of Natural Resources Data Bases, ASPRS, Williamsburg, Virginia, 6-20 May*, pp. 78-87.
- Cook P G, Walker G R, Jolly I D. 1989. Spatial Variability of Groundwater Recharge in a Semi-arid Region. *Journal of Hydrology*, 111(1-4): 195-212. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90260-6
- Costa, L.T., Farinha, J.C., Hecker, N. et Tomàs Vives, P., 1996, *Mediterranean Wetland Inventory: A Reference Manual*. MedWet / Instituto da Conservação da Natureza / Wetlands International Publication, Volume I., 102 p.
- Deroin J-P. 2008. Permian and Quaternary playas, a discussion based on Climatic, Tectonic, and Paleogeographic Settings. *Journal of Iberian Geology*, 34(1): 11-28. URL: <http://revistas.ucm.es/index.php/JIGE/article/download/JIGE0808120011A/32754>
- Djidel Mohamed, 2008, *Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie)*. Thèse doctorat Université d’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
- Djili k, Daoud Y, Gaouar A, Beljoudi Z, (2003) « La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l’agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur ». *Sécheresse*. Volume 14. Numéro 4.241-6.
- Dubief J., (1959-1963), *Le climat du Sahara*. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors-série, tome 1 et 2.- ALGER, 275p.
- Edet A E, Preston M R, Worden R H, et al., 2011. Hydrogeochemical processes in a shallow coastal plain sand aquifer and tidal river systems (Calabar, Southeastern Nigeria): tracking wastewater and seawater pollution in ground and river waters. *Environmental Earth Sciences*, 65(7) : 1933–1953.
- El Ayachi B., 1951, *Une journée de réjouissance publique à Ouargla, Mission Sahara n° 5 –Ouargla et sa population*, 12-25 pp.
- Fabre J., 1976, *Introduction à la géologie du Sahara d’Algérie et des régions voisines*, SNED,

- Feth J H. 1981. Chloride in Natural Continental Water. A Review, U. S. Geologic Survey Water Supply Paper 2176, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C. URL: <http://pubs.usgs.gov/wsp/2176/report.pdf>
- François Berné, (1978), « Les traitements des eaux dans l'industrie pétrolière : agressivité et corrosivité ». Publication de l'institut français du pétrole. Technip, pp. 31-58. ISBN 2710802074, 9782710802075.
- Fritz B. 1981. Étude thermodynamique et modélisation des réactions hydrothermales et diagénétiques. Sciences géologiques Mémoire., 65. Strasbourg
- Gac J Y, Al-Droubi A, Paquet H, et al., 1979. Chemical model for origin and distribution of elements in salts and brines during evaporation of waters. Application to some saline lakes of Tibesti, Chad. *Physics and Chemistry of the Earth*, 11: 149-158. DOI : 10.1016/0079-1946(79)90018-1
- Gac J Y. 1980. Géochimie du bassin du lac Tchad. Documents et Travaux de l'O.R.S.T.O.M, 123. URL: http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Tra_d_cm/00039.pdf
- Ghobadi Y., Pradhan B., Kabiri K., Pirasteh S., Shafri H.Z.M. and Sayyad G.A., (2012), "Use of Multi-Temporal Remote Sensing Data and GIS for Wetland Change Monitoring and Degradation", IEEE Colloquium on Humanities, Science & Engineering Research (CHUSER 2012), December 3-4, 2012, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia
- Gunn, S.R. (1998) "Support vector machines for classification and regression". Technical report, university of Southampton, 54 p.
- Hacini, M. (2006). Géochimie des sels et des saumures du chott Merouane et calcule des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques. Thèse de doctorat. Uni-versité Badji Mokhtar, Annaba (Algérie), 184p.
- Hacini, M., Kherici N., Oelkers H.E. (2009). Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake. *Geochimica et Cosmochimica 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.
- Hacini, M., Kherici, N. et Oelkers, E.H. (2010). Le lithium dans les lacs salés des régions désertiques ; cas du chott Merouane Sud-est de l'Algérie; comportement, origine potentiels et perspectives. *Bulletin du service Géologique National*, Vol.21, pp.151-164.
- Hamdi-Aïssa B, Girard M-C. 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Sécheresse*, 11(3) : 179-188. URL:http://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/utilisation_de_la_teledection_en_regions_sahariennes_pour_lanalyse_et_lextrapolation_spatiale_des_pedopaysages_230069/article.phtml
- Humez P, Audigane P, Lions J, et al., 2011. Modeling of CO₂ Leakage up through an Abandoned Well from Deep Saline Aquifer to Shallow Fresh Groundwaters. *Transport in Porous Media*, 90(1) : 153–181. DOI : 10.1007/s11242-011-9801-2

- 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.
- Jamila Ouardi, 2005, dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du tadla marocain par salinisation et sodisation, thèse doctorat Université Cadi Ayyad, 155 p.
- Jean-Louis Ballais, (2010), « Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara algérien », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 4. URL: <http://physio-geo.revues.org/1173>; DOI: 10.4000/physio-geo.1173.
- Keller C, Bourrie G, Vedy J C. 1987. Formes de l'alcalinité dans les eaux gravitaires : Influence des métaux lourds contenus dans des composts. *Science du Sol*, 25(1): 17-29. URL : http://www.afes.fr/afes/sds/SDS_25_1_p17_KELLER.PDF
- Kilham P. 1990. Mechanisms controlling the chemical composition of lakes and rivers: Data from Africa. *Limnology and Oceanography*, 35(1): 80-83. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.4319/lo.1990.35.1.0080/pdf>
- Kouzmine Y., 2005, Les villes sahariennes algériennes et le développement urbain durable ville réelle et ville normative, in *Bulletin de la Société neuchâtoise de Géographie*, n°49, pp.85-103.
- Langbein W B, Dawdy D R. 1964. Occurrence of Dissolved Solids in Surface Waters of the United States; U. S. Geological Survey Professional Paper 501-D; U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.: D115 - D117.
- 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, mém. magister, univ. Ouargla, 140 p.
- Maman Sani ABDOU BABAYE, 2012, Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako – Niger), thèse doctorat Université de Liège, 265 p.
- Meybeck M. 1976. Total Mineral Dissolved Transport by World Major Rivers/Transport en sels dissous des plus grands fleuves mondiaux. *Hydrological Sciences Bulletin*, 21(2): 265-284. DOI: 10.1080/02626667609491631
- Michele Volpi, Devis Tuia, Francesca Bovolo, Mikhail Kanevski and Lorenzo Bruzzone, (2011), Supervised change detection in VHR images using contextual information and support vector machines. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, doi:10.1016/j.jag.2011.10.013
- Mohamed E A, El-Kammar A M, Yehia M M, et al., 2015. Hydrochemical evolution of inland lakes' water: A study of major element geochemistry in the Wadi El Raiyan depression, Egypt. *Journal of Advanced Research.*, 2: DOI: 10.1016/j.jare.2014.12.008
- N.Bouchahm, W.Chaib, A.Drouiche, F.Zahi, W.Hamzaoui, N.Salemkou, F.Fekraoui et L.Djabri, 2013, caractérisation et cartographie des sites de remontée dans la région de l'oued Righ (bas sahara algérien), *Journal Algérien des Régions Arides*, N° Spécial 2013.

- Nezli, I E., Achour, S, Djidel, M, 2009. Presence and Origin of Fluoride in the Complex Terminal Water of Ouargla Basin (Northern Sahara of Algeria). *American Journal of Applied Sciences*, 6(5): 876-881. DOI : 10.3844/ajassp.2009.876.881
- Nezli. IE., 2009, Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla) thèse doctorat Université d' Ouargla,
- O'Connor, D J. 1967. The temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in streams. *Water Resources Research*, 3(1): 65-79. DOI: 10.1029/WR003i001p00065
- Olivia Darcheville, 2008, rôles des composantes géochimiques et microbiologiques d'un sol sur le comportement du sélénium en conditions oxygènes et anoxiques, thèse doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 251 p.
- Omosuyi G O, Osehale A. 2012. Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifers using geoelectric and hydrogeologic parameters in Odigbo, Southwestern Nigeria. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 3(6): 501-512. DOI: 10.5251/ajsir.2012.3.6.501.512
- Peters N E. 1984. Evaluation of Environmental Factors Affecting Yields of Major Dissolved Ions of Streams in the United States. U. S. Geological Survey Water Supply Paper 2228; U. S. Government Printing Office, Alexandria, VA. URL: <http://pubs.usgs.gov/wsp/2228/report.pdf>
- Phillips K N, Van Denburgh A S. 1971. Hydrology and Geochemistry of Abert, Summer and Goose Lakes, and Other Closed-Basin Lakes in South-Central Oregon; U. S. Geological Survey Professional Paper 502-B; U. S. Government Printing Office, Washington D. C. URL: <http://pubs.usgs.gov/pp/0502b/report.pdf>
- Pony O., Descombes X. et Zerubia J., 2000, Classification d'images satellitaires hyperspectrales en zone rurale et périurbaine, ISRN INRIA/RR-4008-FR. ISSN 0249 6399.
- Ribolzi O, Valles V, Barbiero L. 1993. Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. *Argument d'équilibre et argument de bilan. Science du Sol*, 31(1/2): 77-95. URL : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_43-44/010004180.pdf
- Rodier J, Bazin C, Broutin J-P, et al., 1996. L'Analyse de l'eau - eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^e édition, Paris : Éditeurs Dunod.
- Rouvillois-Brigol M. (1975). Le pays d'Ouargla (Sahara Algérienne). Edition département géographique. Paris. Sorbonne, p390.
- Ruan R., Zhang Y., Zhou Y., (2008), Change detection of wetland in hongze lake using a time series of remotely sensed imagery, the international archives of the photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.
- Scatchard G. 1936. Concentrated Solutions of Strong Electrolytes. *Chemical Reviews*, 19(3): 309-327. DOI:10.1021/cr60064a008. URL:<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr60064a008>
- Schneider R. 1964. Relation of Temperature Distribution to Ground-Water Movement in Carbonate Rocks of Central Israel. *Geological Society of America Bulletin*, 75(3): 209-216 DOI: 10.1130/0016-7606(1964)75[209:ROTDGTG]2.0.CO;2

- Sheikh Saeed Ahmad and Summra Erum, (2012), Remote sensing and GIS application in wetland change analysis: case study of KallarKahar, *Sci., Tech. and Dev.*, 31 (3): 251-259, 2012
- Teferi E., Uhlenbrook S., Bewket W., Wenninger J., and Simane B., (2010), The use of remote sensing to quantify wetland loss in the Choke Mountain range, Upper Blue Nile basin, Ethiopia, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2415–2428, 2010, www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/2415/2010/, doi: 10.5194/hess-14-2415-2010.
- Tong S. and Koller D., 2001, Support Vector Machine active learning with applications to text classification. *Journal of Machine Learning Research*, pp 45-66.
- Université de Louis-Pasteur, Bibliothèque de l'Institut de Géologie.
- Valles V, Cockborne A M. 1992. Élaboration 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.
- Valles V, Rezagui M, Auque L, et al., 1997. Geochemistry of saline soils in two arid zones of the Mediterranean Basin. 1. Geochemistry of the chott melghir-mehrouane watershed in Algeria. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11(1): 71-84. DOI : 10.1080/15324989709381460
- Valles V. 1987. Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux : Application au calcul des doses d'irrigation. *Sciences géologiques Mémoire*, 79. Strasbourg : Université de Louis-Pasteur, Bibliothèque de l'Institut de Géologie.
- 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.
- Zeddouri Aziez, 2010, caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des nappes du complexe terminal de la région de Ouargla (sud-est algerien), thèse doctorat Université d' Ouargla, 170 p.