République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Kasdi Merbah Ouargla

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

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Laboratoire de Géologie du Sahara

Thèse

en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT ES SCIENCES

Spécialité « Géologie »

Présentée par

Mr. **Abdelaziz BELLAOUEUR**

Contribution à l'étude des indices de dégradation et de quelques Éléments traces dans les écosystèmes lacustres chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien

Soutenue le 08 Octobre 2017 devant le jury composé de :

Mohammed DJIDEL	Président	Professeur	Université de Ouargla
Messaoud HACINI	Directeur de thèse	Professeur	Université de Ouargla
Mohammed CHETIH	Examinateur	Professeur	Université de Laghouat
Nafaa BRINIS	Examinateur	M. de Conf	Université de Batna

Thèse

en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT ES SCIENCES

Spécialité « Géologie »

Présentée par

Mr. **Abdelaziz BELLAOUEUR**

Contribution à l'étude des indices de dégradation et de quelques Éléments traces dans les écosystèmes lacustres chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien

Soutenue le 08 Octobre 2017

À tous ceux

Qui penchent sur le

Développement des sciences,

Je dédie ce travail

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements de reconnaissance au Prof. Messaoud HACINI pour m'avoir proposé cette recherche et pour son aide tout au long de ce travail. Merci Professeur.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur Mohammed DJIDEL, Professeur à l'université de Ouargla pour avoir accepté de juger ce travail et me faire l'honneur de présider mon Jury de thèse.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Messieurs Nafaa BRINIS, Maitre de Conférences à l'université de Batna et Mohammed CHETIH, Professeur à l'université de Laghouat pour avoir accepté d'examiner mon travail et de s'être déplacé pour faire partie du Jury de cette thèse.

Résumé

Les saumures, dans les écosystèmes lacustres chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien, sont des solutions fortement concentrés en sels minéraux avec une salinité qui dépasse largement celle des eaux des mers (120 à 440g/l). Pour déterminer l'état de saturation de ces saumures vis-à-vis de principales espèces chimiques, on utilise le modèle thermodynamique PHREEQC v3. La première interprétation des données, permet de spécifier le faciès chimique principalement chloruré sodique. En effet, on utilise ce modèle thermodynamique pour calculer l'équilibre minéraux/solution sous différentes hypothèses. Le test de ces différentes hypothèses montre que chacune a ses limites dans la simulation des comportements thermodynamiques des saumures.

L'analyse chimique a permis de mettre en relief le degré élevé de pollution de ces saumures par certains Eléments Traces (ET), notamment Sr, Cu, Zn et Ti. Les teneurs moyennes sont respectivement de l'ordre de 22,5 ; 2,9 ; 2,3 et 0,6 mg/l. Pour les sels solides, les teneurs moyennes sont de l'ordre de 31mg/l (de Sr), 1,8mg/l (de Cu) et 0,6mg/l (de Ti). Ces résultats sont approfondis par l'analyse d'images ponctuelles au MEB. Ce sont essentiellement les silicates, les sulfates et les oxydes qui constituent l'origine de ces ET, avec prédominance des minéraux évaporitiques et argileux.

La pratique encore répandue du "tout à l'égout", maitre en évidence l'impact environnemental des rejets d'eaux usées sur ces écosystèmes lacustres. 0,01 à 6768mg/l charge en matière minérale exprimée en terme de nitrates a été enregistrée. En termes de phosphate, elle est de l'ordre de 0,2 à 9mg/l. La charge en matière organique exprimée en termes de DCO, DBO_5 et MES, elle est respectivement de 82 à 340mg/l, de 28 à 123mg/l, et de 67 à 149mg/l.

L'examen de ces résultats et les rapports (DCO/DBO_5 >3) soulignent très bien les indices de dégradation des saumures et le caractère insatisfaisant de biodégradabilité des rejets d'eaux usées dans ces écosystèmes lacustres.

Mots clés : Saumure, Modèle thermodynamique, Eléments Traces, Indice de dégradation, Ecosystème lacustre, Chott, Sebkha, Bas Sahara.

Abstract

The Brines of chotts in Algerian Lower Sahara are highly concentrated solutions of mineral salts with a salinity that far exceeds that of the sea water (120 to 440g/l). Databases of the thermodynamic model PHREEQC v3 were used to determine the saturated state of the brines with respect to principal chemical species. The first interpretation of data allows to specify the chemical facies of these brines form their chemical compositions. They have mainly a very marked sodic chlorinated character. Indeed, we use the thermodynamic model PHREEQC v3 to calculate the mineral/solutions equilibria on the basis of different assumptions. The test of these assumptions shows that each one has its limits to simulate and control the thermodynamic behavior of the brines.

Chemical analysis shows the high degree of pollution of these brines by certain Trace Elements (TE), in particular Sr, Cu, Zn and Ti. The mean contents are respectively of 22.5; 2.9; 2.3 and 0.6mg/l. For solid salts, the average contents are 31mg/l (of Sr), 1.8mg/l (of Cu) and 0.6mg/l (of Ti). These results are investigated by the analysis of point images at the (MEB). It is essentially silicates, sulphate and oxides that are the origin of these (TEs), with predominantly evaporite and clay minerals.

The still widespread practice of “sewerage” highlights the environmental impact of wastewater discharges on these lake ecosystems. 0.01 to 6768mg/l load of mineral matter expressed in terms of nitrates was recorded. In terms of phosphate, it is of the order of 0.2 to 9mg/l. The organic matter load expressed in terms of COD, BOD_5 and (SM) is 82 to 340mg/l, 28 to 123mg/l, and 67 to 149mg/l, respectively.

The examination of these results and the reports ($COD/BOD_5 > 3$) show very well the indices of degradation of brine and the unsatisfactory biodegradability of wastewater discharges in these lacustrine ecosystems.

Key words: Brine, Thermodynamic model, Trace Elements, Degradation index, lacustrine ecosystem, Chott, Sebkha, Lower Sahara.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Remerciements 01
Résumé 02
Abstract 03

Introduction générale 10

Chap. 1. Généralités

1.1. Site d'étude 13
1.2. Cadre géo-structural 14
1.3. Géologie de surface 18
1.3.1. Région de Rhir 19
1.3.2. Région de Ouargla 20
1.3.3. Le Grand Erg Oriental 20
1.4. Reliefs et paysages 21
1.4.1. Région de Righ 21
1.4.2. Région de Ouargla 22
1.5. Paléogéographie 26
1.6. Ressources en eau 27
1.6.1. Région de Righ 28
1.6.2. Région de Ouargla 29
1.7. Analyse climatique 31
1.7.1. La température 31
1.7.2. La pluviométrie 32
1.7.3. L'humidité de l'air 32
1.7.4. L'insolation 32
1.7.5. Le vent 33
1.7.6. L'évaporation 33
1.7.7. Conclusion sur le climat 33

Chap. 2. Moyens et méthodes

2.1. Sites d'échantillonnage 36
2.1.1. Chott Aïn El-Beïda 36
2.1.2. Chott Oum Er-Raneb 37
2.1.2.1. Activités autour de Chott Oum Er-Raneb 37
2.1.3. Sabkhet Safioune 37
2.1.4. Chott Merouane 39
2.2. Prélèvements et analyses 40
2.2.1. Analyse de la phase liquide 41
2.2.1.1. Préparation des échantillons 41
2.2.1.2. Analyses par HPLC 42
2.2.1.2.1. Principe de fonctionnement 42
2.2.1.2.2. Performance de la méthode 44
2.2.1.3. Analyses par ICP-MS 44
2.2.1.3.1. Fonctionnement de l'appareil 44
2.2.1.3.2. Méthode de calibration 45
2.2.1.3.3. Performance de la méthode 46
2.2.1.4. Analyse par absorption atomique 47
2.2.1.5. Mesure de l'alcalinité 48
2.2.2. Analyse des sels solides au MEB 48
2.2.2.1. Principe 49
2.2.2.2. Fonctionnement simplifié 49
2.2.2.3. Méthode d'analyse complémentaire 49
2.2.2.4. Préparation des échantillons 50
2.2.3. Détermination de la Demande Chimique en Oxygène 51
2.2.3.1. Principe 51
2.2.3.2. Protocole 51
2.2.4. Détermination de la Demande Biochimique en Oxygène 54
2.2.4.1. Principe de la méthode manométrique 54
2.2.4.2. Mode opératoire 54
2.2.4.3. Quantité à mesurer 55
2.3. Modèle thermodynamique 56
2.3.1. Phreeqc v3 56
2.3.1.1. Le modèle d'Association Ionique 57
2.3.1.1.1. Théorie de Debye-Hückel 57
2.3.1.1.2. Extension du modèle de Debye-Hückel 58
2.3.1.2. Le modèle d'interaction ionique spécifique 59
2.3.1.2.1. Modèle de Pitzer 59
2.3.1.3. La Théorie d'Interaction Ionique Spécifique 60
2.4. Notions de dégradation environnementale 62

Chap. 3. Résultats et discussion

3.1. Géochimie des saumures 65
3.1.1. Introduction 65
3.1.2. Compositions et faciès chimiques des saumures 66
3.1.3. Etat de saturation 68
3.1.4. Conclusion 72
3.2. Teneurs en éléments traces 74
3.2.1. Introduction 74
3.2.2. Concentration des éléments traces dans les saumures 74
3.2.3. Concentration des éléments traces dans les sels 77
3.2.4. Analyse des sels solides au MEB 79
3.2.5. Eléments traces : Origines et impacts 88
3.2.6. Conclusion 90
3.3. Indices de dégradation 91
3.3.1. Introduction 92
3.3.2. Variations des paramètres de pollution 93
3.3.3. Impact des rejets urbains sur l'écosystème 96
3.3.4. Conclusion 97

Conclusion générale et perspectives 99

Références bibliographiques 102

Annexe 1 111
Annexe 2 117
Annexe 3 128

Liste des figures

Figure 1. Localisation du site d'étude 13
Figure 2. Carte géologique d'Algérie 19
Figure 3. Encroûtements gypso-siliceux salins indurés 21
Figure 4. Croûte saline en surface de la sebkha 21
Figure 5. Relief (Oued Righ) 23
Figure 6. Relief (Sebkhet Safioune et Chott Beghdad) 24
Figure 7. Relief (Oued M'ya) 25
Figure 8. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara 28
Figure 9. Chott Ain El-Beida 36
Figure 10. Chott Oum Er-Raneb 37
Figure 11. Sebkhet Safioune 38
Figure 12. Chott Merouane 39
Figure 13. Multiparamètres portables 41
Figure 14. Outils DCO 53
Figure 15. DBO mètre 55
Figure 16. Variation des compositions chimiques des saumures 66
Figure 17. Equilibre des saumures par rapport au gypse 71
Figure 18. Equilibre des saumures par rapport à la calcite 71
Figure 19. Equilibre des saumures par rapport à l'halit 71
Figure 20. Variations des teneurs en éléments traces des saumures 77
Figure 21. Variations des teneurs en éléments traces des sels 79
Figure 22. Image MEB de l'échantillon Z 80
Figure 23. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.10 80
Figure 24. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.2 81
Figure 25. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.3 81
Figure 26. Images MEB de l'échantillon AB 82
Figure 27. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB20-Img.1-Pt.6 83
Figure 28. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB20-Img.1-Pt.7 83
Figure 29. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.2-Pt.5 84
Figure 30. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.2-Pt.6 84
Figure 31. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.4-Pt.1 85
Figure 32. Images MEB de l'échantillon Mr 85
Figure 33. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.4 86
Figure 34. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.10 86
Figure 35. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.11 87

Figure 36. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.3 87
Figure 37. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.2-Pt.1 88
Figure 38. Température des saumures 92
Figure 39. PH des saumures 93
Figure 40. Conductivité électrique des saumures 93
Figure 41. Lac El-Bheir 94

Liste des tableaux

Tableau 1. Volume et facteur de conversion de la DBO_5 55
Tableau 2. Compositions chimiques des saumures 67
Tableau 3. Forces ioniques et indices de saturation des saumures 70
Tableau 4. Teneurs en éléments traces des saumures 76
Tableau 5. Teneurs en éléments traces des sels 78
Tableau 6. Paramètres de pollution des saumures 96

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les faibles valeurs du rapport Pluviosité/Evaporation dans le Bas Sahara Algérien présentent un aspect défavorable vis-à-vis du maintien de l'activité biologique, animale, végétale et humaine. Mais à côté de cet aspect négatif, l'accentuation des conditions d'aridité peut permettre le démarrage d'activités susceptibles de prendre le relais de celles touchées par la sécheresse. L'augmentation de l'évaporatoire se traduit en effet par une concentration des eaux de surface et subsurface. Cette concentration peut donner lieu à des mises en réserves minérales exploitable (gypse, halite, sels potassiques, éléments rares comme le magnésium, le brome, le lithium,...). L'intérêt ne résiderait pas dans l'exploitation du sel gemme, à faible valeur commerciale, mais dans la récupération par concentration évaporatoire d'éléments rares actuellement très demandés par l'industrie, comme le magnésium, le lithium,... etc.

Les écosystèmes lacustres chotts et sebkhas, sont des lacs salés où l'évaporation intense pendant l'Eté favorise la cristallisation des sels en surface. Ces sels sont à caractères chlorurés, sulfatés et gypseux. Pour les scientifiques, ces chotts sont aussi des milieux idéals pour comprendre la genèse et l'histoire géochimique de la phase liquide et solide, de véritables laboratoires chimiques naturels et même des réserves d'êtres vivants capables de s'adapter à des conditions extrêmes.

Le concept de formation des minéraux évaporitiques et les facteurs contrôlant l'interaction eau/roche ont été traités par Harvie et al. (1980 et 1984), Eugster et Jones (1979), Eugster et Hardie (1978), etc.

Dans le Bas Sahara Algérien, les chotts sont alimentés par les rejets d'eaux usées et de drainage. Ces rejets polluent et dégradent ces écosystèmes de façon impressionnante. Cette pollution pose de grave problème, car elle rendre les réserves progressivement inexploitables. Même si la matière organique rejetée contribue à l'alimentation de l'avifaune, à terme cette pollution risque de dégrader complètement le milieu. De point de vue écologie, la suppression de ces rejets risque paradoxalement de compromettre ces zones « humides » par assèchement. La gestion des effluents devra donc tenir compte de cette contrainte d'alimentation en eau nécessaire (la mise en décharge).

En effet, une bonne gestion de l'eau doit permettre d'accroître la richesse globale d'une région et non pas le développement d'un secteur d'activité aux dépens des autres comme c'est trop souvent le cas.

Pour comprendre le comportement géochimique des saumures et l'état environnemental de ces écosystèmes lacustres chotts et sebkhas, on essaye dans le présent projet de thèse de :

1. Faire des mesures sur certains paramètres physico-chimiques en utilisant le modèle thermodynamique PHREEQC v3 ;

2. Estimer les teneurs en éléments traces ;

3. Mesurer certains paramètres de pollution, et en fin

4. Maitre en évidence l'impact de ces éléments polluants sur l'écosystème lacustre.

CHAPITRE 1. GENERALITES

Chap. 1. Généralités

Ce chapitre est consacré à la présentation du cadre de l'étude. Après avoir décrit le cadre géographique, nous traiterons les grands traits de la géologie et de la géomorphologie du bassin de Bas Sahara Algérien. Ensuite, nous présenterons les ressources en eau, et en fin les paramètres climatiques caractéristiques de la région d'étude.

1.1. Site d'étude

Le Bas Sahara Algérien est une vaste dépression (-37 à 300m d'altitude), occupée en partie par le Grand Erg Oriental. Elle est limitée par : les monts de l'Atlas Saharien au Nord, la Dorsale Saharienne et le Grand Erg Occidental à l'Ouest et les plateaux du Tademaït et des Tassilis N'Ajjers au Sud. Cette dépression s'ouvre au Nord-Est sur le golfe de Gabes et la Méditerranée, et s'étend sur une superficie de 720.000 km^2 entre 35° et 28° de latitude Nord et de 3° à 11° de longitude Est (Dubief, 1963) (fig. 1). C'est un pays de vallées peu profondes et de plateaux bas.

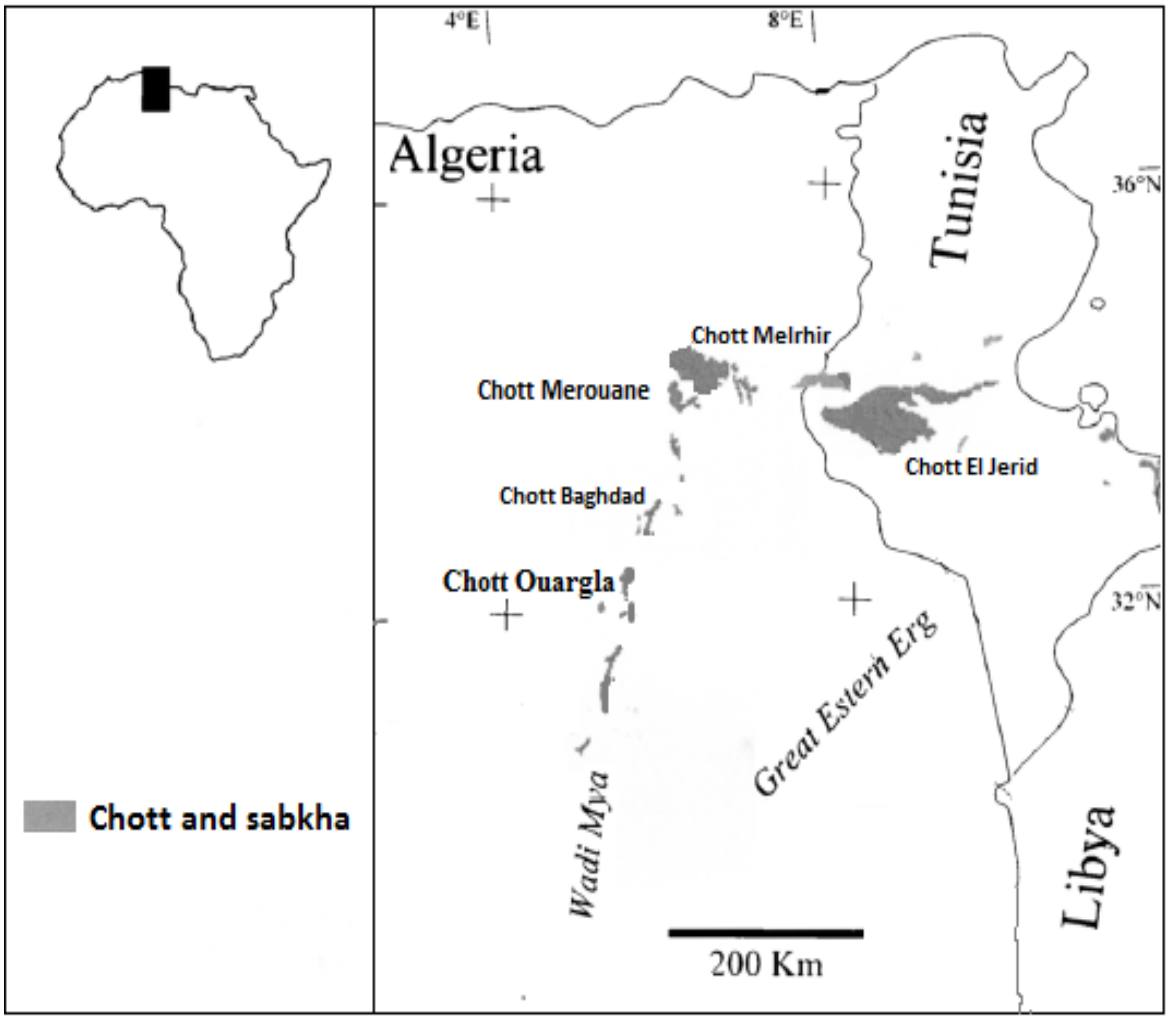


Figure 1. Localisation du site d'étude
(Carte géologique du Nord-Ouest de l'Afrique au 1/5.000.000. Bronner et Fabre, 1978)

1.2. Cadre géo-structural (fig. 2)

De nombreux auteurs ont travaillé et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Bas Sahara, aussi bien dans le cadre de la géologie pétrolière, que par des chercheurs universitaires, parmi eux nous citons les plus connus : Cornet (1964), Busson (1970), Dubief (1963), Conrad (1969).

A partir du massif ancien les couches géologiques s'enfoncent vers le Nord pour être brutalement pincées par l'accident sud atlasique. Dans l'ensemble, la couverture mésozoïque n'a pas subi de mouvements orogéniques et est demeurée tabulaire, mais elle est affectée à l'Est d'un mouvement de subsidence, qui est à l'origine de la cuvette des Grands Chotts algéro-tunisiens.

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

On trouve le socle ancien à 3000m ou plus de profondeur surmonté par les grès primaires plus ou moins plissés et érodés qui constituent les roches réservoirs des hydrocarbures. Au-dessus s'entassent les grès du Continental Intercalaire "CI". A la suite de la discordance cénomanienne s'empilent encore les couches marines du Sénonien et de l'Eocène qui se terminent par la couverture continentale du Mio-Pliocène.

Les grands traits de la géologie sont :

a- Au Sud de l'accident sud atlasique qui sépare la zone mobile maghrébine du reste de l'Afrique occidentale, le bouclier rigide est formé de terrains sédimentaires et éruptifs, plissés et métamorphisés.

b- Le Paléozoïque du Sahara correspond à des dépôts de climat désertique périglaciaire. Autour des affleurements du socle, s'étagent des couches gréseuses et schisteuses des Tassilis. Les mouvements hercyniens du Permo-Carbonifère, vont provoquer l'érosion du bouclier. Il s'installe alors une grande période continentale avec pénéplanation post-hercynienne pendant le Trias et le Jurassique et formation d'un manteau de grès, de sable et d'argile, qui va constituer le Continental Intercalaire.

c- Le Trias

Busson (1970) souligne la grande variabilité de faciès et d'épaisseur du Trias. Il est divisé en grandes unités lithologiques distinctes qui peuvent être salifères, argileuses, argilo-gréseuses ou carbonatées. L'épaisseur de ces différentes formations varie principalement là où s'intercalent des bancs salifères. L'épaisseur du Trias argilo-gréseux inférieur augmente vers le Nord-Ouest (150-180m). Elle diminue dans les zones de hauts fonds (Hassi Messaoud et R. El Baguel). Le Trias salifère présente une grande épaisseur (700m au NE de Ghadamès), il atteint 1300m à Hassi Messaoud.

d- Le Jurassique

-- ***Le Jurassique inférieur et moyen (Lias-Dogger)*** comprend principalement des couches évaporitiques constituées essentiellement de sel, d'anhydrite et d'argiles auxquelles se superposent des couches franchement marines et qui se présentent sous forme de calcaires et argiles avec des bancs d'anhydrite.

-- ***Le Jurassique moyen*** caractérisé par une transgression couvrant tout le bassin du Grand Erg Oriental et les dépôts y sont épais.

-- ***Le Jurassique supérieur*** est caractérisé par une permanence relative du régime marin avec des sédiments de milieux confinés. Dans la partie occidentale du bassin, le régime marin accuse une certaine régression à l'image de ce qui se passe plus à l'Ouest et vers le Sud.

Le passage du Jurassique supérieur au Crétacé inférieur se caractérise par des apports terrigènes ayant pour origine les reliefs nourriciers situés au Sud du bassin saharien (Hoggar) (Busson, 1970).

e- Le Crétacé inférieur

L’étude des données de sondages a permis de préciser la succession des paléogéographies au cours du Crétacé inférieur. Il est constitué par des couches terrigènes fluvio-détlaïques qui sont en contraste lithologique et sédimentaire avec les formations marines du Jurassique supérieur (Busson, 1970).

Il comprend, en partant des formations les plus anciennes :

-- ***Le Néocomien*** comprenant dans le Bas Sahara des argiles vertes et rouges avec de l'anhydrite en bancs massifs plus fréquents à la base. Elles sont surmontées par une alternance de dolomies et d'argiles ;

-- ***Le Barrémien*** est caractérisé par un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusque dans le Bas Sahara. Ces formations se présentent sous forme de grès fins ou grossiers et d'argiles provenant apparemment du Sud (Hoggar).

Les intercalations carbonatées sont peu nombreuses et cantonnées au Nord-Est du Sahara Algérien ;

-- ***L'Aptien*** est un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du Bas Sahara par 20 à 30m en moyenne de dolomies alternant avec des lits d'anhydrite, d'argiles et de lignite (sédimentation lagunaire) ;

-- ***L'Albien*** est caractérisé par un remarquable retour de la sédimentation terrigène. Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomanien. On remarque que le changement du régime sédimentaire et l'arrivée en masse de sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien (Fabre, 1976).

f- Le Cénomanien est formé par une alternance de bancs de dolomie, de calcaire dolomitique, d'argiles et d'évaporites (anhydrite ou sel). Son faciès varie :

-- Au Sud de Ouargla les argiles et les évaporites dominent ;

-- Au Nord, au contraire, les bancs de calcaire et de dolomie sont majoritaires ;

-- De plus, l'épaisseur augmente du Sud vers le Nord (de 50m dans le Tademaït à 350m dans le Bas Sahara).

La présence de nombreux bancs d'évaporites et d'argiles rendent le Cénomanien imperméable (Bel et Cuche, 1969).

Le Cénomanien inférieur à moyen est argileux dans le Tinrhert et le Bas Sahara. Le Cénomanien supérieur y est calcaire (Busson, 1970).

g- Le Turonien

Il se présente sous trois faciès différents, du Sud au Nord :

-- Au Sud du parallèle d'El Goléa, il est calcaro-marneux ;

-- Entre El Goléa et Djamaâ, il est essentiellement calcaire et ;

-- Au Nord de Djamaâ, il est à nouveau calcaro-marneux.

Son épaisseur moyenne varie entre 50 et 100m. Elle augmente cependant dans la région des chotts où elle dépasse 300m (Bel et Cuche, 1969).

h- Le Sénonien

Il s'individualise en deux faciès :

-- ***Le Sénonien inférieur*** à sédimentation lagunaire caractérisé par des formations argileuses et salifères à anhydrite, il est très peu perméable ;

-- ***Le Sénonien supérieur*** (Sénonien carbonaté) : formation carbonatée perméable (Busson, 1970).

i- L'Eocène

On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique :

-- ***À la base :*** L'Eocène carbonaté est formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argiles et même d'anhydrite et de marnes. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500m. L'épaisseur maximum se situant dans la zone du Bas Sahara.

-- ***Au sommet :*** L'Eocène évaporitique est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les chotts.

L'Eocène constitue le dernier épisode marin du Sahara Algérien (Bel et Cuche, 1969 ; Busson, 1970).

j- Le Mio-Plio-Quatrenaire

Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais (150m). Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le Bas Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur peut atteindre, dans la région des chotts algéro-tunisiens, quelques centaines de mètres. On y identifie, dans la région d'Oued Rhir, deux niveaux aquifères au sein des sables qui sont séparés par une couche argileuse au milieu (première et deuxième nappe d'Oued Rhir). L'ensemble est surmonté par le Plio-Quaternaire argilo-sableux et gypseux qui résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes des chotts (Busson, 1970).

1.3. Géologie de surface

Elle présente une grande hétérogénéité et se compose des principaux types suivants :

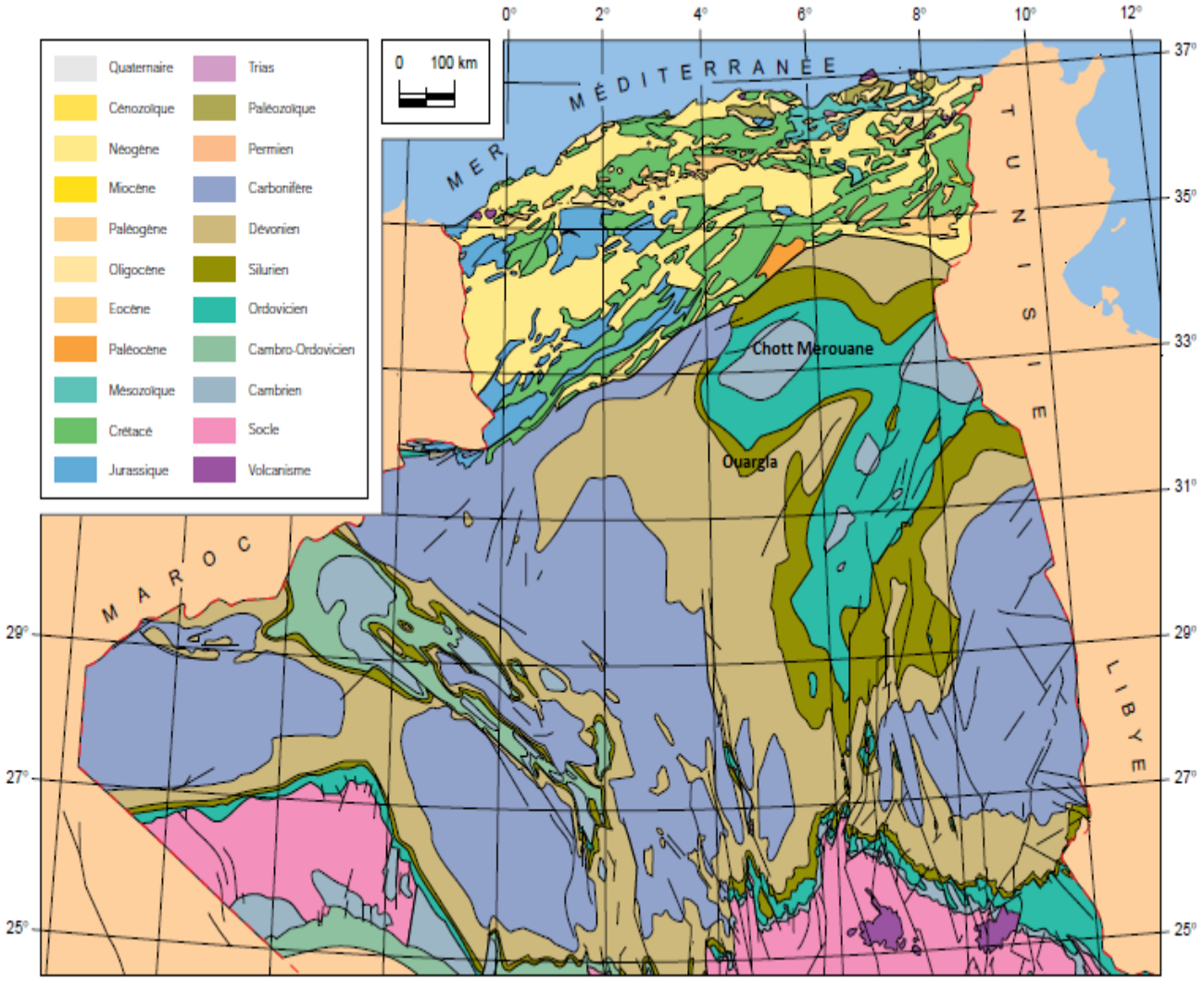
a) Des éléments fins et concentration d'éléments grossiers ;

b) Des sables fins ;

c) Des dépôts éoliens ou alluviaux, localisés sur les terrasses des anciennes formations alluviales ;

d) Des encroûtements gypseux, gypso-salins, ou gypso-calcaires dans les zones basses et endoréiques.

Dans les vallées ou les zones d'épandage des oueds quaternaires, la surface du sol est caractérisée par une richesse plus grande en éléments fins, argiles et limons. Au niveau des chotts, la surface est une croûte gypseuse épaisse, partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux. En dessous, des encroûtements gypseux pulvérulents homogènes surmontent des encroûtements gypseux indurés. Les surfaces gypseuses sont soit des sédiments lacustres gypseux, soit des accumulations secondaires de gypse sous forme d'encroûtements. Dans les sebkhas, la surface se caractérise par une croûte saline continue peut comporter ou non des horizons gypseux et/ou calcaire. Cette croûte saline présente une forte rugosité liée à leur structure ondulée, piquetée ou craquetée. Elle repose au centre sur des matériaux limono-sableux (BRL-BNEDER. 1999).



(Document SH/EXP)

Figure 2. Carte géologique d'Algérie

(Carte géologique internationale de l'Afrique « feuille n°2 »)

1.3.1. Région de Rhir

Les formations géologiques sont en majeure partie d'âge quaternaire et résultent de l'érosion continentale des dépôts miopliocènes. Ces derniers, largement représentés à l'Ouest de l'axe routier Touggourt-Biskra et sur les versants abrupts qui matérialisent le plateau de Stil, montrent des sables gypseux comportant à la base des intercalations rougeâtres d'argiles plus ou moins sableuses ou gypseuses.

Dans la vallée proprement-dite d'Oued Rhir, le Mio-Pliocène ne s'observe plus que sur quelques buttes-témoins dont les bases sont actuellement le siège d'une intense accumulation éolienne.

1.3.2. Région de Ouargla

Le plateau de la hamada pliocène à l'Ouest de la cuvette présente une surface graveleuse : reg à graviers ou pierreuse, reg à pierre, et des voiles éoliens. Cet horizon de surface surmonte une croûte calcaire à dolomie très dure de 30cm d'épaisseur. On trouve ensuite, de 35 à 60cm, un horizon calcaire nodulaire moins dur et fissuré puis, au-delà de 60cm, un horizon gypseux. C'est un lithosol calcareux de Hamada à encroûtement gypseux en profondeur. Les glacis sont constitués d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène.

L'horizon de surface dans le chott est une croûte gypseuse épaisse blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux (fig. 3). À 15-20cm de profondeur, on trouve des encroûtements gypseux pulvérulents homogènes de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve des encroûtements gypseux indurés de 40cm d'épaisseur moins riches en gypse que l'horizon précédent. Les surfaces gypseuses sont soit des sédiments lacustres altérés en surface, soit des accumulations dans le sol sous forme des encroûtements. Les croûtes salines en surface de la sebkha qui vont de quelques millimètres jusqu'à 5 à 6cm d'épaisseur, présentent une forte rugosité liée à leur structure soufflée. La couleur, la structure et l'hygroscopicité de ces croûtes dépendent de l'état hydrique et de la nature minéralogique du sel qui est très variable dans le temps. Les couleurs varient de brun rougeâtre à jaune rougeâtre ou même blanc pour les efflorescences (fig. 4).

Les dunes, formations éoliennes récentes en petit cordons, occupent l'Est et le Nord-Est de la cuvette et bordent les sebkhas le long de la vallée de l'Oued M'ya. Ce sont des sables grossiers et/ou graviers siliceux arrondis, vraisemblablement d'origine alluviale. Le substrat gréseux tendre à sable et argile rouge du Mio-Pliocène érodé, affleure dans les talwegs sur les collines et au pied des reliefs. Il est caillouteux par endroits, souvent recouvert de voiles de sable fin siliceux rarement gypseux (Fabre, 1976).

1.3.3. Le Grand Erg Oriental s'étend largement du Nord au Sud et met en relation la zone dépressionnaire au Nord avec les plateaux du Tinrhert au Sud. Les chaînes de dunes se disposent parallèlement et séparent de longues dépressions dont les surfaces présentent dans son ensemble une morphologie légèrement ondulée avec des parties hautes correspondant soit à l'affleurement de la croûte gypso-calcaire soit à l'accumulation de graviers siliceux et fragment de croûte donnant formation à un reg ; et des parties basses avec

changement de l'aspect de surface qui devient plus fin avec parfois une couverture éolienne (BRL-BNEDER. 1999).

Figure 3.
Encroûtements gypso-siliceux salins indurés « Chott Beghdad »

Figure 4.
Croûte saline en surface de la sebkha « Chott Beghdad »

1.4. Reliefs et paysages

Le bassin du Bas Sahara est comme son nom l'indique un pays plat, déprimé, de faible altitude (200 à -30m dans les chotts). C'est un pays d'erg (le Grand Erg Oriental), de reg allochtone (Oued Righ, Oued M'ya) et de chotts (Chott Melrhir) où le sable et le sel dominent.

1.4.1. Région de Righ (fig. 5)

Le cœur de la région est une longue dépression large de 20km, qui s'étire de El Goug (altitude : +100m) à Oum Touyour (+15m) sur 150km. Elle résulte de la confluence des oueds M'ya et Igharghar et aboutit aux grands chotts Merouane et Melrhir (-30m). La vallée d'axe nord-sud est nettement tracée et bordée par deux falaises basses parfois découpées en petites buttes. Le fond de la dépression est occupé par une succession de sebkhas alimentées par les nappes sous-jacentes et surtout par les eaux de drainage des palmeraies. Elles sont séparées par des placages sableux et de petites dunes blanches aux sables mobiles.

La région est limitée au Nord par les grands chotts et les piémonts du Zab, à l'Ouest par le plateau miopliocène et turonien de la dorsale mozabite et du plateau des daïas, au Sud par les regs sableux de la région ouarglie et à l'Est par le massif de dunes du Grand Erg Oriental.

1.4.2. Région de Ouargla (fig. 6 et 7)

De par sa position géographique centrale et de sa proximité avec les bassins pétroliers et gaziers, cette région s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien. C'est la véritable porte vers le Sud, dont les territoires (Hoggar, Tassili) constituent ainsi un immense arrière-pays qui donne toute son importance économique et stratégique à la région.

Elle s'étend jusqu'aux premières cuestas du plateau calcaire de Tinrhert dont la surface tabulaire est découpée en d'innombrables petites buttes. Le centre de cette région est aménagé dans une zone dépressionnaire qui borde Sebkhet Safioune (103m d'altitude) vers laquelle débouchent les oueds de N'sa et de M'zab venus de la dorsale M'zabite au Nord-Ouest et le grand oued fossile de M'ya venu du Tademaït au Sud. La zone dépressionnaire est considérée comme un bassin de remblaiement qui s'est affaissé lentement vers le Nord. Ce bassin est creusé dans les formations continentales du Mio-Pliocène. Le versant occidental est particulièrement marqué formant même une falaise en corniche entaillée dans les sables et les grès calcaires terminant la série continentale du Mio-Pliocène.

Au Sud, le Grand Erg Oriental s'étend largement et est traversé du Nord au Sud par le long couloir du Gassi Touil qu'emprunte la route Ouargla-Hassi Messaoud-In Aminas et qui met en contact le pays ouargli avec les Tassilis Touaregs et la frontière libyenne. En dehors du Gassi Touil le Grand Erg est pratiquement impénétrable.

A la marge sud de l'Erg on trouve les falaises du Tinrhert qui terminent le plateau doucement incliné vers le Nord. Ce plateau occupe une vaste région sur plus de 400km depuis le Tidikelt jusqu'à la Hamada El Hamra et le djebel Nefoussa en Libye. La nature marno-calcaire de ces plateaux très perméables a plus ou moins désorganisé le réseau hydrographique.

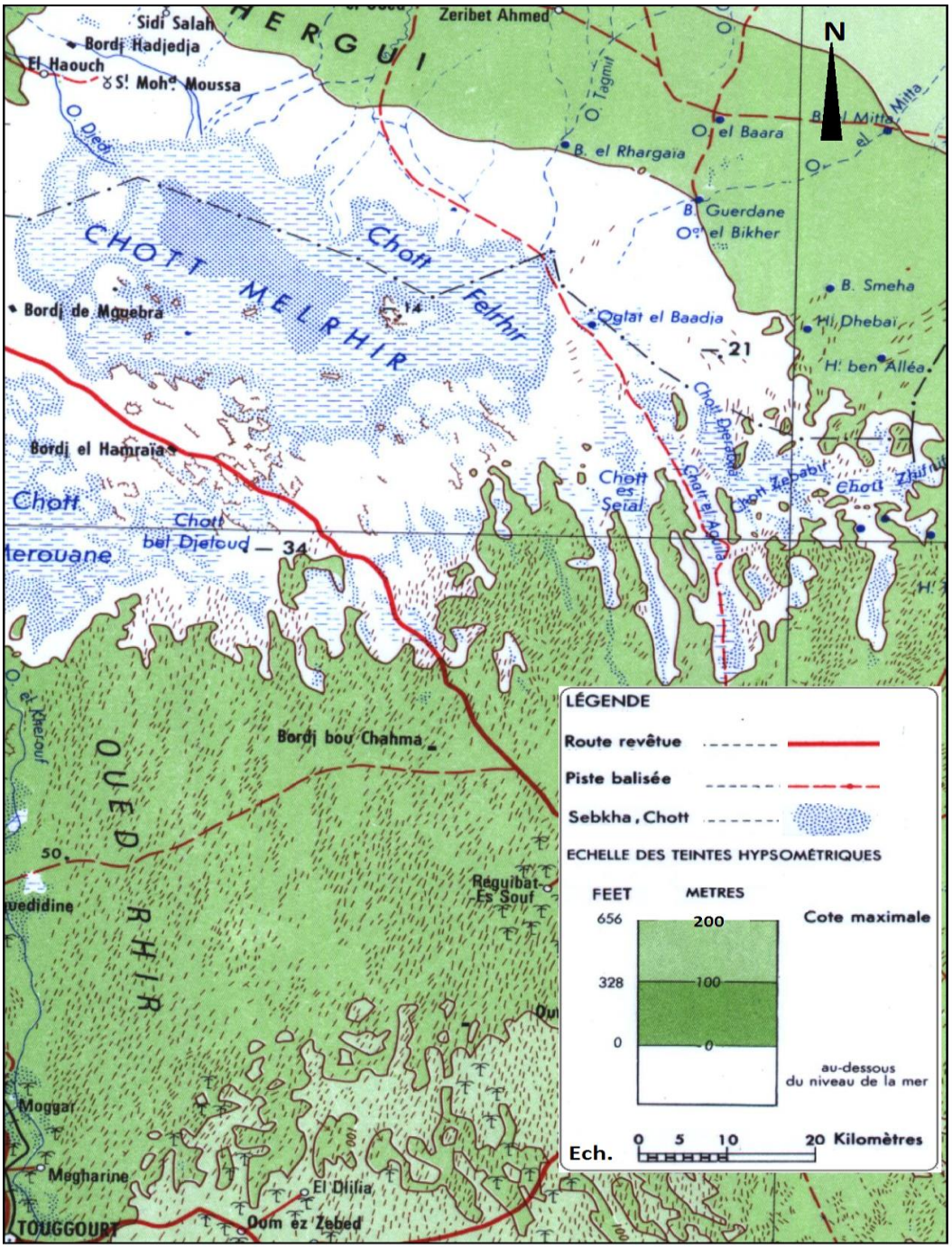


Figure 5. Relief (Oued Righ)

(Carte internationale du monde 1/1 000 000 SFAX NI–32 I.G.N. Paris 1974)

Figure 6. Relief (Sebkhet Safioune et Chott Beghdad)

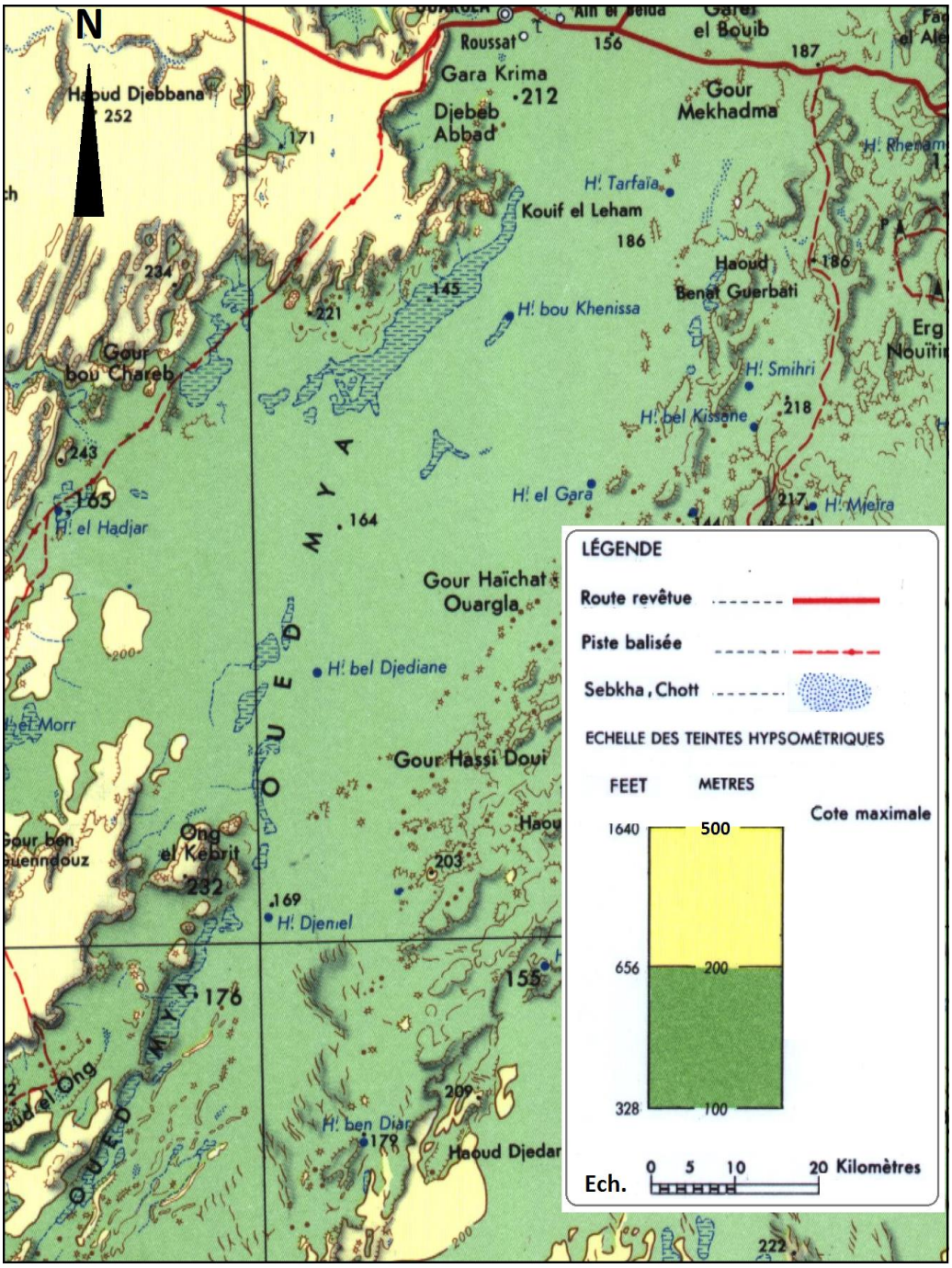


Figure 7. Relief (Oued M'ya)
(Carte internationale du monde 1/1 000 000 OUARGLA NH–31 I.G.N. Paris 1974)

1.5. Paléogéographie

La dissection de la dalle carbonatée pourrait dater du Mio-Pliocène ou du tout début du Quaternaire, au moment de l'assèchement des grands lacs. Les formes du relief sont déjà caractéristiques d'un climat aride, et les dépôts lacustres sont surmontés de cailloutis étalés par des pluies violentes : premier signe d'une apparition de l'aridité. L'Oued M'ya et l'Oued Rhir révèlent la présence en profondeur des zones de faiblesse subméridiennes anciennes. Ces linéaments sont demeurés vivants tandis que l'épirogenèse de l'Atlas et du Massif Central Saharien et la subsidence de la zone des chotts déterminent le sens d'écoulement des eaux. Aumassip (1986) rappelle que «les déformations qui affectent parfois le Mio-Pliocène, sont rapportées au Quaternaire ancien, au Villafranchien pour la phase majeure» d'autre attribue «à une phase compressive N-S à N20° post Villafranchien» la flexuration du Mio-Pliocène sur des accidents Nord-Ouest et Est-Ouest.

Les grandes vallées sont aujourd'hui desséchées ; mais ont-elles connu, au Quaternaire, un écoulement permanent pendant les périodes humides. Les travaux des archéologues confirment que la dépression de l'Oued M'ya n'a été drainée par des cours d'eau qu'à une période très ancienne du Quaternaire et que les sebkhas n'étaient pas fonctionnelles à l'époque néolithique car certains gisements reposent sur elles. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand pluvial contemporain de la glaciation de Würm.

Les sédiments quaternaires sont des sables, des graviers, des argiles. Des croûtes calcaires ou gypseuses se forment quand le climat devient moins humide. Dutil et Sami (1960) distinguent plusieurs séquences dans le Quaternaire : elles débutent par des limons et se terminent par des sables. Aumassip (1986) distingue plusieurs périodes dans le Bas Sahara : Le Quaternaire ancien dont le type est les cailloutis déposés sous un climat tropical chaud et humide comportant une saison sèche. Au début du Quaternaire supérieur se déposent des argiles grises, de la tourbe et des limons bruns. Ces sédiments témoignent d'un climat encore clément. Au début de l'Holocène de légères mobilisations de carbonates impliquent une pluviosité un peu plus importante. Cette amélioration climatique paraît ici de courte durée. En résumé, dès le Villafranchien les marques de l'aridité s'inscrivent dans le paysage. Au cours du Quaternaire, des périodes «pluviales», séparées par des périodes d'aridité, sont responsables de quatre glacis identifiés en divers points du bassin. Leur développement de plus en plus réduit implique des phases de

plus en plus longues d'une aridité de plus en plus prononcée. Ces variations climatiques se perçoivent dans les formations marines.

1.6. Ressources en eau

L'étude ERESS (UNESCO. 1972) constitue à ce jour la seule synthèse d'envergure sur les ressources en eau souterraine du Sahara Septentrional. C'est-à-dire qu'elle constitue véritablement la référence, à la fois en matière de synthèse des informations disponibles sur les grands systèmes aquifères et sur leur fonctionnement, et en matière de projections sur l'avenir de l'exploitation de ces nappes, obtenues au travers des simulations sur modèles mathématiques.

Le Sahara actuel porte les vestiges d'un réseau hydrographique ancien qui témoigne des écoulements de surface énergiques au cours des périodes humides du Quaternaire. Les grands oueds qui arrivent du Sud : l'Oued M'ya qui vient du Tademaït et l'Igharghar des Tassilis, confluent dans l'Oued Rhir et traversent toute la dépression. Leurs grandes vallées sont de nos jours obstruées par les dunes. Seules des crues exceptionnelles en raniment une partie pendant quelques jours (Aumassip, 1986). Il s'agit d'un réseau endoréique débouchant dans les grandes sebkhas.

Dans le sous-sol, il existe trois grands ensembles aquifères qui du haut vers le bas sont : (fig. 8)

a) **La nappe phréatique** contenue dans les niveaux sableux et argilo-évaporitiques du Quaternaire, pelliculaires par rapport à la nappe des sables qui lui succède en profondeur, dont elle est généralement séparée par un niveau semi-perméable du Mio-Pliocène. Il s'agit donc d'une unité séparée, alimentée principalement par sa surface (pluie, infiltration des oueds et fuites des réseaux et des eaux de drainage) et soumise à l'évaporation dans les chotts.

b) **Le Complexe Terminal** (CT) regroupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes (formations continentales, sableuses et argileuses). Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et Mio-Pliocène sont évidentes sur l'ensemble du bassin, à l'exception de la région des chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable vient s'intercaler. La nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du Sénonien inférieur. Cependant, ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Mio-Pliocène sur la bordure du bassin. La

profondeur du "CT" peut atteindre 600m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300m.

c) **L'ensemble aquifère argilo-gréseux du Continental Intercalaire** (CI) dite aussi nappe de l'Albien fortement artésienne. Cet ensemble constitue le réservoir d'eau douce le plus profond du Sahara Septentrional. Son toit correspond à la base du Cénomanien argileux à l'Ouest et de l'Albien argileux à l'Est. L'épaisseur utile totale (c'est-à-dire l'épaisseur des dépôts perméables à eau douce) dépasse 250m dans la plus grande partie du réservoir. Elle atteint 1000m au Nord-Ouest (Ouest de Ghardaïa) et au Centre (Ouest de la dorsale primaire d'Amguid), et 150m, voire une centaine de mètres dans les structures faillées associées à la dorsale précitée, et localement sous le Grand Erg Oriental (Ouest d'El Borma). Dans la vallée d'Oued Righ, la nappe est captée à une profondeur de 1760m au Sud et 2200m au Nord de la vallée, à Ouargla, elle est exploitée au-delà de 1150m de profondeur.

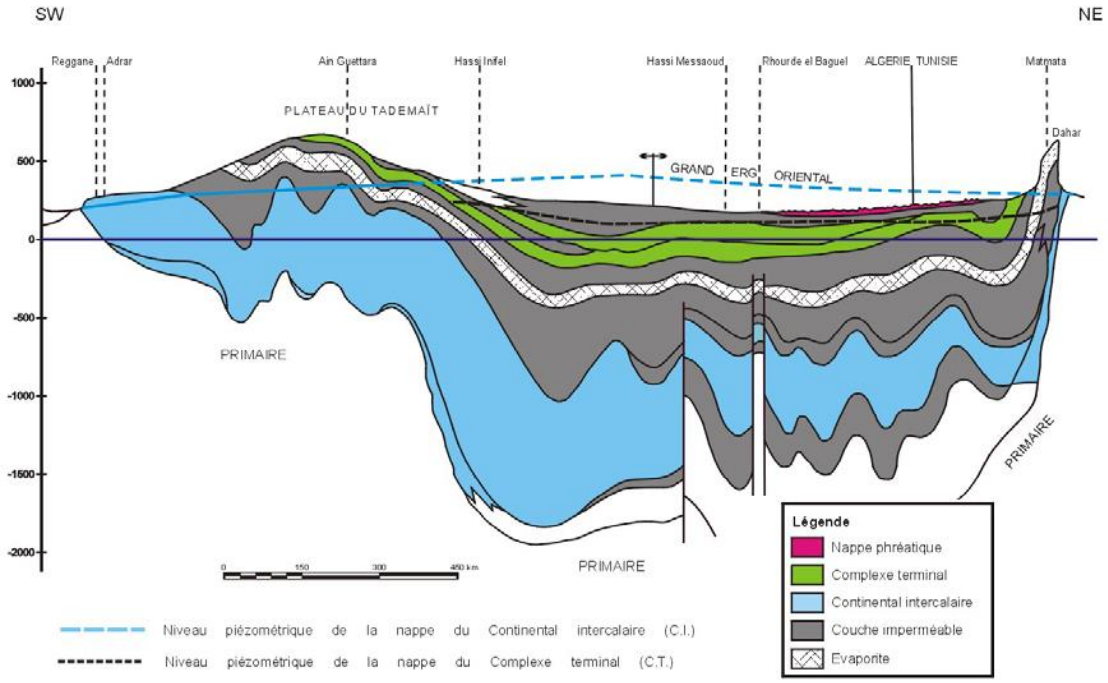


Figure 8. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO. 1972)

1.6.1. Région de Righ

Les oueds des Aurès débouchent dans les chotts Merouane et Melrhir qu'ils contribuent à alimenter. Cependant le plan d'eau de ces dépressions est fourni pour l'essentiel par l'ascendance des nappes du Tertiaire Continental.

L’axe de la vallée est occupé par le grand canal de drainage qui mène les eaux de nezz vers les chotts. Le flanc ouest est parcouru par de petits oueds qui descendent de la dorsale mozabite qui drainent les quelques 70mm de pluies annuelles par des crues épisodiques : Oued Besbes marque la limite nord, Oued Rtem alimente la daïa de M’rara, Oued El Attar s’arrête à Dzioua. Les crues n’ont quelque importance que sur le flanc ouest de la région, pour les emblavements dans les daïas.

Les nappes du Complexe Terminal sont ici empilées en un système plus compliqué et plus diversifié que dans les autres régions. L'aquifère le plus profond est contenu dans les calcaires du Sénonien supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen (>400 m de profondeur), d'abord marins puis évaporitiques. Cette nappe, dite des calcaires est surmontée de sables blancs grossiers et de graviers contenant une deuxième nappe. Cette dernière serait en continuité avec la nappe pontienne du Souf et du sud tunisien. Le toit de la deuxième nappe est constitué par un banc de poudingue et de calcaire plus ou moins gréseux.

Au-dessus se trouve un ensemble de lentilles sableuses entrecoupées d'argiles gypseuses, dont les niveaux perméables renferment les eaux captives les plus proches de la surface : ce sont elles qui constituent la première nappe des foreurs.

Tous ces aquifères s'écoulent du Sud vers le Nord. La surface piézométrique de la deuxième nappe est généralement plus élevée que celle de la première.

L'accroissement du nombre des forages a été à l'origine de baisses spectaculaires du niveau hydrostatique. La surexploitation des nappes en aval du bassin entre Djamaa et El Meghaier provoque la baisse des niveaux en amont, au sud de Touggourt.

A plus de 1300m de profondeur on trouve le toit de la nappe de l’albien qui est ici fortement artésienne (30kg/cm² de pression au sol) et à température élevée (54°C). Plusieurs forages sont en activité : ils sont utilisés pour l’AEP et pour l’irrigation (Sidi Mahdi, Sidi Slimane, M’rara, ...).

1.6.2. Région de Ouargla

Les pluies annuelles sont insignifiantes et le réseau hydrographique n'a de ce point de vue pas beaucoup d'influence sur le régime hydraulique de la région. En revanche les zones dépressionnaires comme la Sebkhet Safioune et surtout

le chott de Ouargla (Ain El-Beida) sont des zones d'hydromorphie qu'il est impossible de drainer efficacement.

a) **L'Oued M'ya** actuel prend son origine à l'Ouest d'Aïn El Hadjadj, vers 800m d'altitude, et draine un bassin de près de 20000km². Ses crues, après un parcours de 400km en direction sud-nord, allaient se perdre, entre Saf-Saf et le cordon dunaire de Tinefdjaouine, vers la cote 200m. Entre 1950 et 1961, il a coulé 3 jours par an en moyenne. Des pluies de 25 mm sur le Tademaït en Décembre 1960 ont provoqué un débit de pointe de 1600m^3/s. Actuellement, les plus grandes crues s'arrêtent à 200km en amont de la ville de Ouargla.

Les oueds N'sa et M'zab atteignent la Sebkhet Safioune. Les crues plus ou moins importantes se produisent à peu près chaque année dans la partie supérieure de leurs cours, toutefois de façon irrégulière. Certaine années on compte jusqu'à 5 mois avec une ou plusieurs crues tandis que des périodes de sécheresse peuvent s'étendre sur plusieurs années.

b) **L'Oued M'zab** coule d'Ouest en Est sur environ 320km de la région de Botma Rouila à 750m d'altitude jusqu'à Sebkhet Safioune à 107m située au Nord de la cuvette de Ouargla. La surface du bassin versant est de 5100km². Il n'y a pas d'écoulement pérenne. Les crues sont exceptionnelles et se produisent chaque 50 ans avec, comme pour celles du cours supérieur, des irrégularités. Elles ont été signalées aux environs de 1848, le 30 Septembre 1901, en Octobre 1951, en 1991, en Septembre 1994 et 2009. Le débit mesuré en 1994 a atteint 13,5m³/s. Lors de la crue de 2009, la circulation de la route Frane - El Hadjira a été interrompue.

c) **Le bassin versant d'Oued N'sa** couvre une superficie de 7800km². Il coule selon une direction W-E dans son cours supérieur, en direction NNW–SSE dans son cours moyen sur une longueur d'environ 100km et de nouveau vers l'Est en son cours inférieur sur une longueur d'environ 220km pour se déverser dans la Sebkhet Safioune. Les crues qui atteignent la sebkha sont plus fréquentes sans que nous n'en possédions de chronique. Celle qui date de 1994, le débit enregistré est de 35m³/s.

Dans le fond de la cuvette, en dessous des placages sableux quaternaires, on trouve la nappe phréatique puis des bancs calcaires du Pontien sur une vingtaine de mètres, séparés d'un niveau aquifère contenu dans des sables grossiers pontiens eux aussi par des passées d'argiles. Vers -150m de

profondeur on retrouve la nappe des calcaires sénoniens et enfin à -1100m on atteint le toit du Continental Intercalaire.

L'aquifère du Sénonien a été exploité tardivement : après des essais malheureux au cours de la première moitié du 20eme siècle, des forages ont été exécutés pour l'irrigation dans la palmeraie des Beni Thour (1965), puis pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation des jardins des Mekhadma (1969), et enfin à Garet Chenia et à Hassi Ben Abdallah. L'exploitation de ces forages est accompagnée d'un pompage qui améliore de beaucoup les débits.

En revanche, la nappe mio-pliocène est d'exploitation très ancienne : elle était atteinte par les puits coffrés traditionnels creusés en apnée par les ghetassin qui ont permis la création de la palmeraie. A l'origine, ces puits étaient le plus souvent artésiens de quelques mètres, aujourd'hui ils nécessitent un pompage. L'Ain Sfa de Sédrata jaillissait à la cote +145m au Xème siècle ! La nappe s'écoule comme on doit s'y attendre du Sud-Sud/Ouest vers le Nord-Nord/Est.

1.7. Analyse climatique

Le Bas Sahara Algérien constitue un désert parmi les plus arides et les plus chauds du globe. L'aridité extrême est expliquée par des valeurs des paramètres climatiques stables depuis quatre millénaires. L'absence de précipitations, les températures extrêmement élevées et le vent qui contribuent à de très fortes évapotranspirations sont les principaux facteurs contrôlant le comportement géochimique des plans d'eau libre dans le Sahara.

L'analyse des paramètres climatiques sera faite à partir des données recueillies de l'ONM-Ouargla période (1978-2016).

1.7.1. La température

C'est un facteur principal qui conditionne le climat de notre région. La température moyenne annuelle pour un climat aride n'a pas une grande signification ; les plus intéressantes sont les températures moyennes mensuelles et les amplitudes thermiques.

Pour les mois les moins chauds (Décembre et Janvier), les températures moyennes oscillent entre 9 et 13°C, pour les mois les plus chauds de Juin à Août elles sont nettement plus élevées et varient autour de 40°C. L'amplitude thermique journalière est importante toute l'année, elle varie de 11 à 20°C, nettement plus marquée au cours des mois les plus chauds. Ces variations sont

évidemment beaucoup plus fortes lorsque l'on considère non plus la température de l'air mais celle du sol.

La température moyenne annuelle enregistrée est de l'ordre de 22°C.

1.7.2. La pluviométrie

Les pluies sont généralement des pluies d'hiver, avec des valeurs moyennes annuelles autour de 50mm. Elles sont d'autant plus irrégulières que leur valeur diminue. La quasi-absence de pluie est due à la présence des basses pressions sahariennes thermiques plus ou moins permanentes surmontées de hautes pressions synoptiques.

1.7.3. L'humidité de l'air

Le degré hygrométrique de l'air (ou humidité relative) c'est le rapport de la tension de vapeur effective à la tension de vapeur saturante dans les mêmes conditions de température et de pression.

L'humidité relative moyenne annuelle enregistrée est inférieure à 50% au moins durant 8 mois de l'année soit de Février à Octobre. Les valeurs minimales sont observées en Juin et Juillet (≈ 30%), les maximales en Janvier (≈ 60%) ; donc, une variation inversement proportionnelle à la température.

Nous pouvons résumer les choses en disant que l'humidité relative dépend dans une large mesure de la température qui elle aussi dépend de la quantité de rayonnement reçue sur le sol, il demeure que celle-ci n'est pas la seule, car d'autres facteurs interviennent aussi, notamment les vents, les nuages et l'ensoleillement.

1.7.4. L'insolation

Il s'agit de l'insolation effective c'est-à-dire de la période en heures durant laquelle le soleil a brillé. La variation annuelle de l'insolation concorde avec celle de la nébulosité, elle est de type méditerranéen présentant un maximum estival. Cependant, il existe plusieurs variations annuelles dues aux petits accidents provoqués par des ponts nuageux.

La durée moyenne enregistrée est de 8 à 12 heures par jour. Elle excède 9h/j pendant au moins la moitié de l'année, du mois d'Avril au mois de Septembre. Elle est maximale en Juillet avec 12h/j, minimale en Janvier avec 8h/j.

1.7.5. Le vent

Nous pouvons dire que le vent c'est le paramètre climatique le plus régulier dans notre région d'étude. Il est déterminé par sa vitesse et sa direction.

Les vents les plus forts se produisent à partir du mois de Mars et s'étale jusqu'à la mi-période estivale avec un maximum de 5m/s, tandis que dans le reste des mois on a une vitesse faible de l'ordre de 2m/s. Les vents les plus fréquents sont ceux qui ont une direction S-N et SW-NE, tandis que les vents dirigés vers le Sud et le Sud-Ouest ne dominent qu'au mois de Janvier. On peut penser que l'orientation grossièrement N-S de la vallée joue un rôle dans la direction des vents.

1.7.6. L'évaporation

Les mesures de "l'évaporation" peuvent se faire de différentes façons selon les buts poursuivis : estimation de l'évaporation à partir d'un réservoir, estimation de l'évaporation potentielle, etc.

Elle est très élevée et le déficit hydrique est permanent avec des écarts climatiques très importants entre les mois de Décembre et Janvier d'une part et de Juillet et Août d'autre part. L'évaporation mesurée peut atteindre 3000mm/an, elle est maximale en Juillet (400mm), minimale en Décembre (110mm).

L'analyse des conditions climatiques à montrer que l'intensité de l'évaporation dépend de l'importance du déficit de saturation de l'air, par suite des très hautes températures qui règnent pendant une longue période estivale. Cependant, d'autres phénomènes, tels que le vent peuvent avoir une incidence sur l'évaporation. Le vent est un élément éminemment variable, il n'agit jamais indépendamment des autres facteurs, il a un effet très différent selon sa direction soit qu'il souffle par temps humide ou par temps sec.

1.7.7. Conclusion sur le climat

Le climat de notre région d'étude est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par la forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région. Ce climat est de type méditerranéen aride, malgré l'effet de la continentalité, il est caractérisé par un Hiver doux et

une période de sécheresse prolongée dominée par des vents de direction SW-NE.

CHAPITRE 2. MOYENS ET METHODES

Chap. 2. Moyens et méthodes

Dans ce chapitre nous présenterons tout d'abord les sites d'échantillonnage, puis les méthodes analytiques exploités au cours de cette thèse.

2.1. Sites d'échantillonnage

2.1.1. Chott Aïn El-Beïda (fig. 9)

Il constitue le point bas de la ville de Ouargla. Il couvre environ une superficie de 1000 hectares. L'alimentation en eau de ce chott se fait par les eaux de drainage de la palmeraie et d'irrigation, et surtout à partir de la divagation des eaux usées de la ville de Ouargla. Ce chott est divisé en quatre zones distinctes par l'implantation d'infrastructures plus ou moins récentes : le canal de drainage des eaux de la palmeraie sépare longitudinalement le chott, et la piste du chott, récemment goudronnée, qui joindre la ville de Ouargla à Aïn El-Beïda, coupe le chott de manière transversale. Ces deux infrastructures ont vraisemblablement des incidences sur le comportement dynamique des eaux dans le chott.

Le niveau d'eau dans le chott est variable suivant les saisons et selon les apports des différents canaux de drainage.

Actuellement le chott est soumis à de fortes pressions de pollution par les rejets des eaux usées. Pour les écologistes, c'est une zone humide présentant un intérêt majeure pour la conservation de la biodiversité. L'interception des eaux usées risque de créer un assèchement « et donc une mise en eau plus ou moins permanente est nécessaire ».

Figure 9. Chott Ain El-Beida

2.1.2. Chott Oum Er-Raneb (fig. 10)

Ce chott est une zone humide située à environ 7Km au Nord-Est de la Ville de Ouargla. Il est localisé entre l'agglomération de Sidi-Khouiled au Sud et l'agglomération de Oum Er-Raneb au Nord selon une direction Nord-Sud. Il est alimenté par les eaux usées de la ville de Ouargla et les eaux de drainage agricole depuis 1983. La superficie varie de 900 à 1400 hectares en fonction du niveau de l'eau.

Ce Chott est entouré par des formations dunaires au Nord, à l'Est et au Sud. La végétation est située essentiellement au Nord-Est du Chott. Elle est assez dense au niveau du village de Oum Er-Raneb et devient clairsemée vers le Sud-Est et le Sud-Ouest.

Figure 10. Chott Oum Er-Raneb

2.1.2.1. Activités autour de Chott Oum Er-Raneb

Une régie communale de production de sel a été créée en 1975 : UNISEL qui produit du sel à partir de Chott Oum Er-Raneb. Le sel est vendu à la société SONATRACH pour les travaux de forages pétroliers. Entre 1975 et 1978, les bénéfices de cette société ont été aux environs de 5 millions de dinars. Cette société n'existe plus depuis les années 80.

2.1.3. Sabkhet Safioune (fig. 11)

Elle constitue le point le plus bas de la cuvette de Ouargla et l'exutoire naturel des crues des oueds N'sa et M'zab. Elle constitue actuellement, le milieu récepteur potentiel des rejets de l'agglomération de Ouargla sur une superficie totale près de 8000 hectares.

Elle est limitée à l'Est et au Nord-Est par une zone à topographie un peu plus élevée occupée par une végétation clairsemée de tamaris et de salicorne. A l'Ouest et au Sud, la sebkha est bordée par des dunes de sable.

Les contraintes du milieu sont telles que toute végétation et vie animale est quasi inexistante. Les concentrations en sels au niveau de la nappe phréatique située sous la sebkha sont de l'ordre de 300g/l. Cette concentration limite tout développement faunistique et floristique intéressant.

À côté de la route menant à Hassi Debiche, des nouvelles palmeraies sont implantées et des canaux de drainage ont été creusés dans le cadre des programmes de développement agricole des provinces du Sud. Cette zone est légèrement surélevée par rapport à la Sebkha.

Figure 11. Sebkhet Safioune

2.1.4. Chott Merouane (fig. 12)

Ce chott est situé au Nord Est du Sahara Septentrional ; qui fait partie administrativement de la wilaya d'El Oued et la daïra d'El Meghaier, située à environ 9km du chef-lieu de la daïra, dans le village de N'sigha, de coordonnées géographiques : 33°55'N et 6°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 parmi les zones humides, d'importance internationale, avec une superficie de l'ordre de 333700 hectares (Hacini, 2006).

Figure 12. Chott Merouane

2.2. Prélèvements et analyses

L'échantillonnage de l'eau a été fait au cours des années :

2009 : avec 48 prélèvements et mesures in situ dans tout le Bas Sahara Algérien ;

2011 : avec 08 prélèvements et mesures in situ dans le Chott de Beghdad ;
2012 : avec 06 prélèvements et mesures in situ dans les chotts de Ouargla ;
2013 : avec 46 prélèvements et mesures in situ dans les chotts de Ouargla ;
2015 : avec 40 prélèvements et mesures in situ dans les chotts de Ouargla ;
2016 : avec 26 prélèvements et mesures in situ dans les chotts de Ouargla.

1. 48 échantillons ont été analysés conformément au protocole élaboré au Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie (LMTG) à Toulouse.

2. 66 échantillons ont été analysés au laboratoire de l'université de Ouargla conformément au protocole élaboré par Rodier (2005).

3. 60 échantillons ont été analysés au laboratoire de l'ONA à Ouargla conformément aux normes AFNOR.

Le choix du site de prélèvement est basé sur :

- leur situation dans le chott (1 à 3m de la périphérie) ;
- leur contact avec les rejets (eau de drainage p.ex.) ;
- leur profondeur par rapport à la surface (hors contact avec l'air).

Au cours de l'échantillonnage, des flacons en polypropylène (de 1,5L) ont été rincés avec de l'eau distillée, puis avec de l'eau de l'échantillon avant de les remplir. Tous les échantillons une fois prélevés sont conservés dans une glacière à 5°C.

Sur les flacons sont notés, le numéro de l'échantillon, la date de prélèvement, l'heure de prélèvement et les paramètres mesurés sur le terrain. Les solides sont mis dans des sacs en plastique avec les numéros et la date de prélèvement.

Le pH, la conductivité électrique, la température et l'oxygène dissous sont mesurés in situ après chaque prélèvement en utilisant des appareils portatifs (HI-9829, Multi-3430) (fig. 13).

Figure 13. Multiparamètres portables

2.2.1. Analyse de la phase liquide

Toutes les analyses effectuées au cours de notre étude ont été réalisées dans le laboratoire de géochimie de transfert au CNRS de Toulouse France (LMTG UMR 5055). L'analyse des eaux très salées (saumures) a demandé une longue préparation des échantillons, parce que ces eaux sont très chargées en sels et la sensibilité des appareils de mesure est très élevée, donc ce qui rend la dilution des échantillons plusieurs fois pour atteindre les limites de détection des appareils de mesure.

2.2.1.1. Préparation des échantillons

Pour diluer les échantillons de saumures, à forte concentration, on a utilisé les eaux MilliQ®, l'opération de dilution est passée par plusieurs phases de dilution à cause de la forte concentration. On prend d'abord 1g de saumures et on les met dans un pilulier, de volume 100ml ; la même opération est reprise pour la solution résultante (solution 1/100), et ainsi jusqu'à l'obtention de la dilution convenable.

Chaque prélèvement est filtré à l'aide de seringues stériles B-D plastique pack de 60ml (becton-dickinson) et de filtres en cellulose nalgéne de 0,2µm (nalge company). Les seringues de filtration ont été préalablement rincées 3 fois à l'eau MilliQ® et 1 fois avec l'eau de l'échantillon. Cette filtration est effectuée pour séparer la solution des particules en suspension.

Pour les solides, une présélection des échantillons est utile, on n'utilise que les échantillons de sels et on élimine les échantillons des sables et des argiles. Chaque échantillon des sels est dissout dans les MilliQ®, l'échantillon doit être mélangé, de telle sorte que les sels deviennent homogènes. On prend 1g de sels

dans un litre de eau MilliQ®, l'échantillon est agité plusieurs fois jusqu'à la dissolution totale des sels dans l'eau.

Les échantillons destinés aux dosages par absorption atomique (cations) sont acidifiés jusqu'à pH = 2, avec de l'acide HNO_3 bi-distillé, concentré (9 à 10N). Cette manipulation est effectuée afin d'éviter l'adsorption des ions sur les parois des piluliers ainsi que la formation d'éventuels colloïdes.

Vu la sensibilité de l'ICP-MS, les échantillons destinés à l'analyse par cette méthode ont été préparés dans la salle blanche (c'est une salle spéciale, dépourvue de la poussière, avec un système d'évacuation des gaz et des odeurs). Les échantillons mis dans des piluliers de 30 ml, sont lavés plusieurs fois à l'HNO_3 et sont séchés dans le four. On met 1g de l'échantillon par pesée et on ajoute l'HNO_3 bi distillé pour rendre le pH à 2 (acidification de l'échantillon) et enfin, on ajoute des gouttes d'indium et rhénium, généralement absents dans les échantillons. Ceci sert à corriger les éventuelles dérives de la machine lors des mesures. L'indium sert de standard interne et le rhénium permet de vérifier la stabilité dans le temps de la calibration interne.

Les concentrations des cations majeurs (Na, K, Mg, Na et Ca) sont déterminées par l'absorption atomique. Les anions majeurs (Cl, NO_3 et SO_4) sont déterminés par chromatographie ionique en phase liquide, sous pression (HPLC). Les bicarbonates HCO_3 sont analysés par titration. Les éléments en traces sont analysés par ICP-MS (spectromètre de masse à plasma inductivement couplé).

2.2.1.2. Analyses par HPLC

Cette méthode (HPLC : chromatographie ionique en phase liquide sous pression) est utilisée pour déterminer les concentrations de certains cations et anions majeurs, tels que : Na, Mg, K, Cl, SO_4, NO_3, PO_4. Dans notre étude, nous avons analysé seulement les éléments Cl et SO_4.

2.2.1.2.1. Principe de fonctionnement

a) **La colonne :** le principe de cet appareil est basé sur les résines échangeuses d'ions. Les résines anioniques permettent le dosage des cations, tandis que les résines cationiques permettent le dosage des anions. Les colonnes sont constituées d'une matrice insoluble organique (gels de silice) ou inorganique (styrène), sous forme de sphères, de 10 à 25µm de diamètre. Dans le cas d'une résine échangeuse de cations, ces sphères subissent une sulfonation lors de leur fabrication qui crée des radicaux $-SO_3$ actifs. Pour une résine

échangeuse d'anions, les sphères subissent une chlorométhylation puis une fonction ammonium quaternaire est ajoutée. Ces sites ioniques ($-SO_3$ et -N) sont appelés groupes fonctionnels.

b) L'éluant : le volume interstitiel entre les sphères est comblé par un liquide circulant en permanence grâce à un système de pompage. Cette phase mobile est l'éluant. L'éluant utilisé est l'acide méthane sulfonique (CH_3SO_3H) pour les cations et un mélange de bicarbonate et de carbonate de sodium ($NaHCO_3$, $NaCO_3$) pour les anions. L'éluant fournit des ions en nombre équivalent aux groupes fonctionnels, de charges opposées à ceux-ci : les contre ions, qui peuvent s'échanger rapidement avec d'autres ions de même charge. Les sites actifs de la résine à l'équilibre sont ainsi saturés par les ions de la phase mobile.

c) La séparation : afin de doser les anions, par exemple, on injecte un volume connu de solution sur la colonne de résine. Les anions de la solution entrent en compétition avec ceux de l'éluant et les remplacent sur les sites cationiques de la résine. Ces ions se fixent sur la colonne en fonction de leur taille et de leur affinité pour la résine. L'éluant circulant en continu, cet équilibre n'est pas stable et les anions de l'échantillon sont libérés en commençant par les éléments dont le coefficient de partage par rapport à la résine est faible. Les différents anions seront donc élués les uns après les autres, permettant ainsi leur séparation.

d) Détection : les espèces éluées arrivent dans une cellule conductimétrique simple pour les anions, et associée à un suppresseur auto régénérant pour les cations.

Le suppresseur permet d'abaisser la conductance de l'effluant au niveau de l'eau, et donc de réduire le bruit de fond et donc d'augmenter la réponse due à l'analyte elle-même, en l'associant à un ion de forte conductivité (H^+). Ceci repose sur les propriétés des membranes échangeuses d'ions de n'être perméables qu'aux espèces de charges opposées à celles du groupement fonctionnel qu'elles contiennent.

e) Acquisition des données : en sortie du conductimètre, le signal analogique est traduit sous forme de chromatogramme grâce à un enregistreur. La calibration s'effectue grâce à des solutions étalons dont les concentrations encadrent celles de l'échantillon. Ces

solutions sont injectées régulièrement lors des dosages afin de palier à une éventuelle dérive de l'appareil. La position du pic traduit le temps de rétention, et permet d'identifier l'élément dosé ; sa concentration étant calculée à partir de la surface du pic.

Dans le cas du dosage des cations, l'enregistrement et le traitement des données se fait numériquement par ordinateur, à l'aide du logiciel peak-net. Pour les anions, le traitement est effectué manuellement.

2.2.1.2.2. Performance de la méthode

a) **Limite de détection :** le dosage par HPLC s'adresse ici à des éléments majeurs. La limite de détection n'apparaît pas comme un paramètre important.

   En effet, le domaine d'application de cette technique (des ppm au ppb) recouvre largement les concentrations à mesurer.

b) **Précision de la mesure :** la précision de la mesure pour un anion ou un cation donné correspond à l'écart de la moyenne obtenue, en effectuant douze mesures successives d'un même échantillon. Cette valeur est le pourcentage d'erreur maximum sur la mesure.

2.2.1.3. Analyses par ICP-MS

L'ICP-MS (spectromètre de masse à plasma inductivement couplé) est une méthode qui permet l'analyse simultanée d'un grand nombre d'éléments en quelques minutes. De plus, cette méthode est très sensible et particulièrement adaptée à l'analyse des éléments en traces.

2.2.1.3.1. Fonctionnement de l'appareil

a) **Le système d'injection de l'échantillon :** l'échantillon en solution est amené dans un nébuliseur où il est transformé à l'aide d'un flux d'argon, en un aérosol, dont seules les gouttelettes de diamètre inférieur ou égal à 5 µm pénétreront dans la torche à plasma.

b) **Le système ICP :** la source d'ionisation est une torche à plasma composée d'une spire d'induction, contenant trois tubes de quartz concentriques, dans lesquels circulent différents flux d'argon. Ces flux d'argon permettent de créer le plasma, de refroidir le tube extérieur et d'introduire l'échantillon dans le tube central. L'augmentation de température est due au plasma (jusqu'à 10000°K), provoquant l'ionisation de l'échantillon en ions à charge unique. Cette ionisation dépasse 90% pour 50 éléments de la classification.

c) **L'interface de prélèvement du plasma :** les ions issus du plasma passent à travers 2 cônes de nickel par des orifices, d'environ 1mm de diamètre. Ceci permet de sélectionner un faisceau précis à l'entrée du spectromètre de masse. Entre les deux cônes intervient un pompage différentiel, qui permet de passer de la pression atmosphérique à un vide poussé. Le faisceau d'ions est dirigé vers des lentilles électrostatiques qui focalisent les ions sur l'entrée du spectromètre.

d) **Le spectromètre de masse :** le spectromètre de masse est un quadripôle constitué de quatre électrodes parallèles, séparant les ions en fonction de leur masse dans un champ électrique. Pour un réglage de tension donnée, seule les ions de rapport m/z choisi ont des trajectoires stables et passent à travers le quadripôle. Par étapes successives, l'appareil peut ainsi balayer très rapidement l'ensemble des masses spécifiques sélectionnées.

e) **Acquisition des données :** les ions qui sortent du quadripôle sont dirigés sur un multiplicateur d'électrons afin d'en permettre le comptage.

Pour chaque échantillon, nous avons choisi une procédure dans laquelle l'appareil effectue dix cycles, chaque cycle comprend dix analyses successives de tous les éléments recherchés. Chaque comptage (en nombre de coups) est directement envoyé vers un ordinateur ou un logiciel spécifique qui permet de traiter les données, en tenant compte des corrections désirées. Le nombre de coups donné par l'appareil pour chaque élément est donc une moyenne pour laquelle l'écart type est automatiquement calculé.

2.2.1.3.2. Méthode de calibration

Le calcul de la concentration s'effectue par calibration externe avec un étalonnage interne.

a) **Calibration externe :** Elle est réalisée grâce à des solutions étalons, contenant des quantités connues des éléments à déterminer. C'est une calibration à deux points (une valeur connue et zéro), rendue possible par le fait que le domaine d'analyse est parfaitement linéaire sur six ordres de grandeur.

b) **Etalonnage interne :** Une quantité connue de 2 éléments (indium et rhénium, généralement absents dans les échantillons) est ajoutée. Ceci sert à corriger les éventuelles dérives de la machine lors des mesures.

L'indium sert de standard interne et le rhénium permet de vérifier la stabilité dans le temps de la calibration interne.

2.2.1.3.3. Performance de la méthode

Deux paramètres sont importants à connaître pour notre étude : la limite de détection et la précision des mesures.

a) **Limites de détection et de calcul :** Pour que la mesure d'un élément soit significative, il faut déterminer l'intensité minimale à partir de laquelle on peut estimer que l'élément recherché est présent dans l'échantillon (limite de détection). Cette limite est reliée à la valeur et à la variation du blanc (valeur du signal obtenu en l'absence de l'élément recherché). Le blanc comprend plusieurs composants :

- **Le blanc "machine"** correspondant au bruit de fond dû à l'électronique et à l'argon, ainsi qu'aux éventuelles contaminations ;
- **Le blanc "terrain"** lié au conditionnement des échantillons.

Pour chaque échantillon, on soustrait la contribution du blanc (B) au signal mesuré (N), et la concentration est calculée à partir de l'intensité (N-B). Statistiquement, pour qu'un élément soit présent dans l'échantillon, avec une certitude de 99,5%, il faut que le signal mesuré (N-B) soit supérieur à 3 fois l'écart type mesuré sur le blanc σ (B). La limite de détection est donc calculée comme le serait un échantillon qui donnerait un signal blanc, déduit, supérieur ou égal à 3σ (B).

Cependant, des valeurs qui ne sont que légèrement supérieures à la limite de détection présentent une erreur importante qui rend la valeur obtenue peu précise. Il est donc nécessaire d'introduire la notion de limite de calcul supérieure et la limite de détection en général, pour que le pourcentage d'erreur soit acceptable, en estimant que la mesure doit être supérieure à 10σ (B).

b) **Précision de la mesure :** Le nombre de coups obtenu sur un élément correspond à la moyenne de dix mesures successives de l'échantillon, la précision étant donnée par l'écart-type sur ces dix mesures. Cette précision dépend de plusieurs paramètres susceptibles d'influencer le nombre de coups mesuré, à savoir :

- La stabilité de la machine ;

- Le choix de l'isotope de l'élément à déterminer selon son abondance naturelle ;
- L'abondance relative de l'élément dans l'échantillon (la précision augmente avec la teneur de l'élément) ;
- La valeur du blanc machine et les interférences entre différents éléments (effet de matrice).

La correction des interférences entre la masse de quelques éléments est faite selon la méthode de Aries et al. (2000).

2.2.1.4. Analyse par absorption atomique

Les éléments sodium, calcium, potassium et magnésium ont été analysés par l'absorption atomique, de type Perkin Elmer 5100 PC, avec une marge d'erreur ± 5% et une limite de détection de l'ordre de $7x10^{-8}$ M.

L'absorption de la lumière par les atomes fournit un puissant instrument analytique à la fois pour l'analyse quantitative et qualitative des éléments. La Spectroscopie d'Absorption Atomique (SAA) est basée sur le principe que les atomes libres peuvent absorber la lumière d'une certaine longueur d'onde. L'absorption de chaque élément est spécifique, aucun autre élément n'absorbe sa longueur d'onde.

La SAA est une méthode basée sur un élément unique, utilisée pour reconstituer l'analyse des métaux des échantillons biologiques, métallurgiques, pharmaceutiques et atmosphériques par exemple.

Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique se compose d'une :

a) **Lampe à cathode creuse :** est constituée par une enveloppe de verre scellée et pourvue d'une fenêtre en verre ou en quartz, contenant une cathode creuse cylindrique et une anode. La cathode est constituée de l'élément que l'on veut doser. Un vide poussé est réalisé à l'intérieur de l'ampoule qui est ensuite remplie d'un gaz rare (argon ou néon), sous une pression de quelques mm de Hg.

   Lorsqu'on applique une différence de potentiel de quelques centaines de volts entre les deux électrodes, une décharge s'établit. Le gaz rare est alors ionisé et ces ions bombardent alors la cathode, arrachant les atomes à celle-ci. Ces atomes sont donc libres et sont excités par chocs : il y a émission atomique de l'élément qui constitue la cathode creuse. La particularité du rayonnement ainsi émis est qu'il est constitué de raies très intenses et très fines.

b) **Nébuliseur :** L'échantillon à analyser est en solution, celle-ci est aspirée au moyen d'un capillaire par le nébuliseur. A l'orifice du nébuliseur, du fait de l'éjection d'un gaz à grande vitesse, il se crée une dépression (effet Venturi). La solution d'analyse est alors aspirée dans le capillaire et à la sortie, elle est pulvérisée en un aérosol constitué de fines gouttelettes. Cet aérosol pénètre alors dans la chambre de nébulisation dont le rôle est de faire éclater les gouttelettes et d'éliminer les plus grosses. Ce brouillard homogène pénètre alors dans le brûleur.

c) **Flamme – atomisation :** L'aérosol pénètre dans le brûleur puis dans la flamme. Au bout d'un certain parcours au seuil de la flamme, le solvant de la gouttelette est éliminé, il reste les sels ou particules solides qui sont alors fondus, vaporisés puis atomisés.

   La flamme air acétylène est la plus répandue et permet de réaliser le dosage de nombreux éléments, sa température est de 2500°C environ.

   La flamme N_2O/acétylène (protoxyde d'azote) est utilisée pour certains éléments qui forment des oxydes réfractaires, particulièrement solides et ne sont pas atomisés par la flamme air/acétylène.

d) **Analyseur :** Pour isoler une bande étroite de longueurs d'ondes, on utilise un monochromateur.

e) **Détecteur :** Un photomultiplicateur convertit la lumière en signaux électriques.

2.2.1.5. Mesure de l'alcalinité

L'alcalinité des eaux du chott est présentée essentiellement par les bicarbonates (HCO_3). La mesure de l'alcalinité a été effectuée par un titreur automatique, de type Metrohm 716 DMS Titrino, avec l'utilisation de l'acide chlorhydrique l'HCl. La précision de l'appareil est de ± 10%.

2.2.2. Analyse des sels solides au MEB

Au cours de ces dernières années et grâce aux progrès réalisés dans les domaines de l'électronique, de l'imagerie, de l'acquisition et des traitements des données, les techniques de microscopie électronique se sont considérablement développées et perfectionnées. Parmi toutes les microscopies électroniques, la microscopie électronique à balayage (MEB) est une des méthodes d'observation et d'analyse les plus usitée en géologie, science des matériaux et biologie. Cette nouvelle technologie a permis, du fait de sa profondeur de champ, l'observation du relief d'échantillons massifs.

2.2.2.1. Principe

Le microscope électronique à balayage n'est pas proprement dit un microscope conventionnel dans le sens optique du terme. En effet, il n'y a pas formation d'une image par une lentille objective comme cela et le cas en microscopie optique et en microscopie électronique en transmission mais l'image est formée de manière séquentielle en balayant la surface de l'échantillon et en recueillant les particules émises. Suivant le type de particules détectées, le microscope électronique à balayage fournit des images différentes dont les informations peuvent être complémentaires.

Donc ; le principe consiste à explorer la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal du détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident. Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie, point par point, la surface de l'échantillon.

Sous l'impact du faisceau d'électrons accélérés, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par l'échantillon sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage de l'objet.

2.2.2.2. Fonctionnement simplifié

Le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe à celle du microscope électronique en transmission. L'image MEB est une image reconstituée : une sonde, le faisceau d'électrons, balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone un signal induit par cette sonde pour en former une image, cartographie de l'intensité de ce signal.

L'échantillon va participer activement au processus de formation de l'image. Sa nature chimique et son numéro atomique déterminent le résultat de l'interaction avec le faisceau incident.

2.2.2.3. Méthode d'analyse complémentaire

La connaissance minéralogique est la caractéristique fondamentale d’un matériel solide. Elle s’applique dans de nombreux cas comme l’étude des sols ou des sédiments. Les besoins et les implications d’une description minéralogique adéquate se retrouvent dans des domaines aussi variés que la géologie, l’agriculture, la foresterie, la minéralurgie ou l’environnement. La connaissance minéralogique comprend de manière exhaustive les aspects suivants (Lastra et al. 1998 ; Petruk, 2000) :

- Composition minéralogique : formule chimique des minéraux présents ;
- Variabilité minérale : composition en impuretés élémentaires des différentes phases minérales ;
- Granulo-minéralogie : distribution granulométrique par phase minérale ;
- Morpho-minéralogie : différenciation des phases minérales de composition identique mais de cristallographie différente (polymorphes) ;
- Assemblage minéralogique : minéraux mixtes ou libres, composition en impuretés minérales.

2.2.2.4. Préparation des échantillons

Les échantillons sont tamisés en humide à 25 microns pour faciliter l'analyse. Ensuite, chaque fraction est séchée et homogénéisée pour être ensuite montée en section polie. Ces deux fractions granulométriques seront analysées séparément puis rassemblées lors du traitement des données d'analyse. Il est important de noter que les proportions massiques ou volumiques de chaque fraction granulométrique seront requises pour cet assemblage.

Le montage en section polie présente deux étapes : le montage et le polissage. Le montage de la section consiste à mélanger une quantité optimale d'échantillon avec une préparation de durcisseur et de résine époxy en proportion volumique 1/5. Une fois l'échantillon bien mélangé et homogénéisé avec la préparation, on laisse le tout sécher de 30 min à 2 h. Un socle de résine est ajouté en fin de séchage pour épaissir la section et faciliter son polissage. Le polissage consiste à retirer la fine pellicule de fond de montage par une succession de papiers sablés de plus en plus fins. Une fois les grains visibles, la section est polie sur un tapis de polissage et une succession de pâtes diamantées pour l'obtention d'une surface la plus lisse possible.

L'échantillon, placé dans la chambre du microscope, reçoit un flux d'électrons très important. Si les électrons arrivant sur l'échantillon ne sont pas évacués, ils donnent lieu à des phénomènes de charge induisant des déplacements d'images ou des zébrures sur l'image attribuables à des décharges soudaines de la surface. Si la surface est conductrice, les charges électriques sont évacuées par l'intermédiaire du support de l'échantillon. L'observation d'échantillons électriquement isolants se fait grâce à un dépôt préalable d'une fine couche conductrice d'or ou de carbone transparente aux électrons. La résine époxy couplée à une analyse en basse pression suffit à évacuer le flux de surface de l'échantillon ; le dépôt d'une couche conductrice n'est donc pas nécessaire.

Cependant, un morceau de cuivre adhésif est positionné sur le côté de la section pour aider à l'évacuation mais aussi à la calibration du faisceau d'électron (Knight et al. 2002).

2.2.3. Détermination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La DCO a été déterminée par deux méthodes, l'une en utilisant le réactif DCO (type : TNT) et le spectrophotomètre (DR 2800) à l'aide d'un réacteur DCO à 150°C (Fig. 14), la deuxième est classique décrite ci-après (protocole de Rodier, 2005 et suivant la norme : ISO EN NBN 90-101).

La dégradation des matières organiques déversées dans les écosystèmes lacustres entraîne une consommation de l'oxygène dissout dans l'eau et par conséquent eutrophisation ou pollution du milieu récepteur. L'importance de cette pollution est évaluée par la demande chimique en oxygène, c'est-à-dire : la quantité de dioxygène nécessaire pour oxyder les matières oxydables. Ces matières oxydables sont en très grande majorité des matières organiques. La DCO donc, permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale (Rodier, 2005). Par définition : la DCO est la concentration, exprimée en mg/l de dioxygène (O_2), équivalente à la quantité de dichromate consommée par voie chimique pour oxyder l'ensemble des matières oxydables dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau.

2.2.3.1. Principe

La détermination de la DCO comprend deux étapes :

Étape 1 : Oxydation chimique de la matière organique réductrice contenue dans l'eau, par un excès de dichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$). Cette oxydation se réalise en milieu sulfurique (H_2SO_4), en présence de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) et de sulfate de mercure ($HgSO_4$), à ébullition à reflux pendant deux heures (2h) dans un ballon muni d'un réfrigérant.

Étape 2 : Après refroidissement, dosage de l'excès de dichromate de potassium par le sel de Mohr.

2.2.3.2. Protocole

Etape 1 : Oxydation des matières organiques de l'eau :

- Avant prélèvement de la prise d'essai, l'échantillon doit être soigneusement homogénéisé par agitation du flacon ;
- Dans un ballon à fond plat, introduire :
  - 10ml d'eau à analyser ;
  - 5ml de solution de dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$.
- Ajouter 4 billes régulatrices d'ébullition, boucher et homogénéiser en agitant doucement ;
- Ajouter avec précaution et lentement 15ml de la solution de sulfate d'argent/acide sulfurique (H_2SO_4/Ag_2SO_4 à 10g/l), en agitant le ballon d'un mouvement circulaire et en le refroidissant dans un bain de glace ;
- Placer le ballon dans son support chauffant ;
- Installer le réfrigérant au-dessus du ballon ;
- Mettre en marche le chauffe ballon (température consigne = 185°C) ;
- Chauffer à ébullition douce pendant 2 heures, l'ébullition doit être régulière sans soubresauts ni excès ;
- Au bout de 2 heures, éteindre le chauffe ballon et laisser refroidir environ 15 minutes ;
- Rincer la paroi interne du tube réfrigérant avec environ 25ml d'eau distillée sans enlever le tube réfrigérant et recueillir les eaux de lavage dans le ballon ;
- Sortir le réfrigérant puis compléter à environ 75ml avec de l'eau distillée et laisser refroidir à la température ambiante.

Etape 2 : Dosage de l'excès d'oxydant par le sel de Mohr :

- Ajouter dans le ballon 2 gouttes de ferroïne (indicateur coloré) ;
- Verser le contenu du ballon dans un erlenmeyer de 250ml dans lequel est introduit un barreau aimanté ;
- Doser, sous agitation magnétique, l'excès de solution oxydante par la solution réductrice de sel de Mohr à l'aide d'une burette de 25ml jusqu'au virage de la solution dosée du bleu-vert au marron.

Soit V_E le volume de solution réductrice de sel de Mohr versé pour atteindre l'équivalence du dosage.

Etape 3 : Réalisation d'un blanc :

- Afin de vérifier la qualité, d'une part de l'eau distillée employée durant la séance et d'autre part de celle des diverses solutions utilisées, on réalise le dosage de 10ml d'un blanc, en suivant le même mode opératoire que pour l'échantillon, mais en remplaçant la prise d'essai par 10ml d'eau distillée.
- L'écart entre le volume de titrant (sel de Mohr) pour doser le dichromate de potassium et celui utilisé pour le blanc ne doit pas excéder 0,5ml.

Effectuer cet essai parallèlement à la détermination de la DCO (étape 1 et 2)

Figure 14. Outils DCO

2.2.4. Détermination de la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5)

Sur le principe c'est le même type de réaction que ci-dessus, mais au lieu d'être une réaction chimique via «l'oxydant », c'est l'oxygène dissous présent dans l'eau polluée qui est mise en incubation avec des micro-organismes inoculés. Ce sont eux qui réalisent la réaction l'oxydation à 20°C (fig. 15).

La différence fondamentale avec la DCO réside dans le fait que l'on considère que la DBO_5 mesure la pollution dégradable par les micro-organismes alors que la DCO mesure la quantité totale de la matière potentiellement polluante.

2.2.4.1. Principe de la méthode manométrique

Une quantité d'eau est versée dans une bouteille d'incubation de 300ml fermée avec un bouchon muni d'un capteur de pression. Le volume choisi est fonction de la gamme de mesures souhaitée. L'appareil de mesure est placé dans un réfrigérateur maintenu à 20°C. On suit ensuite, en fonction du temps (pendant 5 jours), la consommation d'oxygène, qui se traduit par une diminution de la pression d'air. On procède enfin à la correction de la mesure par un facteur correctif qui dépend de la quantité d'échantillon prélevée et de la gamme de mesure souhaitée.

L'oxydation des matières organiques provoque la formation de CO_2 et par conséquent il se développe une dépression dans la bouteille.

2.2.4.2. Mode opératoire

- Mesurer la quantité désirée (tab. 1) avec le ballon jaugé de trop-plein et verser dans la bouteille propre ;
- Introduire l'agitateur magnétique dans chaque bouteille ;
- Mettre 2 pastilles d'hydroxyde de potassium ou de sodium dans chaque bouchon (noir) ;
- Visser sans fermer hermétiquement le bouchon ;
- Mettre sur le système d'agitation à 20°C ;
- Laisser s'établir l'équilibre pendant 30mn et fermer hermétiquement le bouchon ;
- Relever les valeurs après 5 jours ;

Il est recommandé d'effectuer le double de chaque dosage (selon la disponibilité du matériel de mesure).

La valeur réelle est calculée comme suit : DBO_5 (mgO_2/l)=Valeur lue * facteur.

2.2.4.3. Quantité à mesurer

La demande biochimique en oxygène pour une analyse dépend de la charge en substances organiques.

- Eaux brutes 164ml ;
- Eaux décantées 250ml ;
- Eaux épurées 432ml.

Tableau 1. Volume et facteur de conversion de la DBO_5

Portée de mesure	Quantité en (ml)	Facteur
0 - 40	432	1
0 - 80	365	2
0 - 200	250	5
0 - 400	164	10
0 - 800	97	20
0 - 2000	43,5	50
0 - 4000	22,7	100

Figure 15. DBO mètre

2.3. Modèle thermodynamique

Dans le développement des modèles géochimiques, nous pouvons distinguer, avec Coudrain-Ribstein (1988), les modèles qui calculent la spéciation des solutions aqueuses et qui caractérisent leurs états d'équilibre vis-à-vis des minéraux. La théorie des équilibres thermodynamiques est le concept le plus adéquat pour faciliter l'identification de plusieurs variables dans la détermination des relations entre solutions et minéraux (Stumm & Morgan, 1970). Le travail de Debye et Hückel (Helgeson et Kirkham, 1974b) est la principale percée dans l'évolution de la thermodynamique des solutions électrolytes.

L'activité des constituants d'une solution, et plus exactement le coefficient d'activité relatif à ces constituants, reflètent les interactions qui sont présentes entre ceux-ci, c'est-à-dire solvant-ion ou ion-ion. Lorsqu'une solution est très diluée, les différentes perturbations sont négligeables ; Il faut cependant distinguer le solvant et le soluté. Dans le cas du solvant, la fraction molaire est proche de 1 tandis que la fraction molaire du soluté est très faible. L'activité est alors équivalente à la fraction molaire et le coefficient d'activité est égal à 1. La fraction molaire est l'échelle de concentration. Cependant il est plus commun d'utiliser la molarité ou la molalité comme unité de concentration : La concentration molaire est le nombre de moles de l'espèce par unité de volume de la solution alors que la molalité est le nombre de moles de soluté par unité de masse du solvant. Cette distinction entre ces deux échelles de concentration est importante du fait de leur utilisation distincte entre l'expérimentation et la théorie. En effet, les théories développées afin de déterminer le coefficient d'activité sont exprimées par rapport à la concentration molaire tandis que les résultats expérimentaux sont déterminés dans l'unité de molalité.

2.3.1. Phreeqc v3 (Parkhurst and Appelo, 2013) est un modèle de réaction géochimique qui simule une variété de processus géochimiques, y compris l'équilibre entre l'eau et les minéraux, les échangeurs d'ions, les complexes de surface, les solutions solides et les gaz. La formulation cinétique générale permet la modélisation de la dissolution et de la précipitation des minéraux non équilibrés et d'autres réactions cinétiques. Il a des capacités de modélisation inverse pour l'évaluation des réactions géochimiques qui expliquent les changements dans la chimie de l'eau.

En raison des spécificités géochimiques et des capacités de réaction et de l'organisation modulaire des intrants, Phreeqc v3 a souvent été utilisé comme module de calcul géochimique. Il a été utilisé pour calculer les indices de saturation, les activités et le pH dans le logiciel de gestion de données de qualité de l'eau, pour générer des diagrammes de prédominance et des paramètres d'estimation et à considérer effets géochimiques dans les processus des bassins hydrographiques.

Il permet de définir les compositions initiales de la solution et des réactifs, de calculer de nouvelles compositions à la fin d'une étape de réaction et enfin d'enregistrer ces nouvelles compositions pour une utilisation dans des calculs de réaction ultérieurs.

On utilise ce modèle pour calculer les coefficients d'activité et les équilibres minéraux/solutions sous différentes hypothèses :

2.3.1.1. Le modèle d'Association Ionique

Il est basé sur la fonction étendue de Debye-Hückel qui s'écrit pour un ion i en solution :

$$Log\ \gamma_i = -\ (A\ z_i^2\ \sqrt{I})\ /\ (1\ +\ a_i^{\circ}\ B\sqrt{I})\ +\ b_\gamma I$$

Avec :

b_γ = 0,2 ou 0,3 : constante d'écart à la loi de Debye-Hückel ;

a_i° : le diamètre du noyau dur, ce qui est spécifique à chaque espèce aqueuse *i* (en cm) ;

z : la charge électrique de *i* ;

I : la force ionique ;

A = 0.5092 et *B* = 0.3283 à t = 25°C : constantes universelles de la loi de Debye-Hückel (Helgeson et Kirkham, 1974b).

2.3.1.1.1. Théorie de Debye-Hückel

À partir de 1923, Debye et Hückel publient une série d’articles sur la chimie des électrolytes qui conduisent à la loi limite de Debye-Hückel, qui permet de calculer le coefficient d’activité d’une espèce aqueuse mais qui est valable uniquement pour les solutions très diluées :

$$Log\ \gamma_i = -A\ z_i^2\ \sqrt{I}$$

Où z_i correspond à la charge de l'espèce *i* et *I* à la force ionique de la solution définie par :

$$I = ½ \sum m_i\ z_i^2$$

Où m_i est la molalité de *i* dans la solution.

Ces auteurs fournissent également une loi, dite loi étendue, qui n'est valable que pour les solutions modérément diluées :

$$Log\ \gamma_i = -\ (A\ z_i^2\ \sqrt{I})\ /\ (1 + a_i^{\circ}\ B\sqrt{I})$$

Où a_i° correspond au diamètre de l'ion considéré comme une « sphère dure ». L'hypothèse, incorrecte, est faite que tous les ions ont le même diamètre. En effet, la difficulté du modèle est que la valeur du diamètre $\boldsymbol{a_i^{\circ}}$ n'est pas une quantité mesurable. Cependant, en choisissant une valeur proche du rayon hydraté entre 3.5 et 6.2 Å, les résultats peuvent être améliorés (Stokes, 1945a et b ; Robinson et al. 1940).

Les lois développées par Debye et Hückel n'étant valables qu'à basse molalité, elles ont fait l'objet d'extensions empiriques afin de représenter les coefficients d'activité des solutions plus concentrées.

2.3.1.1.2. Extension du modèle de Debye-Hückel

Hückel (1925) a amélioré la loi de Debye-Hückel étendue en rajoutant un paramètre ajustable *C*. Il démontre qu'un terme proportionnel à la force ionique prend en compte la variation de la constante diélectrique avec la composition.

$$Log\ \gamma_i = -\ (A\ z_i^2\ \sqrt{I})\ /\ (1 + a_i^{\circ}\ B\sqrt{I}) + CI$$

Guggenheim (1935) propose une autre version de cette équation afin d'éviter l'hypothèse incorrecte faite précédemment, c'est-à-dire que tous les ions ont le même diamètre :

$$Ln\ \gamma_{\pm} = (-\ \alpha z_+ z_-\ \sqrt{I})/(1+\sqrt{I}) + 2\nu Bm$$

Davies (1938) propose une nouvelle extension empirique de la loi limite de Debye-Hückel :

$$Log\ \gamma_{\pm} = -\ 0{,}5 z_+ z_-\ \left\{ \sqrt{I}\ /(1+\sqrt{I})\ -\ 0{,}2I \right\}$$

Cette équation, valable à 25°C, a été obtenue grâce à une revue des mesures de coefficients d'activité disponible. En 1962, Davies est amené à réviser son modèle suite à de nouvelles données de coefficient d'activité (Davies, 1962) :

$$Log\ \gamma_{\pm} = -\ 0{,}5 z_{+} z_{-} \left\{ \sqrt{I}/(1+\sqrt{I})\ -\ 0{,}3I \right\}$$

Cette dernière équation peut être utilisée pour tous les types d'électrolytes, excepté ceux du type 2-2, pour lesquels l'équation empirique suivante est utilisée :

$$Log\ \gamma_{\pm} = -\ 2 \left\{ \sqrt{I}/(1+\sqrt{I})\ -\ CI \right\}$$

2.3.1.2. Le modèle d'interaction ionique spécifique

Il est basé sur l'équation de Pitzer où le terme $b_{\gamma}I$ est remplacé par la somme : $\sum \beta_{ij}\ m_j$

$$Log\ \gamma_i = (-A\ z_i^2\ \sqrt{I})/\ (1\ +\ a_i^{\circ}\ B\sqrt{I})\ +\ \sum \beta_{ij}\ m_j$$

Avec :

m_j : est la molalité de l'ion j ; et

β_{ij} : est un coefficient caractéristique du couple d'espèces i et j (Millero, 2001 ; Plummer et al. 1988 ; Harvie and Weare, 1980 ; Harvie et al. 1980).

2.3.1.2.1. Modèle de Pitzer

Le modèle de Pitzer (1973) est un modèle semi-empirique dont la forme des équations a été guidée par des bases théoriques. Il part du constat que, dans la théorie de Debye-Hückel, les effets appelés effets cinétiques de sphère dure sur les différentes propriétés ne sont pas pris en compte. Pitzer repart de l'expression suivante :

$$\Pi\ -\ ckT = -\ 1/6 \sum_i \sum_j c_i\ c_j \int_0^{\infty} (\partial u_{ij}/\partial r)\ g_{ij}\ 4\pi r^3 dr$$

Où Π est la pression osmotique, c la concentration totale en soluté ($\sum_i c_i$), k la constante de Boltzmann, c_i et c_j sont les concentrations des espèces i et j, u_{ij} est le potentiel intermoléculaire, g_{ij} la fonction de distribution radiale et r est le rayon de la sphère.

Dans le cas des saumures les coefficients d'activité qui prennent en compte l'influence de la concentration de diverses espèces en solution sont aisément calculés par ce modèle. Dans la conception de ce modèle, les ions demeurent non associés et la force ionique I de la solution est directement calculée à partir des molalités des sels.

2.3.1.3. La Théorie d'Interaction Ionique Spécifique (SIT)

L'expression des paramètres de SIT (Specific Ion Interaction Theory) est la même que celle de Pitzer.

Dans le modèle SIT (Grenthe et al. 1997), les hypothèses suivantes sont faites :

- Le coefficient d'interaction entre les ions de même signe est nul. Du fait des forces électrostatiques de répulsion, les ions de même signe sont éloignés les uns des autres et, par conséquent, le terme de courte portée pour ces espèces est petit.
- Les interactions entre les espèces non chargées sont négligeables.

Le coefficient osmotique, pour un mélange contenant des électrolytes, un solvant et un nombre n d'espèces neutres, se décrit d'après l'équation suivante :

$$Ø = 1 - \left\{2A_y\left(t-2\ln(t)1/t\right)/1{,}5^3\sum_k mk\right\} + (1/\sum_k m_k)\left\{\sum_c\sum_a \varepsilon_y(c,a)m_c m_a + \sum_c\sum_n \varepsilon_y(c,n)m_c m_n + \sum_a\sum_n \varepsilon_y(a,n)m_a m_n + ½ \sum_{ni}\sum_{nj} \varepsilon_y(n_i, n_j)m_{ni}m_{nj}\right\}$$

Le paramètre t est fonction de la force ionique I :

$$t = 1 + 1{,}5 \sqrt{I}$$

Le coefficient A_y peut se calculer à partir du paramètre de Debye-Hückel $A_Ø$.

$$A_y = 3A_Ø = A \ln 10$$

Et le paramètre $\varepsilon\gamma$ se calcule à partir du coefficient d'interaction ajustable $\varepsilon(c,a)$:

$$\varepsilon\gamma\ (c,a) = \ln\ (10)\ \varepsilon(c,a)$$

Bretti et al. (2004) ont modifié le modèle SIT. Dans cette nouvelle approche, les paramètres d'interaction sont supposés dépendre de la force ionique ce qui leur permet de modéliser des solutions jusqu'à 6mol/kgw minimum.

L'état de saturation de la solution vis-à-vis des minéraux est exprimé par l'indice de saturation *(IS)* défini comme le logarithme du ratio entre le Produit des Activités Ioniques *(IAP)* et la constante de solubilité de la phase solide considérée *(Ks)* :

$$IS = Log\ (\Omega) = Log\ (IAP/K_s)$$

La sous-saturation de la solution par rapport au minéral se caractérise par un rapport inférieur à 1 et donc le minéral à tendance à se dissoudre. La saturation (ou équilibre thermodynamique) se caractérise par un rapport égal à 1 et aucune variation de la quantité nette de minéral dissous et précipite n’est donc attendue. La sursaturation se caractérise par un rapport supérieur à 1 et, par conséquent, le minéral à tendance à se précipiter.

2.4. Notions de dégradation environnementale

a) ***Une contamination*** est une variation anormale en excès d'un élément sur les teneurs naturelle du système.

b) ***Une pollution*** est une concentration anormale d'un élément qui provoque des perturbations dans le fonctionnement des organismes vivants du système.

Un écosystème lacustre est dit pollué lorsque son équilibre a été modifié de façon durable par l'apport en quantités trop importantes de substances plus ou moins toxiques d'origines naturelles ou issues d'activités humaines. Certains de ces substances sont biodégradables. L'écosystème est donc, capable de transformer et d'éliminer, en partie ou en totalité, ces substances biodégradables qu'il reçoit et d'assurer ainsi le maintien de son équilibre et de la qualité de ses eaux. Mais, si l'abondance de ces substances dépasse un seuil critique, ses capacités d'auto-épuration ne suffisent plus. L'élément polluant ne peut plus être éliminé assez rapidement ; il s'accumule, rompant progressivement l'équilibre dynamique naturel du milieu aquatique, et peut même devenir toxique. On dit alors qu'il y a pollution.

c) ***Une toxicité :*** Un élément est dit toxique lorsqu'il est susceptible d'engendrer des effets négatifs sur certaines fonctions des organismes vivants du système. Un élément est dit toxique lorsqu'il est susceptible d'engendrer des effets négatifs sur le comportement biologique des composantes d'un milieu naturel. Les Eléments Traces (ET) présentent un risque de toxicité qui dépend de leur taux de transfert d'un compartiment à un autre.

d) ***La mobilité*** d'un (ET) est l'aptitude de celui-ci à migrer d'un compartiment quelconque à un autre. Les ET peuvent se trouver sous différentes formes :

- Solubles ou adsorbés sur les argiles, les oxydes de fer et de manganèse et la matière organique ;
- Complexés à la matière organique ou ;

- Précipités avec les phosphates, les hydroxydes, les carbonates, ou inclus dans les silicates.

Donc ; toute augmentation significative d'un ou plusieurs Eléments Traces représente une contamination dont le diagnostic dépend de la nature, de la source contaminante et du comportement de l'élément contaminant dans le milieu récepteur.

« La prise en compte des aspects environnementaux dans la législation algérienne est détaillée en annexe 3»

CHAPITRE 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Chap. 3. Résultats et discussion

Dans ce chapitre nous essayons de comprendre le comportement géochimique des saumures en utilisant les bases de données du modèle thermodynamique PHREEQC v3. Ensuite, nous présenterons les concentrations de quelques Eléments Traces, et quelques indices de dégradation dans les chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien.

3.1. Géochimie des saumures

3.1.1. Introduction

Les travaux les plus connus, consacrés à l'étude des interactions minéraux/solutions et évolutions géochimiques des sels et des saumures dans les lacs salés, sont les travaux de : Jones and Deocampo (2004), Moshood (2004), Risacher et al. (2003, 2002, 2001 et 1996), Garcés (2000a), Bein et Dutton (1993), Weare (1987), Brantley et al. (1984), Harvie et al. (1984), Monnin et Schott (1984), Frape et Fritz (1982), Land et Prezbindowski (1981), Rettig et al. (1980), Eugster and Jones (1979), Eugster and Hardie (1978), Clayton et al. (1966).

Dans le Bas Sahara, on peut citer les travaux de Hacini et al. (2006 et 2008) sur la géochimie et la minéralogie des saumures de chott Merouane et les travaux de Gueddari et al. (1983) sur l'application de l'équation de Pitzer dans la géochimie des saumures de chott El Jerid dans le Sud tunisien.

Les modèles thermodynamiques utilisés dans ces travaux sont applicables pour les saumures où la force ionique est inférieure à 1mol/l, ce qui n'est pas le cas pour notre région où la force ionique est supérieure à 1mol/l. Donc ; une simulation de l'évolution géochimique des saumures à l'aide de modèles mathématiques sera nécessaire pour vérifier l'applicabilité de ces modèles. A cette fin, les bases de données du modèle thermodynamique PHREEQC v3 (version 3.0 récemment publiée par l'US Geological Survey) (Parkhurst and Appelo, 2013), ont été utilisées pour déterminer les coefficients d'activité et l'état de saturation des saumures par les principales espèces chimiques.

Vu la forte concentration des saumures en sels dessous, le traitement des résultats d'analyses chimiques acquises lors de ce projet de recherche demande un travail important. Afin d'évaluer la qualité des résultats d'analyses, on utilise une méthode simple basée sur le calcul de la balance ionique (Freeze and Cherry, 1979). Les résultats sont donc, corrigés en acceptant une erreur de déséquilibres de balance ionique inférieure à 10%. Néanmoins, cette balance ionique ne donne une information sur la qualité analytique que pour les espèces chimiques dominantes dans la solution. La nature chimique des saumures est influencée par les propriétés chimiques des eaux usées, par les conditions

climatiques sévères, ainsi que par les impacts humains qui peuvent influencer sur les processus naturels.

3.1.2. Compositions et faciès chimiques des saumures

Le cation majeur des saumures continentales est presque toujours le sodium (Na). I1 existe très peu de saumures à magnésium (Mg) ou calcium (Ca) dominant et l'on ne connaît pas de saumures naturelles où le potassium (K) soit le cation principal. Les anions majeurs sont le chlorure (Cl), le sulfate (SO_4) ou le carbonate (CO_3) (fig. 16).

L'analyse chimique de différents ions permet de spécifier le faciès géochimique des saumures dans les chotts du Bas Sahara Algérien. Elles comprennent généralement des ions simples en solution, des espèces aqueuses complexes et des espèces minérales. Le tableau 2 synthétise la concentration des saumures en sels dessous dans les conditions naturelles.

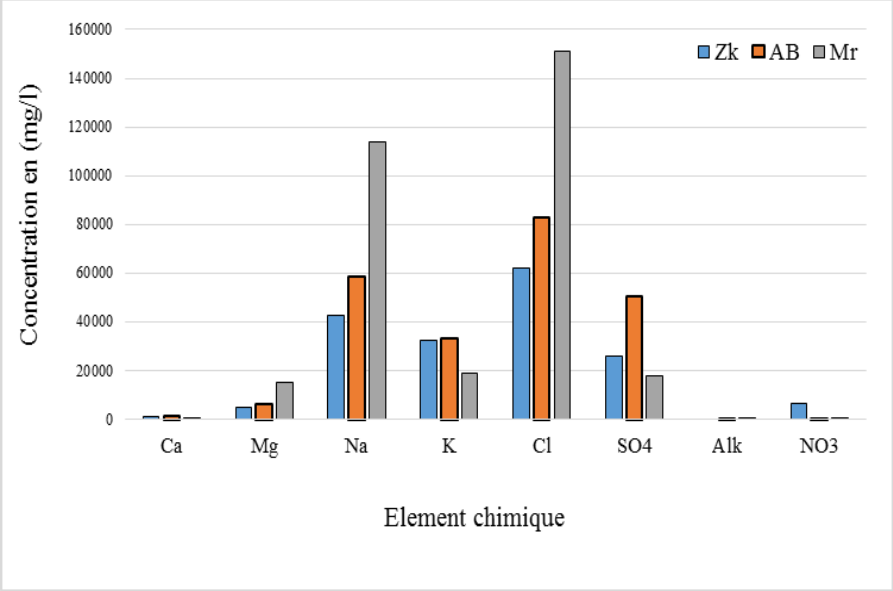


Figure 16. Variation des compositions chimiques des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien

Elles contiennent typiquement en moyenne le chlorure (6,04mol/kgw) comme anion dominant et le sodium (5,36mol/kgw) comme cation dominant. Les autres éléments dissous ont des concentrations moins importantes par rapport au chlorure et au sodium, elles sont en moyenne de l'ordre de 0,53mol/kgw pour les sulfates et le magnésium, de 0,26mol/kgw pour le calcium et de l'ordre de 0,41mol/kgw pour le potassium. La concentration en sulfates est associée aux formations évaporitiques (sols gypseux à croûte gypseuse). La concentration totale en éléments dissous peut approcher parfois plusieurs

centaines de gramme par litre (400g/l). En revanche, l'eau de mer ne contient que 19g/l de chlorures et une salinité totale moyenne de l'ordre de 35g/l.

Tableau 2. Compositions chimiques des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009-2010)

N° : Ech	T (°C)	pH	Densité	Ca mol/kgw	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3
Ab.09	29,3	8,3	1,37	0,04	0,21	4,48	1,11	4,12	0,68	0,001
Ab.09	30,8	8,43	1,36	0,04	0,2	4,38	1,16	4,24	0,57	0,001
Ab.09	24,1	7,68	1,46	0,03	0,53	5,3	1,24	5,49	0,88	0,003
Ab.09	30,1	7,79	1,5	0,11	0,95	5,24	0,83	5,25	1,37	0,01
Ab.09	13,5	8,07	1,65	0,68	0,47	8,17	0,06	10,42	0,51	0,02
Ab.09	14	8,13	1,67	0,74	0,84	8,23	0,12	10,12	0,69	0,03
Ab.09	16	8,38	1,17	0,15	0,52	1,39	0,13	1,79	0,52	0,02
Ng.09	23,7	7,28	1,46	0,04	0,65	4,75	1,88	6,37	0,3	0,003
Sf.09	20,3	7,25	1,39	0,02	1,2	3,85	0,55	5,81	0,46	0,003
Bg.09	19,4	7,88	1,2	0,07	0,08	2,61	0,54	3,08	0,08	/
Bg.09	21,4	7,36	1,37	0,02	0,56	4,57	0,59	5,61	0,3	0,003
Bg.09	22,4	7,25	1,44	0,04	0,64	4,82	1,52	6,32	0,32	0,003
Bg.09	17,4	7,45	1,47	0,04	0,83	4,98	1,8	6,38	0,35	0,003
Ch.09	16,5	7,6	1,27	0,03	0,32	3,22	0,55	3,96	0,24	0,005
Mr.12/09	16	7,85	1,54	0,01	0,96	6,86	0,13	9,03	0,37	0,02
Mr.12/09	18	7,95	1,52	0,01	0,82	6,74	0,11	8,84	0,3	0,01
Ab.01/10	19	8,04	1,44	0,51	0,5	5,98	0,04	5,75	0,65	0,01
Ab.02/10	19,7	8,26	1,69	0,89	0,48	8,39	0,12	10,2	0,82	0,02
Ab.02/10	19,8	8,12	1,79	1	0,84	8,94	0,12	9,48	1,87	0,02
Ab.02/10	19,9	8,74	1,14	0,33	0,17	1,31	0,02	1,31	0,42	0,02
Ab.02/10	20	8,76	1,24	0,45	0,46	2	0,27	1,53	1,04	0,02
Ab.03/10	19	9,4	1,06	0,03	0,08	0,77	0,01	0,53	0,24	0,004
Ab.03/10	13,7	8,3	1,54	0,1	0,58	7,79	0,09	7,18	0,92	0,02
Ab.03/10	14,3	8,36	1,3	0,07	0,44	4,06	0,05	3,07	0,86	0,02
Ab.03/10	14,4	9,04	1,34	0,07	0,97	3,33	0,29	3,14	1,2	0,03
Ab.04/10	20	8,22	1,15	0,21	0,27	1,48	0,06	1,53	0,41	0,02
Mr.01/10	14	7,89	1,46	0,55	0,44	6,15	0,07	7,35	0,22	0,01
Mr.01/10	15	7,81	1,5	0,56	0,53	6,74	0,07	8,13	0,22	0,01
Mr.02/10	20,8	8,02	1,5	0,68	0,46	6,62	0,07	8,02	0,26	0,01
Mr.02/10	21,2	8,07	1,52	0,76	0,51	6,88	0,08	8,39	0,23	0,01
Mr.03/10	15,7	7,85	1,46	0,11	0,48	7,01	0,07	7,08	0,27	0,01
Mr.03/10	15,9	8,01	1,46	0,11	0,48	7,1	0,07	7,32	0,15	0,01
Mr.04/10	19	7,35	1,56	0,53	0,64	7,25	0,11	9,13	0,28	0,01

(mol/kgw : mole par kilogramme d'eau)

Ab.09 : Station Chott Ain El beida en 2009
Ng.09 : Station Sebkhet N'goussa en 2009
Sf.09 : Station Sebkhet Safioune en 2009
Bg.09 : Station Chott Beghdad en 2009
Ch.09 : Station Sebkhet Chagga en 2009
Mr.12/09 : Station Chott Merouane Décembre 2009
Ab.01/10 : Station Chott Ain El beida Janvier 2010

Les faciès chimiques de ces saumures sont principalement chlorurés-sodiques :

r % Cl > r % SO_4 > r % HCO_3 = r % Na > r % Mg > r % Ca > r % K

r % Cl > r % SO_4 > r % HCO_3 = r % Na > r % Ca > r % Mg > r % K

r % : quantité en réaction en pour cent en milliéquivalents par litres (méq/l)

3.1.3. Etat de saturation

Les indices de saturation en calcite, gypse, anhydrite, sylvite et Thenardite ont été calculés au moyen de trois modèles thermodynamiques (tab. 3) (annexe 2). Les calculs montrent que la solubilité de ces minéraux dans les saumures est directement proportionnelle avec la force ionique ; sauf que pour la sylvite où elle est presque constante malgré l'accroissement de la forces ioniques.

La modélisation thermodynamique indique que les saumures sont nettement sur-saturées vis-à-vis de la calcite que vis-à-vis du gypse (tab. 3). En effet, la précipitation de la calcite est contrôlée par la concentration des ions calcium. Lorsque la dissolution de gypse est importante, conduisant à de fortes concentrations en SO_4, la cinétique de précipitation de la calcite n'a pas d'influence significative sur les concentrations en Ca. Donc ; le Ca est produit essentiellement par la dissolution du gypse et est partiellement mobilisé par la précipitation de calcite.

L'état d'équilibre thermodynamique observé avec la halite n'est plus atteint. Pour les autres minéraux, les saumures sont plus ou moins sous-saturées vis-à-vis de la sylvite et de la thénardite.

Les data bases de trois modèles thermodynamiques utilisées dans les calculs, montrent des écarts plus au moins importants entre les valeurs mesurées des indices de saturation (tab. 3).

Tenant compte l'applicabilité limitée du modèle d'association ionique pour les solutions fortement concentrées (Michard, 1989), on estime :

- 21, 24, 9 et 12% de valeurs aberantes sous ou sur-estimées de $IS_{Calcite}$, IS_{Gypse}, $IS_{Anhydrite}$ et $IS_{Sylvite}$, calculées par la méthode SIT contre respectivement :
- 45, 24, 57 et 63% calculées par celle de Pitzer, sauf que pour l'halite où on estime :

- 0% de valeurs aberantes sous ou sur-estimées de IS_{Halite}, calculées par la méthode de Pitzer contre :

- 84% calculée par la méthode de SIT.

D'une manière générale, on estime 29% de valeurs aberantes sous ou sur-estimées de IS calculées par la méthode SIT contre 37% calculées par celui de Pitzer. Cela nous amène de déduire « *l'accord satisfaisant* » de calcul avec SIT. Les indices de saturation de la thénardite ne sont pas calculés par le modèle d'association ionique.

En revanche, dans le diagramme d'activité, l'état d'équilibre simulé par différents modèles thermodynamiques, montre que :

A) Pour la saturation vis-à-vis du gypse et vis-à-vis de la calcite, les points s'organisent plus au moins conformément avec les droites d'équilibre des produits de solubilité du gypse $K_{ps\ (gypse)}$ et de la calcite $K_{ps(\ calcite)}$ établi par la méthode de Pitzer (fig. 17 et 18).

   Lorsque la saturation est atteinte, les concentrations en *Ca* et SO_4 sont conditionnées par leurs produits de solubilité. Les droites d'équilibre des produits de solubilité du gypse et de la calcite sont :

$$Log\ K_{ps\ (gypse)} = log\ a_{Ca} + log\ a_{SO4} + 2log\ a_w = -\ 4.58$$

$$Log\ K_{ps\ (calcite)} = log\ a_{Ca} + log\ a_{CO3} = -\ 8.36$$

B) Pour la saturation vis à vis de l'halite, elle n'est plus atteinte bien que si les concentrations en sodium et en chlorure augmentent ; donc, leur précipitation ne peut être obtenue que pour des facteurs de concentration plus élevés (fig. 19). La droite d'équilibre du produit de solubilité de l'halite est :

$$Log\ K_{ps\ (halite)} = log\ a_{Na} + log\ a_{Cl} = 1.56$$

Tableau 3. Forces ioniques et indices de saturation des saumures, calculés par trois modèles thermodynamiques chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009-2010)

N°: Ech	I	Calcite			Gypse			Anhydrite			Halite			Sylvite			Thenardite	
	(mol/l)	IA	M. Pitzer	SIT	IA	M. Pitzer	SIT	IA	M. Pitzer	SIT	IA	M. Pitzer	SIT	IA	M. Pitzer	SIT	M. Pitzer	SIT
Ab.09	4,93	0,85	0,79	0.48	0,7	0,63	0.40	0,61	0,52	0.43	-0,42	-0,48	-0.71	-0,78	-0,67	-0.71	-0,48	-0.67
Ab.09	4,81	0,83	0,81	0.56	0,61	0,57	0.35	0,53	0,47	0.39	-0,41	-0,47	-0.69	-0,76	-0,64	-0.68	-0,55	-0.72
Ab.09	6,08	0,47	0,81	0.42	0,72	0,78	0.36	0,62	0,68	0.37	-0,08	-0,08	-0.48	-0,51	-0,35	-0.49	-0,13	-0.53
Ab.09	7,02	1,56	1,75	1.52	1,29	1,39	0.88	1,25	1,38	0.95	-0,12	-0,02	-0.61	-0,78	-0,57	-0.79	0,08	-0.49
Ab.09	7,68	2,62	2,76	2.69	1,92	2,69	1.38	1,85	2,78	1.47	0,83	1,08	0.36	-1,3	-0,96	-1.23	0,60	-0.56
Ab.09	8,26	2,64	2,12	2.87	2,04	2,73	1.46	1,98	2,87	1.55	0,87	1,17	0.30	-1,03	-0,65	-1	0,77	-0.46
Ab.09	3,46	2,39	2,36	2.20	1,23	1,06	1.09	0,89	0,66	0.89	-1,47	-1,49	-1.60	-1,96	-1,91	-1.87	-1,62	-1.47
Ng.09	5,83	-0,01	0,82	0.35	0,37	0,55	0.22	0,29	0,47	0.26	0,03	0,00	-0.40	-0,23	-0,05	-0.23	-0,62	-0.90
Sf.09	6,08	-0,76	0,17	-0.37	0,05	0,37	-0.05	-0,12	0,22	-0.09	-0,15	-0,08	-0.61	-0,78	-0,58	-0.82	-0,57	-0.82
Bg.09	2,97	/	/	/	0,24	0,17	0.23	-0,03	-0,15	0.10	-0,89	-0,96	-1.00	-1,11	-1,07	-1.01	-1,80	-1.65
Bg.09	5,21	-0,23	0,51	-0.03	0,01	0,25	-0.08	-0,15	0,09	-0.10	-0,15	-0,15	-0.48	-0,79	-0,64	-0.76	-0,67	-0.84
Bg.09	5,78	-0,08	0,77	0.25	0,37	0,57	0.22	0,26	0,47	0.23	0,02	0,01	-0.39	-0,32	-0,14	-0.31	-0,57	-0.84
Bg.09	6,15	-0,03	0,80	0.38	0,46	0,63	0.26	0,32	0,48	0.23	0,10	0,10	-0.37	-0,17	0,03	-0.18	-0,50	-0.83
Ch.09	3,98	0,57	0,94	0.49	0,21	0,23	0.14	-0,06	-0,09	0.01	-0,61	-0,66	-0.81	-0,95	-0,89	-0.89	-1,18	-1.09
Mr.12/09	6,92	0,02	0,42	0.65	-0,46	0,36	-0.62	-0,56	0,36	-0.59	0,54	0,71	0.04	-1,12	-0,83	-1.12	0,22	-0.51
Mr.12/09	6,64	0,15	0,45	0.73	-0,54	0,25	-0.65	-0,63	0,24	-0.61	0,48	0,63	0.02	-1,20	-0,93	-1.19	0,07	-0.58
Ab.01/10	6,4	2,38	2,81	2.30	1,78	1,91	1.38	1,63	1,77	1.37	0,07	0,16	-0.28	-1,90	-1,68	-1.82	-0,12	-0.59
Ab.02/10	8,16	2,85	/	2.83	2,20	2,78	1.56	2,20	2,96	1.72	0,84	1,10	0.33	-1,07	-0,73	-1.01	0,76	-0.42
Ab.02/10	9,34	2,57	/	2.62	2,53	2,86	1.76	2,54	3,10	1.89	0,82	1,22	0.18	-1,11	-0,72	-1.11	1,20	-0.21
Ab.02/10	2,79	2,91	2,89	2.66	1,52	1,31	1.37	1,22	0,94	1.20	-1,67	-1,70	-1.74	-2,84	-2,80	-2.72	-1,72	-1.57
Ab.02/10	4,68	3,07	2,85	2.74	1,88	1,55	1.60	1,60	1,21	1.45	-1,39	-1,40	-1.55	-1,77	-1,69	-1.67	-1,17	-1.08
Ab.03/10	1,28	1,81	1,68	1.60	0,49	0,34	0.41	0,14	-0,08	0.20	-2,34	-2,38	-2.37	-3,55	-3,54	-3.44	-2,10	-1.94
Ab.03/10	6,95	2,11	2,09	2.11	1,24	1,62	0.76	1,08	1,53	0.73	0,38	0,54	-0.06	-1,38	-1,13	-1.34	0,52	-0.33
Ab.03/10	4,87	2,19	2,13	1.88	1,03	0,87	0.72	0,74	0,52	0.56	-0,65	-0,67	-0.89	-2,11	-2,04	-2.03	-0,55	-0.63
Ab.03/10	5,68	2,43	1,93	2.12	1,10	0,96	0.76	0,80	0,63	0.60	-0,71	-0,67	-1.03	-1,32	-1,21	-1.30	-0,57	-0.70
Ab.04/10	2,89	2,53	2,57	2.31	1,29	1,12	1.17	0,99	0,76	1	-1,54	-1,57	-1.63	-2,37	-2,33	-2.26	-1,62	-1.48
Mr.01/10	6,31	2,08	2,84	2.14	1,44	1,81	1.09	1,26	1,67	1.07	0,31	0,40	-0.04	-1,44	-1,21	-1.35	-0,43	-1
Mr.01/10	6,71	1,98	2,79	2.15	1,43	1,91	1.06	1,30	1,85	1.08	0,48	0,60	0.08	-1,38	-1,11	-1.29	-0,25	-0.99
Mr.02/10	6,75	2,32	2,88	2.41	1,56	1,99	1.16	1,48	1,99	1.24	0,45	0,56	0.06	-1,50	-1,22	-1.40	-0,22	-0.97
Mr.02/10	7	2,34	2,79	2.47	1,57	2,02	1.13	1,51	2,07	1.23	0,54	0,67	0.12	-1,41	-1,12	-1.31	-0,19	-1.03
Mr.03/10	6,04	1,48	2,10	1.69	0,76	1,21	0.52	0,61	1,08	0.51	0,30	0,39	-0.05	-1,50	-1,27	-1.43	-0,16	-0.72
Mr.03/10	6	1,65	2,19	1.91	0,51	1,01	0.32	0,37	0,90	0.32	0,35	0,43	-0.01	-1,48	-1,24	-1.40	-0,38	-0.94
Mr.04/10	7,14	1,59	2,72	1.92	1,49	2,13	1.12	1,43	2,19	1.22	0,63	0,79	0.17	-1,21	-0,90	-1.14	0,07	-0.83

IA : méthode d'Association Ionique M-Pitzer : modèle d'interaction ionique spécifique de Pitzer SIT : Specific Ion Interaction Theory I : force ionique

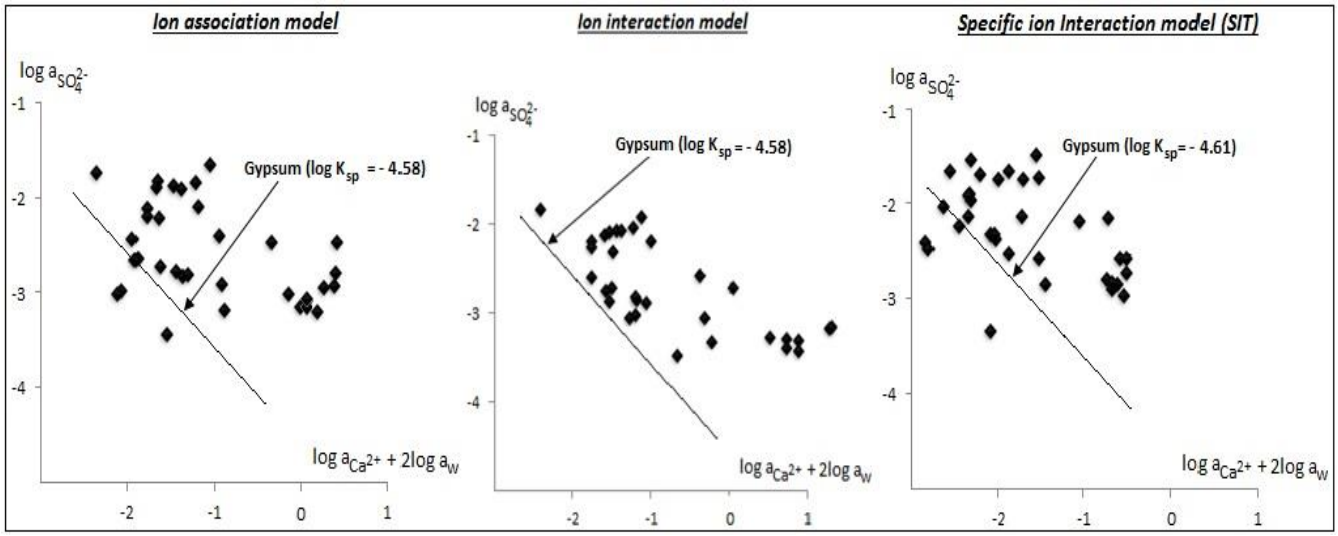


Figure 17. Equilibre des saumures par rapport au gypse

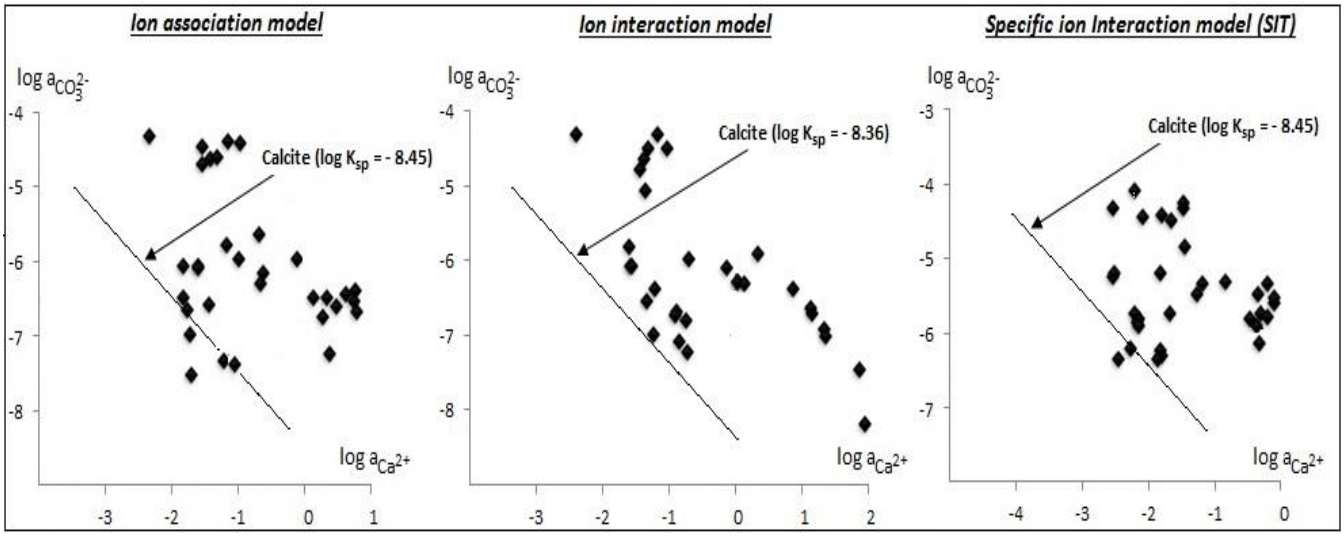


Figure 18. Equilibre des saumures par rapport à la calcite

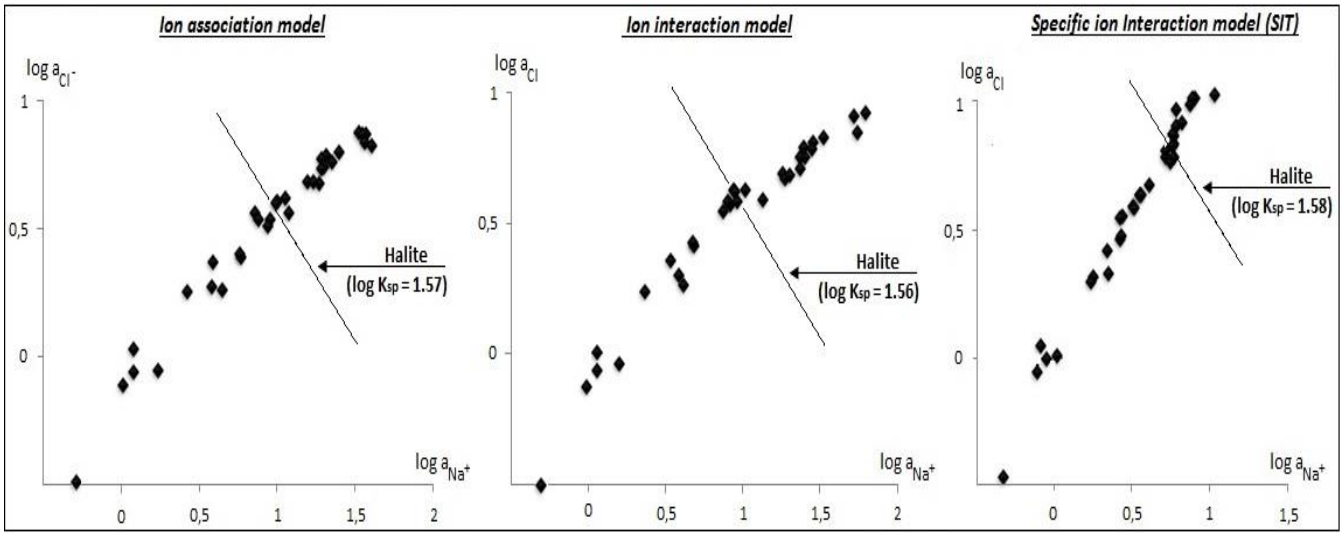


Figure 19. Equilibre des saumures par rapport à l'halite

Dans PHREEQC, il n'y a pas de séparation nette entre modèles et paramètres :

- Utiliser la base de données *phreeqc.dat* (base par défaut) implique d'utiliser la loi de Debye-Hückel « étendue » ;
- Utiliser la base de données *pitzer.dat* implique d'utiliser les équations de Pitzer, mais :
    - seuls les éléments majeurs sont paramétrés ;
    - le modèle est surparamétré.
- Utiliser la base de données *sit.dat* implique d'utiliser le modèle SIT, introduit avec la version 3, qui repose sur une extension de la loi de Debye-Hückel plus ancienne que celle de Pitzer, due à Scatchard et Guggenheim, et contient moins de paramètres.

Les données thermodynamiques tabulées ne sont pas toujours cohérentes d'une base à une autre : à l'utilisateur de vérifier si les données sont adaptées à son problème !

De plus, les données thermodynamiques sont obtenues par extrapolation à I = 0 de mesures en solution plus concentrées. Il n'est donc pas a priori cohérent d'utiliser des données thermodynamiques avec un autre modèle que celui qui a servi à faire cette extrapolation (Bourrié et al. 1976, 2013).

3.1.4. Conclusion

Les résultats menés lors de ce projet de recherche montrent que les saumures dans les chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien, sont caractérisées par une concentration élevée de l'ordre de 290g/l en moyenne, un état de sursaturation vis-à-vis de la calcite plus au moins vis-à-vis du gypse.

La spéciation et la modélisation thermodynamique de ces saumures se différencient selon le modèle utilisé. Ce modèle dépend essentiellement de la base de données thermodynamiques avec laquelle les calculs sont exécutés. Tenant compte l'applicabilité limitée du modèle d'association ionique pour les solutions très concentrées, le modèle d'interaction ionique spécifique établi par Pitzer a été comparé avec celui de SIT Specific Ion Interaction Theory. On constate en règle générale que le modèle de SIT met en jeu davantage de paramètres et il est plus au moins satisfaisant, dans son domaine d'application, par rapport de celui de Pitzer. Mais les diagrammes d'activité de l'halite

montrent qu’il y a des points au-dessus de la droite d'équilibre, ce qui est important : c’est-à-dire aucun de ces trois modèles marche. Ce paragraphe souligne le fait qu'il n'existe plus d’outil de modélisation idéal, chacun a ses avantages et ses limites mais reste toujours un outil de valeur pour simuler et maîtriser le comportement thermodynamique des saumures. Par conséquent, le modélisateur doit avant tout choisir le meilleur modèle par rapport au site étudié, en fonction des données dont il dispose, des objectifs de la modélisation, etc.

3.2. Teneurs en éléments traces

3.2.1. Introduction

L'appellation Eléments Traces (ET) est communément utilisée pour désigner les éléments chimiques naturels dont la concentration est très faible (à l'état de traces, moins de 0.1%) dans tous les compartiments de l'environnement (Turekian, 1971 ; Lameyre, 1986 ; Elder, 1988 ; Baker et Walker, 1989 ; Alloway et Ayres, 1997 ; Davies, 1997 ; Callender, 2003 ; Wang et al. 2008). La distribution spatiale de ces éléments dans la nature résulte de la combinaison de facteurs naturels et de facteurs anthropiques. Si la concentration à un endroit donné est anormalement élevée, l'impact environnemental sera potentiel.

Dans les écosystèmes lacustres, la présence de certains éléments traces demeure un sérieux problème d'environnement de plus en plus inquiétant. Les sédiments sont souvent étudiés comme réservoirs de nombreux polluants chimiques (Yao et al. 2009). Ils sont des pièges à micropolluants et donnent une indication sur la pollution historique (Boucheseiche, 2002).

Les études portées sur le même axe au niveau des chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien, restent rares mise à part celles de Saltec-lavalin (1983) sur l'exploitation des sels dans le Chott Merouane, et récemment celles de Hacini et al. (2008 et 2010) sur l'évolution géochimique des saumures et de lithium dans ce chott.

Dans ce contexte, on essaye de déterminer la dispersion potentielle de certains éléments traces, notamment le Baryum (Ba), le Cuivre (Cu), le Fer (Fe), le Nickel (Ni), le Plomb (Pb), le Strontium (Sr), le Titane (Ti) et le Zinc (Zn), et d'évaluer leurs impacts environnementaux sur les milieux récepteurs.

3.2.2. Concentration des éléments traces dans les saumures

L'eau est évidemment un élément particulièrement important pour les polluants en général et les éléments traces en particulier, car il va entraîner des réactions chimiques liées à l'acidité, l'alcalinité, la température et l'oxygénation des systèmes aquatiques.

On sait qu'il n'y a pas une répartition type des éléments chimiques dans la nature (Chouti, 2010). La présence d'un élément chimique toxique dans le milieu naturel peut être un indicateur de contamination, cependant elle ne fournit pas d'indication sur la nature et de l'intensité de la contamination. Dans les cas où les lois fixent des normes, celles-ci varient selon les pays.

Dans notre cas, on essaye d'estimer l'intensité de contamination en utilisant le principe fondé sur la comparaison avec des valeurs références (normes). Malheureusement ; en Algérie, il n'y a pas de législation spéciale pour la protection de l'environnement. Il n'existe que quelques lois cadres qui ne déterminent pas clairement les critères de protection de l'environnement. Pour cela ; les préconisations retenues dans cette étude, sont celles de (CCME, 1999, 2002, 2003) ; (U.S.EPA, 1987a, 1998a) ; (SAVEX, 2000) ; (MDEQ, 2008) ; (ISO EN NBN 90-101) ; etc.

Les concentrations des éléments traces dans les saumures, sont résumées dans le tableau (4) ci-dessous. Le détail des autres points peut être consulté (en annexe 1).

Les valeurs de la température enregistrées sont inférieures à 30°C. Pour la conductivité électrique, les valeurs enregistrées se situent entre 150 et 180mS/cm.

La baisse du pH entraîne une augmentation de la solubilité des certains éléments traces et de leur mobilité (Moran et Wentz, 1974 ; Nordstrom et al. 2000). Les valeurs légèrement basiques (> 8) obtenues, sont celles enregistrées pour les saumures en contact avec les rejets urbains : cas de chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune. Pour les valeurs légèrement acides (< 7), elles sont celles enregistrées pour les saumures hors contact avec les rejets urbains : cas de chott Beghdad et chott Merouane (voir annexe 1).

Les concentrations moyennes des éléments traces sont en général supérieures aux valeurs de références (normes) (tab. 4) :

- 1006 à 1962µg/l de (Cu) contre 3,7µg/l fixée par la norme ;
- 1933 à 2390µg/l de (Zn) contre 86µg/l fixée par la norme ;
- 18 à 39µg/l de (Pb) contre 7,2µg/l fixée par la norme ;
- 10692 à 22507µg/l de (Sr) contre 21000µg/l fixée par la norme ;

- 21 à 110µg/l de (Ni) contre 20µg/l fixée par la norme, sauf que pour la Sebkhet Safioune où la concentration enregistrée est inférieur à la valeur de référence, c'est-à-dire de 12µg/l ;

- Concernant le (Fe), les concentrations enregistrées sont en général faibles par rapport à la valeur de référence (1300µg/l) ; elles sont de l'ordre de 50 à 577µg/l ;

- Les concentrations du (Ti) et du (Ba) sont respectivement de l'ordre de 82 à 632µg/l et de 13 à 107µg/l (tab. 4 et fig. 20).

Tableau 4. Teneurs en éléments traces des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009)

Station	T °C	pH	Cond (mS/cm)	Ti (µg/l)	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb
Sebkhet Bordj Omar Idriss	/	/	/	632	50	52	1006	1951	20103	25	22
Chott Ain El-Beida	27	8,21	151	388	73	21	1551	2315	17065	33	26
Sebkhet Safioune	20,3	7,25	170	83	/	12	/	1933	10692	13	18
Chott Beghdad	20,7	7,4	175	82	74	110	1962	2304	22507	107	39
Chott Merouane	17	7,9	179	128	577	30	1801	2390	21239	16	26
Norme*	25	7,0 à 8,7	/	/	1300	20	3,7	86	21000	/	7,2

*

T °C	:	(AR du 4/11/1987). Données de l'IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement) : "L'eau à Bruxelles" Ministère de la sante publique et de l'environnement 1987. « Arrêté royal du 4 novembre 1987 fixant des normes de qualité de base pour les eaux du réseau hydrographique public et portant adaptation de l'arrêté royal du 3 août 1976 portant règlement général relatif aux déversements des eaux usées dans les eaux de surface ordinaires, dans les égouts publics, et dans les voies artificielles d'écoulement des eaux pluviales », MB du 21.11.87.
pH	:	(CCME, 1999 et 2002).
Fe	:	(SAVEX, 2000).
Ni, Pb	:	(Circulaire du 7 mai 2007 DCE/23 et INERIS 2006 B. Lepot).
Cu	:	(U.S.EPA, 1998a).
Zn	:	(U.S.EPA, 1987a et 1998a).
Sr	:	(MDEQ, 2008).

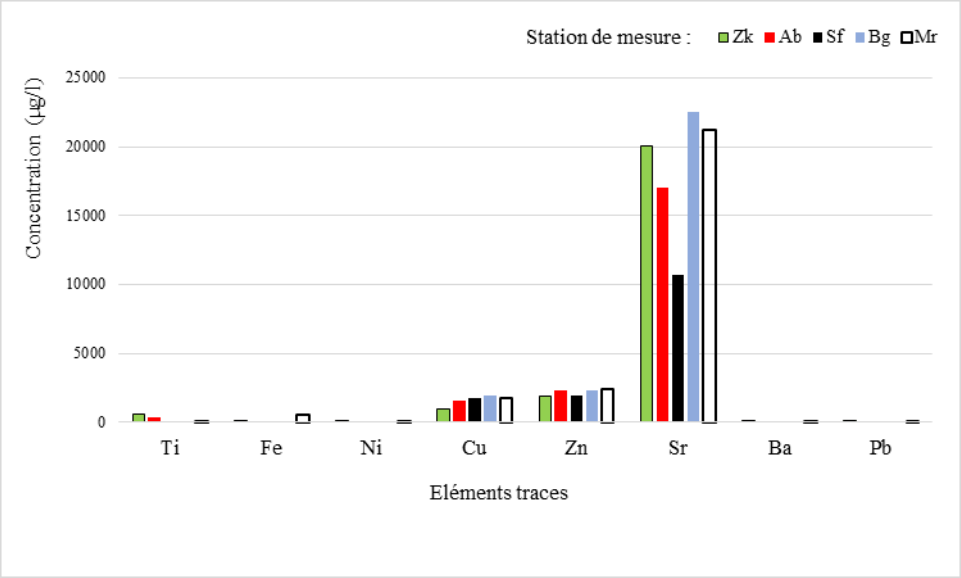


Figure 20. Variations des teneurs en éléments traces des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009)

Ces travaux d'analyse permettent de dire que les teneurs en éléments traces dépendent de l'acidité du pH et de l'abondance de matières organiques. Les valeurs du pH légèrement acide enregistrées au niveau des chotts de Beghdad et de Merouane, correspondent à des teneurs élevées en (ET). Par contre, le pH légèrement basique enregistré au niveau du Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune correspond à de teneurs moins élevées en (ET) ; sauf que pour le (Ti) où il atteint une concentration de 0,4mg/l environ ; et nous savons déjà, que ces deux derniers chotts sont fortement dégradés par les rejets d'eaux usées chargées en matière organique, contre les deux autres hors contact avec les rejets d'eaux usées : Chott Beghdad et Chott Merouane.

3.2.3. Concentration des éléments traces dans les sels

En ce qui concerne les sels solides, les résultats d'analyse montrent que les concentrations en éléments traces sont en général inférieures par rapport aux valeurs de référence (tab. 5) :

- 4 à 663µg/l de (Ti) contre 5600ppm de référence ;
- 24 à 78µg/l de (Fe) contre 56300ppm de référence ;
- 12 à 16µg/l de (Ni) contre 84ppm de référence ;
- 416 à 2228µg/l de (Cu) contre 60ppm de référence ;
- 115 à 152µg/l de (Zn) contre 70ppm de référence ;

- 1152 à 31770µg/l de (Sr) contre 370ppm de référence ;
- 15 à 99µg/l de (Ba) contre 425ppm de référence et ;
- 1 à 53µg/l de (Pb) contre 14ppm de référence (tab. 5 et fig. 21) (voir détail en annexe 1, tab. M).

Tableau 5. Teneurs en éléments traces des sels chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009)

Station	Ti (µg/l)	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb
Sebkhet Bordj Omar Idriss	663	78	12	416	145	31770	15	1
Chott Ain El-Beida	412	55	14	1038	152	13666	58	7
Sebkhet Safioune	4	43	12	1108	115	2340	87	6
Chott Beghdad	6	24	16	2228	121	4443	99	53
Chott Merouane	11	30	13	1845	144	1152	60	5
Teneur référence (en ppm)*	5600	56300	84	60	70	370	425	14

*

: William M. Haynes, CRC Handbook of Chemistry and Physics, vol. 97, CRC Press/Taylor and Francis, 2016, 2652 p. (ISBN 1498754287), « Abundance of elements in the Earth's crust and in the sea », p. 2402 (14-17).

Il apparaît clairement que les saumures ont des niveaux de concentrations considérables en éléments traces par rapport aux valeurs trouvées pour les sels solides.

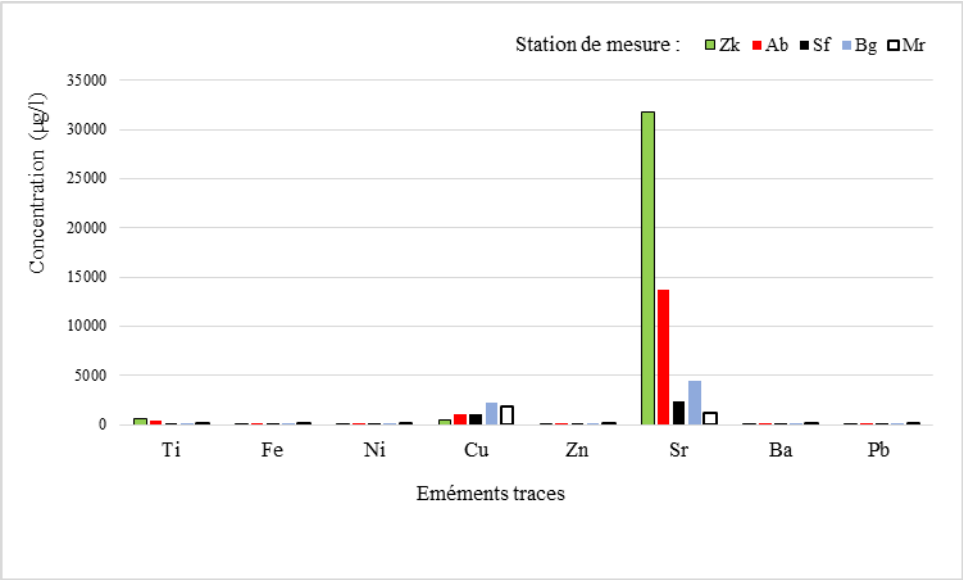


Figure 21. Variations des teneurs en éléments traces des sels chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009)

3.2.4. Analyse des sels solides au MEB

L'étude chimique des saumures, a été renforcée et approfondie par l'analyse d'images au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Nous restreindrons l'application de cette technique à quelques échantillons représentatifs de chaque système.

Les figures (au MEB) présentent une synthèse des minéraux les plus fréquents et ceux trouvés à l'état de traces dans les sels solides. Ce sont essentiellement les silicates primaires de la silice, les sulfates et les oxydes qui constituent l'origine des éléments traces, mais leurs prédominance reste faible tenant compte les minéraux évaporitiques et argileux.

- La figure (22) synthétise les minéraux les plus fréquents et ceux trouvés à l'état de traces au niveau de Sebkhet Bordj Omar Idriss (échantillon Z).

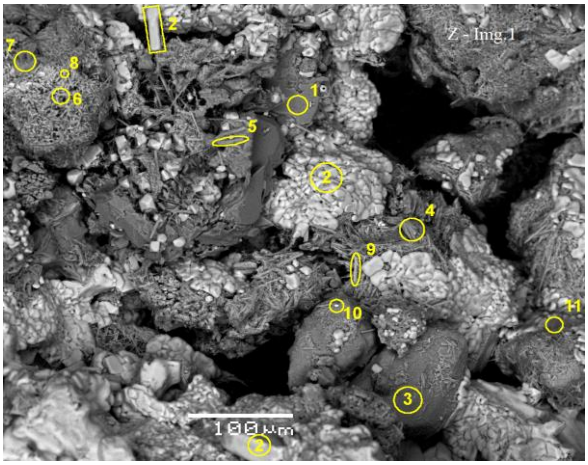


Figure 22. Image MEB de l'échantillon Z

- Les analyses ponctuelles ci-dessous (fig. 23 ; 24 et 25) de l'échantillon Z, montrent des minéraux origines et d'autres prédominants au niveau de la Sebkhet Bordj Omar Idriss :

  1. Des silicates (Si-O) et des sulfates (de célestine : Sr-S-O ; et de baryum : Ba-S-O) comme minéraux origines de (Sr) et (Ba) ;

  2. Des silicates primaires (quartz), des argiles (Si-O-Na, Al, Ca, Mg, K) et des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 23. Z-Img.1-Pt.10).

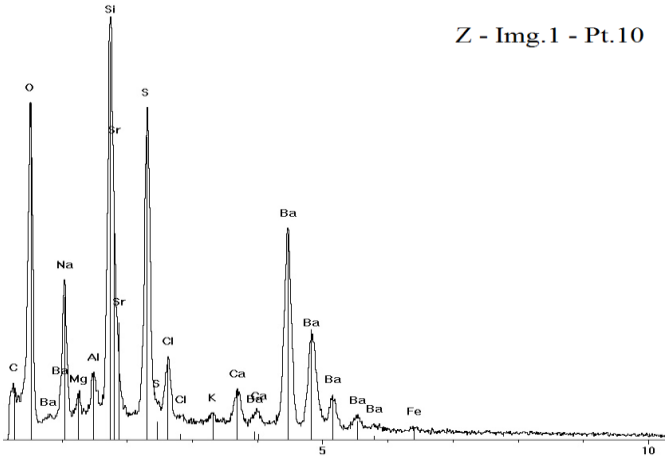


Figure 23. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.10

  3. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 24. Z-Img.1-Pt.2).

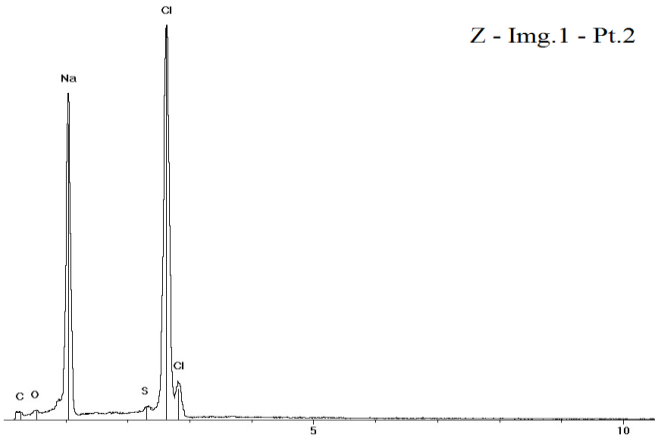


Figure 24. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.2

4. Des silicates primaires (quartz) et des argiles (Si-O-Al, Na, Mg) comme minéraux prédominants (fig. 25. Z-Img.1-Pt.3).

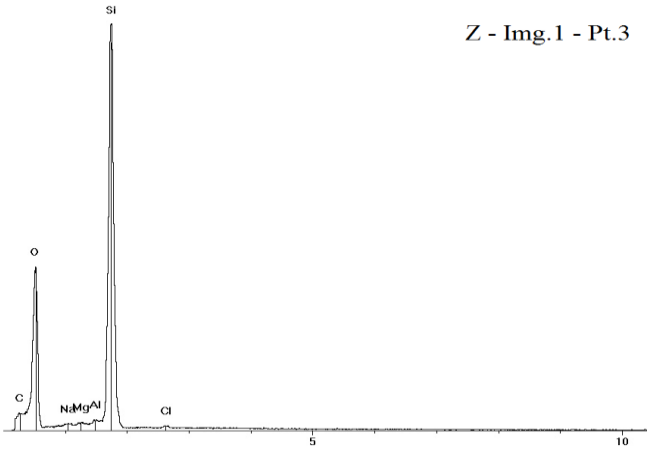
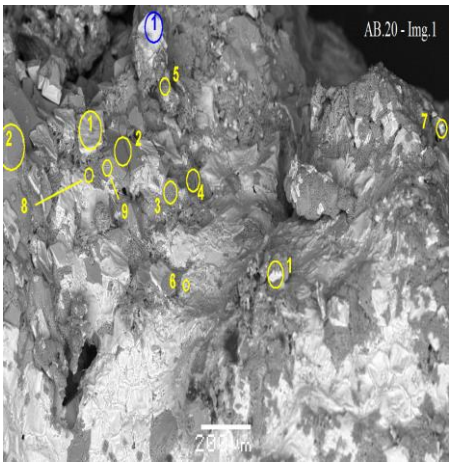
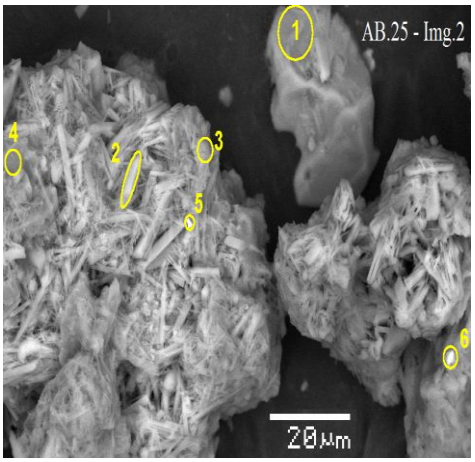


Figure 25. Analyse ponctuelle de l'échantillon Z-Img.1-Pt.3

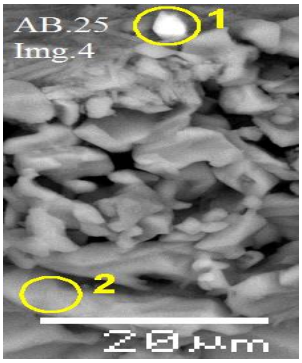
- La figure (26) synthétise les minéraux les plus fréquents et ceux trouvés à l'état de traces au niveau de Chott Ain El-Beida (échantillon AB).



AB20-Img.1



AB25-Img.2



AB25-Img.4

Figure 26. Images MEB de l'échantillon AB

- Les analyses ponctuelles ci-dessous (fig. 27 ; 28 ; 29 ; 30 et 31) de l'échantillon AB, montrent des minéraux origines et d'autres prédominants au niveau de Chott Ain El-Beida :

  1. Des sulfates (de célestine : Sr-S-O) comme minéraux origines de (Sr) ;

  2. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 27. AB20-Img.1-Pt.6).

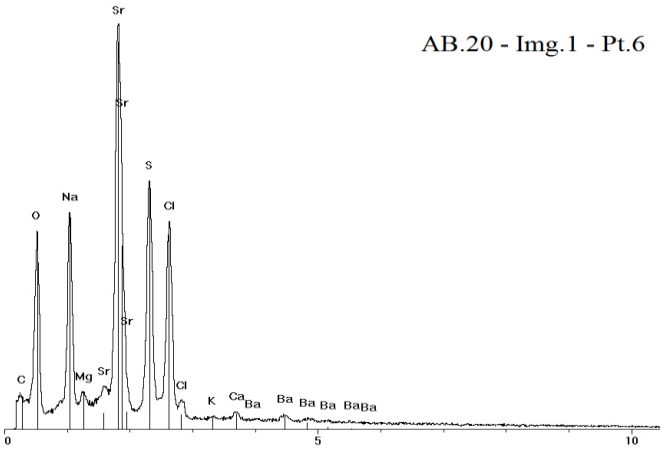


Figure 27. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB20-Img.1-Pt.6

3. Des oxydes (de fer : Fe-O ; et de titane : Ti-O) piégés dans l'argile (Si-O-Al, Na, Mg, K) comme minéraux origines de (Fe) et (Ti) (fig. 28. AB20-Img.1-Pt.7).

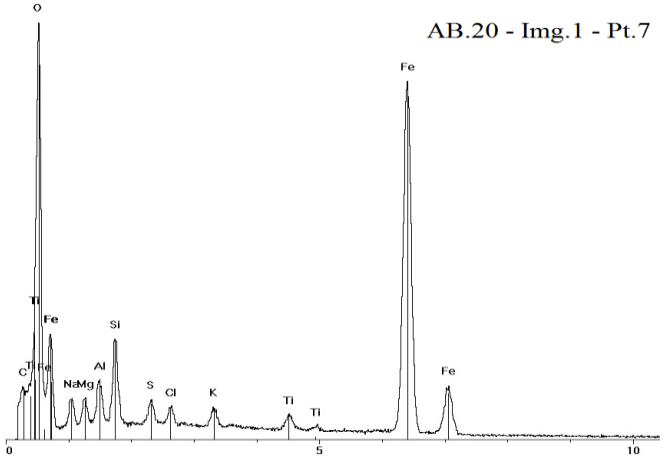


Figure 28. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB20-Img.1-Pt.7

4. Des sulfates (S-O-Na, Sr, Ca ...) qui peuvent être l'origine de (Sr) (fig. 29. AB25-Img.2-Pt.5).

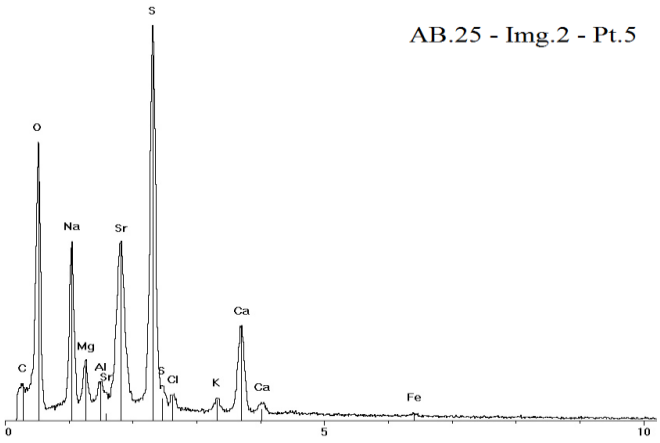


Figure 29. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.2-Pt.5

5. De minéraux évaporitiques (Na-Cl), des oxydes (Fe-O), des sulfates (S-O) et des minéraux argileux (Si-O-Na, Al, Mg) qui prédominent dans les sels (fig. 30. AB25-Img.2-Pt.6).

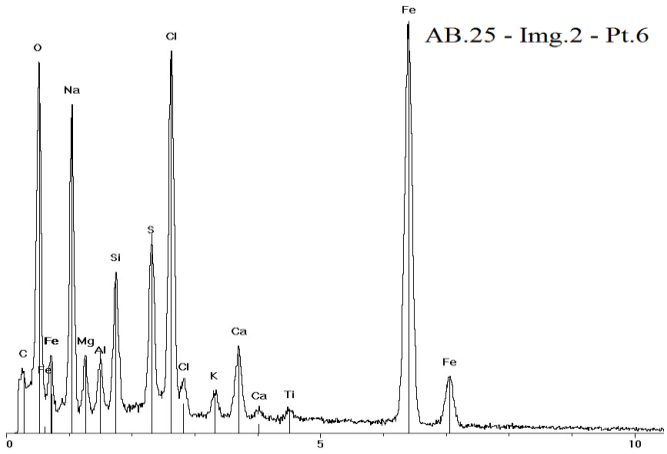


Figure 30. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.2-Pt.6

6. Des oxydes (de titane : Ti-O) piégés dans l'argile (Si-O-Na, Al, Mg, Ca) comme minéraux origines de (Ti) (fig. 31. AB25-Img.4-Pt.1).

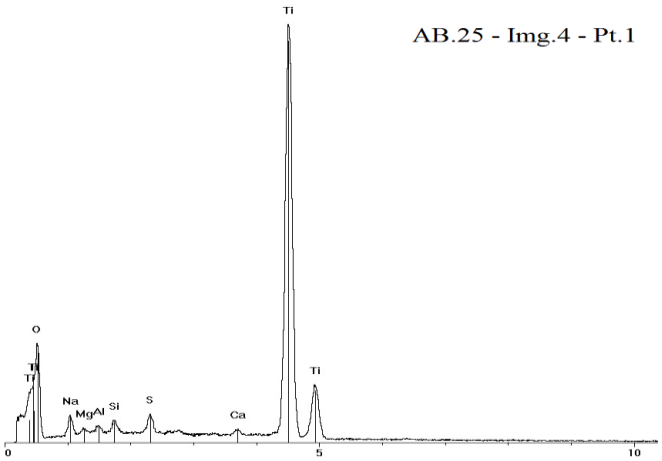
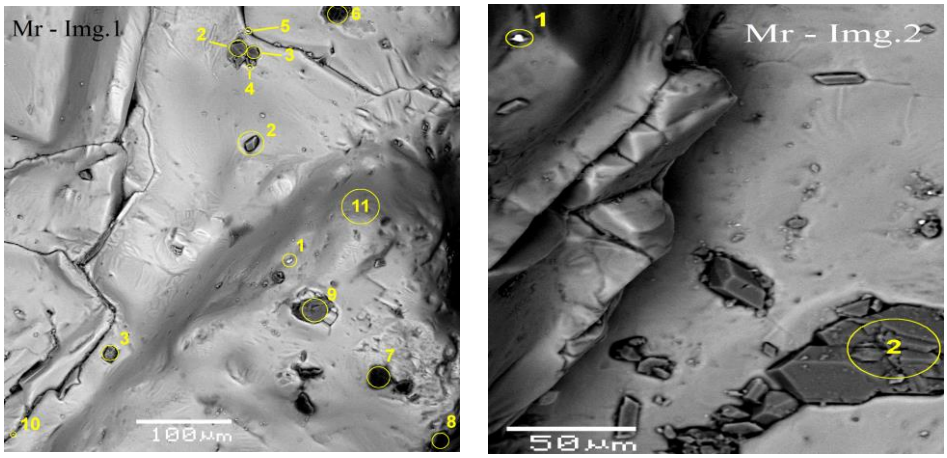


Figure 31. Analyse ponctuelle de l'échantillon AB25-Img.4-Pt.1

- La figure (32) synthétise les minéraux les plus fréquents et ceux trouvés à l'état de traces au niveau du Chott Merouane (échantillon Mr).



Mr-Img.1 **Mr-Img.2**

Figure 32. Images MEB de l'échantillon Mr

- Les analyses ponctuelles ci-dessous (fig. 33 ; 34 ; 35 ; 36 et 37) de l'échantillon Mr, montrent des minéraux origines et d'autres prédominants au niveau de Chott Merouane :

  1. Des oxydes (de titane : Ti-O ; et de fer : Fe-O) piégés dans l'argile (Si-O-Al, Na, Mg, Ca, K) comme origines de (Ti) et (Fe) ;

  2. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 33. Mr-Img.1-Pt.4).

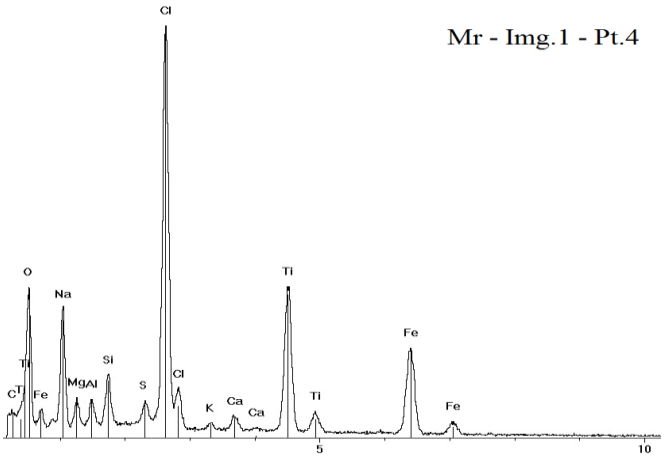


Figure 33. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.4

3. Des oxydes (de titane : Ti-O) piégés dans l'argile (Si-O-Al, Na, Mg, Ca) comme origines de (Ti) ;

4. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 34. Mr-Img.1-Pt.10).

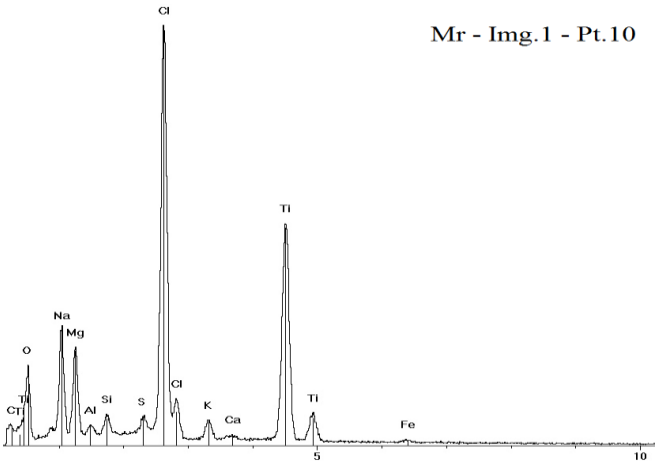


Figure 34. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.10

5. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) comme minéraux prédominants (fig. 35. Mr-Img.1-Pt.11).

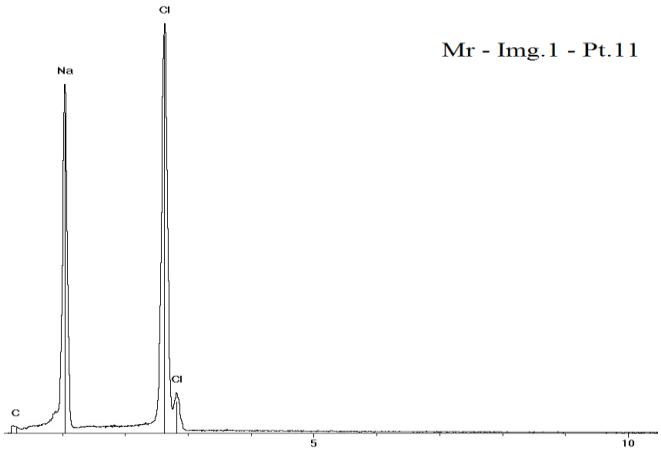


Figure 35. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.11

6. Des silicates primaires (silice Si-O) plus fréquents (fig. 36. Mr-Img.1-Pt.3).

7. Des sulfates (de baryum : Ba-S-O ; de célestine : Sr-S-O) comme minéraux origines de (Ba) et (Sr) ;

8. Des minéraux évaporitiques chloruré-sodiques (Na-Cl) et sulfaté-magnésiens ou calciques (S-O-Mg, Ca) comme minéraux prédominants (fig. 37. Mr-Img.2-Pt.1).

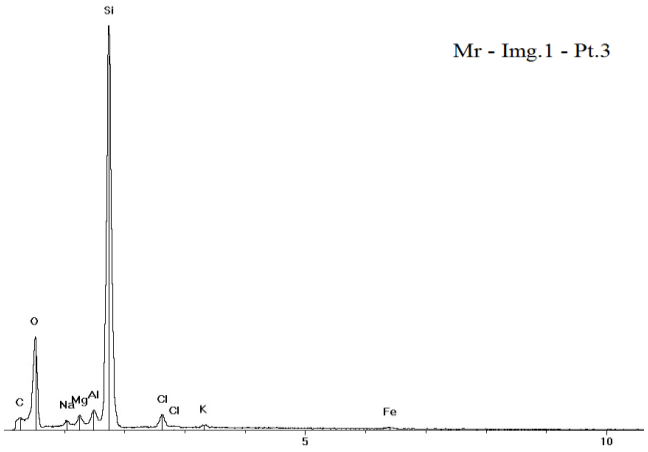


Figure 36. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.1-Pt.3

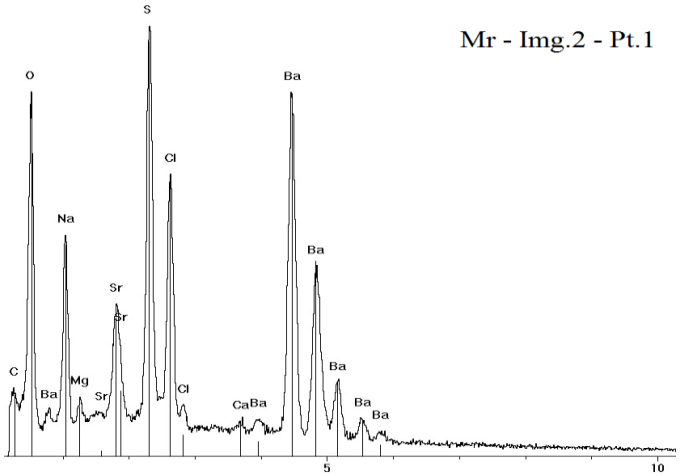


Figure 37. Analyse ponctuelle de l'échantillon Mr-Img.2-Pt.1

En règle générale : Ces éléments traces sont des micropolluants qui entraînent les nuisances même quand ils sont rejetés en quantités très faibles. La présence d'argiles ou d'oxydes de fer va jouer le rôle de piégeage pour ces ET. Cependant, Leur affinité pour la matière organique est reconnue depuis longtemps. Elle est souvent présentée comme le mode de fixation des ET dans les sols, mais il reste toujours plus ou moins partielles.

3.2.5. Eléments traces : Origines et impacts

Le Baryum (Ba) : Se retrouve dans l'environnement en combinaison avec d'autres éléments chimiques tels que le soufre, le carbone et l'oxygène, et se dissolve facilement dans l'eau (Alloway et Ayres, 1997).

Dans les chotts de notre région d'étude, leur concentration dans la phase solide est plus importante que celle dans la phase liquide. Il est fréquemment utilisé par certaines industries de brique, de tuile, de verre, etc.

Le Cuivre (Cu) : La production du (Cu) est toujours en augmentation. Ce qui signifie que de plus en plus de (Cu) se retrouve dans l'environnement. Il est relâché dans l'environnement soit par des sources naturelles (feu de forêt par exemple), soit par les activités humaines (utilisation des engrais...).

Des lacs déposent sur leurs rives des boues contaminées par du (Cu) du fait des rejets d'eaux usées chargés en matières organiques. Le plus souvent, il ne se détruit pas facilement dans l'environnement et peut s'accumuler dans différentes composantes du système aquatique. Leur présence donc, est une sérieuse menace qui influe sur le comportement chimique et biologique du système (Callender, 2003).

Le Zinc (Zn) : Comme le (Cu), se trouve dans des milieux potentiellement pollués par des rejets urbains. Leur présence menace si non dégrade le système aquatique (Callender, 2003).

Le Plomb (Pb) : Est un élément bio-accumulateur qui se présent naturellement dans l'environnement et se libère surtout en fonction de l'acidité des eaux. Cependant, la plupart des concentrations que l'on trouve dans l'environnement sont causées par l'activité humaine (rejets d'eaux usées, engrais, pesticide, insecticide, combustion des déchets solides, usure des peintures au plomb, etc.). Le (Pb) ne peut être détruit que par changement de forme, il est considéré donc, comme élément toxique perturbant l'équilibre et le fonctionnement biochimique du système aquatique (Garnier, 2005).

45 à 70% du plomb et du zinc, se trouvent à l'état dissous dans les eaux usées, et sont par conséquent difficilement éliminables (Miquel, 2001).

Le Fer (Fe) : Encore à certaines teneurs peut être dangereux et provoque le système aquatique.

Le Nickel (Ni) : La part la plus importante relâchée dans l'environnement, est adsorbée par des sédiments et devient par conséquent immobile. Cependant, dans les sols acides, le (Ni) devient plus mobile. Les concentrations les plus élevées dans la fraction eau/roche des systèmes aquatiques, peuvent endommager la croissance des micro-organismes et des plantes caractéristiques du système (Fergusson, 1990 et Sukandar et al. 2006).

Le Strontium (Sr) : Se trouve dans l'environnement sous sa forme élémentaire. Il peut se déplacer dans l'environnement assez facilement et se retrouve dans les sédiments ou dans les eaux de surfaces à l'état dissout ou en suspension entraînant la formation d'eaux boueuses. Les concentrations excèdent les teneurs normales lors de rejet des déchets directement dans l'eau. Une partie du (Sr) introduit par l'homme ne rejoint pas les eaux de surface et peut rester dans le sol pendant des décennies (Alloway et Ayres, 1997).

Le Titane (Ti) n'a aucun effet connu sur l'environnement.

Parmi les sources anthropiques de ces éléments traces, nous pouvons signaler : les engrais et pesticides appliqués dans la culture des sols, les incinérateurs et cendres d'incinération des déchets, les déchets médicaux et les effluents des égouts. Toutefois, il semble que la source anthropique principale de métaux pour l'environnement est celle produite par les effluents des égouts, et elle a été

aussi identifiée comme un des premiers impacts environnemental provoqué par l'homme.

3.2.6. Conclusion

Cette étude a montré que les chotts dans le Bas Sahara algérien possèdent des indices de dégradation matérialisés par des teneurs élevées en éléments traces.

- 21 ; 17 et 10mg/l de (Sr) enregistrées dans les saumures de Merouane, Ain El-Beida et Safioune et ;
- 1,5 et 2mg/l de (Cu) enregistrées dans les saumures d'Ain El-Beida et Merouane ;
- Les teneurs de (Zn) et de (Ti) sont de l'ordre de 2,3 et 0,6mg/l environ.

Dans les sels solides, les teneurs de (Sr), (Cu) et (Ti) sont respectivement de l'ordre de 32 ; 2,2 et 0,4mg/l.

L'analyse au MEB confirme ces résultats et présente des origines possibles de ces éléments traces tel que les oxydes, les sulfates et les silicates.

L'impact environnemental des rejets d'eaux usées est confirmé et la nécessité de réduire ces rejets n'est plus discutée.

Dans une optique de gestion de l'environnement et afin de prendre en compte de façon efficace la problématique des rejets des éléments traces dans l'environnement, il convient d'accroître la précision des inventaires d'émission.

3.3. Indices de dégradation

3.3.1. Introduction

L'eau est un des éléments essentiels dans notre vie. Après avoir été utilisée, la plus grande partie de cette eau usée est retournée à l'environnement. Comme cette eau est habituellement chargée en matière organique, elle provoque une augmentation des concentrations en phosphore et azote, favorise l'eutrophisation du système aquatique et devient dès lors une source de pollution importante pour le milieu récepteur qui la reçoit (El Guamri et al. 2008). Certaines conditions d'ordre climatique comme la température élevée et l'ensoleillement important, favorisent ce phénomène.

L'exemple type de ce phénomène dans notre cas, est observé au niveau du Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune dans la région de Ouargla où les rejets d'eaux usées constituent un facteur grave de pollution.

Pour cela, on essaye dans ce travail de caractériser les paramètres physico-chimiques de ces rejets par la détermination de certains paramètres globaux de la pollution et enfin de mettre en évidence l'impact de ces rejets sur le milieu récepteur.

3.3.2. Variations des paramètres de pollution

De prévoir l'incidence des rejets sur notre environnement et d'évaluer l'indice de dégradation d'une eau, il faut déterminer certain paramètres physico-chimiques caractérisant cette eau. Parmi ces paramètres on a : la DCO, DBO_5, NO_3, PO_4, etc.

Les teneurs moyennes de ces différents paramètres au niveau des écosystèmes lacustres chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien, sont résumées dans le tableau 6 (voir détaille en annexe 1). Ces résultats permettent de noter que :

- La température des eaux dans ces écosystèmes lacustres suit les températures ambiantes. Les valeurs minimales (14°C) sont enregistrées en Janvier et Février et les valeurs maximales (31°C) en Juillet et Aout. La moyenne des températures ne montre pas de différence notable, elle varie entre 18 et 23°C (fig. 38) ;

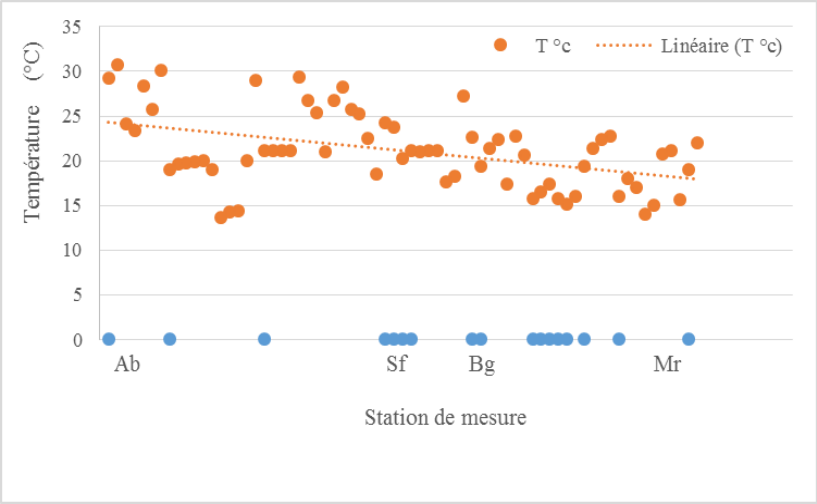


Figure 38. Température des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009-2016)

- Le pH indique la basicité ou l'acidité des eaux. Les valeurs extrêmes minimales et maximales mesurées sont comprises entre 6,5 et 9,4 que ce soit pour les eaux en contact ou hors contact avec les rejets d'eaux usées (fig. 39). Son rôle est capital dans la croissance des microorganismes ; lorsqu'il est inférieur à 5 ou supérieur à 8,5 la croissance des micro-organismes est directement affectée.

La conductivité électrique est l'un des paramètres les plus simples et les plus importants utilisés pour contrôler la qualité des eaux. Elle nous renseigne sur la salinité et le degré de minéralisation. C'est une expression numérique de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique mesurée en mS/cm. Les résultats obtenus mettent en évidence une variation importante de la minéralisation exprimée en conductivité moyenne. Ces résultats pourraient être expliqués par le contact ou non avec les rejets d'eaux usées.

- Les valeurs de la conductivité électrique inférieures à 50mS/cm enregistrées au niveau du Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune, mettent en évidence le contact des eaux dans ces écosystèmes avec les rejets d'eaux usées. Les valeurs maximales (au-delà de 150mS/cm) sont enregistrées dans le cas où les saumures sont hors contact avec ces rejets (fig. 40) : cas de Chott Beghdad et Chott Merouane. Dans le lac El-Bheir (80m de profondeur) (fig. 41) creusé dans la formation calcaire, les valeurs de conductivité électrique (57mS/cm) et d'oxygène dissous (7,6mg/l), témoignent un éventuel contact avec les eaux profondes et un brassage de l'eau par le vent qui caractérise la région ;

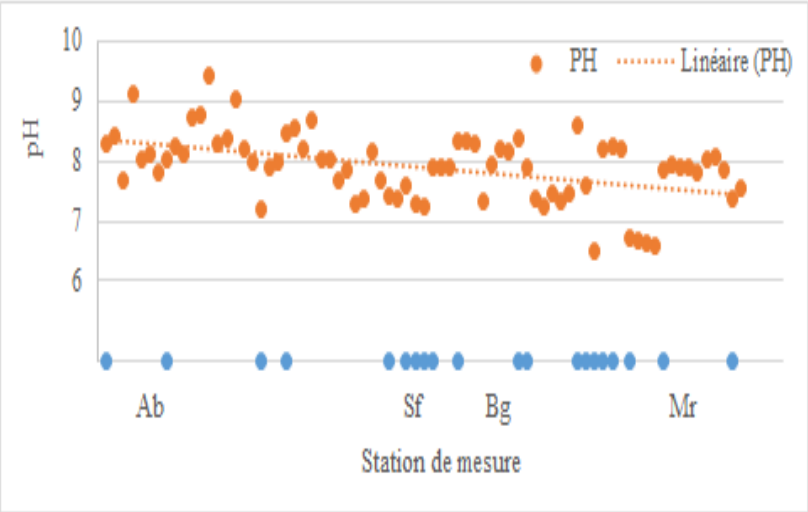


Figure 39. PH des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009-2016)

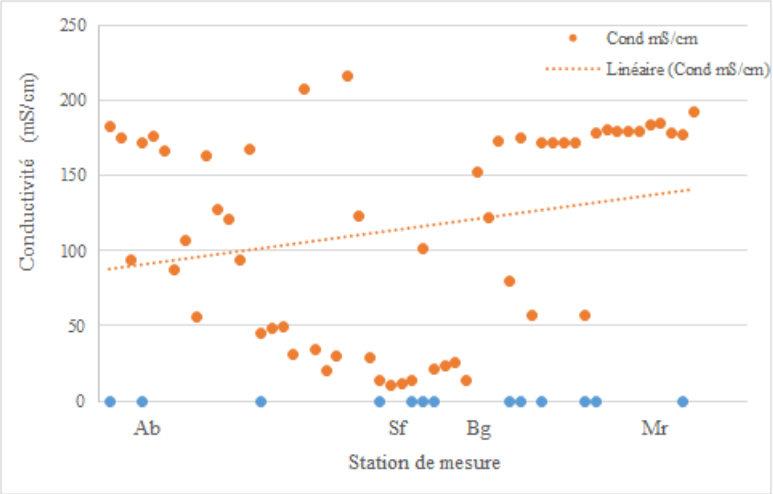


Figure 40. Conductivité électrique des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009-2016)

- La présence d'oxygène dissous conditionne les réactions de dégradation de la matière organique et l'équilibre biologique des milieux lacustres. L'état d'oxygénation de nos échantillons montre des valeurs extrêmes minimales et maximales de l'ordre de 0,8 à 07mg/l pour respectivement le Chott Ain El-Beida et Chott Beghdad (annexe 1). Ces valeurs permettent de déduire que ces eaux sont très dégradées ;

Figure 41. Lac El-Bheir (Chott Beghdad)

- Les concentrations en matière en suspension sont variées entre 67 et 149mg/l (tab. 6) ;

- Les valeurs de pollution organique exprimée en DBO_5 présentent des variations significatives entre les sites en contact et hors contact avec les rejets d'eaux usées. Les valeurs moyennes enregistrées sont variés entre 28 et 123mg/l. Ces valeurs pourraient être expliquées par l'abondance de la matière organique essentiellement sous forme dissoute ;

- Pour la DCO, les résultats d'analyse présentent des valeurs moyennes varient de 82 à 340mg/l (tab. 6). Cette charge polluante est un des plus importants critères utilisés dans la conception d'un traitement des eaux usées afin de déterminer le degré de traitement nécessaire.

> *«Les concentrations en DCO et DBO_5 atteignent des valeurs hautes aberrantes dès que la conductivité dépasse 8 à 10 ms/cm (pour la DCO, l'interférence des chlorures est connue). En effet les valeurs devraient être au contraire faibles avec l'augmentation de la salinité».*

Le calcul des rapports DCO/DBO_5 présente des intérêts très importants et constitue un bon moyen pour donner une image du degré de pollution des rejets

d'eaux et aussi pour optimiser les paramètres physico-chimiques de ces rejets afin de proposer un mode de traitement convenable. Les résultats de ce rapport constituent une indication de l'importance des matières polluantes peu ou pas biodégradables. Dans notre cas, les eaux usées rejetées dans le Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune présentent un ratio DCO/DBO_5 au-delà de 3mg/l, ce qui souligne bien le mauvais caractère de biodégradation et reflète ainsi la présence d'une pollution importante dans ces écosystèmes lacustres.

Les Nitrates comme les autres formes azotés évoluent très rapidement dans le milieu naturel selon le cycle d'azote. Sa présence est généralement associée à l'agriculture ; c'est un meilleur signe de pollution d'origine agricole. Mais dans notre cas, les nitrates proviennent des eaux usées non traitées :

- Les valeurs extrêmes maximales sont enregistrées au niveau de la Sebkha Safioune (1,3g/l) et la Sebkha Zaouia (13g/l). La valeur (de 126mg/l) enregistrée au niveau du Chott Chagga est certainement associée à l'excès d'apports en azote par les épandages de lisiers et les activités agricoles. Au niveau du Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune les concentrations sont de l'ordre de 49 et 63mg/l. Les faibles teneurs sont enregistrées au niveau du Chott Beghdad (34mg/l) et Chott Merouane (5mg/l) (voir annexe 1) ;

- De même, les teneurs enregistrées en phosphates (PO_4) sont importantes au niveau de Sebkhet Safioune (62mg/l) et Chott Ain El-Beida (18mg/l). Le phosphore total (Pt) prend des valeurs de 0,2 à 2mg/l dans respectivement le Chott Beghdad et Chott Merouane (annexe 1). La présence du phosphate est un indice d'eutrophisation. Ce phénomène est clairement lié à un excès de nutriments minéraux provenant soit directement de l'agriculture (engrais), soit de la minéralisation de la matière organique des eaux usées.

Sur la base des teneurs en nitrates et en phosphates, on déduire que ces deux indices repèrent bien la pollution et l'eutrophisation de ces écosystèmes lacustres. Comme nous l'avons dit, les teneurs les plus importantes sont enregistrées au niveau du Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune là où la pollution est la plus forte et la plus évidente. En plus, elle est plus marquée là où s'observe aisément sur le terrain : matières organiques, odeurs, etc.

Tableau 6. Paramètres de pollution des saumures chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien (2009/20016)

Station	T °C	pH	Cond (mS/cm)	O_2	DBO_5 (mg/L)	DCO	MES	NO_3	PO_4	Pt
Chott Ain El-Beida	14-31	7-9,4	10-216	3	28-123	82-340	74-149	0,5-49	/	3,7
Sebkhet Safioune	17-27	7,3-8,3	14-173	1,6	20-101	104-710	/	3-1356	62	/
Chott Beghdad	16-23	6,5-7,9	173	7	29	109	67	5-126	/	0,1-3
Lac El-Bheir	16	8,2-8,6	57	7,6	27-43	167	70	15-20	/	0,2
Normes *	25	7,0-8,7	/	4	3,0	25	/	3,6	2,68	0,03

*

T °C	:	(AR du 4/11/1987). Données de l'IBGE (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement) : "L'eau à Bruxelles" Ministère de la sante publique et de l'environnement 1987. « Arrêté royal du 4 novembre 1987 fixant des normes de qualité de base pour les eaux du réseau hydrographique public et portant adaptation de l'arrêté royal du 3 août 1976 portant règlement général relatif aux déversements des eaux usées dans les eaux de surface ordinaires, dans les égouts publics, et dans les voies artificielles d'écoulement des eaux pluviales », MB du 21.11.87.
pH	:	(CCME, 1999 et 2002).
O_2	:	(OMOE, 1984a; OMOEE, 1994).
DBO_5	:	(Inhaber, 1975).
DCO	:	(ISO EN NBN 90-101 : Station d'épuration de Bruxelles Nord. Documentaire\LABW en Conformité N1 LAB 00 KTR 002).
NO_3	:	(CCME, 2003).
PO_4^{3-}	:	(valeur guide des eaux de surface correspond aux valeurs impératives A1 du décret du 3 janvier 1989 in Gestion des sites potentiellement polluées - version 1 BRGM Edition - juin 1997 in Debieche 2002).
P	:	(OMOEE, 1994).

3.3.3. Impact des rejets urbains sur l'écosystème

Compte tenu de toutes ces données, nous pouvons dire que le Chotte de Ain El-Beida et la Sebkhet Safioune sont terriblement contaminés, et il est impossible de les maintenir en tant que milieux préservés aux saumures. Ce qui confirme ce point de vue sont les pratiques et les décisions des autorités locales et nationales à travers la classification de ces endroits comme zones humides et zones de rejets potentielles.

Le Chott Beghdad par exemple, est un milieu naturel nécessite une préservation et valorisation sur le plan minier comme celui du Chott Merouane.

Malheureusement ; ces dernières années ce chott est menacé par des orientations non responsables des autorités locales de le considéré comme zone de rejets d'eaux usées.

La suppression des rejets d'eaux brutes, de matières organiques et de polluants constitue une des actions positives pour valoriser et conserver ces milieux naturels. Elle contribuera à :

- Limiter la pression de pollution en nitrates et en phosphore et améliorer la qualité bactériologique des eaux, biologique du milieu et de l'air ambiant et ;
- Limiter la réalimentation en eau polluée de la nappe phréatique.

La réutilisation des eaux usées traitées représente une ressource supplémentaire valorisable en agriculture. Les rejets doivent être conformes aux normes bactériologiques. L'irrigation des cultures avec ce type de qualité des eaux est possible mais restrictive : il n'est pas possible d'irriguer des espaces verts ouverts au public. Les techniques d'irrigation devront être gravitaire et non par dispersion. Une sensibilisation auprès des agriculteurs devra être effectuée afin que les techniques d'irrigation et les quantités d'eaux irriguées tiennent compte de la qualité chimique de ces eaux.

3.3.4. Conclusion

L'analyse chimique des eaux des écosystèmes lacustres chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien, met en évidence de fortes concentrations en termes de DCO, DBO_5, NO_3 et PO_4. Ceci traduit une contamination certaine et dangereuse des eaux. Il est certain que ces eaux sont influencées par des rejets d'eaux usées typiquement domestiques. La charge organique élevée estimée par la mesure de la DBO_5 et DCO, laisse suggérer d'une pollution organique importante. Selon les normes, ces eaux sont presque dix fois plus chargées en matière organique.

Si rien n'est fait pour protéger ces milieux, l'impact des activités humaines pourrait avoir des conséquences irrémédiables. Alors, que faire ?

- Il est obligé de supprimer les rejets d'eaux brutes dans la nature ;
- Vérifier l'efficacité du traitement des eaux usées au niveau des stations d'épuration déjà implantées ;

- Réutiliser les eaux épurées dans les besoins agricoles, etc.

Il demande encore :

- Des observations à long terme ;
- Des recherches interdisciplinaires et ;
- Une meilleure communication entre scientifiques, gestionnaires et décideurs des politiques publiques.

Il est également nécessaire que l'état impose son autorité au différent secteur pour qu'il respecte la réglementation en vigueur en matière de protection et de respect de l'environnement.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Cette étude a eu pour objectif d'étudier les indices de dégradation et d'évaluer l'intensité de la contamination ou pollution de la phase liquide et solide (sel et saumure) des chotts et sebkhas du Bas Sahara Algérien.

Du fait de ces objectifs ambitieux et de la complexité des milieux étudiés, des méthodes variées ont été mises en œuvre pour maitriser ces objectifs.

Les principales conclusions de cette thèse peuvent être ainsi résumées :

- En terme de pollution organique exprimée par DBO_5 des valeurs de l'ordre de 28 à 123mg/l ont été enregistrées. Ces valeurs pourraient être expliquées par l'abondance de la matière organique essentiellement sous forme dissoute ;
- La charge polluante exprimée par DCO présente des valeurs de l'ordre de 82 à 340mg/l ;
- La présence de nitrates est un meilleur signe de pollution d'origine agricole. Mais dans notre cas, elles proviennent des eaux usées non traitées. Des concentrations de l'ordre de 49 et 63mg/l ont été enregistrées au niveau de Chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune ;
- La concentration de phosphate (PO_4) est de (62mg/l) au niveau de Sebkhet Safioune et de (18mg/l) au niveau du Chott Ain El-Beida. La présence du phosphate est un indice d'eutrophisation.

Les indices de dégradation matérialisés par éléments traces montrent :

- 21 ; 17 et 10mg/l de (Sr) enregistrées respectivement dans les saumures de chott Merouane, chott Ain El-Beida et Sebkhet Safioune et ;

- 1,5 et 2mg/l de (Cu) enregistrées dans les saumures de chott Ain El-Beida et chott Merouane ;
- Les teneurs de (Zn) et de (Ti) sont respectivement de l'ordre de 2,3 et 0,6mg/l environ ;
- Concernant le (Sr), (Cu) et (Ti), les concentrations sont respectivement de l'ordre de 32 ; 2,2 et 0,4mg/l.

L'analyse au MEB confirme ces résultats et présente des origines possibles de ces éléments traces tel que les oxydes, les sulfates et les silicates.

L'impact environnemental de rejets d'eaux usées dans la région d'étude est confirmé.

La modélisation thermodynamique de ces saumures se différencie selon le modèle utilisé. On constate en règle générale qu'il n'existe plus d'outil de modélisation idéal, chacun a ses avantages et ses limites mais reste toujours un outil de valeur pour simuler et maîtriser le comportement thermodynamique des saumures.

L'analyse des résultats montre que le cadre naturel ou environnement souffre de nombreuses contraintes :

- Une forte dégradation des chotts et sebkhas du fait de l'évacuation des rejets d'eaux usées sans traitements préalables, avec bioaccumulation de éléments traces toxiques ;
- Un déficit des connaissances scientifiques sur le fonctionnement des écosystèmes lacustres chotts et sebkhas. Les travaux de recherche réalisés à ce sujet sont encore limités en raison du déficit en compétences.

Il est certain que la préservation de ces écosystèmes dépend en grande partie, de la capacité à mieux gérer l'ensemble de ses ressources et espaces naturels. Aussi, le développement durable consiste à concilier entre « développement socio-économique et préservation de l'environnement» pour un développement humain équilibré, durable et équitable dans un contexte essentiellement aride et avec des besoins croissants.

Sans gestion raisonnée, la plupart des écosystèmes disparaîtraient sous l'effet d'une influence humaine grandissante. Toute gestion visant à la viabilité des

écosystèmes doit s'appuyer sur les sciences de la nature aussi bien que sur celles de l'homme et des sociétés. Cette interdisciplinarité est un défi très difficile à relever dans la pratique.

C'est cependant un domaine où l'accroissement des connaissances scientifiques nécessite une grande continuité ; car la recherche demande du temps et de longues séries d'observations. Les moyens matériels et d'accompagnement des équipes de recherche scientifiques restent limités. Un certain nombre d'actions peuvent être entreprises telles que :

- Le financement de travaux de thèses ou projets de fin d'études sur des thèmes relevant de la problématique de préservation des chotts et sebkhas et ;

- L'organisation de séminaires et colloques sur ces thèmes afin de favoriser les échanges et la diffusion des connaissances.

Dans le domaine de la sensibilisation, une large campagne médiatique continue doit être menée afin de créer un réflexe de préservation des milieux naturels chez le citoyen. Les organisations non gouvernementales ont un rôle très important à jouer dans le développement de cet aspect de prise de conscience de la population aux impacts indésirables des rejets d'eaux usées dans les chotts et sebkhas. Il en est de même des associations de défense de l'environnement et de protection de la nature qui devront s'impliquer davantage dans la mesure où elles font quotidiennement un travail de promiscuité très intéressant et éminemment positif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Alloway B.J. and Ayres D.C. 1997. Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, London, 394 pp.

Aries S., Valladon M., Polvé M. and Dupré B. 2000. A routine method for oxide and hydroxide interference corrections in ICP-MS chemical analysis of environmental and geological samples. Geostandards Newsletter 24, 19-31.

Aumassip G. 1986. Le Bas Sahara dans la préhistoire. Etudes d'antiquités africaines. Aix en Provence. CNRS ed. 1 vol., 182 fig., 44 tabl., 3 cartes ht., 612p.

Baker A.J.M. and Walker P.L. 1989. Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In : Shaw A, dir. Heavy metal tolerance in plants Evolutionary aspects. Florida: CRC Press; 155-77.

Bein A. and Dutton L.R. 1993. Origin, distribution and movement of brine in the Permian Basin (USA): a model for displacement of connate brine. Geol. Soc. Am. Bull. 105: 695-707.

Bel F. & Cuche D. 1969. Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.

BRL-BNEDER. 1999. Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes. Lot 1 : Etudes de base. Phase II A2 : Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en sols. Tipaza, Algérie, 109p.

Boucheseiche C., Cremille E., Pelte T. et Pojer K. 2002. Guide technique n°7, pollution toxique et écotoxicologie : notion de base. Lyon, Agence de l'eau Rhône – Méditerranée – Corse, 83pp.

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, p. 141–159.

Bourrié G., Trolard F., Chanzy A., Ruget F., Lecerf R. and Charron F. 2013. “Sustainable intensive agriculture: evidence from aqueous geochemistry”. Procedia Earth and Planetary Science 7, p. 93–96.

Brantley S.L., Crerar D.A., Moller N.E. and Weare J.H. 1984. Geochemistry of a modern marine evaporate. Bocana De Virrila, Peru. J. Sediment. Petrol., 54: 447-462.

Bretti C., Foti C. and Sammartano S. 2004. A new approach in the use of SIT in determining the dependence on ionic strength of activity coefficients. Application to some chloride salts of interest in the speciation of natural fluids. Chem. Speciat. Bioavailab. 16, 105–110.

Bronner G. et Fabre J. 1978. Carte géologique du Nord-Ouest de l’Afrique au 1/5.000.000. SNED ed. Alger.

Busson G. 1970. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris, 464p.

Callender E. 2003. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. In: B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elservier-Pergamon, Oxford, pp. 67-105.

Chouti J. 2010. Appl. Biosci. Eléments traces métalliques dans les sédiments de la lagune Porto-Novo.

Clayton R., Friedman I., Graf D., Mayeda P., Meets W. and Shimp N.F. 1966. The origin of saline formation waters: isotopic composition. J. Geophys. Res. 71: 3869-3882.

Conrad G. 1969. L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.

Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), 2003. Recommandations canadiennes pour la qualité de l’environnement, mise à jour 3.2, décembre 2005, Winnipeg, le Conseil.

Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), 2002. Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, mise à jour 2, novembre 2002, Winnipeg, le Conseil.

Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), 1999. Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, Winnipeg, le Conseil.

Cornet A. 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique Vol.VI. fascl,.5-72 pp.

Coudrain-Ribstein A. 1988. Transport d'éléments et réactions chimiques dans les aquifères. Th. d'Etat, Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 381p.

Davies B.E. 1997. Heavy metal contaminated soils in an old industrial area of Wales, Great Britain: source identification through statistical data interpretation, Water Air Soil Pollut. 94 : 85-98.

Davies C.W. 1962. Ion association, Butterworth & CO.

Davies C.W. 1938. The extent of dissociation of salts in water. Part VIII. An equation for the mean ionic activity coefficient of an electrolyte in water, and a revision of the dissociation constants of some sulphates. J. Chem. Soc., 2093–2098.

Debieche T.H. 2002. Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et Métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, Agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté (France), 235p.

Dubief J. 1963. Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors-série, tome 1 et 2. Alger, 275p.

Dutil P. & Sami C. 1960. Essai de bilan hydrologique du chott de Ouargla. VIe journée de l'hydraulique, Grenoble, pp. 309-314.

Elder J.F. 1988. Metal Biogeochemistry in Surface-Water system- A review of Principles and Concepts. 1013, United States Geological Survey.

El Guamri Y., Belghyti D., El Kharrim Kh., Raweh S., Sylla I. et Benyakhef M. 2008. Physicochemical study of raw wastewaters of Kenitra municipal slaughterhouse (Morocco) for the implementation of a suitable treatment. Sud Sciences et Technologies. N° 16 Juin 2008. ISSN 0796-5419

Eugster H.P. and Hardie L.A. 1978. Saline lakes. In Lakes: Chemistry, Geology, Physics (ed. A. Lerman). Springer, New York, pp. 237-293.

Eugster H.P. and Jones B.F. 1979. Behavior of major solutes during closed-basin brine evolution. Am. J. Sci. 279, 609-631.

Fabre J. 1976. Introduction à la géologie du Sahara. S.N.E.D, Ed. Alger 422p.

Fergusson J.E. 1990. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects, 1. Pergamon Press, Oxford, 614 pp.

Frape S.K. and Fritz P. 1982. The chemistry and isotopic composition of saline groundwater's from Sudbury Basin, Ontario. Can. J. Earth Sci. 19: 645–661.

Freeze R.A. and Cherry J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NY, 604p.

Garcés I. 2000a. Geochemistry of Huasco salar, Chile. Origin of solutes and brine evolution. In: Geertman, R.M. (Ed.), Proceedings of the 8th World Salt Symposium, vol. 2. Elsevier, Amsterdam, pp. 1159-1160.

Garnier R. 2005. Toxicity of lead and lead compounds, EMC-Toxicologie Pathologie 2 (2005) 67–88.

Grenthe, Ingmar, Plyasunov, Spahiu and Kastriot, 1997. Estimations of medium effects on thermodynamic data, in Grenthe, Ingmar, and Puigdomenech, Ignasi, eds., Modelling in aquatic chemistry, chap. IX: Paris, OECD Nuclear Energy Agency, p. 325-426.

Gueddari M., Monnin C., Perret D., Fritz B. and Tardy Y. 1983. Geochemistry of brines of the Chott El Jerid in southern Tunisia–Application of Pitzer's equations. Chem.Geol., 39: 165-178.

Guggenheim E.A. 1935. The specific thermodynamic properties of aqueous solutions of strong electrolytes. Phil. Mag., 19, 588–643.

Hacini M., 2006. Géochimie des sels et des saumures et calcul des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques. Thèse Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba, 200p.

Hacini M., Kherici N. et Oelkers E.H. 2010. Lithium dans les lacs salés des régions désertiques Cas de chott Merouane Sud-est de L'Algérie ; comportement, origine, potentialité et perspective. Bulletin des services géologique de l'Algérie, 21 n 2,1-13.

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., Oelkers E.H. and Kherici N. 2006. Retrieval and interpretation of precipitation rates generated from the composition of the Merouane Chott ephemeral lake. J. Geochem.Explor. 88: 284-287.

Hacini M., Oelkers E.H. and Kherici N. 2008. Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake. Geochim. Cosmochim Acta. 72: 1583-1597.

Harvie C.E. and Weare J.H. 1980. The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na–K–Mg–Ca–Cl–SO4–H2O system from zero to high concentration at 258C. Geochim. Cosmochim. Acta 44, 981-997.

Harvie C.E., Moller N. and Weare J.H. 1984. The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO4-OH-HCO3-CO3-CO2-H2O system to high ionic strengths at 25°C. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 723-751.

Harvie C.E., Weare J.H., Hardie L.A. and Eugster H.P. 1980. Evaporation of seawater: calculated mineral sequences. Science 208, 498-500.

Helgeson H.C. & Kirkham D.H. 1974b. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. II. Debye-Hückel parameters for activity coefficients and relative partial molar properties. Am. J. Sci., 274, 1199-1261.

Hückel E. 1925. Zur theorie konzentrierterer wässeriger Lösungen starker elektrolyte. Phys. Z 26, 93–147.

INERIS. 2006. Etat des lieux de la contamination des milieux aquatiques par les substances dangereuses. Campagne exceptionnelle 2005. B. Lepot Rapport n°DRC-06-66026

Inhaber H., 1975. An Approach to a Water Quality Index for Canada, Water Research, vol. 9, p. 821-833.

Jones B.F. and Deocampo D.M. 2004. Geochemistry of Saline Lakes. US Geological Survey, Reston, VA, USA. Volume 5 ; pp. 393-424.

Knight R.D., klassen R.A. and Hunt P. 2002. Mineralogy of fine-grained sediment by energy dispersive spectrometry (EDS) image analysis - a methodology, Environmental Geology, 42: 32-40.

Lameyre J. 1986. Roches et Minéraux, ISBN 2-7040-0499-4, Paris, 350 pp.

Land L.S. and Prezbindowski D.R. 1981. The origin and evolution of saline formation water, Lower Cretaceous carbonates, South-central Texas, USA. J. Hydrol. 54: 51-74.

Lastra R., petruk W. and wilson J. 1998. Image-analysis techniques and applications to mineral processing, In: L.J. Cabri and D.J. Vaughan (Editors), Commission on Ore Mineralogy, International Mineralogical Association. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 327-366.

Michard G. 1989. Equilibres chimiques dans les eaux naturelles. Ed. Publisud, Paris, 357 p.

Michigan Department of Environmental Quality (MDEQ), 2008. Rule 57(2) Guideline Levels, Great Lakes and Environmental Assessment Section, Surface Water Quality Division, Department of Environmental Quality, Michigan, 3 p.

Millero F.J. 2001. The Physical Chemistry of Natural Waters. Wiley, NY, 654pp.

Miquel G. 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. AN (onzième législature), N° 2979, Sénat (2000-2001), N°261, 365 p.

Monnin C. and Schott J. 1984. Determination of the solubility products of sodium carbonate minerals and an application to trona deposition in Lake Magadi (Kenya). Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 571-581.

Moran R.E. and Wentz D.A. 1974. Trace element content of a stream affected by metal mine drainage, Bonanza, Colorado, International symposium on water-rock interaction, Prague, pp. 22.

Moshood N.T. 2004. Evolution of saline waters and brines in the Benue-Trough, Nigeria. Geochemistry. 19: 1355-1365.

Nordstrom D.K., Alpers C.N., Ptacek C.J. and Blowes D.W. 2000. Negative pH and extremly acidic mine Waters from Iron Mountain, California. Environmental Science and Technology, 34(2): 254-258.

O.N.M. 2016. Bulletin climatologique de la station de Ouargla. Service archives. Ouargla, Algérie.

Ontario Ministry of the Environment (OMOE), 1984a. Water Management-Goals, Policies, Objectives and Implementation Procedures of the Ministry of the Environment, Revised edition, 70 p.

Ontario Ministry of Environment and Energy (OMOEE), 1994. Water Management. Policies, Guidelines, Provincial Water Quality Objectives of the Ministry of Environment and Energy, Toronto, 32 p.

Parkhurst D.L. and Appelo C.A.J. 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p.

Petruk W. 2000. Applied Mineralogy in the Mining Industry, 1, Elsevier, Ottawa, Ontario, Canada, 268 pp.

Pitzer K.S. 1973. Thermodynamics of electrolytes -1. Theoretical basis and general equations: Journal of Physical Chemistry, v. 77, no. 2, p. 268-277.

Plummer L.N., Parkhurst D.L., Fleming G.W. and Dunkle S.A. 1988. A computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 88-4153, 310 p.

Rettig S.L., Jones B.F. and Risacher F. 1980. Geochemical evolution of brines in the salar of Uyuni, Bolivia. Chemical Geology 30, 57-79.

Risacher F. and Alonso H. 1996. Geoquımica del salar de Atacama, parte 2: evolucion de lasaguas. Revista Geologica de Chile 23 (2), 123-134.

Risacher F. and Clement A. 2001. A computer program for the simulation of evaporation of natural waters to high concentration. Computers and Geosciences 27, 191-201.

Risacher F., Alonso H. and Salazar C. 2002. Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. Chemical Geology 187 (1-2), 39-57.

Risacher F., Alonso H. and Salazar C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review 63, 249-293.

Robinson R. A., Stokes R. H. and Wilson J. M. 1940. A thermodynamic study of bivalent metal halides in aqueous solution. Trans. Faraday Soc. 36, 733–748.

Rodier J. 2005. Analyse de l'eau naturelle et des eaux résiduaires et eaux de mers. 8. ed. Édition Paris: DUNOD.

Saltec-Lavalin, 1983. Avant-projet exploitation de chott Merouane. SONAREM/DED.

Service des avis et des expertises (SAVEX), 2000. Note technique sur 9 pesticides et sur le fer, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement du Québec.

Stokes R.H. 1945a. A thermodynamic study of bivalent metal halides in aqueous solution. Part XIII. Properties of calcium chloride solutions up to high concentrations at 25°C. Trans. Faraday Soc. 41, 637–641.

Stumm W. and Morgan J. 1970. Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. Ed. Wiley Interscience, 583 p.

Sukandar S., Yasuda K., Tanaka M. and Aoyama I. 2006. Metals leachability from medical waste incinerator fly ash: A case study on particle size comparison. Environmental Pollution, 144(3): 726-735.

Turekian K.K. 1971. Geochemical distribution of the elements, Encyclopedia of Sciences and Technology, vol 4., Mc Graw Hill ed.

UNESCO. 1972. Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, Rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA), 1998a. National Recommended Water Quality Criteria; Republication, Notices, Federal Register, vol. 63, no.237, p. 68354-68364.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA), 1987a. Water Quality Criteria; Availability of Document, Notice of final ambient water quality criteria document: Zinc, Federal Register, vol. 52, no. 40, p. 6213-6216.

Wang X., Liu Y., Zeng G., Chai L., Xiao X., Song X. and Min Z. 2008. Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants, Chemosphere: 1260-1266.

Weare J.H. 1987. Models of mineral solubility in concentrated brines with application to feild observations. In: I.S.E. Carmichael and H.P. Eugster (Editors), Thermodynamic Modelling of Geological Materials: Minerals, Fluids and Melts, Ch. 5. Mineral. Soc. Am., Rev, Mineral., 17: 143-176.

Yao K., Soro M., Albert T. and Bokra Y. 2009. Assessment of sediments contamination by heavy metals in tropical lagoon urban area (Ebrié Lagoon, Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, Vol. 34 No.2, pp. 280-289.

ANNEXE

Annexe 1

Tableau A (saumures)

Ech	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	P (µg/L)	Ni	Cu	Zn	Pb	Ti	Fe	Sr	Ba
Zk 09	785	7423	68442	23793	110041	41136	12817	/	55	1801	1678	22	1026		16805	40
	1689	2739	16982	41724	14442	10783	719	537	48	211	2223		239	49	23400	9
Moy	1237	5081	42712	32759	62242	25959	6768	537	52	1006	1951	22	632	49	20102	24

Zk 09 : Sebkhet Bordj Omar Idriss en 2009

Tableau B (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3	P (µg/L)	Ni	Cu	Zn	Pb	Ti	Fe	Sr	Ba
	29	8,3	182	1198	3710	75364	31769	107058	48124	47	48	/	26	1812	2434	32	894	48	20217	43
	31	8,4	175	1155	3656	74122	33482	110781	40534	47	18	/	41	1856	2516	36	796	/	19854	45
	24	7,7	94	944	8717	83252	33126	132970	57913	126	67	/	22	2121	2054	40	1127	98	6818	48
AB 09	23	9,1	/	1792	2535	13110	41865	13169	9772	118	62	/	32	124	2132		37	/	21404	17
	28	8,0	/	1356	5496	38187	33084	41815	48586	478	/	3708	19	918	1962	1	90	/	24925	22
	26	8,1	/	1410	6386	45920	36869	49422	61336	144	/	/	15	1109	2367	3	47	/	23665	24
	30	7,8	/	2830	15424	80283	21702	124179	88025	525	/	/	6	2160	2541	45	69	/	2995	49
Moy	27	8,21	151	1527	6561	58605	33128	82771	50613	212	49	3708	23	1443	2287	26	437	73	17125	35

AB 09 : Chott Ain El-Beida en 2009

Tableau C (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3	PO4
	19	8	171,2	14250	8412,2	95625	1100	141613	43389	542,9	0	/
	20	8,3	175,9	21250	6972	114375	2825	214253	46875	735	0	/
	20	8,1	166,1	22500	11419	115000	2650	188045	100333	573	0,13	/
	20	8,7	87,1	11500	3639	26500	850	41015	35633	884	0	/
	20	8,8	106,7	14500	9095	37000	8400	43605	80514	1111	0	/
AB 10	19	9,4	56,4	1130	1920	16600	420	17712	21667	247	0	/
	14	8,3	163	2640	9095	116000	2220	164870	56947	787	0	/
	14	8,4	127,6	2140	8286	71700	1460	83663	63124	1152	0	/
	14	9	121,1	1980	17583	57040	8520	82935	85951	1220	0	/
	20	8,2	94	7250	5760	29750	2200	47222	33990	1098	0	/
	29	8	167,8	9774,43	4712	4606	3578,9	2851	14250	506	0	/
Moy	19	8,47	131	9901	7899	62200	3111	93435	52970	805	0,01	/
	/	7,2	45	18023	12084	76124	21995	144080	64205	643	/	/
AB 12	/	7,9	48	18555	18184	81528	23120	149523	77251	720	/	/
	/	8	49	19021	18567	85230	24326	154230	87502	745	/	/
Moy	/	8	48	18533	16278	80961	23147	149278	76319	703	/	/
	21	8,48	/	/	/	/	/	44668	31147	/	7,9	0
	21	8,54	/	/	/	/	/	40360	46138	/	11,1	0
	21	8,22	/	/	/	/	/	145287	45598	/	6	0
	21	8,66	/	/	/	/	/	51736	56510	/	13,3	0
	29	8,03	31	/	/	/	/	8907	5760	/	1,1	0
AB 13	27	8,02	207	/	/	/	/	85554	79200	/	14,5	18
	25	7,68	35	/	/	/	/	10324	6500	/	1,4	0
	21	7,83	20	/	/	/	/	4900	3842	/	0,8	0
	27	7,27	30	/	/	/	/	8652	5536	/	1,3	0
	28	7,37	216	/	/	/	/	153634	127399	/	25,2	0
	26	8,15	123	/	/	/	/	44133	66080	/	8	0
	25	7,66	28	/	/	/	/	8293	4943	/	1,2	0
Moy	26	8	86	/	/	/	/	50537	39888	/	8	1

AB 10 : Chott Ain El-Beida en 2010
AB 12 : Chott Ain El-Beida en 2012
AB 13 : Chott Ain El-Beida en 2013

Tableau D (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	DBO5 (mg/L)	DCO	MES	O2	NO3	PO4	Pt
AB 13	21,6	7,9	105	38	340	/	/	/	/	/
	22,5	7,4	13,5	140	348	170	0,79	0,49	2,8	3,34
AB 15	/	/	10,4	110	270	173	/	/	/	/
	/	/	11,6	120	298	105	/	/	/	/
Moy	22,5	7,4	11,8	123	305	149	0,79	0,49	2,8	3,34
AB 16	24	8	102	62	192	/	5	/	/	/

AB 15 : Chott Ain El-Beida en 2015
AB 16 : Chott Ain El-Beida en 2016

Tableau E (saumures)

Ech	T °c	pH	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3	Ni (µg/L)	Cu	Zn	Pb	Ti	Sr	Ba
N'g 09	23,7	7,28	1184	10811	75121	50423	155110	19783	129	117	9	2060	2367	32	56	18528	70
Sf 09	20,3	7,25	434	20918	63535	15497	147881	31605	137	1356	12	1801	1933	18	83	10692	13
Moy	22	7,26	809	15864	69328	32960	151496	25694	133	736	10	1931	2150	25	69	14610	41

N’g 09 : Sebkhet N’goussa en 2009
Sf 09 : Sebkhet Safioune en 2009

Tableau F (saumures)

Ech	pH	Cond (mS/cm)	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk
	7,9	20,81	75987	7403	6890	10012	92123	40567	396
Sf 12	7,9	23,6	78654	7904	7740	10412	97986	41230	403
	7,9	25,2	79657	8654	8218	10567	100348	44001	432,8
Moy	7,9	23	78099	7987	7616	10330	96819	41933	411

Tableau G (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	O2	DBO5 (mg/L)	DCO	Cl	SO4	NO3	PO4
	21,1	8,31	/	/	/	/	7546	4431	3	0
	21,0	8,33	/	/	/	/	48016	15888	78	62
	21,2	8,27	/	/	/	/	46575	15504	84	0
Sf 13	21,2	7,32	14	/	22	710	3181	2087	106	0
	17,7	7,95	152	/	40	158,4	56065	17139	81	0
	18,3	8,18	122	/	/	/	36663	21421	5	0
	27,2	8,17	173	/	20	163,2	76290	54899	82	0
Moy	21	7,8	95	/	29	270	39191	18767	63	9
Sf 16	23	8,4	80	1,6	101	104	/	/	/	/

Tableau H (saumures)

Ech	T °c	pH	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3	P (µg/L)	Ni	Cu	Zn	Pb	Ti	Fe	Sr	Ba
Bg 09	19,4	7,9	2420	1520	49829	17421	90918	6476	/	26	/	60	1715	2362	65	118	74	34221	351
	21,4	7,4	524	9912	76624	16752	145120	21066	117	6	568	11	1728	2144	24	5	/	20596	56
	22,4	7,3	1087	10791	76851	41217	155280	21354	121	20	1689	11	2186	1913	36	145	/	20725	39
	17,4	7,5	1208	13747	78025	47865	154269	22773	121	17	143	13	2078	2559	32		/	12906	53
	22,8	7,3	1143	18408	77608	57254	157251	35533	182	25	1696	455	2101	2544	39	59	/	24086	38
Moy	21	7	1276	10876	71787	36102	140568	21441	135	19	1024	110	1962	2304	39	82	74	22507	107
Bh 09	15,8	8,6	2091	3852	21185	54752	19424	10883	42	20	233	38	97	2389	/	/	/	31283	52
Ch 09	16,5	7,6	898	6100	58321	16829	110760	18416	254	126	3109	21	1744	2596	63	2	836	28659	58

Bg 09 : Chott Beghdad en 2009 Bh 09 : Lac El-Bheir en 2009 Ch 09 : Chott Chegga en 2009

Tableau I (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3
Bg 10	17	7	175	1870	1766,4	10800	5980	136700	34063	170,8	12
Bh 10	16	8,2	/	/	/	/	/	/	/	/	15
Bh 11	15	8,2	/	/	/	/	/	/	/	/	16
	16	8,2	57	3580	/	16310	705	23000	12000	375	10
Moy	16	8,2	57	3580	/	16310	705	23000	12000	375	13
Bg 11	19	7	172	1910	3174	11600	5950	138000	41625	171	14
	21	7	172	3570	3328	93500	8100	153000	48750	195	5
	22	7	172	9250	3482	95000	8120	162700	75000	329	/
	23	7	172	9880	18688	102400	8420	230000	88125	348	/
Moy	22	7	172	6153	7168	75625	7648	170925	63375	261	9,5

Tableau J (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	DBO5 (mg/L)	DCO	MES	O2
Bh 10	15,8	8,21	/	40	164	76	7,4
Bh 11	15,1	8,24	/	27	172	65	7,7
	16	8,19	57	43	165	68	7,8
Moy	16	8	57	37	167	70	8
Bg 10	17,4	6,5	/	27	105	63	7,3
Bg 11	19,4	6,7	/	31	112	76	7,5
	21,4	6,66	/	29	110	61	7,5
Moy	19	7	/	29	109	67	7

Tableau K (saumures)

Ech	P (µg/L)	Ni	Cu	Zn	Pb	Ti	Fe	Sr	Ba
Mr 09	2474	24	1224	2401	11	/	/	8385	39
	10051	56	2474	2493	71	400	577	19823	10
	1530	25	1543	2395	8	42	/	26336	16
	/	30	1796	2520	5	46	/	25552	6
	/	14	1969	2141	34	25	/	26099	8
Moy	4685	30	1801	2390	26	128	577	21239	16

Tableau L (saumures)

Ech	T °c	pH	Cond (mS/cm)	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO4	Alk	NO3
Mr 09	/	/	/	435	31606	51738	20012	140363	54262	484	7
	/	/	/	2691	47349	376670	61087	145238	18029	376	/
	/	/	/	1304	4712	65269	13629	124680	9961	267	9
	/	/	/	693	5751	81998	12228	150402	10221	276	9
	/	/	/	1535	5500	77889	37602	142370	9410	256	/
	/	/	/	74	92	55018	2906	93702	196	/	0,4
	16	7,85	178,4	133	15104	102300	3200	207585	22758	631	1
	18	7,95	179,9	133	13056	101750	2950	205885	19043	580	1
Moy	17	7,9	179	875	15396	114079	19202	151278	17985	410	5
Mr 10	14	7,89	179,5	15000	7270	96875	1950	178485	14713	427	0
	15	7,81	179,5	15000	8499	103125	1950	191808	13881	439	0
	20,8	8,02	184,1	18000	7478	101250	1775	189278	16471	439	0
	21,2	8,07	184,2	19875	8084	103750	1975	195173	14752	439	0
	15,7	7,85	177,8	2920	8084	110500	1940	172170	17850	458	0
	15,9	8,01	178,3	2920	8084	112000	1940	178230	9931	494	1,2
	19	7,35	177,5	13500	9903	106875	2650	207570	17546	531	0
	22	7,55	192	2428	9154	547360	7589	235180	12860	496	0
Moy	18	7,8	182	11205	8320	160217	2721	193487	14751	465	0,2

Mr 09 : Chott Merouane en 2009 Mr 10 : Chott Merouane en 2010

Tableau M (sels)

Ech	Ca (mg/L)	Mg	Na	K	Cl	SO_4	NO_3	P (µg/L)	Ni	Cu	Zn	Pb	Ti	Fe	Sr	Ba
Zk 09	532	939	16648	1378	8786	31147	1091	/	12	416	145	0,77	663	78	31770	15
AB 09	652	618	35599	1526	6723	76152	/	563	14	865	180	1,46	1452	127	21004	79
	53	271	44506	4024	75735	2496	6,73	175	16	1328	130	22	90	41	1347	40
	655	2565	35621	1630	7377	82247	/	680	16	958	177	1,61	94	35	28079	79
	530	1723	37263	15227	61701	8606	2,12	293	11	1003	120	4,54	10	16	4235	35
Moy	473	1294	38247	5602	37884	42375	4,43	428	14	1038	152	7,42	412	55	13666	58
Mr 09	74	92	55018	2906	93702	196	0,44	70	13	2055	112	6,82	2	32	912	75
	60	335	44813	2557	78239	594	0,67	207	13	1636	176	2,40	20	28	1391	46
Moy	67	213	49916	2731	85971	395	0,56	139	13	1845	144	4,61	11	30	1152	60

Annexe 2

Exemple de calcul de l'état de saturation d'un échantillon (Ab 09) suivant Database de trois (03) modèles thermodynamiques :

- phreeqc.dat. ;
- pitzer.dat. et ;
- sit.dat.

1. Database\phreeqc.dat

```
------------------------------------
Reading input data for simulation 1.
------------------------------------

DATABASE C:\Program Files (x86)\USGS\Phreeqc Interactive 3.0.6-7757\database\phreeqc.dat
TITLE Chotts et sebkhas
SOLUTION_SPREAD
water 1.0
units mol/kgw

Description     temp    pH      Density Ca      Mg      Na      K       Cl      S(6)    Alkalinity      N(+5)   F
1       29.3    8.3     1.365   0.041   0.208   4.476   1.109   4.123   0.684   0.001   0.001   0.02
And
```

```
-----------------------------Solution composition-------------------------------
                    Elements           Molality       Moles

                    Alkalinity       1.000e-003  1.000e-003
                    Ca               4.100e-002  4.100e-002
                    Cl               4.123e+000  4.123e+000
                    F                2.000e-002  2.000e-002
                    K                1.109e+000  1.109e+000
                    Mg               2.080e-001  2.080e-001
                    N(5)             1.000e-003  1.000e-003
                    Na               4.476e+000  4.476e+000
                    S(6)             6.840e-001  6.840e-001
            ----------------Description of solution----------------

                                          pH  =   8.300
                                          pe  =   4.000
        Specific Conductance (uS/cm, 29 oC) = 374102
                            Density (g/cm3)  =   1.21799
                                 Volume (L)  =   1.15694
                          Activity of water  =   0.829
                             Ionic strength  =  5.382e+000
                         Mass of water (kg)  =  1.000e+000
                      Total carbon (mol/kg)  =  6.898e-004
                         Total CO2 (mol/kg)  =  6.898e-004
                        Temperature (deg C)  =  29.30
                    Electrical balance (eq)  =  5.700e-001
  Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|)  =   5.56
                                 Iterations  =   7
                                    Total H  = 1.110132e+002
                                    Total O  = 5.824750e+001
```

----------Saturation indices----------

Phase	SI	log IAP	log K(302 K, 1 atm)	
Anhydrite	0.61	-3.72	-4.33	CaSO4
Aragonite	0.71	-7.66	-8.36	CaCO3
Calcite	0.85	-7.66	-8.51	CaCO3
CO2(g)	-4.43	-5.94	-1.51	CO2
Dolomite	2.66	-14.53	-17.19	CaMg(CO3)2
Fluorite	2.83	-7.72	-10.55	CaF2
Gypsum	0.70	-3.88	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.66	-27.77	-3.11	H2
H2O(g)	-1.48	-0.08	1.39	H2O
Halite	-0.42	1.15	1.57	NaCl
O2(g)	-32.72	-35.64	-2.92	O2
Sylvite	-0.78	0.17	0.94	KCl

2. Databases\pitzer.dat

```
                                    ------------------------------------
                                    Reading input data for simulation 1.
                                    ------------------------------------

DATABASE C:\Program Files (x86)\USGS\Phreeqc Interactive 3.0.6-7757\database\pitzer.dat
TITLE Chotts et sebkhas
SOLUTION_SPREAD
water 1.0
units mol/kgw


Description      temp  pH    Density    Ca    Mg    Na    K     Cl    S6)   Alkalinity
1     29.3  8.3   1.365 0.041 0.208 4.476 1.109 4.123 0.684 0.001
And


        ----------------------------Solution composition-----------------------------

                            Elements           Molality       Moles

                            Alkalinity       1.000e-003  1.000e-003
                            Ca               4.100e-002  4.100e-002
                            Cl               4.123e+000  4.123e+000
                            K                1.109e+000  1.109e+000
                            Mg               2.080e-001  2.080e-001
                            Na               4.476e+000  4.476e+000
                            S(6)             6.840e-001  6.840e-001
```

```
----------------Description of solution----------------

                                      pH  = 8.300
                                      pe  = 4.000
      Specific Conductance (uS/cm, 29 oC) = 409331
                         Density (g/cm3)  = 1.21453
                              Volume (L)  = 1.15986
                       Activity of water  = 0.809
                          Ionic strength  = 6.720e+000
                      Mass of water (kg)  = 1.000e+000
                   Total carbon (mol/kg)  = 5.809e-004
                      Total CO2 (mol/kg)  = 5.809e-004
                     Temperature (deg C)  = 29.30
                  Electrical balance (eq)  = 5.910e-001
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|)  = 5.11
                              Iterations  = 20
                        Gamma iterations  = 6
                     Osmotic coefficient  = 1.10390
                        Density of water  = 0.99585
                                 Total H  = 1.110129e+002
                                 Total O  = 5.824413e+001

--------------------Saturation indices-----------------

          Phase               SI   log IAP   log K(302 K,   1 atm)

          Anhydrite         0.52     -3.76   -4.28  CaSO4
          Aragonite         0.61     -7.64   -8.25  CaCO3
          Arcanite         -0.75     -2.47   -1.72  K2SO4
          Bischofite       -4.80     -0.36    4.44  MgCl2:6H2O
          Bloedite         -1.68     -4.03   -2.35  Na2Mg(SO4)2:4H2O
          Brucite          -1.11    -11.94  -10.83  Mg(OH)2
          Burkeite         -5.59     -6.36   -0.77  Na6CO3(SO4)2
```

Calcite	0.79	-7.64	-8.43	CaCO3
Carnallite	-4.42	-0.09	4.33	KMgCl3:6H2O
CO2(g)	-4.44	-5.94	-1.51	CO2
Dolomite	2.83	-14.35	-17.18	CaMg(CO3)2
Epsomite	-1.65	-3.48	-1.83	MgSO4:7H2O
Gaylussite	-3.38	-12.81	-9.42	CaNa2(CO3)2:5H2O
Glaserite	-0.32	-4.12	-3.80	NaK3(SO4)2
Glauberite	0.65	-4.59	-5.25	Na2Ca(SO4)2
Gypsum	0.63	-3.95	-4.58	CaSO4:2H2O
H2O(g)	-1.49	-0.09	1.39	H2O
Halite	-0.48	1.10	1.58	NaCl
Hexahydrite	-1.80	-3.38	-1.58	MgSO4:6H2O
Kainite	-2.64	-2.83	-0.19	KMgClSO4:3H2O
Kalicinite	-4.45	-14.50	-10.06	KHCO3
Kieserite	-2.80	-2.92	-0.12	MgSO4:H2O
Labile_S	0.07	-5.60	-5.67	Na4Ca(SO4)3:2H2O
Leonhardite	-2.31	-3.20	-0.89	MgSO4:4H2O
Leonite	-1.69	-5.67	-3.98	K2Mg(SO4)2:4H2O
Magnesite	1.14	-6.71	-7.85	MgCO3
Mirabilite	-0.72	-1.75	-1.02	Na2SO4:10H2O
Misenite	-55.43	-66.23	-10.81	K8H6(SO4)7
Nahcolite	-2.94	-13.68	-10.74	NaHCO3
Natron	-4.80	-5.62	-0.82	Na2CO3:10H2O
Nesquehonite	-1.82	-6.98	-5.17	MgCO3:3H2O
Pentahydrite	-2.01	-3.29	-1.28	MgSO4:5H2O
Pirssonite	-3.30	-12.53	-9.23	Na2Ca(CO3)2:2H2O
Polyhalite	0.73	-13.01	-13.74	K2MgCa2(SO4)4:2H2O
Portlandite	-7.69	-12.88	-5.19	Ca(OH)2
Schoenite	-1.53	-5.85	-4.33	K2Mg(SO4)2:6H2O
Sylvite	-0.67	0.27	0.94	KCl
Syngenite	1.12	-6.33	-7.45	K2Ca(SO4)2:H2O
Thenardite	-0.48	-0.83	-0.35	Na2SO4
Trona	-7.19	-18.57	-11.38	Na3H(CO3)2:2H2O

3. Database\sit.dat

```
                                   ------------------------------------
                                   Reading input data for simulation 1.
                                   ------------------------------------

DATABASE C:\Program Files (x86)\USGS\Phreeqc Interactive 3.0.6-7757\database\sit.dat
TITLE Chotts et sebkhas
SOLUTION_SPREAD
water 1.0
units mol/kgw


Description      temp  pH    Density    Ca    Mg    Na    K     Cl    S(6)  Alkalinity N(+5) F
1     29.3  8.3   1.365 0.041 0.208 4.476 1.109 4.123 0.684 0.001 0.001 0.02
and
        ----------------------------Solution composition-----------------------------

                                Elements           Molality       Moles

                                Alkalinity       1.000e-003  1.000e-003
                                Ca               4.100e-002  4.100e-002
                                Cl               4.123e+000  4.123e+000
                                F                2.000e-002  2.000e-002
                                K                1.109e+000  1.109e+000
                                Mg               2.080e-001  2.080e-001
                                N(5)             1.000e-003  1.000e-003
                                Na               4.476e+000  4.476e+000
                                S(6)             6.840e-001  6.840e-001
```

```
-----------Description of solution------------

                                pH  =   8.300
                                pe  =   4.000
                  Activity of water  =   0.837
                     Ionic strength  =  6.231e+000
                 Mass of water (kg)  =  1.000e+000
             Total carbon (mol/kg)  =  7.517e-004
                Total CO2 (mol/kg)  =  7.517e-004
               Temperature (deg C)  =  29.30
           Electrical balance (eq)  =  5.700e-001
Percent error, 100*(Cat-|An|)/(Cat+|An|)  =   5.14
                          Iterations  =  30
                   Gamma iterations  =   8
               Osmotic coefficient  =   0.94456
                             Total H  = 1.110204e+002
                             Total O  = 5.825118e+001

------------Saturation indices-------------

Phase               SI   log IAP   log K(302 K,   1 atm)

Anhydrite         0.43     -4.06   -4.48  Ca(SO4)
Antarcticite     -5.68     -1.70    3.97  CaCl2:6H2O
Aragonite         0.31     -8.03   -8.34  CaCO3
Arcanite         -0.62     -2.41   -1.79  K2SO4
Artinite         -2.99      6.53    9.52  Mg2(CO3)(OH)2:3H2O
Bassanite        -0.14     -4.10   -3.96  CaSO4:0.5H2O
Bischofite       -5.88     -1.44    4.44  MgCl2:6H2O
Bloedite         -2.79     -5.14   -2.35  Na2Mg(SO4)2:4H2O
Brucite          -2.29     14.53   16.82  Mg(OH)2
Burkeite         -6.30     -7.07   -0.77  Na6(CO3)(SO4)2
C(cr)           -39.72    -71.41  -31.70  C
```

Ca(NO3)2(s)	-15.20	-9.31	5.89	Ca(NO3)2
Ca(s)	-105.68	-10.18	95.50	Ca
Ca2Cl2(OH)2:H2O(s)	-13.58	12.95	26.53	Ca2Cl2(OH)2:H2O
Ca4Cl2(OH)6:13H2O(s)	-27.50	40.55	68.05	Ca4Cl2(OH)6:13H2O
CaCl2:2H2O(cr)	-9.23	-1.39	7.84	CaCl2:2H2O
CaCl2:4H2O(cr)	-6.87	-1.55	5.32	CaCl2:4H2O
CaCl2:H2O(s)	-9.03	-1.31	7.72	CaCl2:H2O
CaCO3:H2O(s)	-0.49	-8.10	-7.61	CaCO3:H2O
CaF2:6H2O(s)	-1.77	-7.25	-5.48	CaF2:6H2O
Calcite	0.48	-8.03	-8.51	CaCO3
CaMg3(CO3)4(s)	-0.23	-31.32	-31.09	CaMg3(CO3)4
CaO(cr)	-17.87	14.34	32.22	CaO
Carnallite	-5.59	-1.23	4.35	KMgCl3:6H2O
CH4(g)	-80.20	-120.61	-40.41	CH4
Cl2(g)	-36.21	8.94	45.15	Cl2
CO(g)	-32.27	-46.89	-14.62	CO
CO2(g)	-4.23	-22.37	-18.14	CO2
Dolomite	1.42	-15.79	-17.21	CaMg(CO3)2
Epsonite	-2.49	-4.34	-1.85	Mg(SO4):7H2O
Fluorite	3.76	-6.79	-10.55	CaF2
Gaylussite	-4.06	-13.41	-9.35	CaNa2(CO3)2:5H2O
Glaserite	-0.84	-8.26	-7.41	Na2K6(SO4)4
Glauberite	-7.03	-5.09	1.94	Na2Ca(SO4)2
Gypsum	0.40	-4.21	-4.61	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.60	-24.60	0.00	H2
H2O(g)	-1.47	-42.37	-40.90	H2O
Halite	-0.71	0.89	1.60	NaCl
HCl(g)	-13.93	-7.83	6.10	HCl
Hexahydrite	-2.61	-4.26	-1.65	Mg(SO4):6H2O
Hydrophilite	-12.80	-1.24	11.57	CaCl2
K(cr)	-53.13	-4.26	48.86	K
K(NO3)(s)	-3.73	-3.83	-0.10	K(NO3)
K(OH)(s)	-16.64	7.96	24.60	K(OH)

K-carbonate	-9.52	-6.49	3.03	K2CO3:1.5H2O
K-trona	-11.15	-20.25	-9.10	K2NaH(CO3)2:2H2O
K2CO3(cr)	-11.70	-6.37	5.33	K2CO3
K2O(s)	-67.05	16.00	83.05	K2O
Kainite	-3.60	-3.82	-0.22	KMgCl(SO4):3H2O
Kalicinite	-4.44	-14.41	-9.97	KHCO3
Lansfordite	-3.12	-8.15	-5.03	Mg(CO3):5H2O
Leonhardtite	-3.16	-4.11	-0.95	MgSO4:4H2O
Leonite	-2.57	-6.52	-3.94	K2Mg(SO4)2:4H2O
Magnesite(nat)	1.21	-7.77	-8.97	MgCO3
Magnesite(syn)	0.41	-7.77	-8.17	Mg(CO3)
Mercallite	-9.04	-10.44	-1.40	KHSO4
Mg(cr)	-88.54	-9.92	78.62	Mg
Mg(NO3)2(s)	-24.55	-9.05	15.50	Mg(NO3)2
Mg(NO3)2:6H2O(s)	-12.10	-9.52	2.58	Mg(NO3)2:6H2O
Mg(SO4)(s)	-12.61	-3.80	8.81	Mg(SO4)
Mg(SO4):H2O(s)	-3.63	-3.88	-0.25	Mg(SO4):H2O
Mg-oxychlorur	-4.65	20.99	25.64	Mg2Cl(OH)3:4H2O
Mg5(CO3)4(OH)2:4H2O(s)	-5.95	-16.84	-10.90	Mg5(CO3)4(OH)2:4H2O
MgCl2(s)	-22.61	-0.98	21.63	MgCl2
MgCl2:2H2O(s)	-14.03	-1.13	12.90	MgCl2:2H2O
MgCl2:4H2O(s)	-8.73	-1.29	7.44	MgCl2:4H2O
MgCl2:H2O(s)	-17.27	-1.05	16.22	MgCl2:H2O
MgF2(cr)	2.72	-6.53	-9.25	MgF2
Mirabilite	-0.77	-1.81	-1.03	Na2SO4:10H2O
Na(cr)	-48.87	-3.58	45.29	Na
Na(NO3)(s)	-4.23	-3.14	1.09	Na(NO3)
Na2(CO3)(cr)	-6.05	-5.00	1.05	Na2(CO3)
Na2CO3:7H2O(s)	-5.19	-5.54	-0.35	Na2CO3:7H2O
Na2O(cr)	-49.22	17.37	66.58	Na2O
NaF(s)	-1.40	-1.88	-0.48	NaF
Nahcolite	-3.07	-13.72	-10.66	Na(HCO3)
Natron	-5.10	-5.77	-0.67	Na2(CO3):10H2O

Nesquehonite	-2.84	-8.00	-5.16	Mg(CO3):3H2O
O2(g)	-32.61	-35.54	-2.93	O2
Pentahydrite	-2.87	-4.19	-1.32	MgSO4:5H2O
Periclase	-6.60	14.60	21.20	MgO
Picromerite	-2.42	-6.67	-4.25	K2Mg(SO4)2:6H2O
Pirssonite	-4.29	-13.18	-8.89	Na2Ca(CO3)2:2H2O
Polyhalite	-0.74	-14.48	-13.74	K2MgCa2(SO4)4:2H2O
Portlandite	-8.22	14.27	22.49	Ca(OH)2
S(cr)	-56.71	-91.97	-35.26	S
SO2(g)	-37.50	-42.93	-5.42	SO2
Sylvite	-0.71	0.21	0.91	KCl
Syngenite	0.52	-6.93	-7.45	K2Ca(SO4)2:6H2O
Tachyhydrite	-21.50	-4.12	17.38	Mg2CaCl6:12H2O
Thermonatrite	-5.53	-5.08	0.45	Na2(CO3):H2O
Thernardite	-0.67	-1.03	-0.37	Na2SO4
Trona	-7.59	-18.88	-11.28	Na3H(CO3)2:2H2O
Vaterite	-0.09	-8.03	-7.94	CaCO3

Annexe 3

1. Contexte institutionnel et réglementaire des Etudes d'Impact sur l'Environnement :

1.1. Les institutions dans le domaine de la protection de l'environnement :

La responsabilité globale de la gestion de l'environnement incombe au ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire et aux diverses institutions mises en place à cet effet :

- Haut Conseil de l'Environnement créé par décret présidentiel le 25 décembre 1994,
- Conseil National des Forêts et de la Production de la Nature créé le 25 octobre 1995,
- Inspection Générale de l'environnement créée le 27 janvier 1996,
- Inspection de l'environnement de la wilaya (Ouargla) créée le 27 janvier 1996. Ce décret stipule que l'inspection de la wilaya est l'organe principal de l'Etat en matière de contrôle de l'application des lois et des textes réglementaires relatifs à la protection de l'environnement ou qui y ont trait,
- Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable créé le 12 décembre 2001.

Du point de vue institutionnel, les principaux acteurs concernés par les aspects environnementaux sont :

- Le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement pour les aspects environnementaux,
- Le ministère des eaux et forêts pour les milieux humides,

- L'agence nationale des ressources hydrauliques et l'agence régionale de bassin pour la problématique de la quantité et de la qualité des ressources hydriques.

Au niveau local, la wilaya abrite des services techniques :

- La conservation des Forêts qui représente la direction générale des forêts,
- La direction des services agricoles sous tutelle du Ministère de l'Agriculture,
- L'inspection de l'environnement sous tutelle du ministère de l'Intérieur et de l'Environnement localisée au chef de la wilaya,
- La direction de l'hydraulique sous tutelle du ministère des ressources en eau. Cette direction s'occupe globalement de la gestion de la ressource en eau de la wilaya et ouvrages de mobilisation.

L'assainissement relevait jusqu'à récemment des compétences de l'Office National Algérien d'Assainissement. La mise en place d'une politique de décentralisation donne la responsabilité de l'assainissement aux assemblées populaires communales et à la Direction Hydraulique de la Wilaya.

1.2. La réglementation dans le domaine de l'environnement :

Pour la protection de l'environnement, l'Etat algérien s'est investi dans la mise en place d'un grand nombre de lois et textes régissant la protection et la préservation du patrimoine naturel.

Les textes relatifs aux études d'impact sur l'environnement, aux rejets dans le milieu naturel ainsi que les textes relatifs à la conservation et protection du milieu :

1.2.1. Les études d'impact :

La notion d'étude d'impact sur l'environnement a été introduite dans la loi 83-03 relative à la protection de l'environnement. Son application est devenue opérationnelle depuis la publication du décret N°90-78 du 27 février 1990.

Le décret exécutif N°90-78 du 27 février 1990 relatif aux études d'impact sur l'environnement détermine les conditions d'application du Titre V relatif aux études d'impact de la loi 83-03. L'article 2 précise que la procédure préalable

de l'étude d'impact s'applique à tous les travaux d'aménagements, ouvrages dont l'importance, les dimensions ou leurs incidences peuvent directement ou indirectement porter atteinte à l'environnement. Ce décret précise à l'article 5 le contenu de l'étude d'impact :

- Analyse de l'état initial du site et de son environnement,
- Analyse des effets sur l'environnement,
- Justification du projet,
- Mesures de suppression, réduction et compensation des impacts du projet, prévues par le maître d'ouvrage.

En termes de procédure, l'étude d'impact est soumise au wali territorialement compétent qui la soumet au ministre chargé de l'environnement. L'étude d'impact est rendue publique par le wali. Les réseaux d'assainissement d'évacuation des eaux pluviales et de distribution ne sont pas soumis aux études d'impact car ils sont soumis à d'autres dispositions réglementaires. Cependant les stations de traitement des eaux usées font partie des installations soumises aux études d'impact.

La loi n°83-03 du 05 février 1983 relative à la protection de l'environnement énonce les règles générales applicables en vue de la protection de l'environnement. Cette loi a fait ensuite l'objet de la publication de différents décrets visant à mettre en application les règles énoncées.

Le décret 87-91 du 21 avril 1987 relatif à l'étude d'impact d'aménagement du territoire analyse les incidences des projets/aménagements publics ou privés qui par l'importance de leurs dimensions peuvent directement et/ou indirectement modifier les formes d'organisation économique, urbaine et d'occupation de l'espace ou porter atteinte à la santé publique, à l'agriculture, à la protection de la nature, à la conservation des sites et monuments.

1.2.2. Les rejets liquides :

La législation concernant les rejets liquides est contenue dans la loi n°83-17 du 16 juillet 1983 aussi appelée « Code des Eaux » et dans le décret N° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels.

Loi N°83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux prévoit des mesures de prévention, en particulier la lutte contre la pollution et la protection des ressources en eaux.

L'article 96 précise que les eaux doivent être protégées contre toute forme de pollution. L'article 99 stipule qu'il est interdit d'évacuer, de jeter ou d'injecter dans les fonds du domaine public hydraulique des matières dont la nature pourrait porter des nuisances. Il est notamment interdit de déverser des effluents urbains, industriels contenant des substances solides, liquides ou gazeuses, des agents pathogènes en quantité et en concentration de toxicité susceptible de porter atteinte à la santé publique, à la faune, à la flore ou nuire au développement économique.

L'article 3 du décret N° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels précise que les rejets sont soumis à autorisation laquelle détermine les conditions techniques auxquelles sont subordonnés les rejets. Ce décret précise les valeurs de rejet des installations de déversement industriel. Sans préciser toutefois s'il s'agit de déversement direct dans le milieu ou indirect via un réseau d'eaux usées municipales. Les installations de traitement des eaux usées urbaines ne sont pas concernées par ces valeurs de rejet. Le niveau de mise en œuvre de ce décret reste indécis.

L'ordonnance N°96-13 du 15 juin 1996 modifie et complète la loi N°83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux : Elle spécifie que les agglomérations de plus de 100 000 habitants doivent disposer d'un système de traitement des eaux usées (Article 85 bis). Ce décret ne spécifie toutefois pas la qualité de rejets issus de ces systèmes de traitement.

1.2.3. Installations classées :

Le décret N°98-339 du 03 novembre 1998 définissant la réglementation applicable aux installations classées et fixant leur nomenclature définit classe les activités polluantes en trois catégories :

- Les activités de première catégorie dont la création et l'installation sont soumises à l'autorisation ministérielle,
- Les activités de seconde catégorie soumises à l'autorisation du Wali,
- Les activités de troisième catégorie soumises à l'autorisation du président de l'Assemblée Permanente Communale.

Les études d'impact sur l'environnement sont nécessaires pour la délivrance de ces autorisations. Les stations d'épuration recevant des eaux résiduaires urbaines domestiques et industrielles sont classées dans la seconde catégorie donc sont soumises à l'autorisation du Wali.

1.2.4. Protection de la nature :

La loi N° 91-20 du 02 décembre 1991 modifiant et complétant la loi N° 84-12 du 23 juin 1984 portant régime général des forêts est relative à la protection et sauvegarde du patrimoine forestier, au reboisement et à la lutte contre l'érosion et la désertification.

Dans le domaine de la protection de la nature, l'Algérie a aussi ratifié un certain nombre de conventions internationales :

- Convention de Londres sur la préservation de la faune et de la flore dans leur état naturel en 1933. Cette convention établit et fixe des restrictions au commerce des produits d'animaux sauvages,
- Convention africaine sur la conservation de la nature et des ressources naturelles ratifiée en 1982,
- Convention sur le patrimoine mondial, signé en 1974. Le site algérien de Tassili N'Ajjer dépend de cette convention,
- Convention de RAMSAR, signée en 1984 et qui concerne 13 sites en Algérie,
- Programme de l'UNESCO pour l'homme et la biosphère, signé en 1991 et concernant un site algérien,
- Convention de Barcelone, signée en 1982. 4 sites algériens sont représentatifs du réseau de la Méditerranée,

Déclaration de Tunis sur l'environnement, signée en 1991 qui va vers la mise en œuvre d'une proposition pour consacrer au moins 5% du territoire à la préservation du patrimoine naturel.