

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Magister

En géologie

Spécialité : Géosciences & Environnement

Option : Géochimie de surface

Thème :

Datation des eaux des nappes du complexe
terminal et de la nappe phréatique du Sahara
d' Ouargla

Présenté par :

TOUAHRI Abdeldjebar

Soutenu publiquement le : 10 juin 2013

Devant le jury composé de :

M. HACINI Messaoud
M. GUENDOUZ Abdelhamid
M. HAMDI-AISSA Belhadj
M. CHELOUFI Hamid
M. MOULLA Adnane Soufi

M.C.A
Professeur
Professeur
Professeur
Maitre de recherche

Université de Ouargla
Université de Blida
Université de Ouargla
Université de Ouargla
CRNA Alger

Président
Promoteur
Co-promoteur
Examineur
Examineur

Promotion 2011/2012

Dédicace

A mes très chers parents

Ma femme Karima ; à qui



j'exprime ma gratitude pour son
soutien moral durant ce
travail et pourtous !!!

Mes Frères et mes sœurs
Mes amis, mes voisins
et mes collègues.
et a toute la famille..
Je dédie ce travail

Remerciement

Ce travail doit beaucoup à mon encadreur le professeur M. Abdelhamid GUENDOUCZ sans qui ce travail n'aurait pas lieu. Il est infiniment remercié de ses efforts, sa disponibilité pourtant ses tâches innombrables, de sa patience, de ses orientations méthodologiques et scientifiques, de ses conseils précieux qui, n'ont pas seulement mené ce travail à terme, mais ont aussi enrichi mes savoirs et mes savoir-faire, et ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de l'application des techniques isotopiques en particulier et dans le domaine de la recherche scientifique en général. Il est de même remercié de m'avoir donné l'occasion de faire un stage pratique au Centre de Recherche Nucléaire d'Alger.

Est infiniment remercié aussi le professeur HAMDI-AISS qui codirigé ce travail

Je tiens à remercier M. MOULLA Adnane qui a bien suivi et dirigé mon stage pratique.

Les agents de CRNA, dont je cite M. ZOUBIDA, TOUMI Samir sont à leur tour remerciés de leur collaboration lors de notre stage.

Je tiens de même à remercier M. KRIMO, le technicien de laboratoire de l'institut de sciences de la terre à l'université de Constantine, qui accompli la tâche de l'analyse des eaux.

Nous ne pouvons pas par ailleurs passer sous silence le rôle d'ANRH et ONM d'OUARGLA, dont les responsables n'ont épargné aucun effort à nous fournir les données et les documentations nécessaires à la confection de ce travail.

Nos remerciements sont aussi à tous les membres du jury ; M. GUENDOUCZ Abdelhamid, M. HAMDI-AISSA Belhadj, M. CHELOUFI Hamid, M. MOULLA Adnane Soufi et à leur tête M. HACINI Messaoud et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé:

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire, représente une étude basée principalement sur l'hydrogéochimie, l'hydrochimie, les isotopes stables et la datation des eaux de la cuvette d'Ouargla par ^{14}C et ^3H . Elle est subdivisée en quatre chapitres exposant ; le contexte géographique et géologique de la zone d'étude, Hydro climatologie, hydrogéologie, méthodologie adoptée hydrochimie, et enfin la géochimie isotopique.

Cette étude s'appuie sur:

- le traitement des exposants climatique de la région d'Ouargla
- L'étude piézométrique de la nappe phréatique
- Les caractéristiques physico-chimiques, chimiques et isotopiques des eaux de la nappe CI, CT et celle phréatique.

La cuvette d'Ouargla est située au Nord-est du Sahara algérien, présente une superficie de l'ordre de 95 000 ha et un climat aride (précipitations très faibles, évaporation très élevée et amplitudes thermiques élevées). Hydrochimiquement, les eaux ont une qualité très dégradée et un faciès chimique presque homogène. Les teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux de la nappe phréatique sont très enrichies et montrent un caractère très évaporé sur la majorité de la nappe, et se distinguent ainsi des eaux de deux nappes profondes.

Cependant, un mélange entre les différents réservoirs a été mis en évidence par les isotopes.

Les activités en ^{14}C et ^3H de la nappe phréatique à l'échelle de la cuvette montrent des activités assez variables témoignent de l'existence de plusieurs épisodes de recharge à travers le temps et confirment le mélange mis en évidence par les isotopes stables.

Pour le complexe terminal les activités ^{14}C sont très basses et montrent une décroissance dans le sens d'écoulement.

Mots clés: *Cuvette Isotope stables et Isotopes Radioactives, Paléorecharge, Aquifère, Ouargla.*

Abstract:

This study is mainly based on, hydrogeochemistry, stable isotopes, and dating water with ^{14}C and ^3H , it is subdivided into four chapters explaining ; Geological and geographical study area, hydroclimate, hydrogeology, adopted methodology, hydrochemistry, and in the last chapter; isotopic geochemistry.

The study leans on:

- Treatments of climatic exponents.
- Piezometric study of phreatic groundwater.
- Physicochemical, chemical and isotopic water characteristics of continental intercalaire , complex terminal and phreatic groundwater.

Ouargla basin situated in northern-east of Algerian Sahara presents an area of 95 000 H and arid climate (low precipitation, high evaporation, and considerable thermal amplitude). Ouargla basins have a bad quality of water and its chemical facies is homogeneous. Phreatic groundwater is rich on ^{18}O and deuterium; those isotopes confirm evaporate water characteristic and distinguish between two profound groundwaters. Isotopes data affirmed the water mixing of reservoirs in this area.

^{14}C and ^3H activities of phreatic groundwater are variable and testify the existence of several Paléorecharge episodes also the water mixing between groundwater's in this area.

Complexes terminal groundwater has a low activity of ^{14}C decreasing with flow direction.

Keyword: basin, stable isotopes, radioactive isotopes, paleorecharge, aquifers Ouargla

ملخص

قصد انجاز هذه الدراسة ارتكز العمل على الهيدروجيوكيمياء الهيدروكيمياء النظائر المستقرة ثم التأريخ بواسطة الكربون المشع و التريسيوم لمياه منخفض ورقلة و من اجل ذلك قمنا بتقسيم هذه الأطروحة إلى أربعة محاور رئيسية : الخصائص الجغرافية و الجيولوجية للمنطقة المدروسة, عرض العوامل المناخية, الهيدروجيولوجيا, المنهجية المتبعة في هذا العمل, الهيدروكيمياء, وفي الأخير ؛ جيوكيمياء النظائر.

ركزت هذه الدراسة على :

- دراسة العوامل المناخية
- دراسة السماط المائس السطحي
- دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية, الكيميائية, كد للكم ودراسة النظائر لمياه منخفض ورقلة (المتداخل القاري, المركب النهاس, والسطح)

يتموقع منخفض ورقلة شمال شرق الصحراء الجزائرية ويتربع على مساحة تقدر ب 95000 هكتار يميزه مناخ قاري يابس (تساقط نادر, تبخر جد عال, ومدى حراري معتبر). هيدروكيمياء المياه تعكس نوعيتها الرديئة في المنطقة المدروسة وتضفي عليها شبه التجانس في معظم سحناتها الكيميائية.

لمياه السماط السطحي نسب عالية من الأوكسجين 18 و الديتريوم مما يكسبها خاصية التبخر الشديد و هو بذلك تميز بين سماطين عميقين. لقد كشفت دراسة النظائر المستقرة على وجود خليط مائس حاصل بين مختلف مياه السماطات في منخفض ورقلة.

إن أنشطة الكربون المشع و التريسيوم في مياه السماط السطحي متغيرة جدا , تدل على وجود عدة حلقات تعبئة قديمة كانت قد حصلت خلال الأزمنة الفائتة, وتؤكد في الوقت ذاته على وجود الخليط المائس المثبت عنه بواسطة النظائر المستقرة. أما بالنسبة لسماط المركب النهاس فأنشطته من الكربون المشع ضعيفة نوعا ما وتظهر تناقص تدريجي في اتجاه محور السيلان الرئيس لهذا السماط.

الكلمات المفتاحية : منخفض, ورقلة, النظائر المستقرة و النظائر المشعة, التعبئة القديمة, السماط.

Liste des figures

Figure I-1: Carte de situation géographique.....	04
Figure I-2: Relief géologique de la région d'Ouargla (BG, 2004).....	05
Figure I-3: Relief de la région d'Ouargla (BG 2004).....	06
Figure I-4: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Ouargla.....	09
Figure I-5 : Précipitations moyennes mensuelles	11
Figure I- 6: Graphique des précipitations annuelle (cumule).....	12
Figure I-7: Graphique de l'Humidité moyenne mensuelle.....	13
Figure I-8: Graphique de vitesse du vent mensuel moyen	14
Figure I-9: Graphique de la température moyenne mensuelle	15
Figure I-10: Graphique de l'évaporation moyenne interannuelle mensuelle	16
Figure I-11: Graphique de L'ETP mensuelle calculée par la formule de Thornthwaite.....	18
Figure I-12 : Situation générale des aquifères du Sahara septentrional.....	19
Figure I-13 : Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional (ERESS 1972).....	21
Figure I-14 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2003).....	23
Figure I-15 : Colonne litho stratigraphiques du CI dans la région d'étude.....	24
Figure I-16 : Carte des épaisseurs du CT (OSS, 2003).....	26
Figure I-17 : Carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003).....	27
Figure I-18 : Colonne litho stratigraphiques du CI dans la région d'étude.....	28
Figure I-19 : Carte piézométrique du "CT" dans la cuvette d'Ouargla (A, Bellaouer 2008).....	29
Figure I-20 : Log géologiques des formations de la nappe phréatique (Djidel, 2008).....	31
Figure I- 21 : Carte piézométrique de la nappe phréatique en 1968 (DHW-Ouargla, 1968).....	33
Figure I-22 : Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla en 2003 (BG, 2004).....	34
Figure I-23 : Carte piézométrique de la nappe phréatique 2011.....	36
Figure II-1 : Carte de situation des piézomètres échantillonnés de la nappe phréatique (2011).....	38
Figure II-2 : Situation des forages CI et CT échantillonnés par CRNA 1994-96	39
Figure II-3 : Compteur à scintillation liquide.....	42
Figure II-4 Technique de dosage du tritium utilisée par enrichissement électrolytique.....	44
Figure III-1 : Faciès chimiques des eaux de la cuvette d'Ouargla1.....	49
Figure III-2 : Carte de minéralisation totale des eaux (CI) (BELLAOUER 2008).....	51
Figure III-3: les cartes d'isoteneur en différents cations (nappe phréatique) 2011.....	57
Figure III-4 : les cartes d'isoteneur en différents anions (nappe phréatique) 2011.....	59
Figure III-5 : Indice de saturation des eaux de la nappe phréatique.....	60
Figure III-6 : Graphes représentatives de quelques corrélations entre les ions (nappe phréatique).....	62
Figure III-7 : Couple Ca^{++} VS HCO_3^- (nappe phréatique).....	63

Figure III-8 : Relation entre (cations+anions) Vs Cl (nappe phréatique).....	64
Figure VI-1 : Domaine de répartition des eaux naturelles sur diagramme $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ MOULLA A 2005.....	71
Figure VI-2 : Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations (Guendouz, 1985).....	72
Figure VI-3 : Répartition des teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe phréatique et celle du CT.....	73
Figure VI-4 : Les isotopes de l'hydrogène (SFRP 2002).....	76
Figure VI-5 : Courbe lisse représentant la teneur moyenne en ^3H des précipitations au-dessus de la surface continentale de l'hémisphère Nord. (AIEA 2008).....	77
Figure VI-6 : Evolution de la teneur en ^{14}C du CO_2 atmosphérique. (AIEA 2008).....	82
Figure VI-7 : Cycle générale du ^{14}C	83
Figure VI-8 : Carte représente l'activité en ^{14}C du C T.....	88
Figure VI-9 : Age des eaux du CI d'après la teneur ^{14}C (OULD BABA SY, 2005).....	92

Liste des tableaux

Tableau I-1:Précipitations moyennes mensuelles.....	10
Tableau I-2:Précipitations moyennes interannuelles.....	11
Tableau I-3:Humidité moyennes mensuelles.....	12
Tableau I-4:vitesse du vent mensuel moyen.....	13
Tableau I-5:l'insolation moyenne mensuelle en heures.....	14
Tableau I-6:Température moyenne mensuelle interannuelle.....	15
Tableau I-7:L'évaporation moyenne interannuel mensuelle.....	16
Tableau I-8:ETP moyennes mensuelles et annuelles.....	17
Tableau III-1:Quelques paramètres physicochimiques (CI).....	50
Tableau III-2:Analyses chimiques avec quelques paramètres physicochimique	52
Tableau III-3:Analyse chimique des eaux (nappe phréatique).....	53
Tableau III-4:Analyse chimique des eaux (nappe phréatique).....	55
Tableau VI-1:Teneur en tritium des eaux (CI et CT).....	79
Tableau VI-2:Teneur en tritium des eaux de la nappe phréatique..	80
Tableau VI-3:Les teneurs de ^{14}C et ^{13}C (CT).....	87
Tableau VI-4:Les âges des eaux.....	88
Tableau VI-5:Les teneurs en ^{14}C et ^{13}C (C I).....	90
Tableau VI-6:Les teneurs en ^{14}C et ^{13}C (nappe phréatique).....	90
Tableau Annexe I Les paramètres climatiques.....	98
Tableau Annexe II Inventaire des piézomètres fonctionnels	101
Tableau Annexe III Teneur en ^{18}O et des eaux (La nappe phréatique).....	103
Tableau Annexe III Teneur en ^{18}O et des eaux (CT et CI).....	104

Résumé:

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire, représente une étude basée principalement sur l'hydrogéochimie, l'hydrochimie, les isotopes stables et la datation des eaux de la cuvette d'Ouargla par ^{14}C et ^3H . Elle est subdivisée en quatre chapitres exposant ; le contexte géographique et géologique de la zone d'étude, Hydro climatologie, hydrogéologie, méthodologie adoptée hydrochimie, et enfin la géochimie isotopique.

Cette étude s'appuie sur:

- le traitement des exposants climatique de la région d'Ouargla
- L'étude piézométrique de la nappe phréatique
- Les caractéristiques physico-chimiques, chimiques et isotopiques des eaux de la nappe CI, CT et celle phréatique.

La cuvette d'Ouargla est située au Nord-est du Sahara algérien, présente une superficie de l'ordre de 95 000 ha et un climat aride (précipitations très faibles, évaporation très élevée et amplitudes thermiques élevées). Hydrochimiquement, les eaux ont une qualité très dégradée et un faciès chimique presque homogène. Les teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux de la nappe phréatique sont très enrichies et montrent un caractère très évaporé sur la majorité de la nappe, et se distinguent ainsi des eaux de deux nappes profondes.

Cependant, un mélange entre les différents réservoirs a été mis en évidence par les isotopes.

Les activités en ^{14}C et ^3H de la nappe phréatique à l'échelle de la cuvette montrent des activités assez variables témoignent de l'existence de plusieurs épisodes de recharge à travers le temps et confirment le mélange mis en évidence par les isotopes stables.

Pour le complexe terminal les activités ^{14}C sont très basses et montrent une décroissance dans le sens d'écoulement.

Mots clés: Cuvette Isotope stables et Isotopes Radioactives, Paléorecharge, Aquifère, Ouargla.

Abstract:

This study is mainly based on, hydrogeochemistry, stable isotopes, and dating water with ^{14}C and ^3H , it is subdivided into four chapters explaining: Geological and geographical study area, hydroclimate, hydrogeology, adopted methodology, hydrochemistry, and in the last chapter; isotopic geochemistry.

The study leans on:

- Treatments of climatic exponents.
- Piezometric study of phreatic groundwater.
- Physicochemical, chemical and isotopic water characteristics of continental intercalaire, complex terminal and phreatic groundwater.

Ouargla basin situated in northern-east of Algerian Sahara presents an area of 95 000 H and arid climate (low precipitation, high evaporation, and considerable thermal amplitude). Ouargla basins have a bad quality of water and its chemical facies is homogeneous. Phreatic groundwater is rich on ^{18}O and deuterium; those isotopes confirm evaporate water characteristic and distinguish between two profound groundwaters. Isotopes data affirmed the water mixing of reservoirs in this area.

^{14}C and ^3H activities of phreatic groundwater are variable and testify the existence of several Paléorecharge episodes also the water mixing between groundwaters in this area.

Complexes terminal groundwater has a low activity of ^{14}C decreasing with flow direction.

Keyword: basin, stable isotopes, radioactive isotopes, paleorecharge, aquifers Ouargla

ملخص

قصد انجاز هذه الدراسة ارتكز العمل على الهيدروجيوكيمياء الهيدروكيمياء النظائر المستقرة ثم التأريخ بواسطة الكربون المشع و التريسيوم لمياه منخفض ورقلة و من اجل ذلك قمنا بتقسيم هذه الأطروحة إلى أربعة محاور رئيسية : الخصائص الجغرافية و الجيولوجية للمنطقة المدروسة, عرض العوامل المناخية, الهيدروجيولوجيا, المنهجية المتبعة في هذا العمل, الهيدروكيمياء, وفي الأخير ؛ جيوكيمياء النظائر.

ركزت هذه الدراسة على :

- دراسة العوامل المناخية
- دراسة السماط المائس السطحي
- دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية, الكيميائية, كد للكم ودراسة النظائر لمياه منخفض ورقلة (المتداخل القاري, المركب النهاس, والسطحي)

يتموقع منخفض ورقلة شمال شرق الصحراء الجزائرية ويتربع على مساحة تقدر ب 95000 هكتار يميزه مناخ قاري يابس (تساقط نادر, تبخر جد عال, ومدى حراري معتبر). هيدروكيمياء المياه تعكس نوعيتها الرديئة في المنطقة المدروسة وتضفي عليها شبه التجانس في معظم سحناتها الكيميائية.

لمياه السماط السطحي نسب عالية من الأوكسجين 18 و الديتريوم مما يكسبها خاصية التبخر الشديد و هو بذلك تميز بين سماطين عميقين. لقد كشفت دراسة النظائر المستقرة على وجود خليط مائس حاصل بين مختلف مياه السماطات في منخفض ورقلة.

إن أنشطة الكربون المشع و التريسيوم في مياه السماط السطحي متغيرة جدا , تدل على وجود عدة حلقات تعبئة قديمة كانت قد حصلت خلال الأزمنة الفائتة, وتؤكد في الوقت ذاته على وجود الخليط المائس المثبت عنه بواسطة النظائر المستقرة. أما بالنسبة لسماط المركب النهاس فأنشطته من الكربون المشع ضعيفة نوعا ما وتظهر تناقص تدريجي في اتجاه محور السيلان الرئيس لهذا السماط.

الكلمات المفتاحية : منخفض, ورقلة, النظائر المستقرة و النظائر المشعة, التعبئة القديمة, السماط.

Introduction:

Les ressources en eau souterraines du Sahara septentrional, sont représentées, par deux grands systèmes aquifères superposés : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). La cuvette d'Ouargla fait partie de ce système, elle se situe à la basse vallée fossile de oued Mya au sud-est de l'Algérie qui se caractérise par ces deux nappes captives profondes, CI à la base, le CT au milieu et la nappe superficielle (phréatique) au sommet.

Le chimisme de ces eaux, le mécanisme de recharge et l'âge de ces eaux ont fait l'objet de plusieurs travaux (GUENDOUZ 1985, CRNA 1992, ENAGEO 1993, OULED BELKHIR, 2002, BELLAOUER, 2007, DJIDLE, 2008, NEZLI, 2009).

La surexploitation des eaux des nappes profondes (CI et CT) ainsi la topographie de cette cuvette ont causé une augmentation de niveau piézométrique de la nappe de surface c'est ce qu'on appelle « **problème de remontée des eaux** ».cette remontée menace l'équilibre de l'écosystème de la région dont notamment la palmeraie et les agglomérations. La cuvette a connu depuis longtemps ce problème et un projet lancé récemment par la wilaya a réussi de minimiser un peu cette sérieuse menace par l'évacuation d'excès d'eau plus loin vers le nord.

Nous espérons que le présent travail intitulé « Datation des eaux des nappes du complexe terminal et de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla » va ajouter d'autres connaissances pour le système aquifère de la région d'étude tout en complétant les travaux antérieurs. Il est mené par l'université de Ouargla en collaboration avec le **Centre de Recherche Nucléaire d'Alger** (C.R.N.A), Il a pour objectif d'appliquer les techniques isotopiques, par l'utilisation des isotopes du milieu (^{18}O , ^2H ^{14}C et ^3H) et hydrochimiques par l'utilisation des éléments majeurs (cations, anions en plus les paramètres physicochimiques Température, pH, conductivité électrique, etc.) des eaux des nappes (phréatique, CT et CI) dans la cuvette d'Ouargla, afin de déterminer l'origine de la salinité, l'origine des eaux de chaque nappe ainsi le mécanisme de recharge.

La structuration de ce mémoire repose sur :

- passer en revue les travaux antérieurs ayant porté sur le même axe. Donc ; apporter une analyse critique et une interprétation des diverses données existantes (géologique, hydrogéologique, hydro chimique et isotopique) ;
- Une synthèse des travaux géologiques, hydrogéologiques et hydroclimatiques.
- Une méthodologie de travail est proposée dans la réalisation du travail.
- Interprétation et discussion de l'ensemble de la base de données existante.

-Une synthèse est proposée en dernière partie. Elle intègre les résultats de l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères avec les différentes interprétations tirées des traitements hydro chimiques et isotopiques.

La démarche adoptée dans ce travail est scindée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous abordons :

- Les caractéristiques générales du Sahara;
- La description de ses principales formations ;
- Les thèses sur l'alimentation des nappes sahariennes ;
- Les conditions climatiques (pluviométrie, le réseau hydrographique,...) ;
- La géométrie, l'hydrodynamisme et la piézométrie des aquifères profondes à l'échelle régional et locale.
- La nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla.

Le deuxième chapitre de ce travail, est consacré à la méthodologie adoptée.

Dans le troisième chapitre nous traitons:

L'étude hydro chimique des systèmes aquifères de la région d'étude.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous procéderons à :

- Une généralité sur la géochimie isotopique
- L'interprétation des données isotopique dans la région d'étude
- La cartographie des activités en Carbone 14 mesurées aux forages et donc; La répartition spatiale des âges.

Chapitre I : Généralité sur la région d'étude

I-1-Localisation géographique:

La wilaya d'Ouargla se situe dans le Sud-est de l'Algérie. Elle se trouve limitée au Nord par la wilaya de Biskra, au Sud par la wilaya de Tamanrasset, au Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa, à l'Est par la wilaya d'El Oued, et au Sud-est par la wilaya d'Illizi (Figure I-1). la région d'étude occupe le bas fond de la vallée de l'oued M'ya qui draine le versant Nord du plateau de Tademaït et s'achève à Sebkhet Safioune (Rouvillois-Brigol, 1975 In NZLI 2009).

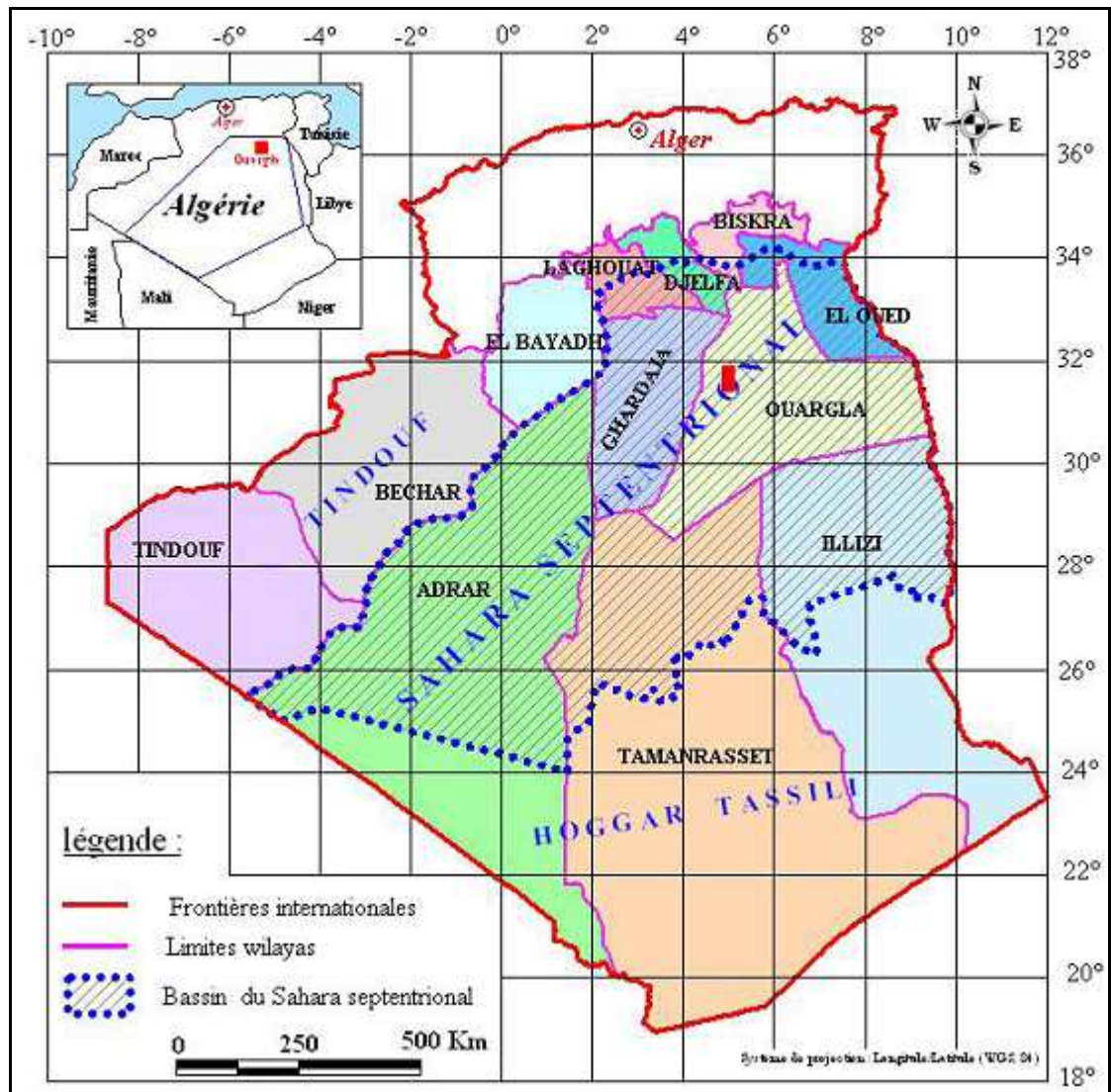


Figure I-1 : Carte de situation géographique (ABH 2006)

La ville d'Ouargla est située dans une dépression appelée (Cuvette d'Ouargla) qui inclut les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouisset, Aïn El Beida et Sidi Khouiled, elle s'étend entre les coordonnées (UTM, Clarke1880) : X (710 000 à 730 000) et Y (3 530 000 à 3 600 000).

La cuvette a une superficie totale de l'ordre de 95 000 ha qui s'étale sur une longueur d'environ 55 km orientée sud-ouest / nord-est et limitée :

- Au Nord par Sebkhet Safioune;
- A l'Est par les ergs de Touil et Arifdji;

- Au Sud par les dunes de Sedrata;
- A l'Ouest par le versant est de la dorsale du M'Zab

I-2- Géomorphologie et hydrographie :

La géomorphologie de la région est constituée par les éléments suivants :

- Les hamadas de Mio-Pliocène et Plio-Quaternaire* : (Figure I-2) formation continentale détritique qui forme des plateaux dont l'altitude est de 200 m en moyenne (Figure I-3) (BG 2004). Les terrains du Mio-Pliocène sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes).
- Les formations sableuses* : composées de dunes et de cordons d'erg.
- Les étendues alluviales* correspondant au lit de l'oued Mya selon un axe SW-NE.
- Les sebkhas* : marécages salés, le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression. La plus grande est la Sebkhet Safiouna à l'extrémité Nord, c'est aussi le point le plus bas de la cuvette.

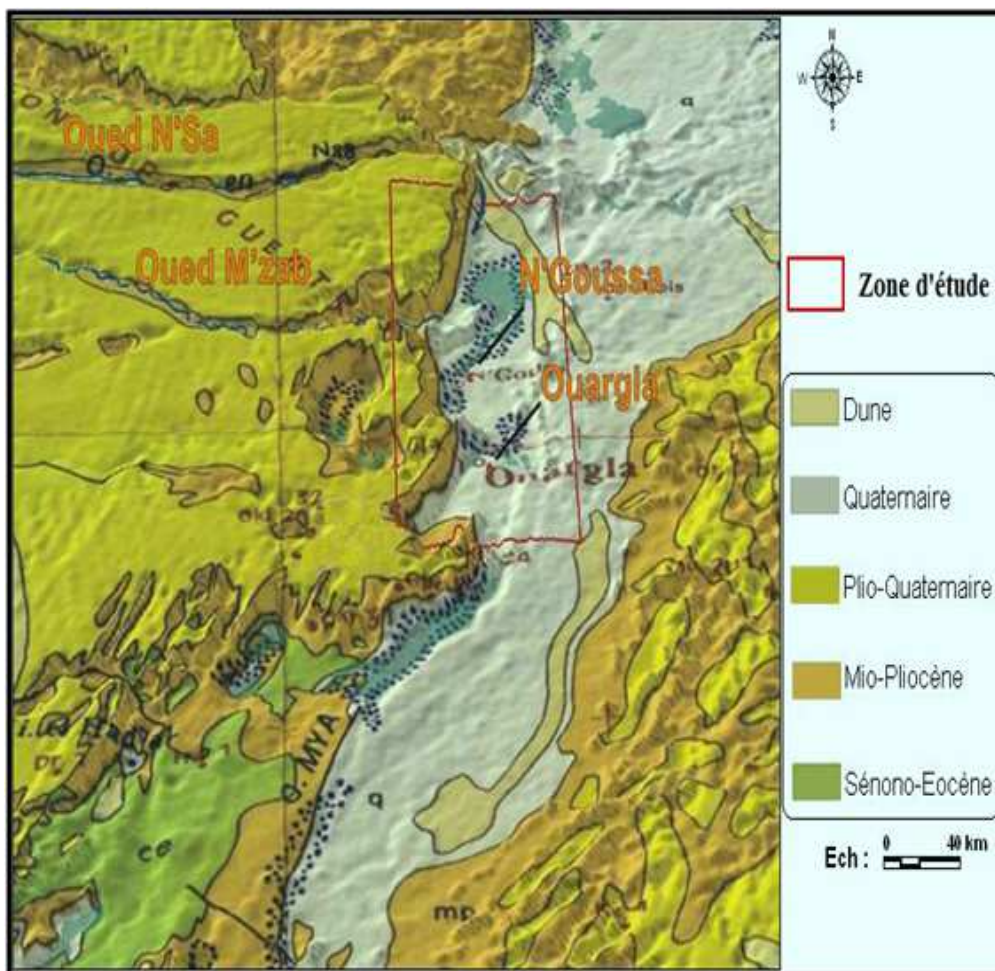


Figure I-2: Relief géologique de la région d'Ouargla (BG, 2004)

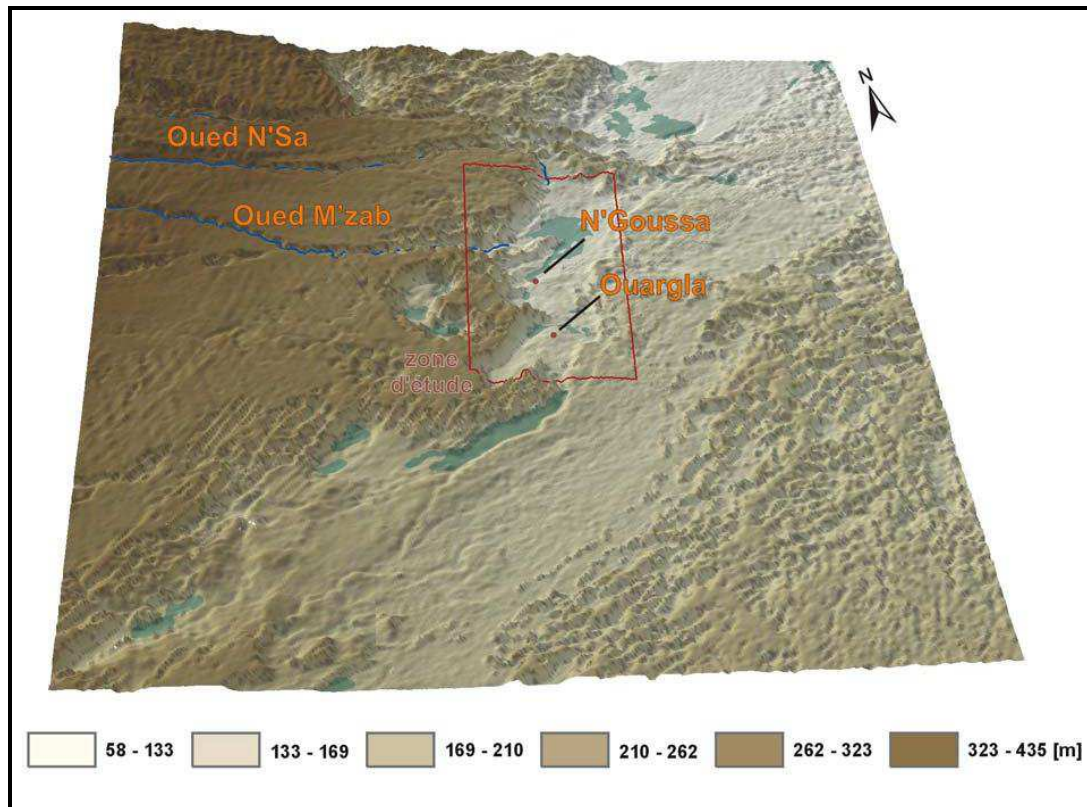


Figure I-3 : relief de la région d'Ouargla (BG 2004)

L'hydrographie de la cuvette d'Ouargla se distingue Selon Dubief (1959) par son caractère endoréique, le réseau hydrographique traversant la région est composé des oueds suivants :

Au Nord-ouest : Oued N'sa (Figure I-3) qui selon les fréquences peut présenter des crues considérables. Le bassin versant de oued N'sa couvre une superficie de 7800 Km².

Au Sud : Oued Mya draine la partie orientale du plateau de Tademaït. Le bassin de l'oued Mya a la forme d'une vaste gouttière relevée du Sud (800 m) avec une pente très faible (0,1 à 0,2 %) vers le Nord-est. Il s'étend sur 19800 km², le cours fossile de l'oued Mya inférieur est jalonné par de vastes sebkhas jusqu'à Ouargla, distant de 200 km environ du point externe. Si l'on admet cependant que l'oued Mya se jetait dans le chott Melrhir, sa longueur devrait atteindre les 900 km.

A l'Ouest : Oued M'Zab, dont la superficie du bassin est d'environ 5000 km², prend la direction Ouest-Est sur une distance de 350 Km de la région de Batma E'Rouilla à une altitude de 750 m jusqu'à Sebkhet Safione d'une altitude de 104 m. Les crues peuvent atteindre Sebkhet Safione.

I-3-Lithostratigraphie:

D'après KILIAN 1931 et CRNA 1991 la lithostratigraphie de Ouargla est composée de :

I-3-1-Aptien :

Il est constitué par la "barre aptienne " dans la région d'Ouargla, qui est formée de marnes dolomitiques,(Figure I-4) gris verte, brunes ou blanches, et dolomies cristallines, son épaisseur est variable, elle est comprise entre 20 et 26 m. L'aptien est considéré comme imperméable dans son ensemble.

I-3-2-Albien :

Sur la région d'Ouargla, l'albien correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire; Ce sont des grès, argiles et sables. L'épaisseur de ces formations est variable (417- 432 m). Les éléments détritiques (non argileux) sont largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois d'intercalations de sables grossiers à limons argileux ou souvent carbonatés. On note des passées d'argiles brun-rougeâtre, elles sont même pélitiques et sableuses. Dans son ensemble, L'Albien correspond à un horizon aquifère.

I-3-3-Vraconien :

L'intercalation Albo-varconienne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les grès Albien et les argiles Cénomaniennes, Il est formé de:

- Dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques, les épaisseurs y sont inférieures à 100 m mais supérieures à 50 m sur Haoud-Berkaoui, sauf quelques exceptions locales en particulier dans deux puits de Haoud-Berkaoui.

- Argiles et marnes dolomitiques et des éléments détritiques.

I-3-4-Cénomaniens :

Il est formé de deux séries (inférieure et supérieure) :

La série inférieure est constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brune-rougeâtre ou gris-verdâtre, son épaisseur varie entre 65 et 80 m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en particulier à la partie médiane de la série.

La série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite, de quelques intercalations dolomitiques, et de passées de sel gemme, son épaisseur est de l'ordre de 70 m.

I-3-5-Turonien :

Il se présente sous forme d'une dalle ayant une épaisseur régulière "barre turonienne", il est de l'ordre de 73 m. Il s'agit d'une série essentiellement calcaire : calcaire poreux blanc, parfois grisâtre, pulvérulent, quelquefois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique.

I-3-6-Sénonien lagunaire :

Le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue lithologique :

- le Sénonien lagunaire à la base

- le Sénonien carbonaté au dessus

Il est constitué par une alternance régulière de bancs :

- d'anhydrite (quelques mètres d'épaisseur).
- de dolomie (jusqu'à 10-15m d'épaisseur).
- d'argile (rarement plus de 1 à 2 m.
- et de sel.

I-3-7-Sénonien et Eocène :

Le Sénono-Eocène est formé essentiellement de carbonates ayant une épaisseur comprise entre 150 à 200 m. Il s'agit des calcaires dolomitiques cristallins ou microcristallins parfois vacuolaires ou crayeux ou plus carrément argileux.

I-3-8- Mio-Pliocène:

Il correspond au Continental Terminal, il est constitué par puissant ensemble de sables et d'argiles, qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénono-Eocène. On distingue quatre niveaux différents, qui sont de bas en haut:

- Un dépôt argileux peu épais (< 10 m) recouvrant dans la partie centrale de la cuvette et suivant une bande Nord-Sud le Sénono-Eocène.
- Un niveau gréseux sableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais (> 30 m) et le plus constant.
- Un niveau argilo-sableux dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche n'apparaît que dans certains endroits.
- Un niveau très épais (≈ 30 m) dans la zone des chotts, à sommet affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux.

I-3-9-Quaternaire :

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

Sur le plateau, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région; jusqu'à 8 m de profondeur il ne présente aucun niveau d'encroûtement; entre 25 et 75 cm de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.

Sur les chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de sebkhas associés à une végétation gypso halophiles. De 15 à 20 cm d'épaisseur on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. En dessous un tuf présente un teneur de gypse décroissante

Les Sebkhas sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.

Les dunes sont de sable éolien d'origine gréseux provenant de Hamada Mio-Pliocène. Il existe dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhas, et sur les versants rocheux.

Ere	Etages		Prof	Chronostratigraphie
QUATERNAIRE	CÉNOZOÏQUE	Mio-Pliocène	10m	Sables
				Argiles
				Évaporites
				Sables
			180m	Argiles
				Gravier
				Grès
				Argiles
		ÉOCÈNE	280m	Argiles Lagunaires
				Dolomies
		CRÉTACÉ	500m	Calcaires
			900m 1000m	Evaporites
				Anhydrite
				Sel massif
				Argiles
			1200m	Marnes
				Calcaire marneux
				Dolomies Argiles Anhydrite Marnes
			1280m	Argile et dolomie
			1500m 1550m	Sables
				Grès
				Argile sableuse
MESOZOÏQUE	CÉNOZOÏQUE	CRÉTACÉ	1500m 1550m	Dolomies
				Sables
			Et	Grès
			Albien	Argile et dolomie
			Vraconien	Marnes
			Cénomannien	Calcaire marneux
			Sénonien Lagunaire	Argiles
			Carbonaté	Marnes
			Sénonien	Sel massif
			Moyen	Anhydrite
			Inférieur	Evaporites
			Mio-Pliocène	Sables
			10m	Argiles
			Évaporites	Sables

Figure I-4: Colonne stratigraphique synthétique de la région de Ouargla (ANRH, 2004 In HOUARI et S, 2009)

I -4 Hydro climatologie

I -4- 1-Introduction :

Le climat du Sahara septentrional correspond au schéma global de circulation atmosphérique, qui schématiquement consiste en un échange entre la zone des basses pressions et celles des hautes pressions subtropicales dues aux alizés (qui soufflent à basse altitude du Nord et Nord-est vers l'équateur), et aux courants d'altitude venants d'ouest. La région d'Ouargla fait partie du bas Sahara et obéit à ce schéma climatique (DUBIEF, 1959-1963). Ce climat saharien est caractérisé par un été chaud et sec, un hiver plutôt doux, une faible pluviométrie et une forte évaporation.

L'analyse des de différents paramètres climatiques fournies par l'ONM -station d'Ouargla- (2009) (Annexe I), montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat saharien hyper aride à hivers tempérés, et d'une sécheresse permanente, l'aridité s'exprime par des températures élevées en été, la faiblesse des précipitations, et l'évaporation intense due à la sécheresse de l'air.

I -4- 2-Paramètres Climatiques :

I -4- 2-1-Précipitations:

La région d'étude est caractérisée par pluies irrégulières, faibles, et présentent de variations interannuelles importantes, nous allons exposer respectivement, les précipitations mensuelles et celles annuelles.

I -4- 2-1-1-Précipitations mensuelles :

Le tableau ci-dessous et la figure I-5 montrent les précipitations moyennes mensuelles interannuelles observées durant la période de (1997-2009).

Tableau I-1 : Précipitations moyennes mensuelles (1997-2009) ONM Ouargla.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Préci mm	5,6	9,5	7,0	2,5	14,4	1,0	4,0	2,3	0,4	0,3	0,5	1,4

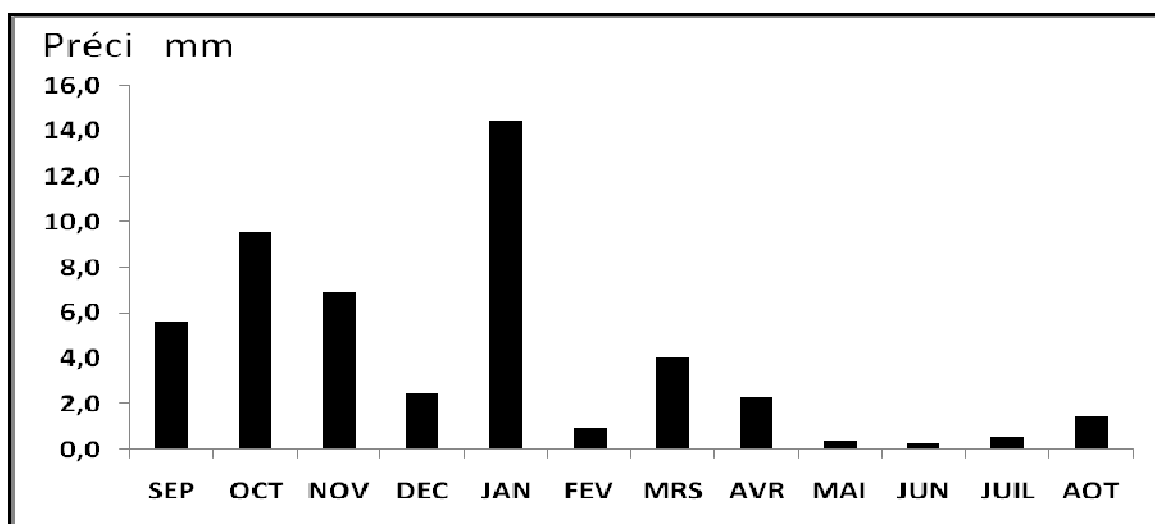


Figure I-5 : Précipitations moyennes mensuelles (1997-2009) ONM

Les précipitations mensuelles sont irrégulières et montrent de faibles hauteurs, (figure I-5) que ce sont surtout les mois sep, oct. nov. jusqu'à janvier qui constituent le maximum de pluviométrie durant l'année, le reste du mois est très insignifiants.

I -4- 2-1-2-Précipitations interannuelle

La moyenne des précipitations interannuelles calculées dans cette série allant de 1997 à 2009 est 52,7 mm.

Tableau I-2 : Précipitations moyennes interannuelles (1997-2009) ONM (2010)

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
ANNEE	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
P cumul mm	32,9	10,6	62,3	7	5,9	13,9	32,1	117,8	23,7	203	13,1	46,4	75,9

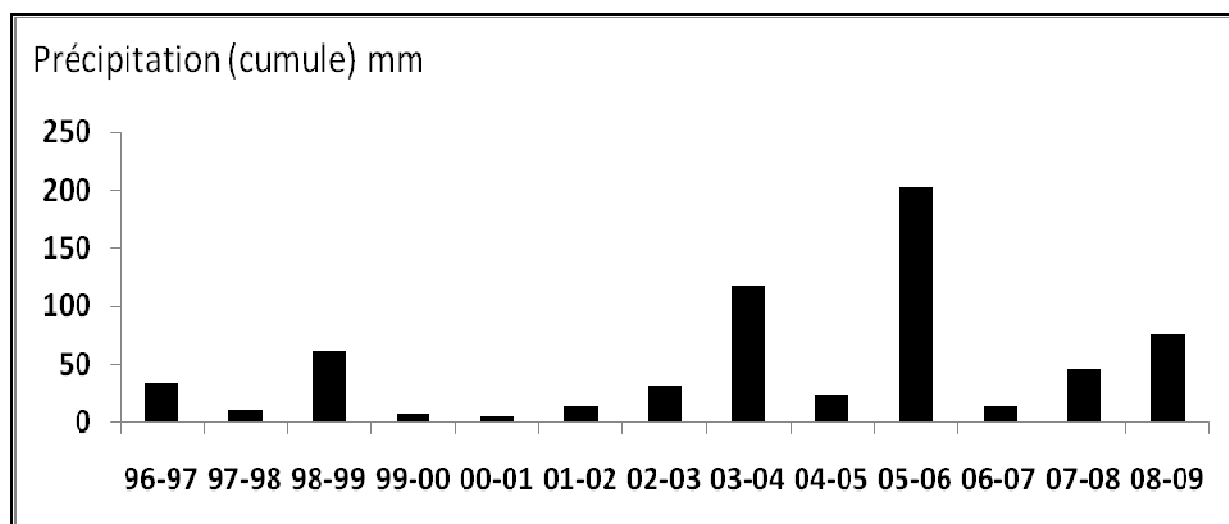


Figure I- 6 : Graphique des précipitations annuelle (cumule) (1997-2009) ONM

D'après l'histogramme on constate que les valeurs des cumules de précipitation annuelle depuis 1997 jusqu'à 2009, varient de 6mm (2001) à 203mm(2006) ; l'année hydrologique la plus pluvieuse dans cette série, ce qui explique une importante irrégularité des précipitations d'une année à autre avec un écart de 197mm.

I-4- 2-2-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. Le tableau I-3 montre que la moyenne mensuelle de l'humidité mesurée à Ouargla (1997-2009)

Tableau I-3 : Humidité moyennes mensuelles en % (1997-2009) ONM

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
H en %	38,0	46,4	55,7	60,5	60,1	52,4	41,9	35,3	32,2	26,2	24,2	27,8

D'après le tableau et le graphique (Figure I-7), on remarque que l'humidité maximale correspond les mois de Janvier et Décembre (60 %). Cette valeur est parfois les caractéristiques importantes du climat, l'humidité moyenne annuelle de l'air dans le secteur étudié est de 41,7 %.

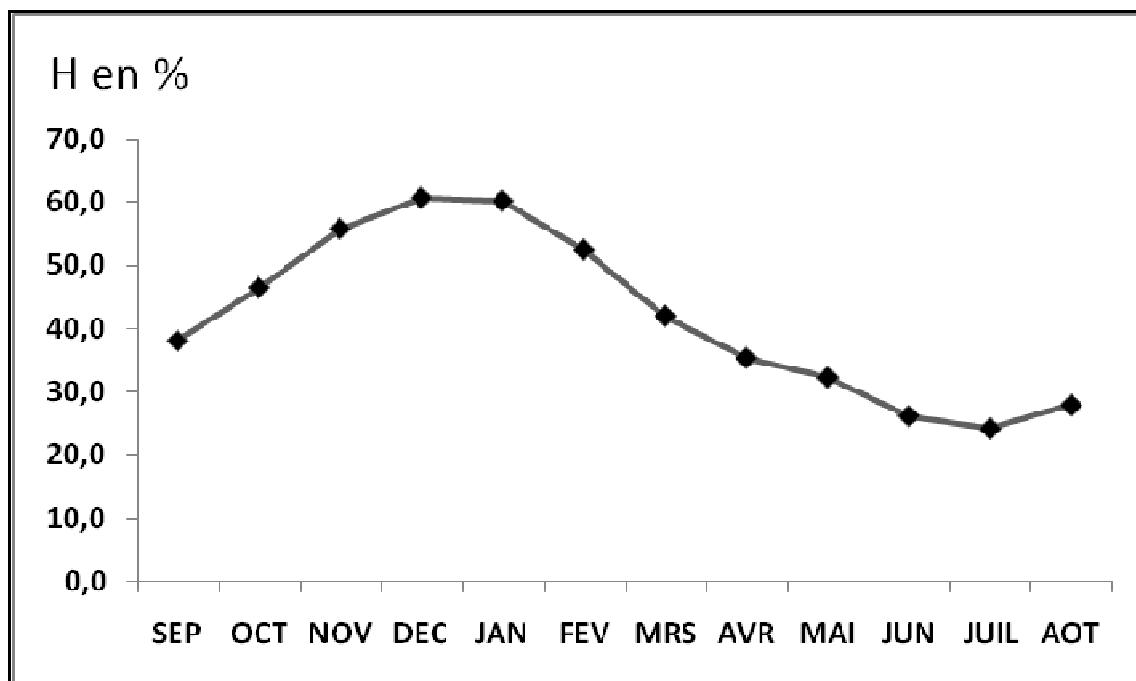


Figure I-7 : Graphique de l'Humidité moyenne mensuelle 1997-2009.

I -4-2-3-La vitesse du vent :

Le vent est le paramètre climatique le plus régulier dans la région d'Ouargla, Il est déterminé par sa direction et sa vitesse.

Tableau I-4 : vitesse du vent mensuel moyen (1997-2009) ONM

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
vitesse m/s	3,8	3,5	2,8	2,7	2,8	3,2	3,8	4,4	4,8	4,6	4,2	4,0

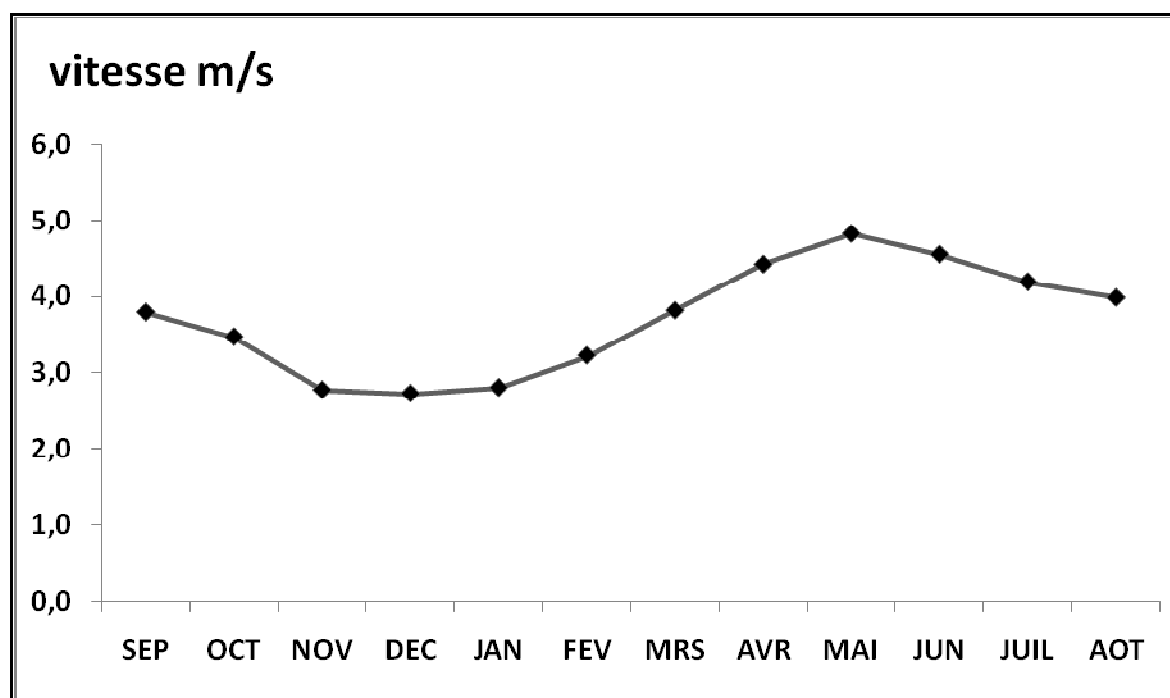


Figure I-8 : Graphique de vitesse du vent mensuel moyen (1997-2009)

Le tableau I-4 montre que les vents les plus forts se produisent durant les mois d'Avril à Juillet avec un maximum de 4,8 m/s en juin, tandis que le reste des mois la vitesse de vent est faible (2,7 m/s).

Généralement, 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. La vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,7 m/s.

I -4-2-4-L'insolation.

L'insolation est la durée d'apparition du soleil, elle est exprimée en heures, elle varie en fonction de l'altitude qui détermine la longueur des jours et le degré d'obliquité des rayons solaires, le tableau I-5 représente les valeurs d'insolation mensuelle moyenne à Ouargla durant la période 1997-2009.

Tableau I-5 : l'insolation moyenne mensuelle en heures à Ouargla (1997-2009)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Insolation h	249	266	226	227	246	238	263	281	276	302	341	320

La durée moyenne d'ensoleillement journalière est supérieure à 8 h/j. Elle peut dépasser légèrement 11 h/j en Été, tandis qu'elle ne dépasse pas 8 h en Hiver.

L'insolation mensuelle, est élevée aux mois les plus chauds, dont ; Juin, juillet, et Août. Les valeurs minimales sont enregistrées dans la période allant de novembre jusqu'à février.

I -4- 2-5-La Température

La température de l'air est un facteur fondamental ayant une grande influence sur le bilan hydrique du fait qu'il conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration réelle de toute la région. L'analyse des températures est faite à partir des données recueillies de l'ONM Ouargla période (1997-2009).

Tableau I-6 : Température moyenne mensuelle interannuelle (1997-2009) ONM

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T en °C	29,63	23,88	17,66	12,40	11,93	13,71	18,21	22,04	25,71	33,33	35,03	33,14

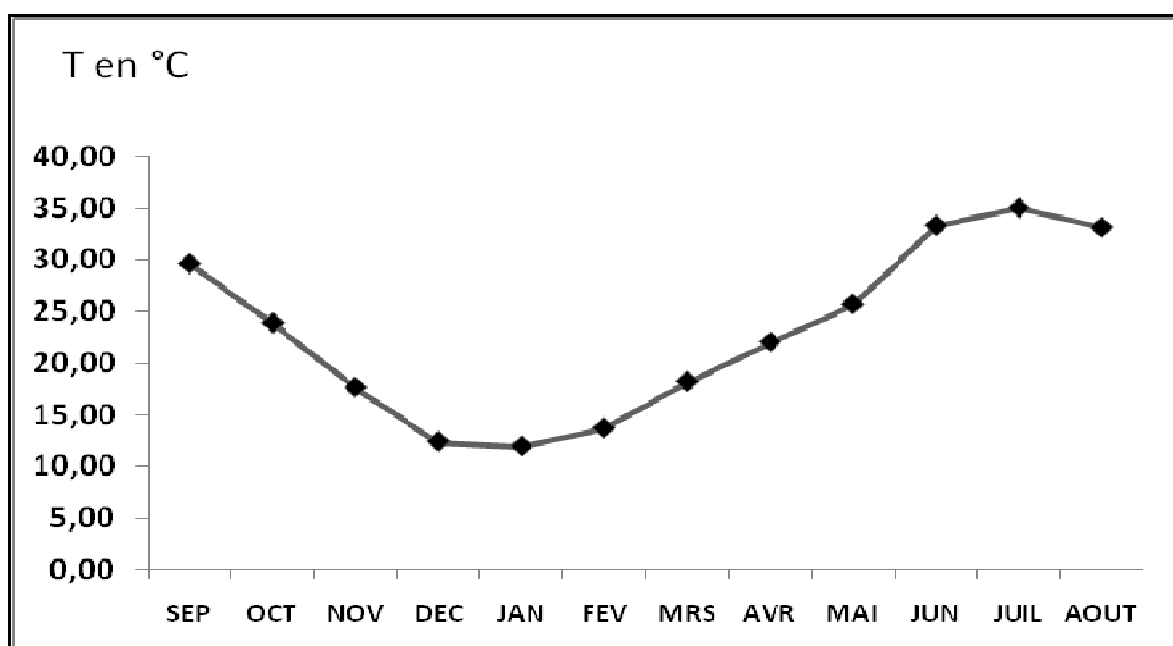


Figure I-9 : Graphique de la température moyenne mensuelle (1997-2009)

La température est un paramètre déterminant dans le calcul du bilan hydrologique. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud (juillet) dépasse 35°C et celle du mois le plus froid (janvier) est de 11.9 °C. Ce sont des températures qui caractérisent généralement le climat saharien.

I -4- 2-6-L'évaporation :

L'évaporation est définie comme étant la restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Les valeurs mensuelles interannuelles de l'évaporation dans

la région d'Ouargla sont reportées dans le tableau suivant (tableau I-7), ces valeurs sont enregistrées durant la période 1997-2009.

Tableau I-7 : l'évaporation moyenne interannuel mensuelle (1997-2009)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Evapora en mm	281,1	206,9	142,5	91,2	95,1	129,0	194,7	240,5	275,8	356,3	388,8	364,9

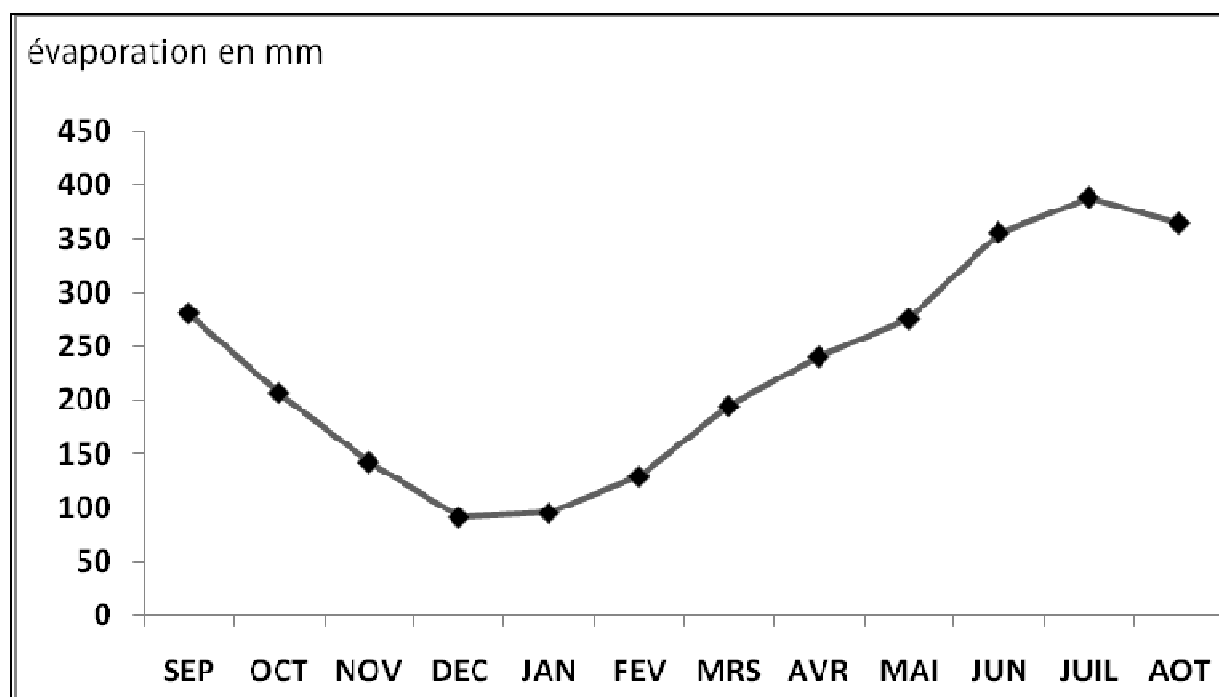


Figure I-10 : Graphique de l'évaporation moyenne interannuelle mensuelle (1997-2009)

D'après le tableau et le graphe on voit bien que l'évaporation la plus élevée se produit en Juin, Juillet, et Août, et la plus faible en Janvier et Décembre.

I-4-2-7-L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est déterminée par l'ensemble des processus d'évaporation (phénomène physique) et de transpiration (phénomène biologique) on distingue alors l'évapotranspiration potentielle (E.T.R) qui correspond à la quantité d'eau pouvant être restituée par la transpiration des végétaux et l'évaporation à partir du sol et l'évapotranspiration réelle (E.T.R) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée.

De nombreux auteurs ont établis des formules empiriques donnant une approximation de l'évapotranspiration (ETR) potentielle à partir des paramètres climatiques facilement accessibles

Formule de Thornthwaite :

Thornthwaite a défini l'évapotranspiration potentielle à partir d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour permettre l'évaporation de la quantité maximale d'eau permise par les conditions climatiques. Elle s'oppose à l'évapotranspiration réelle qui mesure l'évapotranspiration à partir d'une surface compte tenu de son état d'humidité. La formule de Thornthwaite est :

$$ETR = 16(10 t / I)^a.k \quad \text{Avec :}$$

ETR: évapotranspiration mensuelle en mm,

t = température moyenne mensuelle,

I =Indice thermique annuelle soit la somme des indices de Chaleur Mensuelle.

$$I = \sum i \quad i = (t/5)1,514 \quad a = (1,6/100) I + 0,5$$

K : coefficient d'ajustement mensuel;

Tableau I-8 : ETR moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE en période (1997-2009).

MOIS	Temp (°C)	i	ETR	K	ETP*K (Corrigée)
Janv.	11,70	3,62	11,82	0,89	10,52
Fév.	13,70	4,60	17,86	0,86	15,36
Mar	18,00	6,95	36,46	1,03	37,56
Avr	22,50	9,75	65,36	1,08	70,58
Mai	27,60	13,28	111,50	1,19	132,69
Juin	33,80	18,05	189,42	1,19	225,41
Juil.	35,10	19,11	209,06	1,21	252,97
Août	34,10	18,30	193,84	1,15	222,92
Sept	30,70	15,61	147,29	1,03	151,71
Oct.	25,60	11,85	91,59	0,98	89,76
Nov.	16,90	6,32	30,92	0,88	27,21
Déce	12,30	3,91	13,47	0,87	11,72
CUMUL		131,36	1118mm		1248mm

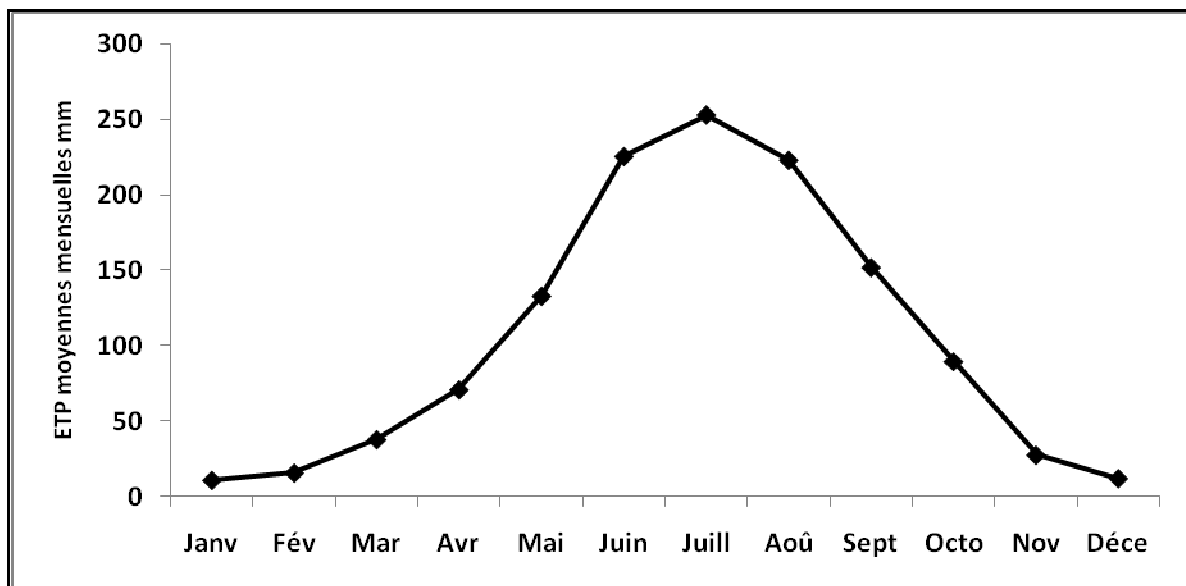


Figure I-11 : L'ETR mensuelle (1997-2009) calculée par la formule de Thornthwaite

Dans la cuvette d'Ouargla l'ETR calculées selon la formule de Thornthwaite est minimale dans les mois d'hiver, et les valeurs élevées sont dans les mois d'été, avec un maximum en juillet (252 mm).

Le cumul des moyennes mensuelles annuelle est 1248 mm /ans dans cette série.

I -4-3-Conclusion :

Le climat de la région de Ouargla 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 une 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.

I -5- Hydrogéologie

I -5-1-Introduction:

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » (ERESS, 1972, OSS, 2003) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (Figure I-12) Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Le domaine du SASS (système aquifère du Sahara septentrional) couvre une superficie d'environ 1.000.000 de km² et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye. Ce bassin se subdivise en trois sous-entités : les deux sous-bassins du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental qui sont des cuvettes à écoulement endoréique aboutissant dans des dépressions fermées «chotts et sebkhas», et le plateau de la Hamada El Hamra.

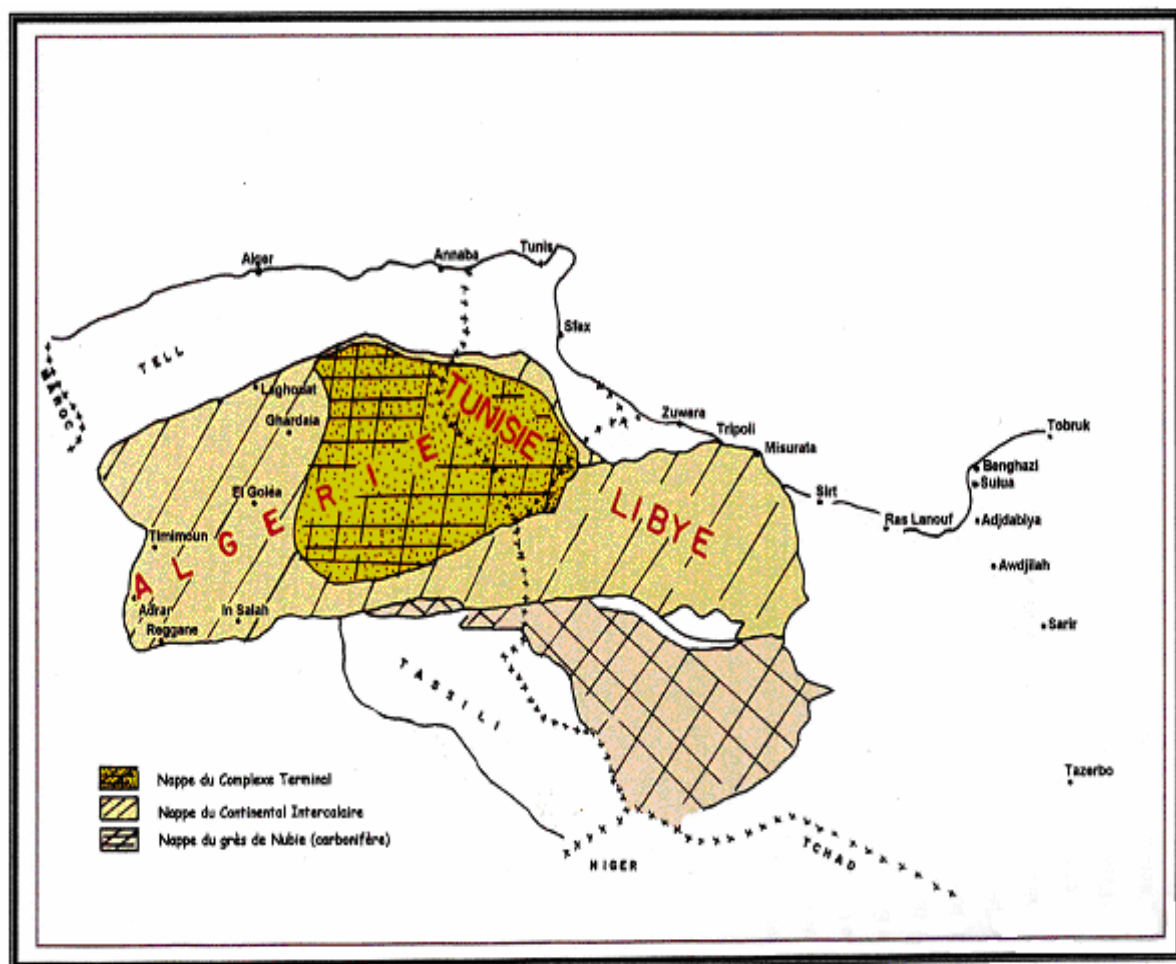


Figure I-12 Situation générale des aquifères du Sahara septentrional (source ANRH in CHABOUR 2006)

I -5-2-Aperçu sur l'hydrogéologie générale de la plateforme saharienne

C'est en 1968 que l'UNESCO a entrepris une étude d'évaluation des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESS), Cette étude a été achevée en 1972 (Pallas PH., 1972 In CHABOUR 2006). Elle concerne un vaste territoire, d'une surface de 800 000 km² et englobe à l'époque le Sahara algérien et une partie de la Tunisie. Son objectif est la détermination des ressources en eau en vue d'aboutir à une politique cohérente de gestion des ressources relatives aux deux importantes nappes du Sahara : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). La méthodologie adoptée consiste en :

- évaluation des besoins globaux en eau du Sahara à l'horizon 2000
- confrontation de ces besoins avec les capacités d'investissements et de réalisation
- construction de modèles mathématiques et analogiques des différentes nappes du Sahara
- réalisation de simulations exploratoires, pour déterminer les limites techniques des débits à ne pas dépasser par zones
- formulation définitive des hypothèses forte et faible en répartissant les prélèvements futurs dans chaque zone en tenant compte des résultats des simulations exploratoires.
- simulation des hypothèses forte et faible et traduction des résultats en données économiques

Avec l'intégration du territoire libyen, l'étude du système aquifère du Sahara Septentrional (SASS) a été confiée à l'observatoire du Sahara et du sahel (OSS, 2003). A cette échelle (Figure IV-1), ce système couvre une étendue de plus d'un million de km² dont 700 000 se trouvent en Algérie, près de 80 000 en Tunisie et 250 000 en Libye (BESBESE et AL, 2003).

Les synthèses hydrogéologiques en 2006, font part de 8 800 points d'eau (forages et sources) : 3 500 au Continental Intercalaire et 5 300 au Complexe Terminal (CHABOUR 2006).

I -5-3-Le Continentale intercalaire :

Le continental intercalaire est un aquifère transfrontalier partagé entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye. La partie algérienne s'étend sur environ 600 000 Km², renfermant d'importantes quantités d'eau estimées à 30 000 milliards de m³ (ERESS, 1972, OSS, 2003). Dans la région d'Ouargla la nappe est située à plus de 1000 m de profondeur, cette nappe est plus connue sous la dénomination d' « Albien », nom de l'étage géologique qui renferme la couche aquifère supérieure du « Continental Intercalaire », qui est la plus exploitée. Le terme de continental intercalaire, par contre, désigne l'ensemble des couches détritiques qui se sont déposées au Mésozoïque inférieur au Sahara, entre deux cycles marin.

I -5-3-1-Limites et morphologie du Continental Intercalaire:

Le continental intercalaire est limité au nord par l'Atlas saharien, à l'ouest par l'axe Béchar-Regagne et au sud par l'axe Regagne Ain Amenas (Figure I-13). A l'est, il se prolonge au-delà des frontières algéro-libyenne et algéro-tunisienne, il est partagé par la dorsale de M'Zab en deux bassins:

Le bassin occidental et oriental,

Vu que notre zone d'étude se situe sur la partie orientale du bassin nous nous limiterons à sa description uniquement sur celle-ci.

A la périphérie du Sahara, le continental intercalaire se termine en biseau sur les anciens reliefs hercyniens, mais il atteint très vite une grande puissance dans les anciennes cuvettes d'accumulation.

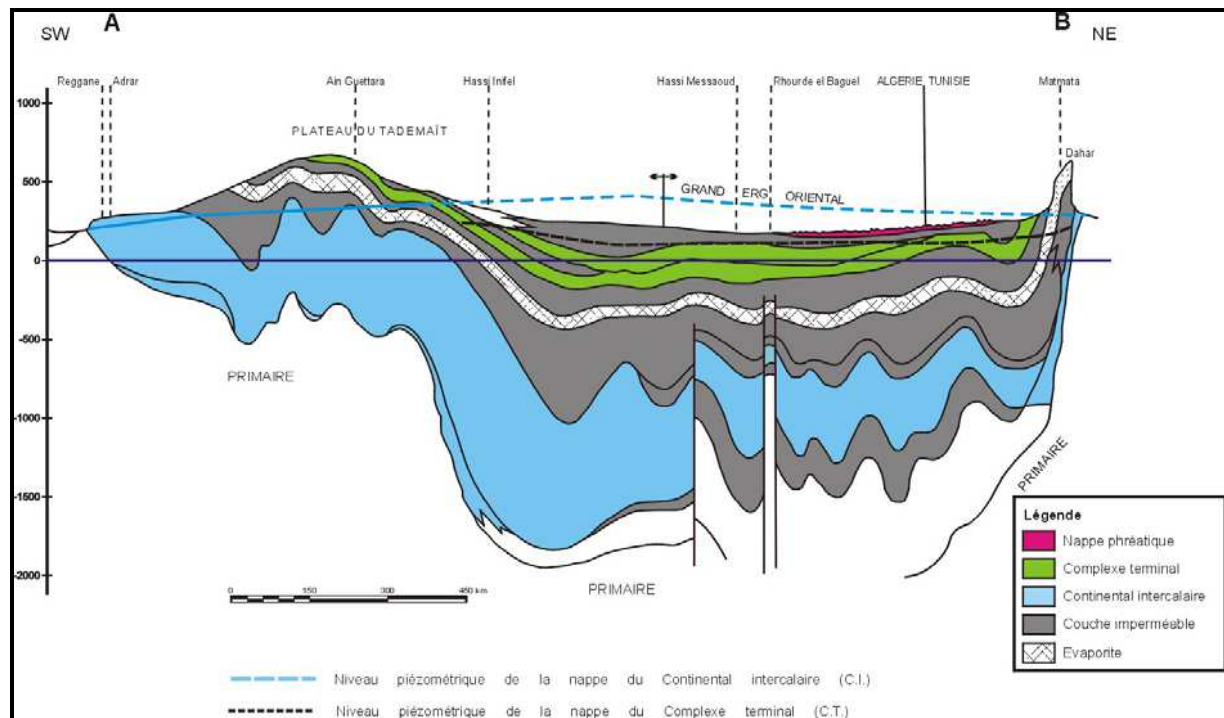


Figure I-13 Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional (ERESS 1972 In BG 2004).

Au sens large, le continental intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. La définition donnée par (ERESS, 1972) est que la limite aux formations clastiques (argilo gréseuses) véritablement continentales et susceptibles de constituer un ensemble aquifère homogène sur le plan lithologique.

Le CI ainsi défini peut occuper une position variable dans l'échelle stratigraphique: si le toit est défini comme la base du céno-manien argileux (sauf dans le nord-ouest), il n'en est pas de même pour le mur qui est situé, suivant les régions, entre la discordance hercynienne et le Barrémien.

Le CI n'est pas constitué uniquement d'horizons perméables. La composante argileuse peut représenter en proportion une place importante. Il a alors été effectué une distinction du réservoir utile. Ainsi, dans la lithologie du Continental Intercalaire, on distingue:

- Les grés, quand les couches renferment moins de 10% d'argiles,
- des grés argileux, s'il y a de 10 à 50% d'argiles,

- des argiles, quand il y a plus de 50% d'argiles.

De haut en bas, le CI débute presque toujours au toit de l'Albien. Le mur du CI coïncide avec la discordance hercynienne sous les plateaux de Tademaït et du Tinhert. La porosité moyenne de cette nappe se situe entre 22 et 29%.

Le toit de cette nappe varie selon les régions : à l'ouest (Gourara, Touat), il est en surface et l'aquifère forme une nappe libre captée par les foggaras. A l'est, le toit plonge progressivement sous d'épais terrains, jusqu'à atteindre son maximum de profondeur dans la dépression d'oued Righ.

Une même morphologie du substratum est observée dans le sens méridien, qui atteint son maximum au Nord, en bordure de l'Atlas saharien.

I -5-3-2-Alimentation du CI :

Plusieurs hypothèses ont été émises concernant la recharge des aquifères sahariens, notamment celui du continental Intercalaire qui a été longtemps considéré comme étant une nappe fossile d'où la notion de Paléorecharge. La plupart des études ERESS(1972), Guendouz (1985), Guendouz et al. (1997), OSS (2003);baba sy, 2005 confirment que la partie la plus importante des réserves du Continental Intercalaire a été emmagasinée durant les périodes pluvieuses notamment à la fin du Pléistocène. Il s'agit donc de recharge paléoclimatique. Cependant, il est de plus en plus admis, qu'en plus de ces réserves générées pendant les derniers humides, il existe des apports continus à partir des limites du bassin. Les cartes piézométriques font ressortir les zones d'alimentation et les zones de vidange, alors que les résultats des analyses Isotopiques traduisent la répartition spatiale des âges des eaux.

La carte piézométrique établie par ERESS 1972 montre que cette partie orientale de l'aquifère peut être alimentée par :

-le piémont Sud atlasique du NW.

-le plateau de Tinhert.

- le Dahar en Tunisie

Les eaux en provenance du Nord-Ouest se divisent sur l'axe de la dorsale du M'zab approximativement suivant deux directions, une partie s'écoule vers le Sud et le Sud-ouest (Gourara, Touât et Tidikelt), et l'autre partie s'écoule suivant une direction Ouest-Est vers le golf de Gabes qui constitue son exutoire naturel. Les eaux en provenance du plateau du Tinhert s'écoulent vers le Nord-est sous l'Erg Oriental en direction de l'exutoire de Tunisie.

Dans l'ensemble ; ces formations sont faiblement alimentées : environ 1 milliard m³/an au total (OSS, 2003; BESBES et AL, 2003) essentiellement aux piémonts de l'Atlas Saharien en Algérie.

I -5-3-3-Les exutoires:

Ils sont constitués par:

-Les foggaras: longues galeries drainant, fonctionnent sous un faible rabattement et utilisant la topographie locale pour permettre l'écoulement libre de l'eau vers des points bas (cas du bassin occidental),

-Les puits artésiens (bassin oriental),

-Les sebkhas: vastes étendues humides et salines, surfaces évaporantes dont le débit total n'est pas négligeable.

I -5-3-4-Piézométrie:

Des cartes piézométriques ont été établies par Cornet(1964), ERESS (1972), OSS (2003) et font apparaître deux grands bassins sahariens séparés par la dorsale du M'Zâb. Sur la carte établie en 2003 (Figure I-14) par l'OSS, il en ressort 3 domaines hydrogéologiques : le bas Sahara à écoulement d'Ouest en Est ; le grand erg occidental, le Touat-Gourara et le Tidikelt à écoulement du Nord vers le Sud et le Sud-ouest. Dans le bassin oriental, bassin en général artésien, avec des pressions d'artésianisme très fortes comprise entre 5 et 25 bars (Guendouz, 1997In CHABOUR2006), le sens d'écoulement semble être du Nord-Ouest vers le Sud-est pour être repris ensuite par un sens d'écoulement du Sud vers le Nord-est. Les eaux convergent vers l'exutoire tunisien par la faille de Médenine.

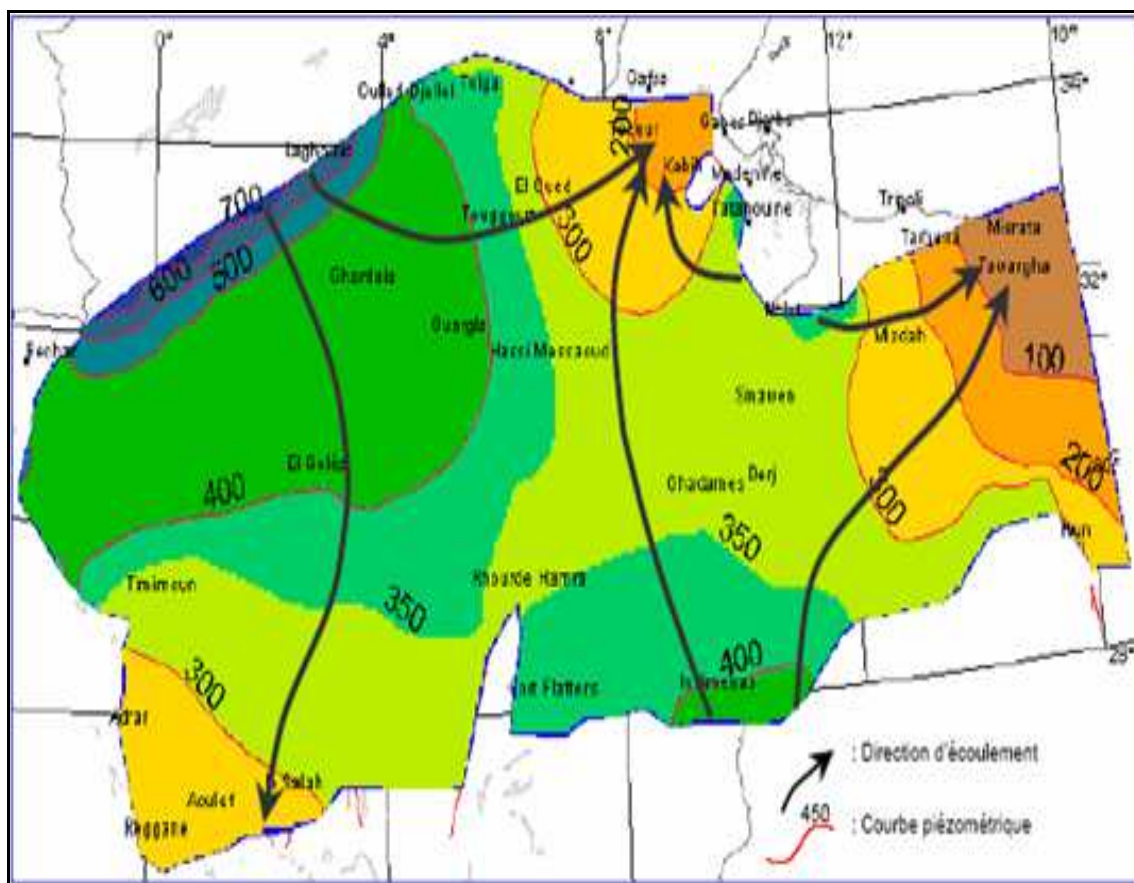


Figure I-14 Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2003, in Ould Baba sy)

I -5-3-5-Le continental intercalaire à l'échelle de la région d'étude :

A l'échelle de la cuvette d'Ouargla, la nappe albiennne est située à une profondeur de 1100 à 1400 mètres, avec une épaisseur utile près de 640 mètres, elle est jaillissante et exploitée par des forages destinés à l'A.E.P. et à l'irrigation (Nezli 2009)

Le débit exploité par forage est de 100 l/s, en moyenne. Les forages captant cette nappe fournissent un débit annuel de 7 Hm³ avec une transmissivité de 8.10⁻³ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 10⁻³ m²/s (DJIDEL, 2008).

Le faciès lithologique (Figure I-15) de la nappe albiennne dans la zone d'étude est formé d'un dépôt gréseux continental à ciment argileux ou carbonaté et des passées d'argiles, connu sur une épaisseur de 400 m en moyenne (NEZLI 2009).

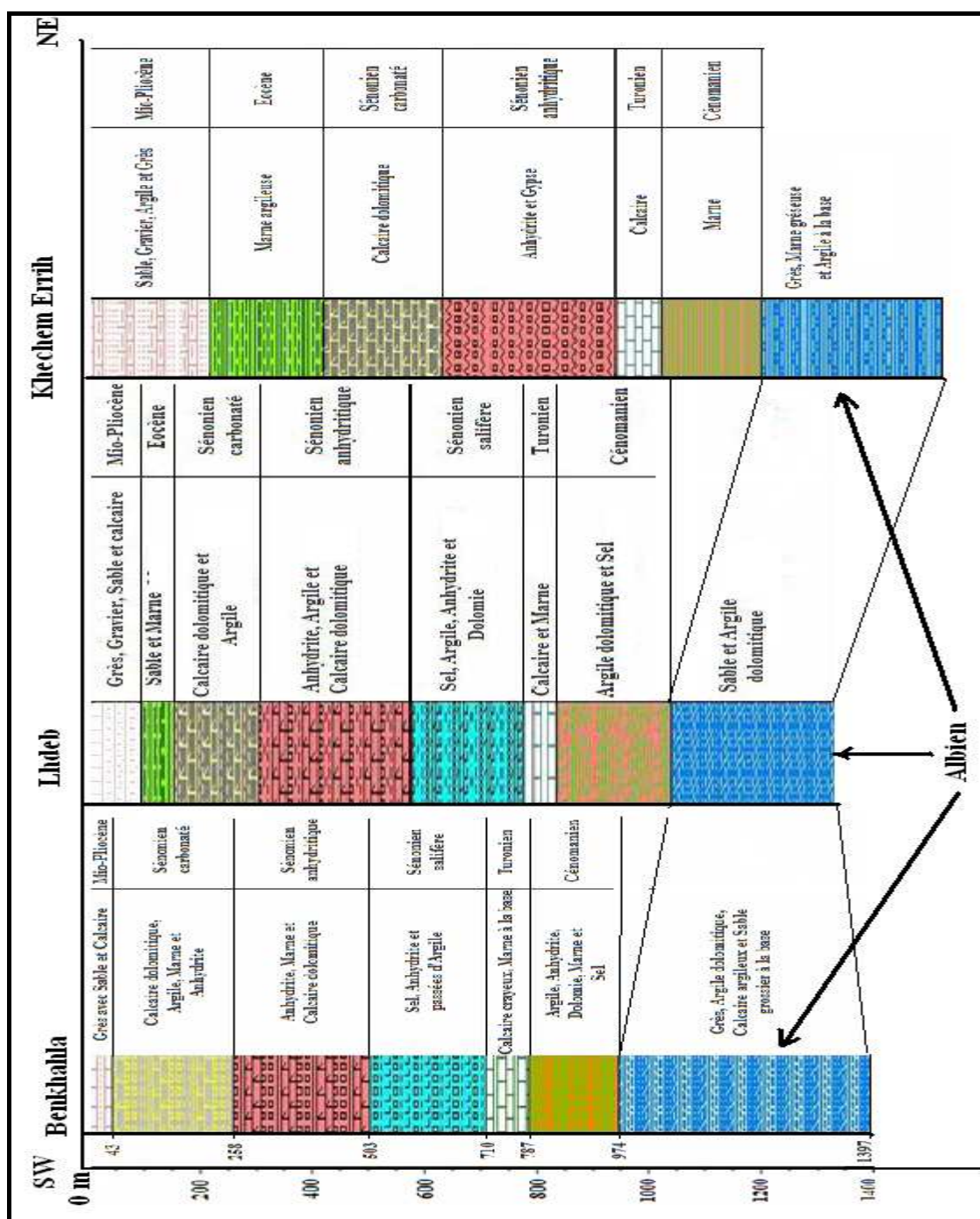


Figure I-15 Colonne litho stratigraphiques du CI dans la région d'étude

I -5-4-Nappe du complexe terminal:

I -5-4-1-Introduction

Le terme de Complexe Terminal désigne les formations les plus récentes déposées au Bas Sahara, en opposition avec les formations du Continental Intercalaire. Dans le bassin oriental, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal sont séparés par la transgression Cénomaniennne. Le Complexe Terminal au sens strict englobe : le Sénonien, l'Eocène, le Miocène, et le Plio-Quaternaire. Alors que le Complexe Terminal au sens large comprend en plus le Turonien.

En Algérie, la nappe du Complexe Terminal s'étend sur la majeure partie du sous bassin oriental mais aussi en Tunisie et Libye. Il est compris entre la dorsale du M'Zab à l'ouest, le plateau de Tinrhert au Sud, la région des Chotts au Nord et les frontières Tunisienne et Libyenne à l'est.

Les formations peu perméables n'existant pas partout permettent une drainance et une mise à niveau des pressions hydrostatiques des différentes nappes. Ceci a justifié le regroupement des nappes du Crétacé supérieur et de l'Eocène et celles du Tertiaire continental comme un seul et même ensemble hydraulique appelé Complexe Terminal (ERESS, 1972, OSS, 2003).

Cette nappe peut circuler dans l'une ou les trois formations litho stratigraphiques suivantes :(GUENDOUZ 1985)

- Sénonien et Eocène carbonatés
- Miopliocène sableux
- Quaternaires

I -5-4-2-Structure et géométrie du Complexe terminal:

La limite du toit du substratum du Complexe Terminal reste assez confuse, du fait de la variation des faciès de l'Eocène inférieur. Ce dernier étant généralement évaporitique (marno-gypseux), il est rattaché aux formations du Cénomaniennne qui constitue le substratum continu du Complexe Terminal. A cela s'ajoute la formation du Turonien carbonaté et à forte perméabilité par endroit.

La carte des épaisseurs (Figure I-16) du réservoir du Complexe Terminal montre que la partie Nord (Biskra) représente l'épaisseur la plus importante (plus de 1600 m) et qu'au niveau de la dorsale du M'Zab la cote du toit se situe à 900 mètres. Ces nappes sont très hétérogènes et présentent des discontinuités dans leur extension.

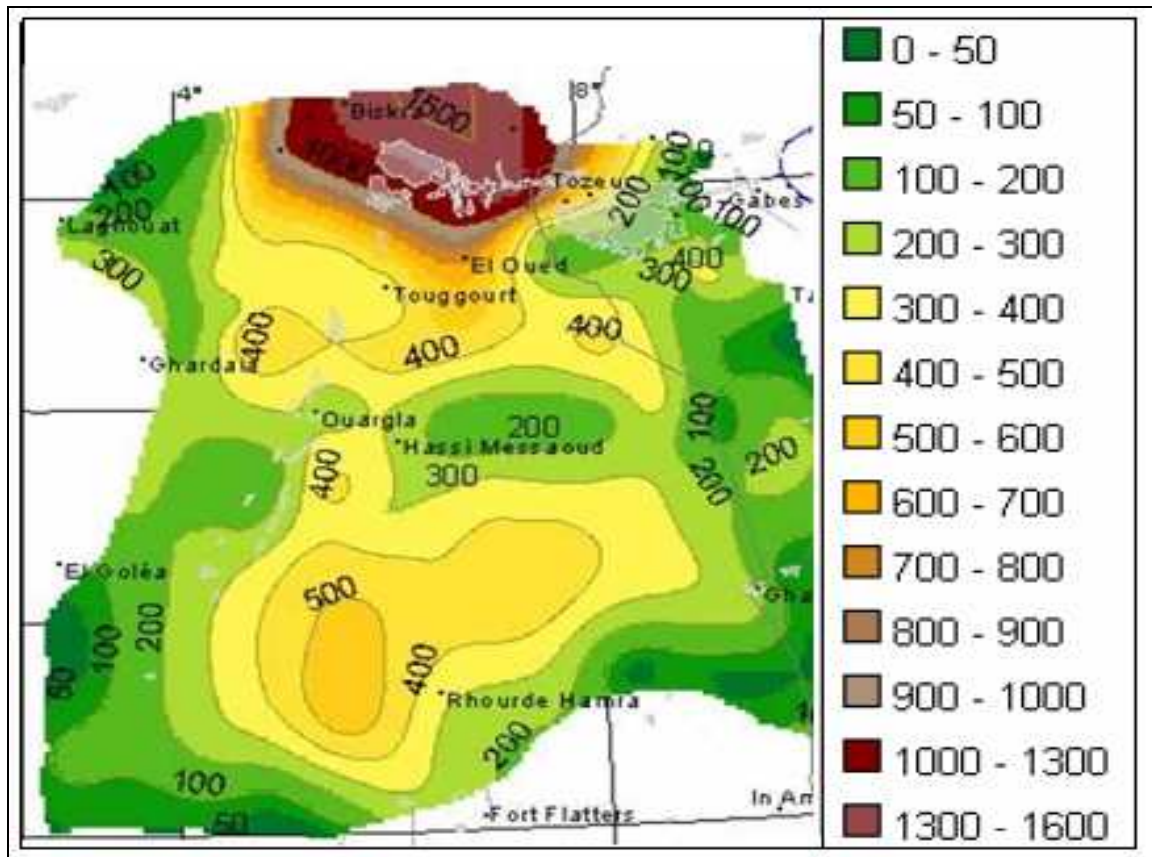


Figure I-16 : Carte des épaisseurs du CT (OSS, 2003 in Ould Baba Sy)

I -5-4-3-Piézométrie:

Depuis Cornet (1964), plusieurs cartes ont été établies et réactualisées (ERESS, 1972). La plus récente (OSS, 2003), la carte (Figure I-17) montre, comme pour la nappe du Continental Intercalaire, un écoulement qui se fait vers l'exutoire tunisien, situé dans la région de Tozeur. Dans la partie Nord du Bas Sahara le sens d'écoulement est de L'Ouest (avec un niveau piézométrique d'environ 700 mètres au niveau de Laghouat) vers l'Est (où le niveau piézométrique atteint les 50 mètres au niveau de Tozeur). Un autre sens d'écoulement se fait du Sud vers le Nord.

Il faut, cependant, noter que du fait de l'hétérogénéité spatiale et des différents aquifères, l'écoulement se fait en relais, par transfert d'un système à un autre.

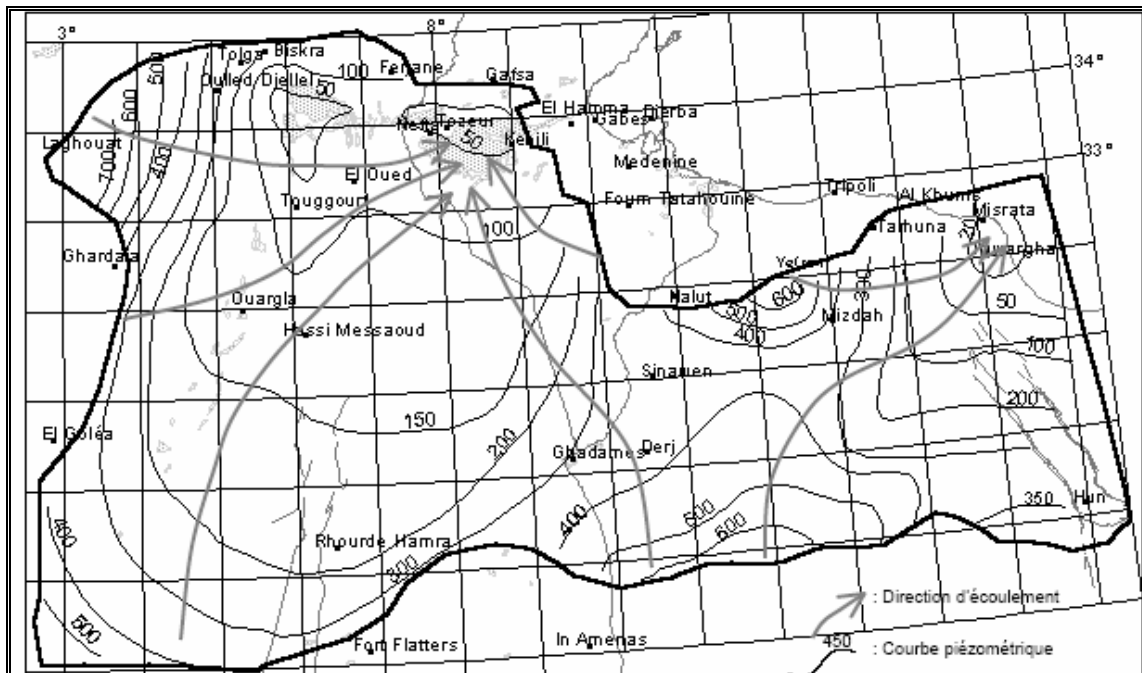


Figure I-17 Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS, 2003a et b, in Ould Baba Sy)

I -5-4-4-Le complexe terminal à l'échelle de la cuvette :

Le système aquifère du complexe terminal à l'échelle de la cuvette est composée des formations litho stratigraphiques reconnues à l'échelle du bassin à savoir : GUENDOUZ A. et MOULA. A.S (1992-1995).

Les sables argileux du Mio-Pliocène.

Les formations carbonatées du sénonien.

Actuellement, plusieurs centaines de forages sont exploités (123 Mio-Pliocène, et 28 Sénonien-Eocène) (ANRH 2010) pour l'irrigation des palmeraies et des cultures sous-jacentes. Dans la zone d'étude le CT est composé (Cornet, 1964. ANRH, 2004 In NEZLI 2009) par : (Figure I-18)

La nappe Sénono-Eocène : elle se situe entre 120 et 200 mètres en profondeur. Elle est formée de calcaires poreux à silex très coquilliers, gris jaunâtre, à intercalation de marnes blanches et dolomitiques.

La nappe du sable Mio-Pliocène : elle a une profondeur allant de 20 à 100 mètres, elle est constituée de sables fins à grossiers graveleux, à intercalation de calcaires blancs tendres et marnes sableuses, d'argiles sableuses roses et passées de grès et de gypses.

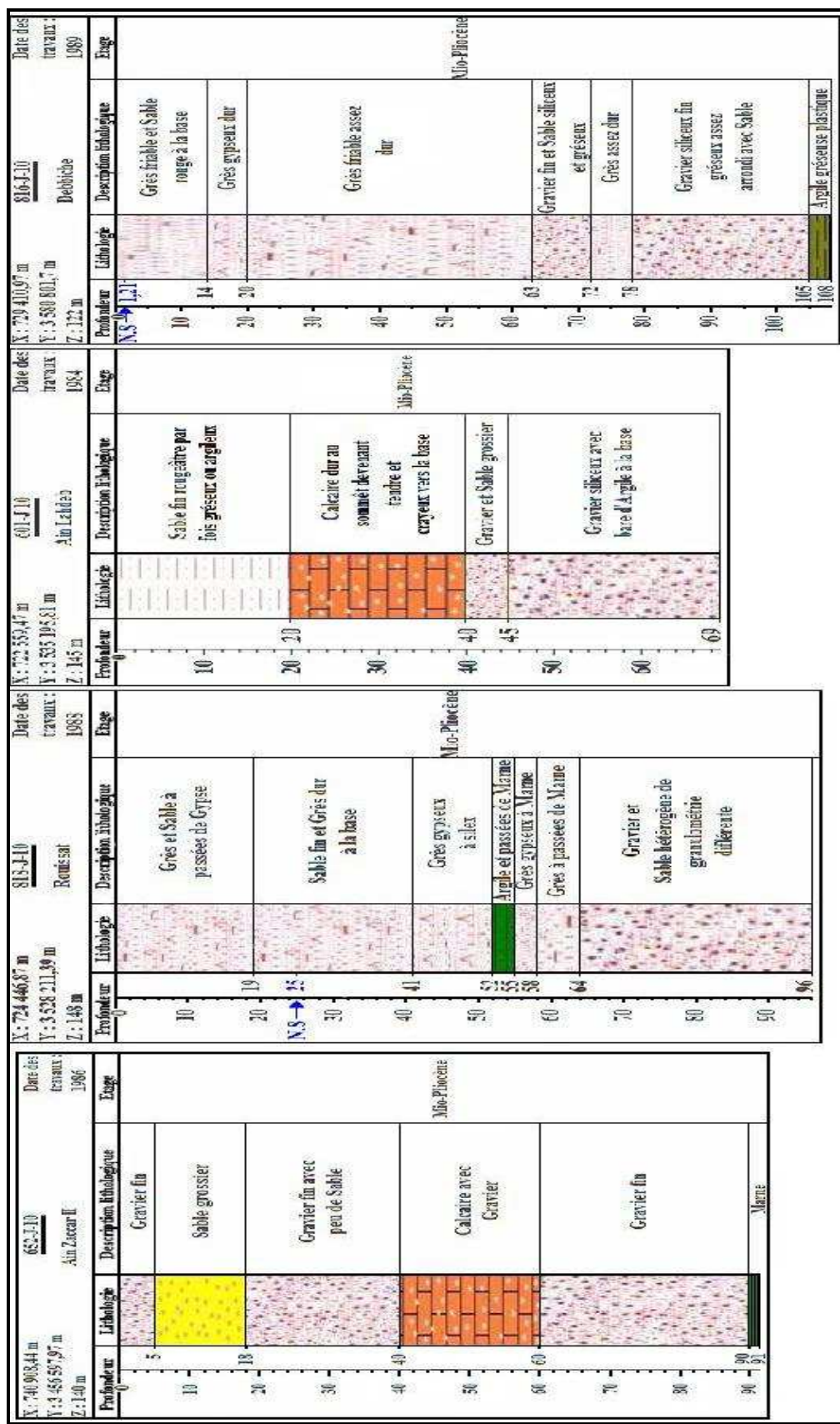


Figure I-18 Colonne litho stratigraphiques du CI dans la région d'étude

La piézométrie de nappe du complexe terminal montre un écoulement du Sud-ouest vers le Nord-est comme reconnu à l'échelle du bassin, La carte piézométrique (Figure I-19) dressée à l'échelle de la cuvette (BELLAOUER, 2008) montre les principaux axes d'écoulement suivants :

- Un écoulement Sud-Nord, du centre ville de Ouargla -Rouisset vers la zone de N'Goussa;
- Un écoulement SW-NE, de la ville de Ouargla vers la zone des Chotts (Oum-Eraneb).

Les paramètres hydrodynamiques au niveau de la zone d'étude sont définis comme ce suit

- 8.10^{-3} à 9.10^{-2} m²/s pour la transmissivité.
- 5.10^{-3} à 3.10^{-2} m²/s pour le coefficient d'emmagasinement.

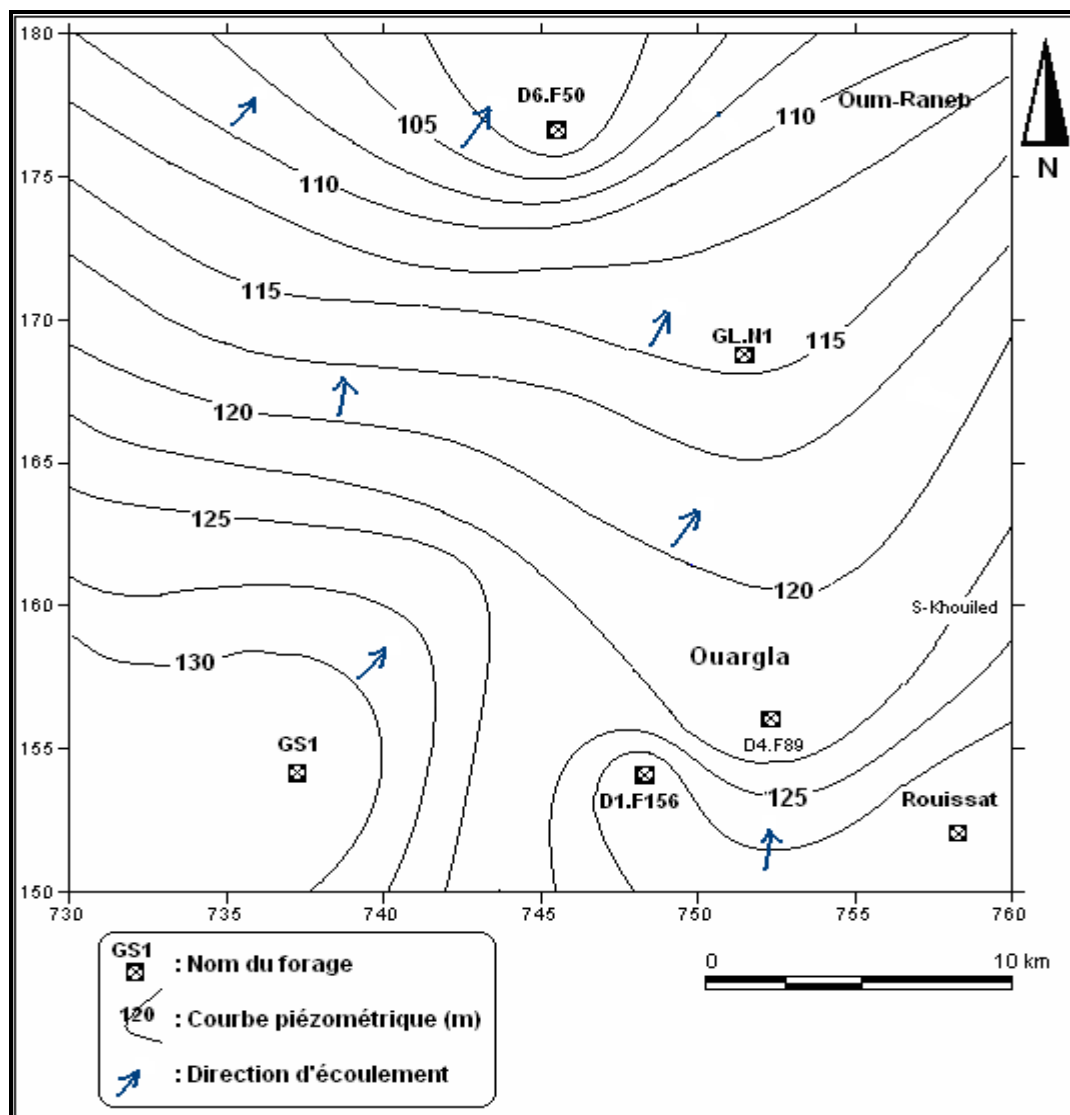


Figure I-19 Carte piézométrique du "CT" dans la cuvette d'Ouargla (A, Bellaouer 2008)

I -5-5-Nappe phréatique:

I -5-5-1-Introduction:

Cette nappe contenue dans les alluvions de la vallée de l'oued Mya, couvre pratiquement toute la cuvette de Ouargla, est caractérisée par une forte salinité (plus de 20 g/l), est géologiquement logée dans des niveaux quaternaires sableux.

Dans l'agglomération et dans les palmeraies, sa profondeur varie, en moyenne, entre 0,5 m et 1,5 m par rapport au niveau du sol. L'alimentation de cette nappe est assurée principalement par infiltration des eaux usées urbaines de la ville de Ouargla et ses municipalités (Rouisset, Aïn El-Beida, Sidi Khouiled, N'Goussa, Hassi Ben Abdallah) ainsi que des eaux de drainage des périmètres agricoles.

Les cartes piézométriques établies à l'échelle de la cuvette, par L'ENAGEO,BG et l'ANRH (campagne 94 et les campagnes récentes 2003, 2004, 2009 , et 2011) montrent clairement qu'il existe deux zones distinctes séparées par une ligne de partage des eaux au niveau du Hassi Miloud et Bour El Haïcha, ce qui se traduit par deux écoulements, l'un vers le Nord c'est-à-dire vers Sebkhat Safione et l'autre vers l'Ouest (Sebkhet Bamendil).

La nappe est présente partout à l'échelle de la région. Son épaisseur varie de 1 à 8m et repose sur un niveau imperméable étanche, qui occupe tout le fond de la vallée d'Ouargla. Sa frange capillaire surgie souvent sur la surface du sol sous forme de chotts qu'on trouve de part et d'autre de la ville d'Ouargla. Elle est relativement profonde dans les points de haute topographie (Ergs), et moins profonde dans les zones à proximité des palmeraies irriguées.

I -5-5-2-Lithologie:

D'après les études faites par ENAGEO, 1993 /94, BG et LTPS (laboratoire des travaux publique du sud) en 2004 au niveau de la cuvette d'Ouargla et les sondages carottés qui permettent de subdiviser la lithologie de la nappe superficielle de la cuvette en trois classes principales: Figure I-20

5-3-1-Classe A :

C'est la classe la plus répandue, elle représente ≈ 75 % des terrains. On distingue :

- Une première couche dont l'épaisseur varie de 1 à 2 m, constituée de sable fin à moyen légèrement gypseux avec une consistance de moyenne compacité;
- Une deuxième couche constituée de sable argileux compacté, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 m.

5-3-2-Classe B :

Elle caractérise les chotts et les sebkhas où on distingue :

- Des encroûtements gypseux très salés dont l'épaisseur varie de 1 à 2m
- Des sables limoneux avec un passage tufeux.

5-3-3-Classe C:

Elle caractérise les versants de la cuvette et le plateau Moi -Pliocène. On distingue :

- Un matériau détritique constitué de grès consolidé (glacis) et de sable limoneux pauvre en gypse dont l'épaisseur est supérieure de 10 m.
- Du sable grossier compacté.

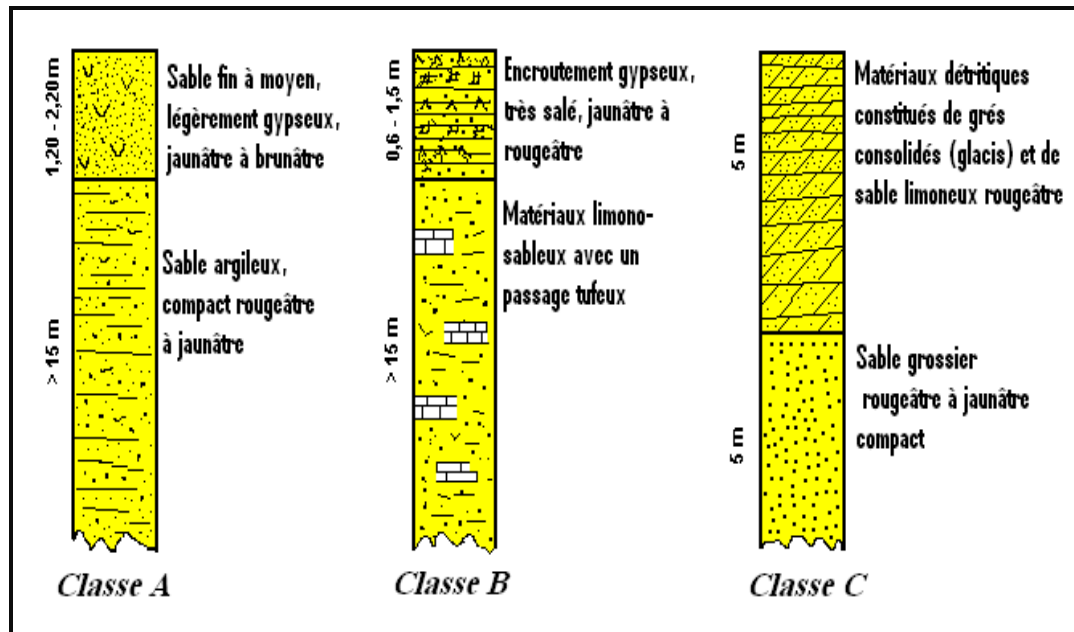


Figure I-20 Log géologiques des formations de la nappe phréatique (Djidel, 2008)

I -5-5-3-Caractéristique hydrodynamique de la nappe phréatique:

Aucune étude hydrodynamique n'a été réalisée concernant la nappe phréatique, mise à part les essais géotechniques du laboratoire des travaux public de sud (LTPS) sur des localités dans la cuvette, ou bien les interprétations des données piézométriques effectuées par l'ANRH.

I -5-5-3-1-Granulométrie:

LTPS a effectué des analyses sur des échantillons représentatifs sur la cuvette (profondeur de 0 à 3 m). L'examen des courbes granulométriques montre d'une manière générale qu'il s'agit des sables fins à moyens avec un pourcentage d'éléments argileux et limoneux qui varie de 7 à 12 %.

I -5-5-3-2-Porosité:

La porosité totale d'un échantillon est égale au rapport, exprimé en pour cent du volume de vides au volume total : $n = V_v / V_t$. Des mesures de la porosité ont été effectuées sur des échantillons prélevés sur des profils du sol représentatif de la cuvette (LTPS 1995). Les valeurs de la porosité déterminées varient entre 10 et 30 %.

I -5-5-3-3-Perméabilité et Transmissivité:

La perméabilité dépend à priori du milieu solide-fluide (porosité, granularité, salinité) et également des conditions hydrogéologiques de chaque zone (zone de recharge, zone centrale, exutoire). Le coefficient de perméabilité moyen de la nappe phréatique varie entre $1.27 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ et $5.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$. Tandis que, la transmissivité varie entre $2 \text{ m}^2/\text{s}$ et $9 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (HADJ ABD EL-RAHMANE, 1998).

I -5-5-3-4-Coefficient d'emmagasinement:

Le coefficient d'emmagasinement (S) est le volume d'eau exprimé en pour cent, que l'on peut retirer par gravité d'un prisme vertical de terrain saturé de section unité. Les valeurs de S varient entre 10^{-2} et 2×10^{-1} (HADJ ABD EL-RAHMANE, 1998).

I -5-5-4-Piézométrie de la nappe phréatique:

I -5-5-4-1-Réseau piézométrique:

Un réseau piézométrique de 120 piézomètres a été établi par l'ENAGEO et ANRH en 1992, qui servi de base à l'établissement du première carte piézométrique de La nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla (ENAGEO 1993). De ce réseau initial ne reste que 65 piézomètres qui sont fonctionnels actuellement (ANRH 2010) (Annexe II).

I -5-5-4-2-Historique:

I -5-5-4-2-1-Avant 1956:

Les fluctuations du niveau de la nappe phréatique sont étroitement liées à l'histoire des palmeraies, à l'exploitation des ressources en eau artésienne et aux efforts d'assainissement consentis pour lutter contre les nuisances qui en ont résulté.

En 1949, le réseau de drainage est rénové, 20 km de drains nouveaux sont réalisés ainsi que 5 grands collecteurs. Ces travaux se poursuivent en 1950 et fin 1951, grâce à 30 km de drainages nouveaux, le niveau de la nappe phréatique a baissé de plus de 1 m.

I -5-5-4-2-2-Après 1956:

En 1956, le forage "Albien I" au Sud-est du Ksar a servi à la revivification des palmeraies anciennes et à la création de nouvelles plantations. Parallèlement, l'exploitation de la nappe du Complexe Terminal est développée, le réseau de drainage étendu et rénové.

Les eaux de drainage qui se déversent dans le Chott provoquent une élévation sensible du niveau de l'eau en saison froide. En même temps, le développement de la ville et l'évacuation des eaux urbaines provoquent une augmentation du niveau de la nappe phréatique.

A cette année et pour abaisser le niveau de la nappe phréatique; une exhaure éolienne a été installée afin d'évacuer l'eau vers Sebkhet Oum Eraneb. Le débit de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ s'est révélé insuffisant et deux groupes motopompes ont été adjoints à l'éolienne portant le débit total à $255 \text{ m}^3/\text{h}$ (BG 2004).

I -5-5-4-2-3-En 1968 :

La direction d'Hydraulique de la wilaya d'Ouargla, a établi une carte piézométrique en Avril-Mai 1968. La surface de la nappe forme un dôme culminant à la cote de 134,5 m sous le quartier Duprez avec une pente régulière en direction des chotts où elle n'atteint plus que la cote 128 m et même 127 m tout au Nord (Figure I- 21).

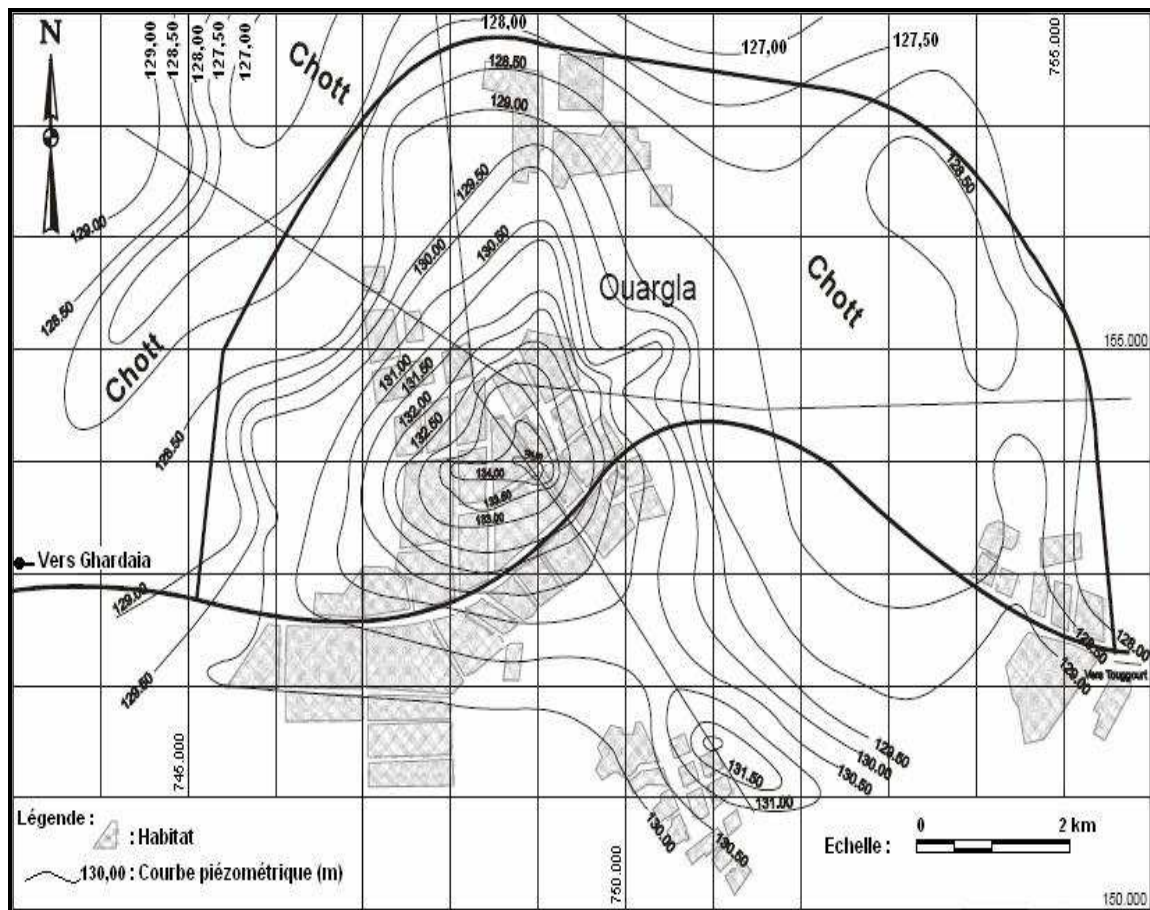


Figure I- 21 : Carte piézométrique de la nappe phréatique en 1968 (DHW-Ouargla, 1968In BG 2004)

I -5-5-4-2-4-1992 -2002:

Durant la période allant 1992 à 2002, une baisse générale de niveau piézométrique a été constatée. Et que Seuls quelques piézomètres présentaient une remontée du niveau égale ou supérieure à 10 cm.

I -5-5-4-2-5-2003:

D'après la carte piézométrique établie par BG (Figure I-22) on constate que le sens d'écoulement principal des eaux de la nappe phréatique est de sud vers le nord, les écoulements secondaires sont de différentes directions, et essentiellement vers les chotts et sebkhas environnantes.

Le point le plus haut de la nappe est situé sous la ville d'Ouargla, le niveau d'eau dépasse 134m. L'écoulement est:

- vers Sebkhet Bamendil au Nord.
- vers le Chott à l'Est.
- vers le Sud.

D'autres points hauts se situent à:

- Bour el aicha (128m); la nappe s'écoule vers le nord -selon l'axe d'écoulement principal- aussi bien que vers l'est (sebkhet Oum Raneb) et vers le sud.

N'Goussa, l'irrigation des plantations crée un point haut ($\approx 117\text{m}$) d'où les eaux s'écoulent vers le Nord et vers le Sud.

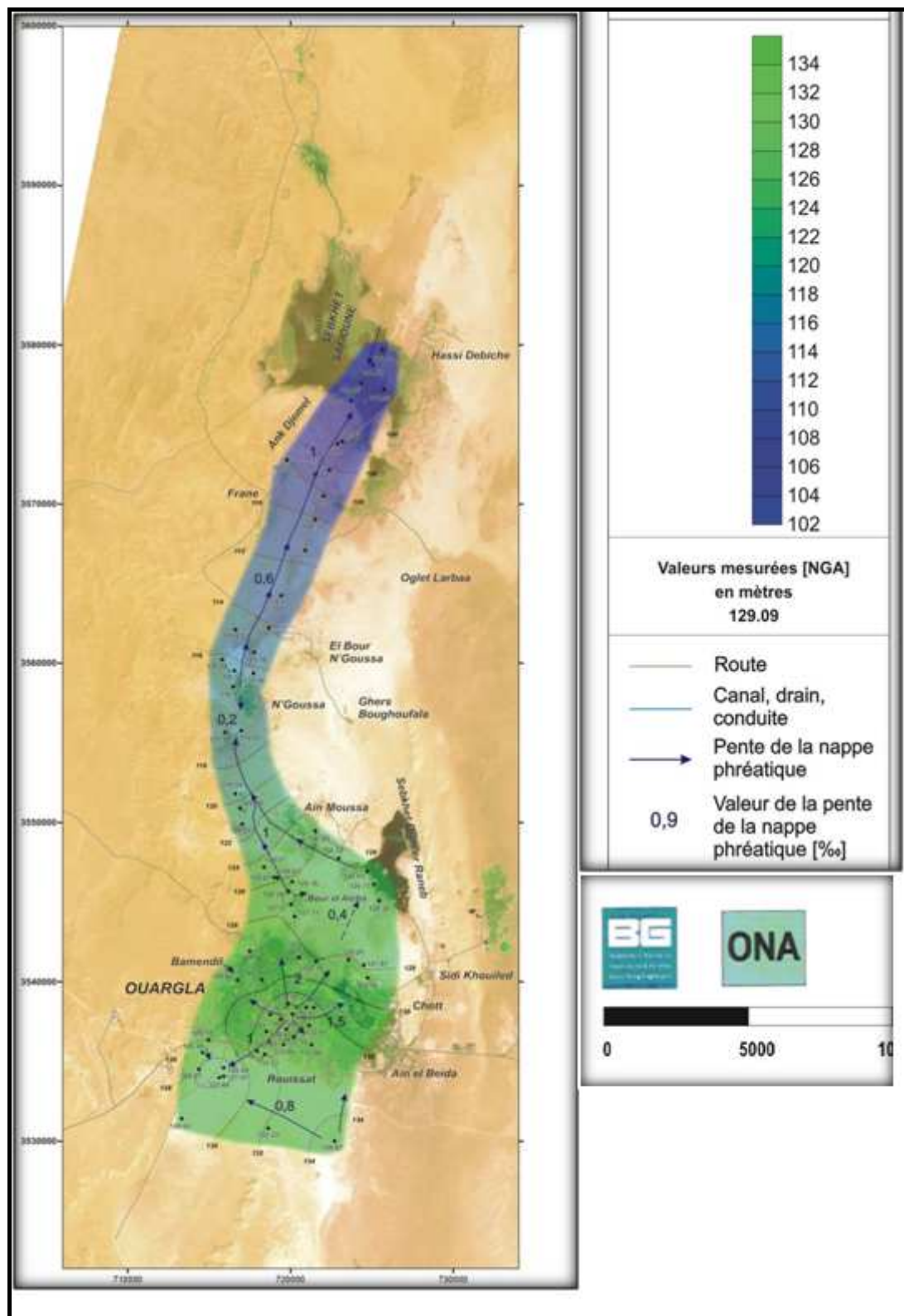


Figure I-22 Carte piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla en 2003 (BG, 2004)

I -5-5-4-2-6-La piézométrie actuelle 2011:

A l'état actuel, on remarque une baisse générale du niveau piézométrique par rapport aux années précédentes avec séchage considérable des chotts et des sebkas, cet abaissement est le résultat et la conséquence du projet mené par la wilaya d'Ouargla pour récupérer et évacuer l'excès d'eau de la cuvette beaucoup plus haut vers sebkhet Safione.

Les campagnes d'échantillonnages et les levés de mesure physique sur les différents points d'eau existants dans la cuvette, nous ont permis d'établir une carte piézométrique;(Figure I-23) qui montre, que le sens l'écoulement principal des eaux de la nappe phréatique prend la direction Sud-Nord, similaire à celui de la nappe du Complexe Terminal.

Dans la partie sud de la carte ; il y a des zones hautes sur le plan piézométrique, sous la ville de Ouargla, le niveau dépasse 138 m, l'eau s'écoule aussi bien vers le nord que vers le Nord Est c'est-à-dire vers les chotts et Sebkhas.

Un autre dôme important apparaît à Bour el Haicha ; constituant ainsi une zone de partage des eaux (niveau d'eau à cet endroit atteint 128m) ; Vers le nord, l'écoulement suit une direction principale sud-nord vers les dépressions, sebkhas et chotts

Le dôme de Bour El Haicha peut être expliqué par :

- La surexploitation des eaux de nappes profondes exploitées (CI et CT) pour l'irrigation des palmeraies et l'usage agricole.

- Possibilité d'une drainance verticale des nappes profondes (CI et CT). (GUENDOUZ, A et MOULLA, A(1996).

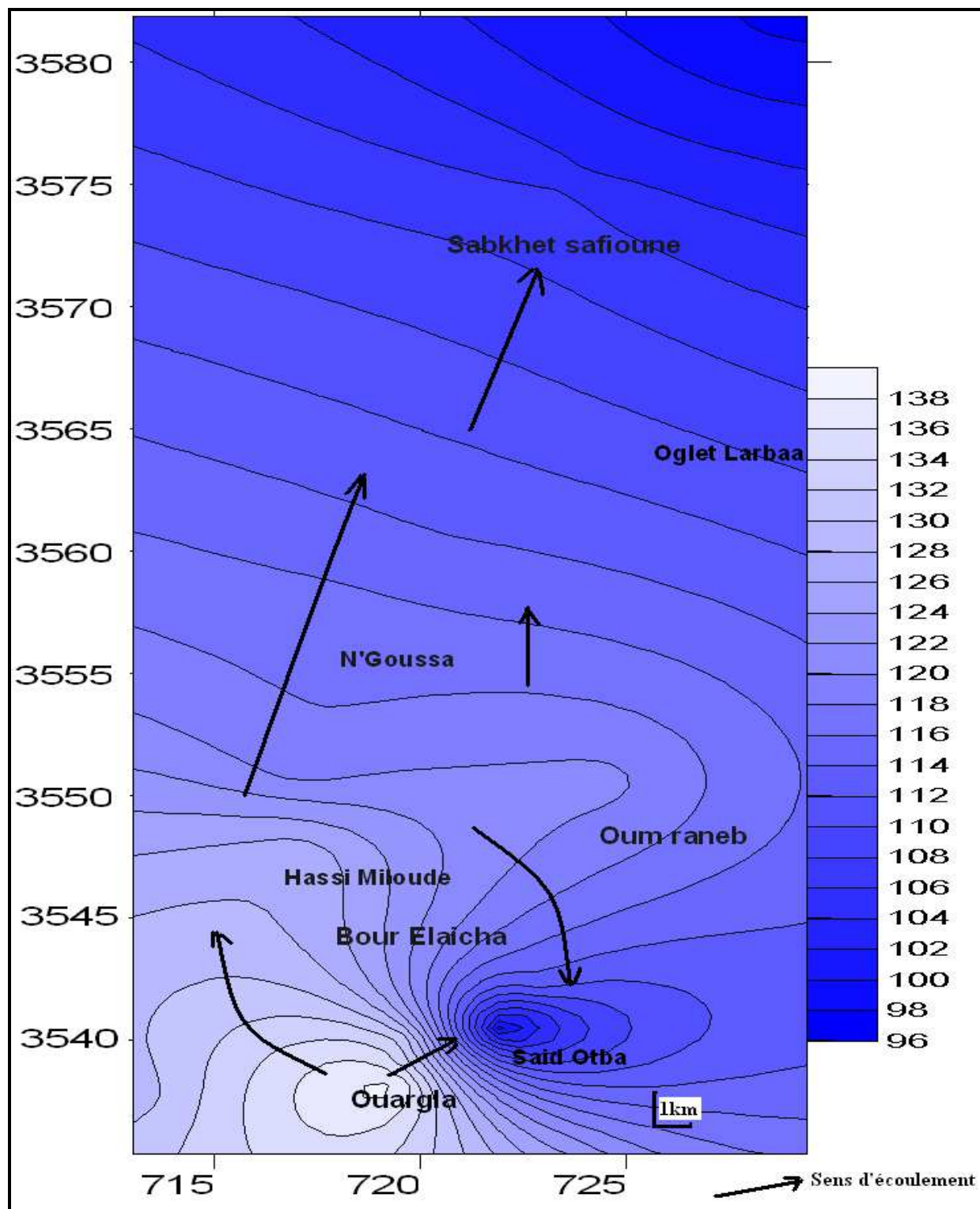


Figure I-23 Carte piézométrique de la nappe phréatique (cuvette d'Ouargla)

Chapitre II : Méthodologie

II-1-Introduction:

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce travail consiste à examiner l'évolution des paramètres hydrochimiques et isotopiques selon des principales directions d'écoulement des différents aquifères de la cuvette d'Ouargla. (Figure II-1), (Figure II-2)

Nappe phréatique

Complexe terminale

Continental intercalaire

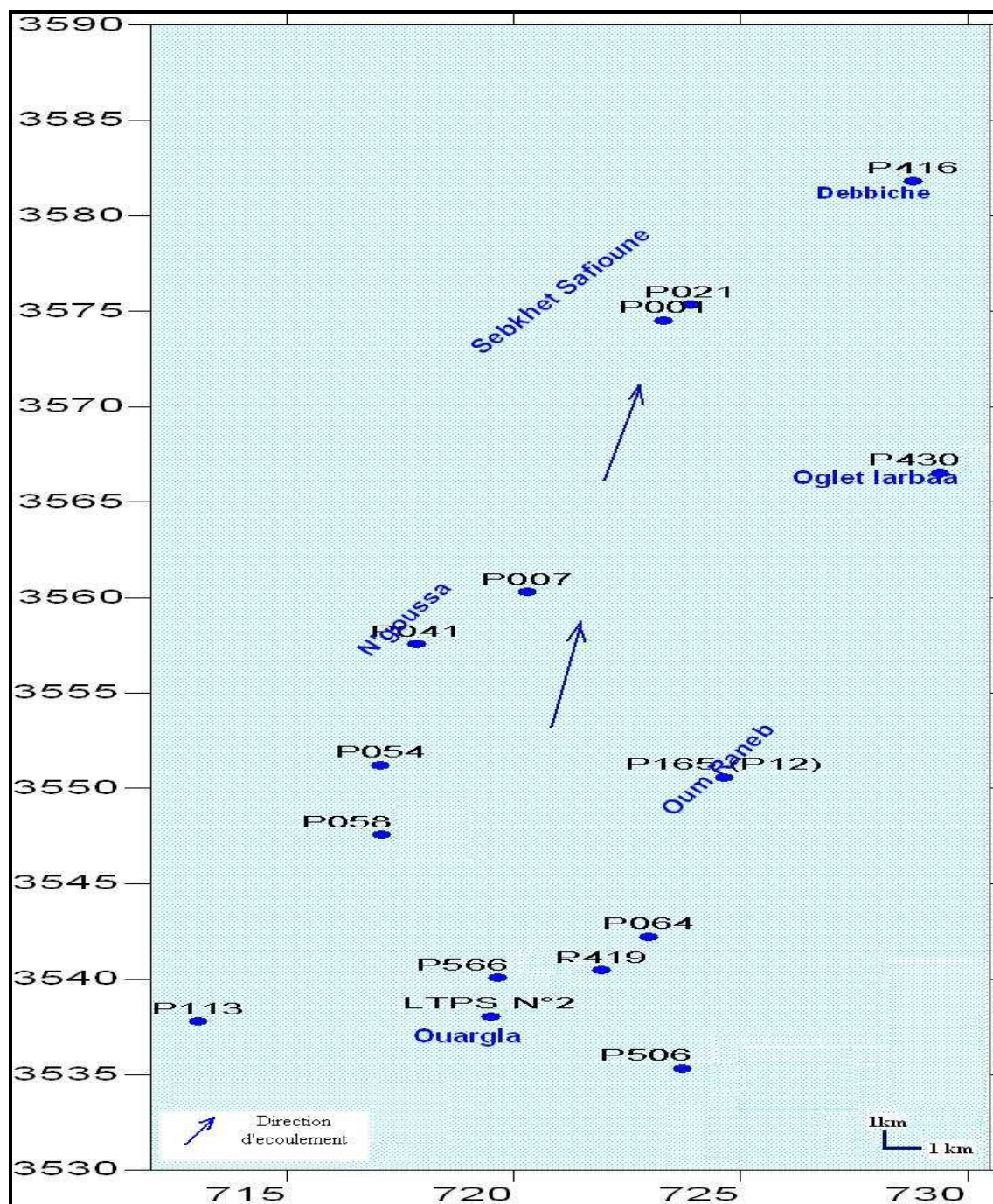


Figure II-1 : Carte de situation des piézomètres échantillonnés de la nappe phréatique (cuvette d'Ouargla 2011).

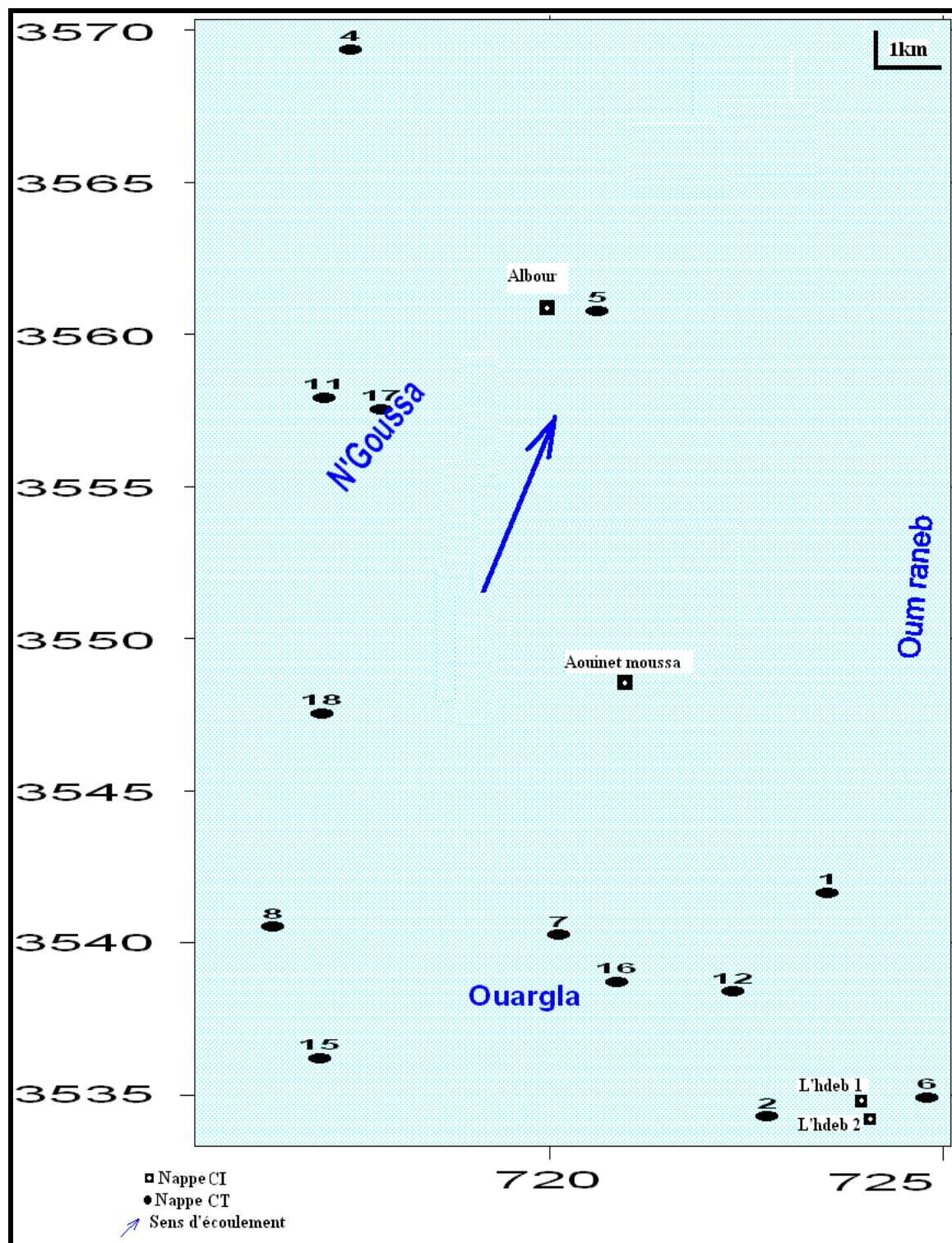


Figure II-2 : Situation des forages CI et CT échantillonnés par CRNA 1994-96 (cuvette d'Ouargla).

L'étude consiste à suivre l'évolution hydrochimique et isotopique le long de ces axes d'écoulement en se basant sur l'interaction eau-roche afin de vérifier la continuité hydrodynamique de la nappe, l'origine de la salinité et détermination de l'âge de différentes masses d'eau.

II-2-les données utilisées:

-Données hydrochimiques de L'ANRH 2010:

Dans le but de la réalisation de ces tâches, l'agence nationale des ressources hydrauliques du Ouargla réalise d'une année à autre des campagnes d'échantillonnage et des mesure afin de suivre la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe superficielle, et de préciser le sens d'écoulement, ainsi que faire ressortir les paramètres physico-chimique des eaux, tel que la température, le pH, la conductivité électrique, etc. les piézomètres fonctionnels et les paramètres physicochimiques sont représentés dans le tableau 1 en annexe.

-données de l'ONM (Office National de Météorologie) pour le traitement des composants climatiques.

II-3-Campagnes d'échantillonnage:

Tous les paramètres physicochimiques, analyses chimiques et les teneurs isotopiques de différentes campagnes d'échantillonnages sont discutés dans les chapitres consacrés.

II-3-1-Campagne de CRNA 1994-1996:

Le commissariat à l'énergie atomique (COMENA/CRNA) a entrepris dans le cadre d'un contrat de marché avec la DHW d'Ouargla une étude isotopique sur les eaux des nappes du continental intercalaire, complexe terminal, et la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Le but de cette étude était de définir l'âge et l'origine des différentes masses d'eau, les relations entre ces nappes et les caractéristiques physico-chimiques des eaux. L'échantillonnage a concerné les nappes suivantes:

La nappe phréatique: 63 points d'eau

La nappe du complexe terminal: 18 points d'eau (forage Mio-Pliocène et Sénonien)

La nappe de continental intercalaire : 4 forages

Sur le terrain, ont été mesurés les paramètres suivants:

La température, pH, la conductivité, Eh, et l'humidité.

II-3-2-Notre Campagne d'échantillonnage 2011 :

Une campagne d'échantillonnage sur la nappe phréatique a été effectuée en septembre 2011, 15 échantillons ont été prélevés et acheminés vers le laboratoire d'analyse chimique de l'Université de Constantine (département de Géologie).Le choix du lieu de prélèvement est basé sur la répartition spatiale des piézomètres de façon à couvrir tout le secteur étudié.

II-4-Techniques d'analyse chimique et isotopique utilisées au CRNA :

(Centre de Recherche Nucléaire d'Alger)

Le centre de recherche nucléaire d'Alger fait partie de (COMENA), le commissariat à l'énergie atomique, ce dernier appartient au Ministère d'énergie et des mines, est une entité opérationnelle d'études et de recherche chargée de la réalisation des programmes de développement dans le domaine de l'énergie et des techniques nucléaires.

II-4-1-Notre Stage au sein du centre:

Nous avons effectué un stage au CRNA de 15 jours sous la supervision de Mr MOULLA afin de suivre le fonctionnement de différentes techniques isotopiques et hydrochimiques utilisées dans le centre.

Le stage a été fait selon le programme suivant:

- Datation par le radiocarbone et la synthèse de benzène
- Tritium
- Spectrométrie de masse (Oxygène 18 et Deutérium)
- l'analyses hydrochimiques.

II-4-1-1-Datation par le radiocarbone et la synthèse de benzène:

Le principe de cette méthode consiste à mesurer l'activité spécifique d'un échantillon qui est le nombre de rayons beta B- émis par gramme et par minute, et en déduire par le calcul le temps écoulé depuis la mort de l'organisme d'où l'échantillon a été prélevé.

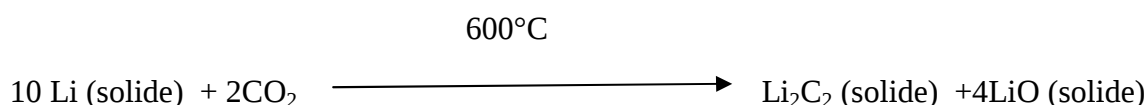
Il existe deux techniques de mesure, l'une par CO_2 (compteur proportionnel) et l'autre par Benzène C_6H_6 . Après la précipitation des carbonates (dans ce cas on parle de datation d'échantillon d'eau) sur le terrain par SrCO_3 ou BaCO_3 à un pH supérieur à 11 par addition de solution de soude forte.

Au laboratoire on entame la ***synthèse de benzène***; le précipité est attaqué à l'acide ortho - phosphorique H_3PO_4 pour libérer le CO_2 qui est réduit sur le lithium à chaud pour donner de l'acétylène C_2H_2 en passant par :

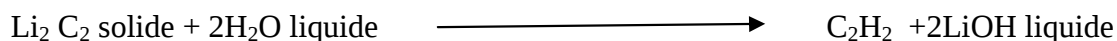
L'azote à -80°C pour piéger H_2O .

L'azote à -186°C pour rendre CO_2 solide.

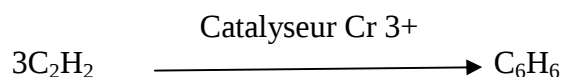
Carburation en présence de Li2 à environ 600°C Selon la réaction:



- L'Hydrolyse avec H_2O afin d'obtenir acétylène C_2H_2 selon la réaction:



L'acétylène obtenu sera trimérisé pour donner le benzène C_6H_6 par catalyseur à base Chrome Cr^{3+} comme suivant:



Le benzène ainsi obtenu est mis dans un récipient en quartz ou en verre, puis introduit dans le compteur à scintillation liquide. (Figure II-3) Chaque désintégration du benzène produit un petit éclair lumineux qui est compté.

Les particules B- ionisantes émises par le ^{14}C , sont transformées par le liquide scintillant en photons de lumière, capté par un tube photomultiplicateur qui les traduit en impulsions électriques et l'électronique faisant le reste.

Pour chaque analyse il faut réaliser un étalon (standard) dont l'activité est connue, un bruit de fond qui contient le benzène mort et l'échantillon à dater provenant de la manipulation.



Figure II-3 : Compteur à scintillation liquide.

II-4-1-2-Tritium:

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène, fait partie intégrante de la molécule d'eau, est un traceur connu en hydrogéologie superficielle et souterraine, sa période est de 12 ans, ce qui rend utilisable dans les cycles hydrologiques relativement courtes. La présence ou non du tritium est une nette indication des eaux récentes ou d'une mélange d'eau ancienne et récente. L'activité en tritium est mesurée par scintillation liquide, et exprimé en unité tritium(UT), à noter que 1UT équivaut à 10^{18} atome d'hydrogène.

Les teneurs en tritium des eaux de surface (continentales) sont maintenant inférieure à 20UT (seuil de détection), ces teneurs basses sont très difficile à mesurer directement avec le compteur et c'est pour cela on fait la méthode de :

L'enrichissement électrolytique Figure II-4 Le comptage direct du tritium donne une concentration proche du seuil de détection, donc on entame l'enrichissement de tritium de l'échantillon :

Cette méthode consiste à :

Distiller 500 ml de l'échantillon dans un système clos pour éviter une contamination par l'air. La distillation est refaite à nouveau si la conductivité de l'échantillon dépasse 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

Ajouter 1.5 g de peroxyde de sodium (Na_2O_2) au distillat pour augmenter sa conductivité.

Peser les cellules d'électrolyse (cathode+anode) vides et après avoir ajouté de la solution afin de calculer le rapport d'enrichissement après l'électrolyse.

Placer les électrodes dans le bac réfrigérant puis faire le montage électrique d'un circuit en série entre les électrodes, Le courant qui traverse la série de cellules décompose l'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène, de masse 1, est évacué plus rapidement que les isotopes lourds, deutérium et tritium, dont la teneur par conséquent augmente dans le liquide restant dans les cellules.

Neutraliser l'électrolysât avec 4 g de chlorure de plomb (PbCl_2).

Distiller totalement une deuxième fois la solution et la préparer pour le comptage.

Le comptage

Les échantillons d'eau électrolysés sont soumis à une mesure de radioactivité par scintillation liquide. L'eau déposée dans un flacon spécial de comptage en polyéthylène est additionnée de liquide scintillant. On met le mélange à refroidir dans le compteur avant de commencer le comptage.

Le comptage dure 50 minutes par échantillon et 12 passages sont nécessaires afin d'avoir une statistique de comptage suffisante.

En plus des échantillons, on prépare aussi 2 étalons (eau tritiée d'une activité connue), 2 bruits de fond (eau sans ^3H) et 2 traceurs (ou spike) correspondant à une eau tritiée de faible activité.

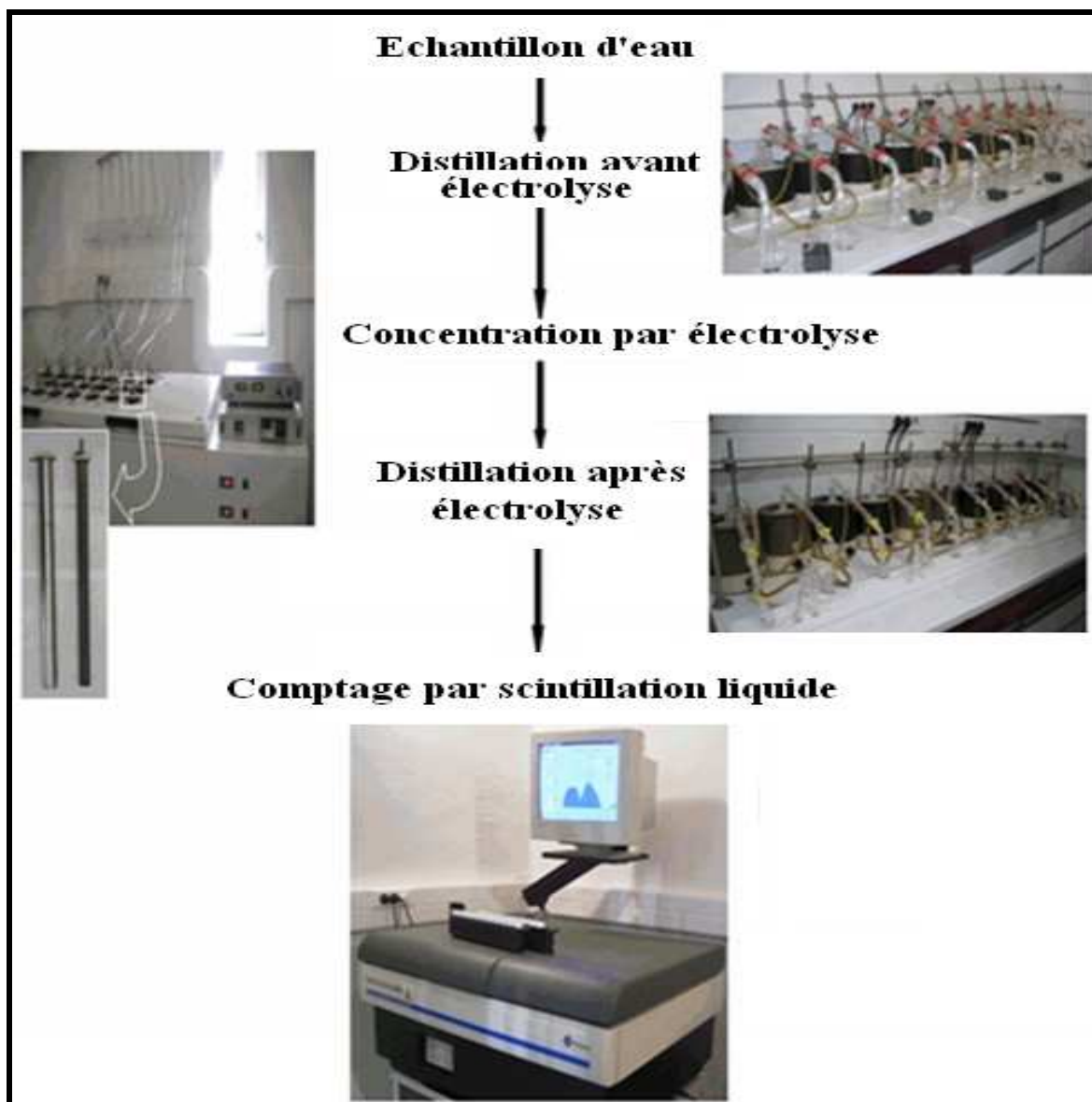


Figure II-4 Technique de dosage du tritium utilisée par enrichissement électrolytique

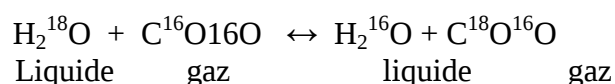
(<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tritium>)

II-4-1-3-Spectrométrie de masse: l'oxygène 18 et le deutérium

Un spectromètre de masse est capable de séparer des atomes ou des ions de masses différentes et de mesurer leurs abondances relatives où un gaz contenant différents isotopes d'un élément (^{12}C et ^{13}C du CO_2 , par exemple) est ionisé dans une source d'ions. Les ions positifs sont accélérés par une haute tension et entrent ensuite dans un champ magnétique perpendiculaire au champ électrique. La trajectoire des ions devient alors circulaire de par la force de Lorentz. Le rayon du cercle dépend de la masse de l'ion: les ions les plus lourds suivront un cercle plus grand. De cette façon, les ions se séparent et peuvent donc être collectés. Dans les collecteurs, les ions perdent leur charge électrique, produisant ainsi de faibles courants électriques qui peuvent être mesurés.

La préparation des échantillons consiste à extraire ^{18}O de l'échantillon et le transférer sur un CO_2 de composition isotopique connue, selon la réaction d'échange isotopique suivante :

(Epstein et Mayéda 1953 In Omar SAIGHI 1999)



Ce gaz carbonique sera introduit dans le spectromètre de masse pour les mesures des rapports isotopiques.

Et pour ^2H la préparation consiste à extraire l'hydrogène en provoquant une réaction de réduction d'eau à analyser. L'hydrogène dégagé est introduit dans l'appareil pour l'analyse.

La précision analytique pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^2\text{H}$ est de $\pm 0.05\text{‰}$ et $\pm 1.0\text{‰}$ respectivement.

II-4-1-4-Analyse hydrochimiques par Chromatographie Ionique:

L'analyse chimique complète des éléments majeurs (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+ , chlore Cl^- , nitrate NO_3^- , sulfate SO_4^{2-}) et des éléments en trace, ont été faites à l'aide d'un chromatographe ionique Dionex 120 à colonne rapide.

Cette technique permet l'analyse qualitative (par séparation des espèces présentes) et quantitative des espèces ioniques présentes dans un échantillon liquide dépourvu de la matière organique. Elle permet aussi de détecter et de quantifier une grande variété d'anions.

La chromatographie ionique est fondée sur des processus d'échange entre une phase liquide (éluant et échantillon) et une phase solide (résine échangeuse d'ions). L'échantillon liquide est injecté dans l'appareil et ensuite poussé à l'aide d'une pompe dans une colonne faite d'une résine échangeuse d'ions. L'échantillon est mélangé à un éluant, c'est-à-dire, une solution facilitant la séparation des différents ions contenus dans l'échantillon à l'intérieur de la colonne.

Les ions contenus dans l'échantillon sont séparés parce qu'ils se déplacent à différentes vitesses dans la colonne, le tout dépendant de leur affinité pour la résine échangeuse d'ions. La séparation des ions est en fonction de leur charge et de leur taille ; Plus les ions sont petits, moins ils seront retenus et plus les ions sont chargés, plus ils seront retenus.

L'éluant et l'échantillon passent à travers un suppresseur, un module permettant d'augmenter la sensibilité du détecteur en soustrayant la conductivité électrique spécifique à l'éluant et en diminuant les bruits de fond.

Un détecteur mesure la conductivité électrique de chaque ion séparé contenu dans l'échantillon et un signal est envoyé à l'ordinateur.

Les ions des solutions électrolytiques ont des conductivités électriques spécifiques qui peuvent être quantifiées. Le dosage est possible en comparant le signal obtenu pour un échantillon avec le signal d'une solution de concentration connue. L'identification des ions est possible grâce à leur temps de rétention particulier, obtenus préalablement lors de la préparation des courbes de calibration tracées à partir de solutions témoins.

II-5-la partie analytique:

Différents procédés d'analyses pour déterminer les concentrations ioniques dissoutes, ont été utilisés :

Pour la campagne que nous avons réalisé, les ions majeurs (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+ , chlore Cl^- , carbonate HCO_3^- , sulfate SO_4^{2-}) ont été dosé par les méthodes classiques (complexométrie titrimétrie, gravimétrie et spectrométrie de flamme) à l'institut des sciences de la terre (université de Constantine).

Et pour la campagne de CRNA 1994-1996, toutes les analyses ont été effectuées au CRNA, dont ;

Les ions majeurs (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+ , chlore Cl^- , nitrate NO_3^- , sulfate SO_4^{2-}) ont été analysés par la méthode de chromatographie ionique avec Dionex120 à colonne rapide, les carbonates et bicarbonates ont dosés par la méthode classique volumétrique.

Les isotopes stables ^{18}O et ^2H pour cette campagne, ont été analysés par spectrométrie de masse avec un spectromètre à double collection de type CF-IRMS Delta-V de Thermo Finnigan.

Les isotopes radioactifs, Carbone 14 et tritium, ont été dosés par compteur à scintillation liquide.

Avant l'analyse au laboratoire, des mesures ont été faites in situ pour la température, la conductivité électrique, le pH, Eh, TAC. La mesure de l'activité en Carbone 14 par le compteur à scintillation liquide est précédée par précipitation des carbonates sur le terrain.

II-6-les outils informatiques:

-SURFER8:

Permet de dessiner les cartes piézométriques et les cartes d'iso-teneurs, il permet aussi de définir le sens d'écoulement des eaux.

-DIAGRAMME:

(Développé par l'Université d'Avignon, France): il permet

-de calculer les âges radiométriques des eaux.

-de représenter graphiquement:

-diagrammes triangulaire de piper qui définit le facies chimique de la solution étudiée

-diagrammes verticale de Sholler-Berkaloff qui permet de comparer la composition chimique des solutions provenant de différents aquifères.

-les corrélations entre les ions afin de distinguer leurs origines.

Chapitre III: Hydrochimie

III -1-Introduction

L'étude hydrochimique des eaux de la cuvette d'Ouargla a été menée sur la base des analyses chimiques réalisées sur les différentes campagnes d'échantillonnage (campagne de CRNA 1994-1996 et notre campagne en 2011), nous disposons ainsi des analyses des éléments majeurs (cations et anions), qui nous ont permis d'examiner l'évolution spatiotemporelle des eaux des aquifères de la cuvette ainsi l'origine de ces éléments et la minéralisation. Et pour cela nous avons traité les données de l'ensemble des campagnes d'échantillonnage effectuées sur la nappe phréatique, nappe du complexe terminal et la nappe de continental intercalaire, sur la cuvette.

Les paramètres physico-chimiques caractéristiques mesurés pour tous les prélèvements sont les suivants: -la température (°C) -le potentiel d'hydrogène pH -la conductivité électrique (ms/cm)- la minéralisation (mg/l) -le résidu sec (mg/l) -les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , et $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$) -les anions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) -la dureté totale (ΔHT).

Dans ce chapitre, les résultats des analyses chimiques de différentes campagnes sont représentés sous forme de tableaux, des graphes et des diagrammes, dont le but est de :

- Déterminer la répartition quantitative des différents éléments chimiques majeurs.
- D'apprécier les différents paramètres ayant une influence sur l'évolution de la qualité des eaux du secteur étudié.
- Déterminer les principaux faciès chimiques des eaux.
- L'évolution spatiale du chimisme et de l'origine de la salinité

III -2-Facies chimique des eaux :

Les eaux analysées sont représentées sur le diagramme de piper (Figure III-1), ce diagramme permet de comparer plusieurs analyses chimiques, établir une classification des eaux, et préciser les différents faciès chimiques.

Les eaux de trois nappes ont un faciès chimique presque homogène, la nappe phréatique, est caractérisée par un faciès chloruré sodique calcique et magnésien, les ions dominants sont les chlorures pour les anions et la dominance des ions de (sodium + potassium) pour les cations.

Les eaux de la nappe de CT représentent :

- un faciès hyper chloruré sodique où les cations dominants sont (sodium + potassium) et la dominance des ions chlorurés pour les anions.
- un faciès chloruré calcique et magnésien.

En ce qui concerne la nappe du continental intercalaire le faciès chimique des eaux est chloruré sodique calcique et magnésien, les ions dominants sont les chlorures pour les anions et pas d'ions dominants pour les cations

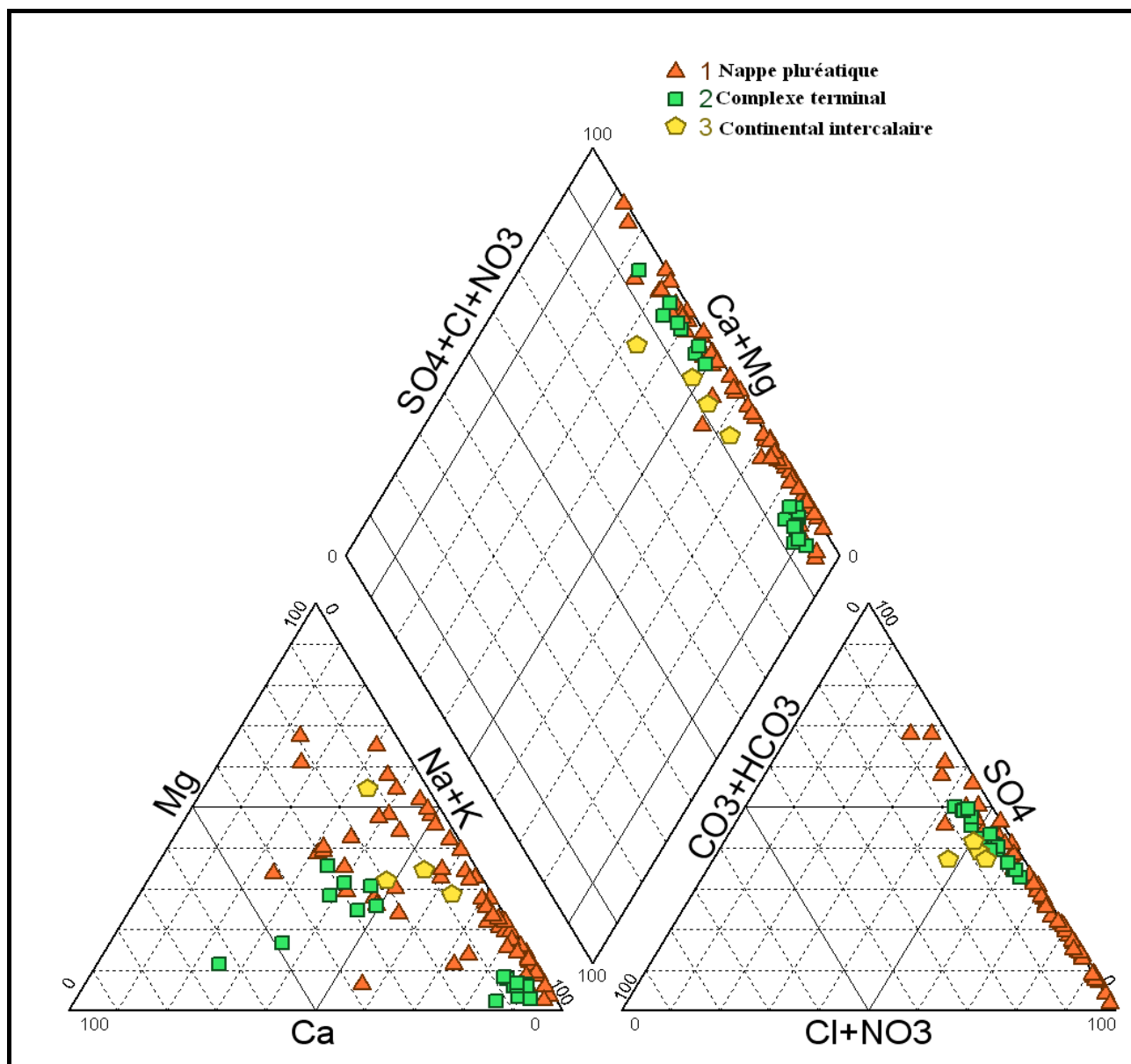


Figure III-1 : Faciès chimiques des eaux de la cuvette d'Ouargla1 1994-1996

III -3-Continental intercalaire:

Les paramètres physicochimiques mesurés des eaux de cette nappe sur le terrain sont : la température, le pH, la conductivité et le potentiel d'oxydoréduction Eh (Tableau III-1).

Tableau III-1 : Quelques paramètres physicochimiques de CI de la cuvette d'Ouargla; CRNA 1994-1996

Code	Temp.	pH	Cond.	Eh	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
					mg/l							
CI Hadeb 1	49,3	7,35	2190	-20	415	416	10	110	100	97	262	29
CI Hadeb 2	47,4	7,64	2260	-40	478	426	10	117	62	120	350	23
CI Aouinet Moussa	48,9	7,55	2200	-32	420	393	12	219	45	122	128	24
CI El-Bour	54,5	7,34	2960	-21	549	609	0	145	60	126	514	28

La température des eaux du CI varie entre 47,4 et 54,5°C (CRNA 1996), les mesures récents montrent que la température est de 51,3 °C pour (l'hdeb1) et 48,8°C (l'hdeb 2) (ADE 2011). La conductivité électrique dépasse souvent 1000 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, elle varie entre 2190 et 2960 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ pour les quatre forages.

Le potentiel d'oxydoréduction est défini comme un paramètre d'intensité pour un équilibre du bilan des électrons: $p\varepsilon = -\log[e]$, pour lequel $[e]$ signifie l'activité des électrons en moles par litre. Pour l'Eh des eaux de cette nappe, les valeurs sont comprises entre -20 à -40m V. A Ouargla et ses environs, le résidu sec oscillant entre 1,6 et 1,9 g/l (ANRH 2008), la minéralisation totale de l'eau du "CI" est de l'ordre de 1.5 g/l, sa plus forte concentration correspond à la partie la plus profonde et la plus exploitée de la nappe (Figure III-2) (BELLAOUER 2008) sur la cuvette d'Ouargla, et les valeurs sont comprises entre 1.3 g/l à Aouinet Moussa et 2g/l à Elbour.

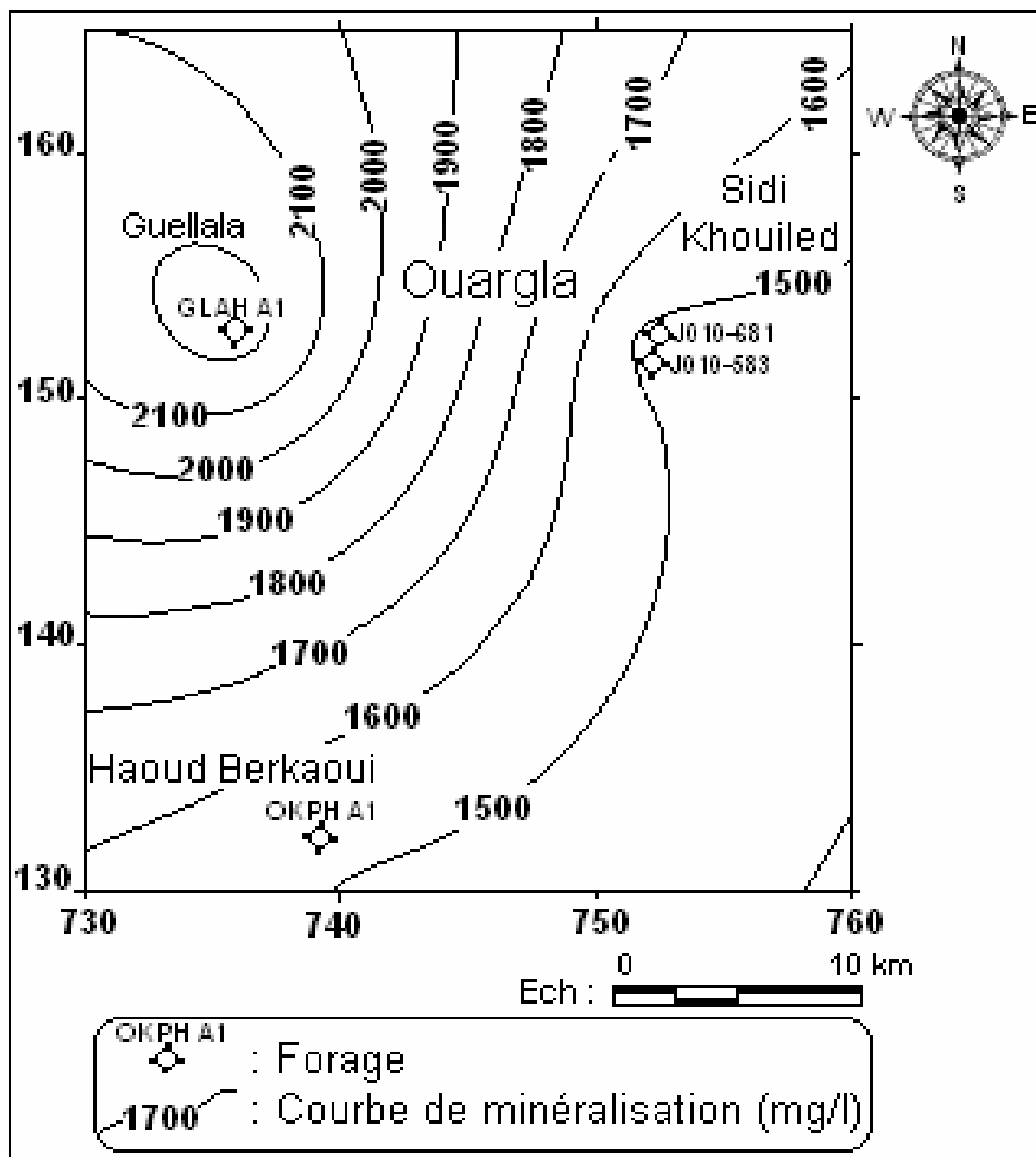


Figure III-2 : Carte de minéralisation totale des eaux, nappe du "CI", Ouargla (BELLAOUER 2008)

III -4-Complexe terminal:

Nous disposons des données chimiques de 18 forages captant la nappe du complexe terminal, les mesures réalisées sur les paramètres chimiques sont : (Tableau III-2)

Tableau III-2 : analyses chimiques avec quelques paramètres physicochimique des eaux de CT cuvette Ouargla (CRNA 1994-1996).

Code	Désignation Points d'eau		Temp. °C	pH	Cond. µS/cm	Eh mV	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
1	CT Station Pompage	Miopliocène	25,4	7,7	3690	-38	792	762	35	111	247	126	418	48
2	CT Irrig. Rouissat	"	25,4	7,5	4380	-29	803	1060	33	105	243	151	524	48
3	CT Irrig. Rouissat	"	25,1	7,5	5110	-26	918	1313	33	102	243	190	524	32
4	CT Frane	Sénonien	26,1	7,5	2410	-30	560	418	39	104	132	119	3087	5
5	CT El-Bour	"	26,2	7,4	3050	-23	693	485	39	104	346	38	112	72
6	CT Hai- Bouزيد	Miopliocène	22,9	7,5	3640	-29	738	762	35	105	194	131	260	96
7	CT Dom. Said Otba	Sénonien	25,4	7,6	2050	-36	580	338	43	113	185	51	2572	5
8	CT Bamendil	"	25,5	7,7	2530	-39	494	425	36	95	222	46	181	6
9	CT Ch. EDEMIAO	"	26,2	7,5	2300	-32	617	391	40	87	181	63	3859	5
10	CT El Gherbouz	"	26,3	7,7	2210	-37	595	375	41	101	195	126	2572	5
11	CT El Gherbouz	"	25,8	7,6	2270	-36	629	403	39	102	120	97	2830	5
12	CT Ain- Smara	Miopliocène	23,9	7,5	3660	-31	757	742	37	101	210	109	211	121
13	CT Ain- Smara Chott	"	24,3	7,4	6000	-21	1117	1469	37	115	456	48	3603	43
14	CT ITAS 1	Sénonien	25,9	7,5	2300	-29	731	641	39	80	198	105	2829	8
15	CT ITAS 2	Miopliocène	23,1	7,5	4320	-29	852	1021	33	101	230	166	292	28
16	CT Transat	Sénonien	24,5	7,7	3590	-43	764	768	36	97	206	133	2572	9
17	CT N'gouça	"	24,0	7,5	2030	-28	773	503	42	100	160	95	2572	6
18	CT Hassi- Miloud	"	25,0	7,6	1950	-34	492	483	40	90	152	104	2572	5

Les valeurs mesurées de la température des eaux de la nappe de CT à l'échelle de la cuvette sont variables (23 et 26,3°C) (CRNA 1994-96), d'autres compagnes, montrent que la température des eaux de cette nappe est de 19,6°C (Ain Hadji) et 20,7 (Matmoura) (ADE 2011). Le pH est, pour la majorité des échantillons compris entre 7,3 et 7,7 (Miopliocène ou sénonien carbonaté). Pour la conductivité les valeurs sont comprises entre 1950 µS.cm⁻¹ à Hassi Miloud et 6000 µS.cm⁻¹ à Ain Smara Chott.

III -5-Nappe phréatique:

Des mesures ont été faites in-situ avec 63 échantillons d'eau destinées au laboratoire de CRNA (campagne CRNA 1994-1996), d'autres prélèvements effectués sur quinze échantillons d'eau destinés au laboratoire de l'université de Constantine, les résultats de différentes analyses sont reportés sur les tableaux suivants :

Tableau III-3 Analyse chimique des eaux de la nappe superficielle CRNA 1994-1996

Code	Désignation	Temp.	pH	Cond.	Eh	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
	Points d'eau	°C	\	µS/cm	mV	mg/l							
1	PZ 07	26,7	7,67	>20000	-39,6	10000	75000	1	98	474	6047	29437	917
2	PZ 09	24,7	7,84	>20000	-49,8	5227	14244	24	138	514	1533	9657	381
3	PZ 10	24,9	7,46	6700	-26,6	2522	2879	71	164	156	405	576	121
4	PZ 18	25,6	7,46	>20000	-27,5	14406	53734	10	141	680	5317	3846	1327
5	PZ 19	24,8	7,72	>20000	-42,9	7252	27035	10	145	494	2375	16720	369
6	PZ 20	27,1	7,59	>20000	-34,8	9371	75685	10	120	581	5549	57360	1130
7	PZ 22	27,8	7,42	>20000	-25,3	8595	40962	11	135	507	3306	24792	467
8	PZ 23	27,2	7,84	>20000	-49,8	14498	72800	10	223	453	5849	66620	1168
9	PZ 34	27,9	7,85	>20000	-51,8	10900	82528	11	101	514	5354	73565	1168
10	PZ 36	28,5	7,54	>20000	-32,7	8356	141835	11	69	510	7100	142500	1903
11	PZ 37	28,5	6,92	>20000	-4,8	14719	145825	21	77	396	10618	133240	143
12	PZ 38	27,0	6,87	>20000	-6,3	15476	118790	15	95	494	8359	123980	934
13	PZ 42	26,2	7,94	>20000	-57,3	32084	94840	9	134	428	3613	64375	1695
14	PZ 44	26,4	7,79	>20000	-49,8	1282	54521	55	202	416	6601	64375	1695
15	PZ 50	28,0	7,31	>20000	-17,7	6437	12451	21	253	210	1457	7262	208
16	PZ 51	25,6	7,46	>20000	-28	6090	19990	9	174	362	2627	9112	208
17	PZ 53	26,0	7,59	>20000	-37,5	10268	87257	13	71	428	5727	42875	1938
18	PZ 54	24,7	7,88	2960	-54,8	825	746	44	86	194	118	260	96
19	PZ 57	24,4	7,69	5300	-39,9	1237	1121	116	92	210	252	365	72
20	PZ 59	24,6	7,83	2770	-47,7	531	436	38	82	114	108	2572	545
21	PZ 60	25,3	7,75	2430	-42	782	527	50	90	90	152	2572	635
22	PZ 61	25,4	7,72	2470	-40,4	735	457	47	100	58	138	6688	635
23	PZ 62	26,3	7,62	7750	-36,3	1813	4310	67	140	177	428	787	72
24	PZ 64	24,5	7,37	>20000	-22,1	9512	40988	6	192	510	6297	15562	716
25	PZ 67	27,1	7,46	>20000	-28,4	13221	48206	6	117	408	4495	29332	738
26	PZ 68	26,6	7,54	>20000	-32,2	16970	65869	5	163	388	7195	71250	1413
27	PZ 75	28,1	7,72	>20000	-43,0	13031	20552	1	297	392	2369	11262	416
28	PZ 76	27,0	7,71	>20000	-41,6	14232	63880	1	361	476	7802	29438	1017
29	PZ 77	28,5	6,47	>20000	-32,2	17887	158995	18	262	882	21977	61687	2182
30	PZ 82	27,1	7,43	>20000	-26,2	16154	27050	3	282	528	3665	12875	1938
31	PZ 84	24,8	7,95	>20000	-56,3	10106	45277	11	169	383	2478	21375	964
32	PZ 92	25,0	7,42	>20000	-26,0	3897	29643	16	169	387	2117	11262	241
33	PZ 93	25,8	7,49	>20000	-29,6	17270	76962	3	90	424	6849	45587	1168
34	PZ 96	25,7	7,71	>20000	-42,8	6558	19897	0	196	606	5955	9657	271
35	PZ 98	26,2	8,02	>20000	-61,0	8062	28788	5	146	432	2893	83187	509

code	Désignation	Temp.	pH	Cond.	Eh	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
36	PZ 103	24,4	7,22	4700	-10,4	1089	996	4	135	272	209	314	9
37	PZ 104	26,1	7,71	12420	-42,0	3897	6868	1	209	192	977	1286	93
38	PZ 109	23,9	8,37	>20000	-81,0	5283	10855	4	231	169	1283	8080	208
39	PZ 110	23,5	7,59	17180	-35,0	3709	6926	32	171	280	780	7639	233
40	PZ 111	26,9	7,93	7620	-54,7	2474	3587	75	82	236	194	274	46
41	PZ 113	24,9	7,70	>20000	-41,0	12937	36516	10	185	436	1964	21375	485
42	PZ 114	23,7	7,58	4490	-33,1	1003	1157	51	95	252	177	446	222
43	PZ 115	23,9	7,65	2620	-37,5	773	565	43	96	152	104	6946	8
44	PZ 116	24,0	7,62	5620	-34,6	1344	1235	59	97	292	237	472	29
45	PZ 117	23,4	7,70	4770	-40,0	1226	1155	59	94	232	225	699	38
46	PZ 119	22,1	7,69	6080	-40,1	1908	1822	33	119	220	357	150	57
47	PZ 120	23,0	7,96	9500	-56,0	2358	6188	53	90	244	511	150	66
48	LTP 30	25,4	7,12	4080	-7,2	1049	707	29	351	300	32	514	15
49	LTP 33	27,4	7,19	4680	-7,3	1743	801	0	240	316	213	903	56
50	LTP 38	26,0	7,31	>20000	-19,2	8164	33490	4	756	634	1536	5043	331
51	LTP 45	24,2	7,41	3600	-23,4	1437	386	0	205	420	204	277	11
52	LTP 06	25,2	7,64	>20000	-39,3	67774	57560	13	474	540	4674	60837	1640
53	LTP 16	25,2	7,48	11530	-28,6	6254	10125	2	314	136	1461	2714	233
54	LTP Ain-Kheir	25,9	7,52	4010	-31,6	1799	525	60	119	288	247	350	23
55	LTP St.Epuration	24,1	7,39	5510	-22,8	2130	901	10	192	86	470	535	33
56	PT 01	23,1	7,76	>20000	-44,6	13422	14144	26	293	638	3685	21765	565
57	PT Ain-Beida	23,1	7,25	9730	-14,5	3250	4267	9	389	58	627	1090	113
58	PT Hassi-Miloud	23,6	8,08	2510	-61,7	561	502	44	67	181	78	902	37
59	PT Bamendil	19,7	8,66	5430	-97,2	2195	2428	190	98	410	261	911	44
60	LTP 33	27,4	7,19	4680	-7,3	6198	3565	4	161	367	1066	3231	233
61	LTP Ecole F.Chott	27,6	7,60	7340	-35,5	2719	2761	44	172	392	269	2714	95
62	LTP Ch.Hai.Bouزيد	25,6	7,76	\	-44,5	1830	1251	21	122	160	339	509	34
63	Drain Chott Ouargla	21,1	7,67	>20000	-38,5	3595	7701	4	250	90	799	1646	92

Tableau III-4 : Analyse chimique des eaux de la nappe superficielle 2011

échantillons	piézomètres	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
1	P506 BIS	6.9	463.6	2272	4650	753.5	460	445	79.5
2	P165 (P12)	6.7	164.7	2385.6	9600	881.7	732	410.5	66.8
3	P058 bIS	7.2	213.5	852	1080	272.5	115.2	305	36.3
4	P054	7.2	146.4	1136	690	256.5	100.8	480	78.8
5	P007	7.1	152.5	2414	2980	881.7	528	377.7	43.3
6	P021	6.8	695.4	2272	10125	961.9	840	479.1	80.7
7	P416	7.7	170.8	1363.2	1625	320.6	159.6	280.9	68.5
8	P001	6.9	158.6	2470	8600	857.7	470.4	675	91.4
9	P430bis	7.1	122	1331.2	1800	569.1	211.2	535	105
10	P041	7.1	420.9	937.2	6600	529.05	535.2	540	95
11	P064	6.7	213.8	2101.6	10080	641.28	479.28	670	112
12	LTPS N°2	6.6	292.8	2073.2	1625	593.1	100.8	280.9	68.5
13	P419	6.9	274.5	2215.2	1800	609.2	302.4	211.3	105
14	P566 bIS	7.3	634.4	2128.8	3500	625.2	537.6	459.8	73.7
15	P113	7.1	262.3	2272	7800	448.8	643.2	685.2	88.3

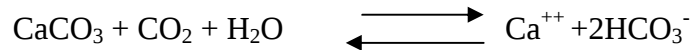
La température des eaux de la nappe phréatique varie entre 19°C et 28°C (CRNA 1994-96), ces eaux montrent des PH allant de 6 à 8,8. D'autres campagnes récentes montrent des valeurs qui sont entre 6,6 et 7,7 et en ce qui concerne le résidu sec les valeurs oscillent entre 144mg/l à Saïd otba et 178000mg/l à sebkhet Oum Raneb et sebkhet Safione (ANRH 2010).

La conductivité électrique renseigne sur la minéralisation d'une eau donnée, à Ouargla (nappe phréatique), Les valeurs sont comprises entre 2400 et 20000 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$. Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction varient entre -4,8millivolt et -97,2 millivolt à Bamendil (CRNA1994-96).

III -5-1- Origine de la minéralisation, évolution spatiale:

III -5-1-1-Calcium (Ca^{++}):

Les ions de calcium existants dans l'eau proviennent de la dissolution des carbonates et de roches gypseuses. Pour les roches carbonatées, l'apparition du calcium résulte de la dissolution des formations (CaCO_3) par l'attaque chimique des eaux en présence du gaz carbonique (CO_2).



En général, les concentrations en calcium des eaux de la nappe superficielle varient de 58 mg/l à 882mg/l (Tableau III-3) (CRNA94-96) et de 256,5 mg/l à 961,9 mg/l (compagne 2011) (Tableau III-4) du sud vers le nord de la cuvette.

III -5-1-2-Magnésium (Mg^{++}) :

L'existence du magnésium dans les eaux résulte principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations dolomitiques, c'est-à-dire la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium, ou bien par les formations salifères riches en magnésium « MgSO_4 ». La réaction chimique est accentuée par la présence de l'acide carbonique présente dans l'eau. Les eaux de la cuvette se caractérisent par teneurs minimal enregistrés à LTP30 et dépassent 21900 mg/l à l'axe de Hassi Miloud –Bour El aicha (CRNA94-96), d'autres mesures récentes sont enregistrés lors de la compagne 2011, les valeurs de concentration en Mg^{++} allant de 101mg/l à LTPSN et P054 à 840g/l sebkhet Safione (Figure V-3).

III -5-1-3-Sodium et Potassium ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) :

La présence de ces ions ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) dans l'eau est due au lessivage des formations riches en Na^+ , Cl^- (Argiles- marnes) et des eaux à usage agricole ou domestique. Les valeurs du sodium et potassium varient de 107mg/l à Pz119 (sud ouest de la cuvette) à 144403 mg/l à Pz36 (sebkhet Safioune) (CRNA94-96), et de 316 mg/l au (P_{419}) à Saïd otba et à 782 mg/l au (P_{064}) à Bour el aicha et sebkhet Safioune pour la compagne 2011(Figure III-3). Et cela est dû à l'influence des eaux de Sebkha et à la présence des formations argileuses et marneuses.

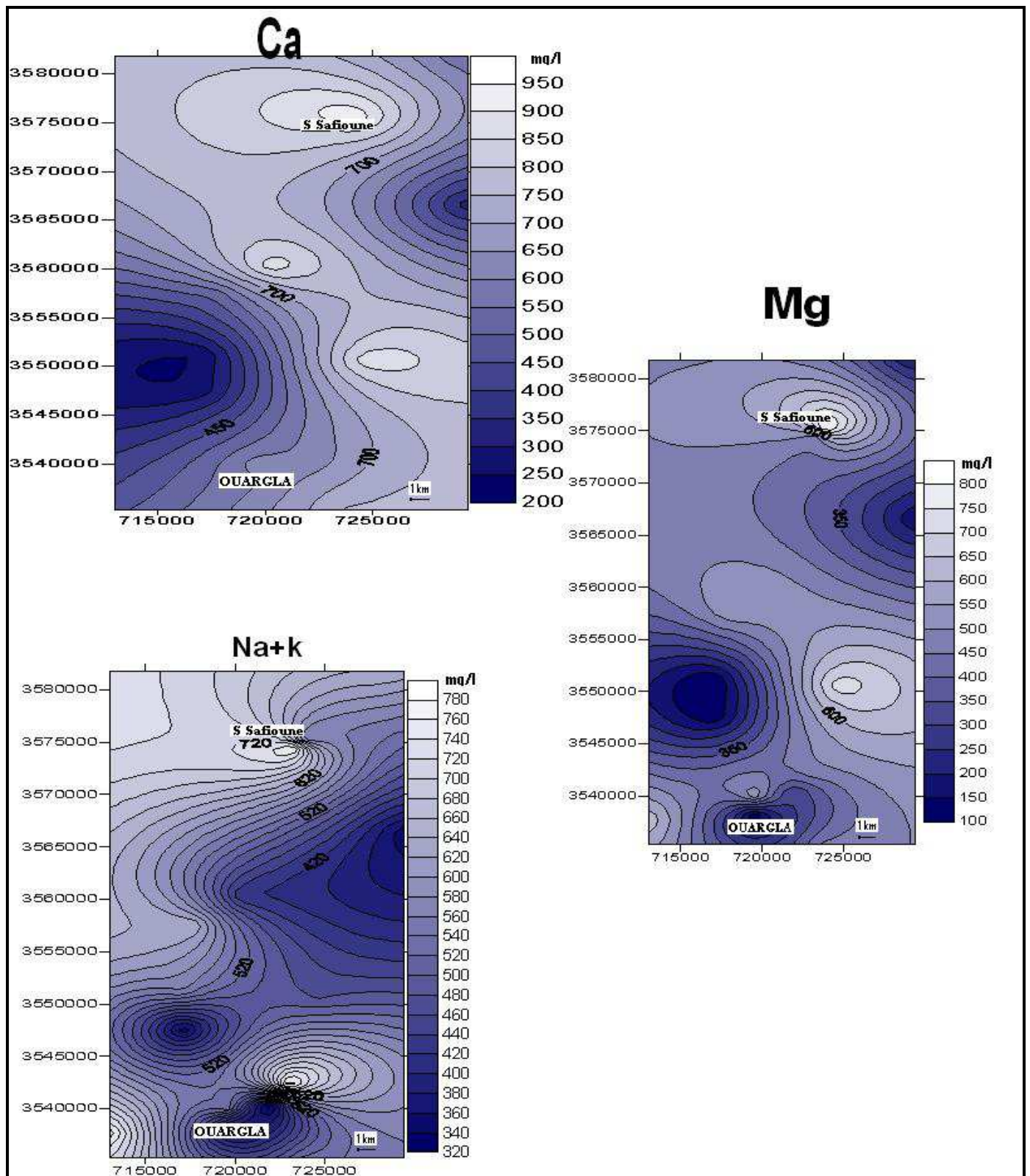


Figure III-3: les cartes d'iso-teneur en différents cations (nappe phréatique cuvette d'Ouargla)

2011

III -5-1-4-Chlorures et Sulfates (SO_4^{-2}) :

Tous ces ions sont présents à des teneurs importantes comme on peut les voir dans les analyses de différentes campagnes Tableau III-3, et Tableau III-4

Les chlorures qui sont des éléments conservés en solution, il ne subissent aucune interaction physique ou chimique avec les autres phases solides ou gazeuses et ne sont pas dégradés en solution, il a plusieurs origines à savoir :

- La dissolution des sols naturels et le lessivage des terrains salifères ;
- Les engrais chimiques et les pesticides utilisés en agriculture ;
- Les rejets des eaux usées d'origines domestique et industrielle.

La répartition du chlorure des eaux de la nappe phréatique est représentée sur la carte d'isoteneur. On remarque des teneurs basses enregistrées à Hassi Miloud et Bour el aicha (800 à 900mg/l) par rapport aux teneurs élevées dans les sebkhas et les chotts, où les valeurs dépassent 2400 mg/l (Safione et Oum Raneb) (Figure III-4). Ces fortes concentrations s'expliqueraient par soit une évaporation intense et/ ou une dissolution et lessivage des niveaux évaporitiques.

Pour les ions sulfatés, La majorité des points présentent des concentrations supérieures aux normes de potabilité de l'O.M.S. les eaux de la nappe phréatique ont des teneurs variant entre 690 mg/l au (P₀₅₄) situé entre Hassi Miloud et N'Goussa à 10125 mg/l au (P₀₂₁) à sebkhet Safione.

III -5-1-5-Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les ions bicarbonatés résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon la relation suivante :



Avec :

X : désigne un élément chimique de la roche.

En d'autres termes, la teneur en (HCO_3^-) dans l'eau dépend d'un certains nombres de paramètres physico-chimiques à savoir :

- la température de l'eau.
- la concentration du (CO_2) dissous.
- la concentration de l'eau en sels ainsi que la nature lithologique des terrains traversés.

Les concentrations en ions bicarbonatés sont relativement élevées, et les teneurs maximum sont enregistrées dans les sebkhas et les chotts, elles dépassent 690 mg/l au (P₀₂₁) à sebkhet Safione et 122 mg/l à Oglet Larbaa.

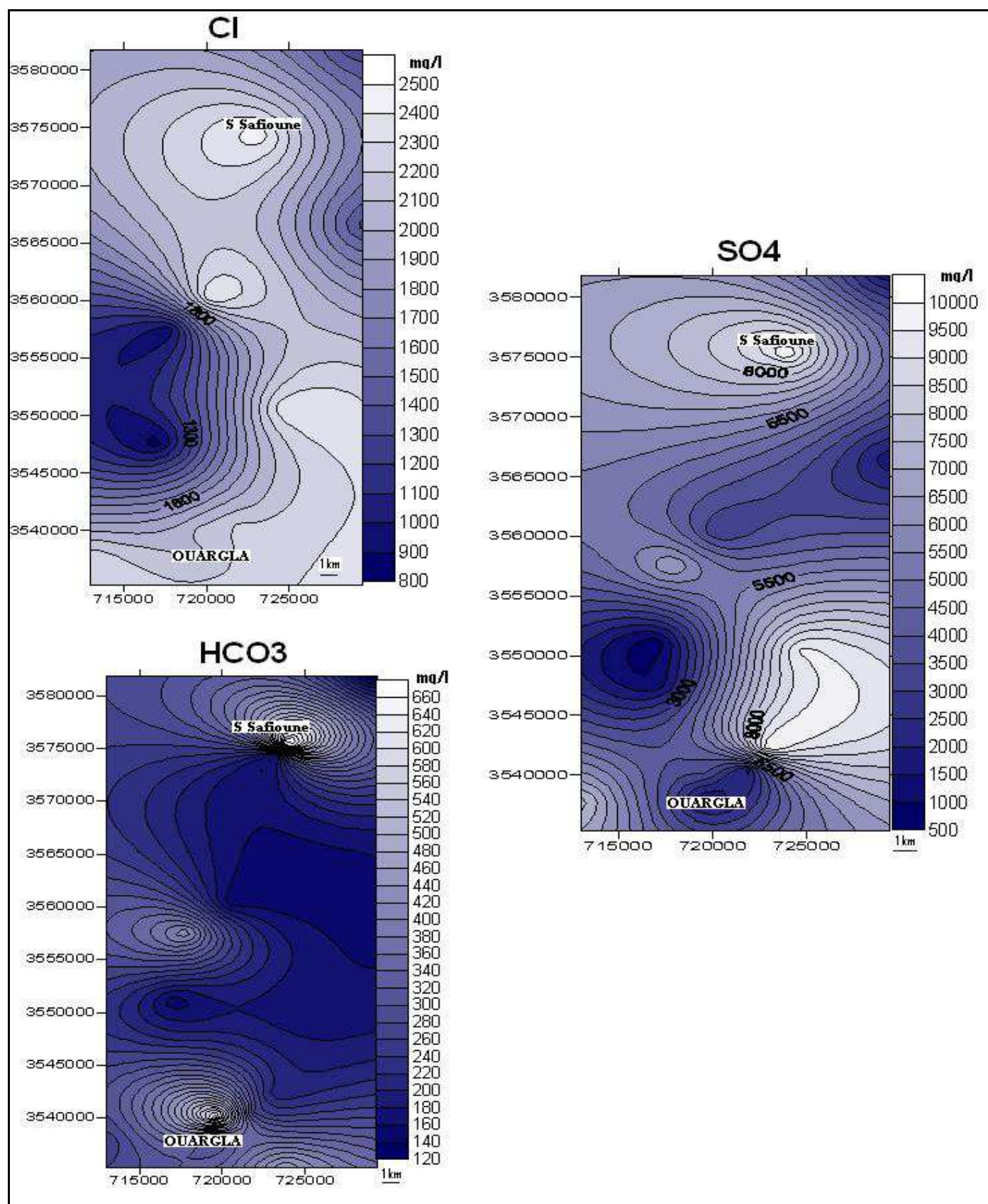
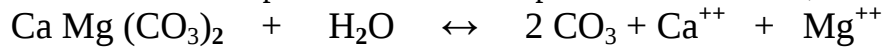


Figure III-4 : les cartes d'isoteneur en différents anions (nappe phréatique cuvette d'Ouargla2011)

III -5-1-6-Indice de saturation :

L'état d'équilibre ou de saturation d'une solution par rapport à un minéral donné est caractérisé par un indice de saturation IS. Le produit d'activités ionique est comparé au produit de solubilité KS à la température de l'échantillon.

Considérons l'exemple d'une solution en présence de dolomite;



Solide

liquide

Le produit d'activité ionique est défini comme suit:

$$\text{PAI} = a \text{Ca}^{++} . a \text{Mg}^{++} . a (\text{CO}_3^-)^2$$

Donc par définition on a:

$$\text{IS} = \text{LOG} \frac{\text{PAI}}{\text{KS}}$$

Si PAI = KS alors IS =0 et la solution est saturé par rapport à la dolomite

Si PAI < KS, IS < 0, la solution est sous-saturée.

Si PAI > KS, IS > 0, la solution est sursaturée.

L'indice de saturation vis-à-vis de certains minéraux dans les eaux de la nappe phréatique, est calculé à laide de DIAGRAMME (logicielle informatique). Les résultats sont reportés en tableau (annexe), Figure III-5.

Les eaux de la nappe phréatique sont sursaturées vis-à-vis à la dolomite sur le long d'axe d'écoulement principale de cette nappe qui est de sud vers le nord, et en ce qui concerne la calcite, aragonite, anhydrite et gypse, les eaux prélevées sous la ville d'Ouargla et Hassi Miloud sont sous-saturées et le reste des échantillons sont sursaturés vis-à-vis ces minéraux.

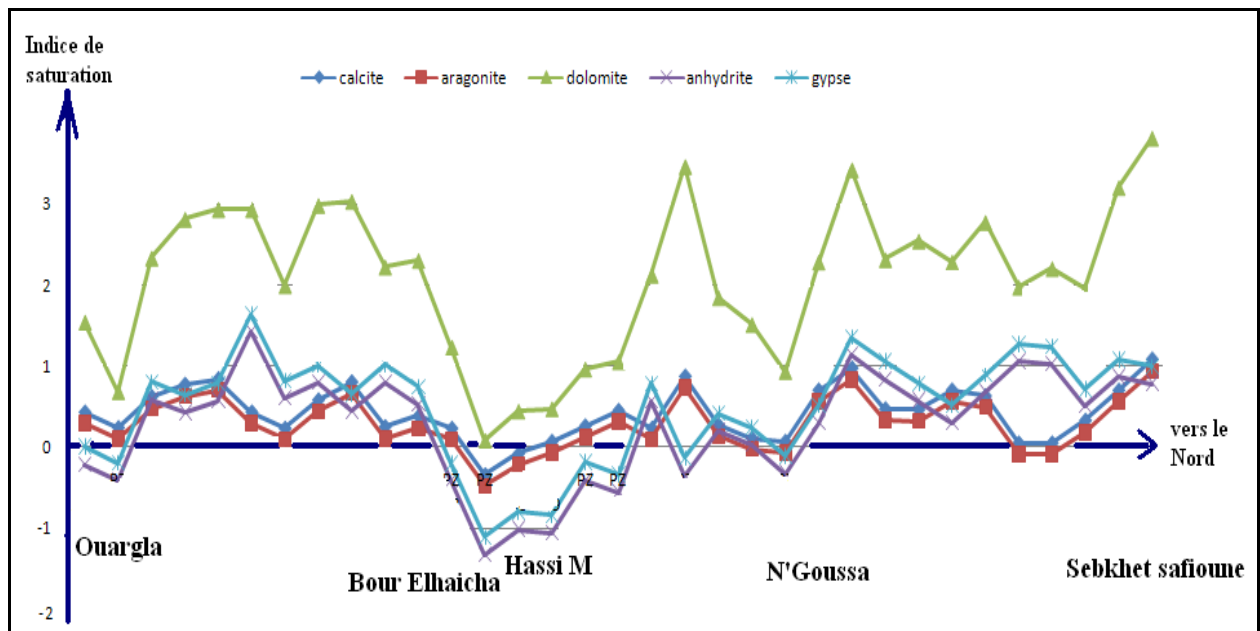


Figure III-5 : Indice de saturation des eaux de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla (CRNA1994-1996)

III -5-1-7-Les rapports caractéristiques :

On appelle rapport caractéristique, le rapport des teneurs de certains éléments chimiques, Ces rapports donnent des indications sur la zone d'alimentation, le contact des eaux avec le milieu solide, ainsi que l'évolution des eaux pendant leur trajet souterraine.

III -5-1-7-1-Couple Ca- SO₄:

On remarque le lien qui existe entre Ca⁺⁺ et SO₄⁻ (Figure III-6) cette corrélation met en évidence que la source principale de ces ions est les sulfates et ceci confirmé par les teneurs élevés de SO₄⁻ due aux dissolutions et lessivage des terrains sulfatés (CaSO₄-2H₂O, CaSO₄).

III -5-1-7-2-Couple Na-Cl:

On a une bonne corrélation entre Na et Cl et si la teneur en Na augmente, la concentration en Chlorure aussi augmente, la majorité des points (nuage des points) sont alignés avec la droite de la dissolution de l'halite (pente 1) ce qui implique que les deux éléments ont peut être la même origine et nous supposons que leur source est principalement due à la dissolution de l'halite. Les teneurs en chlorure et sodium dans les eaux proviennent par lessivages et dissolutions du NaCl contenu dans les niveaux gypseux et anhydritiques existants dans cet aquifère.

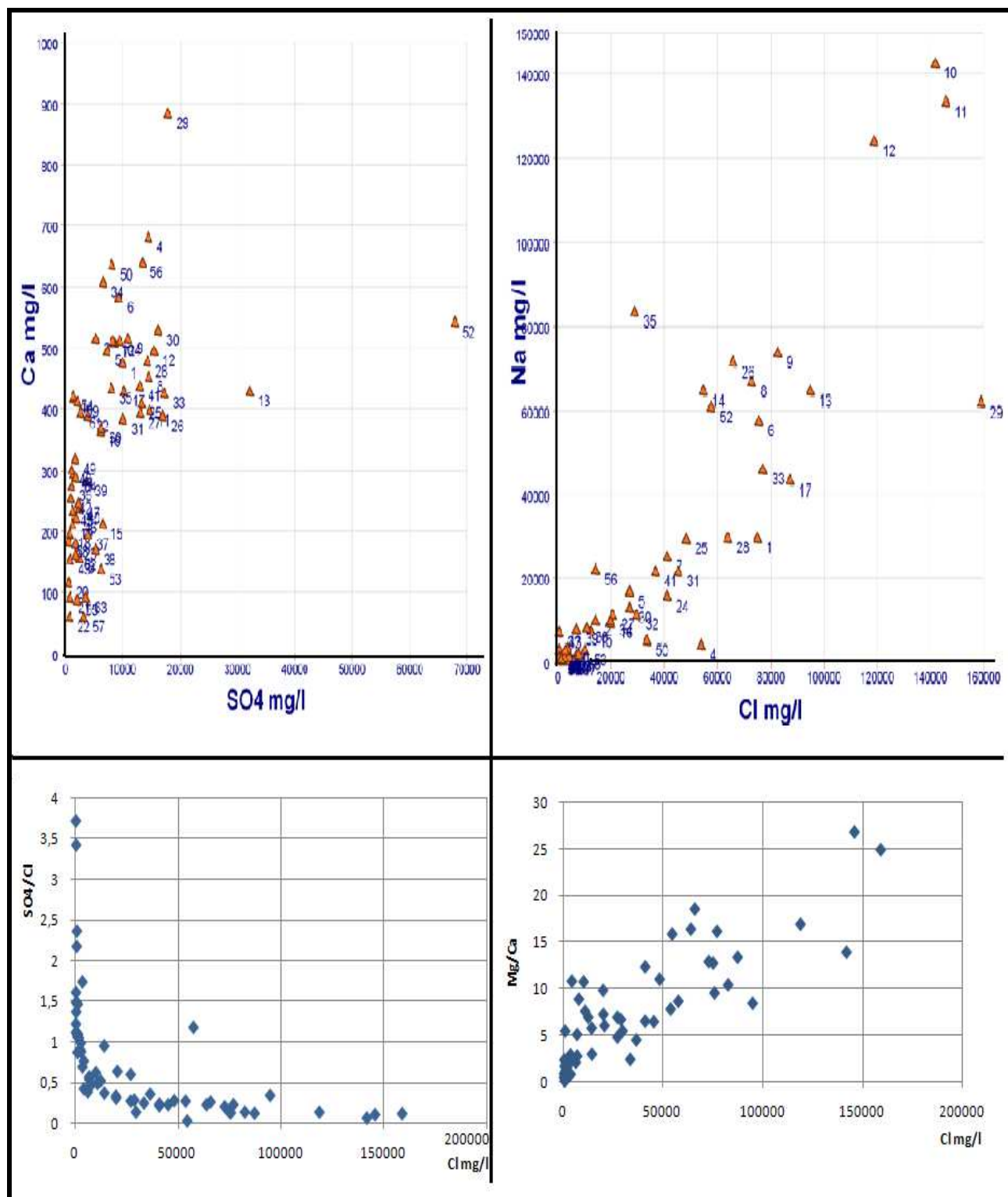


Figure III-6 : Graphes représentatives de quelques corrélations entre les ions des eaux de la nappe phréatique (CRNA1994-1996)

III -5-1-7-3-Couple SO_4/Cl - Cl :

Si le rapport SO_4/Cl augmente, la teneur en chlorure diminue (tend vers 0), on peut dire qu'il y a une prédominance de SO_4/Cl , il implique que les éléments sont disposés selon la branche d'une hyperbole, ces rapports varient d'une manière inversement proportionnelle.

III -5-1-7-4-Couple Mg/Ca – Cl :

On constate que si le rapport de Mg/Ca augmente le Cl augmente, ce qui implique qu'ils ont peut être une même origine, les éléments Ca et Mg proviennent des roches carbonatées (calcaires et dolomies) existantes dans cette nappe, alors que la présence des chlorures dû à la dissolution et lessivages des évaporites (halite).

III -5-1-7-5- $Ca—HCO_3$:

La Figure III-7 montre que le Calcium dissous dans les eaux de la nappe phréatique (CRNA1994-1996) est d'origine évaporitique et s'est fait par la dissolution des sels et des gypses, les points encadrés représentent la majorité des échantillons prélevés qui sont tous Au-dessus de la droite de la pente 1 qui sépare l'origine évaporitique de celle carbonatée. Ce dernier est confirmé par l'abondance des sebkhas et chotts et aussi par les conditions climatique qui caractérisent la région tel que l'évaporation intense, la température élevée, l'insolation, etc.

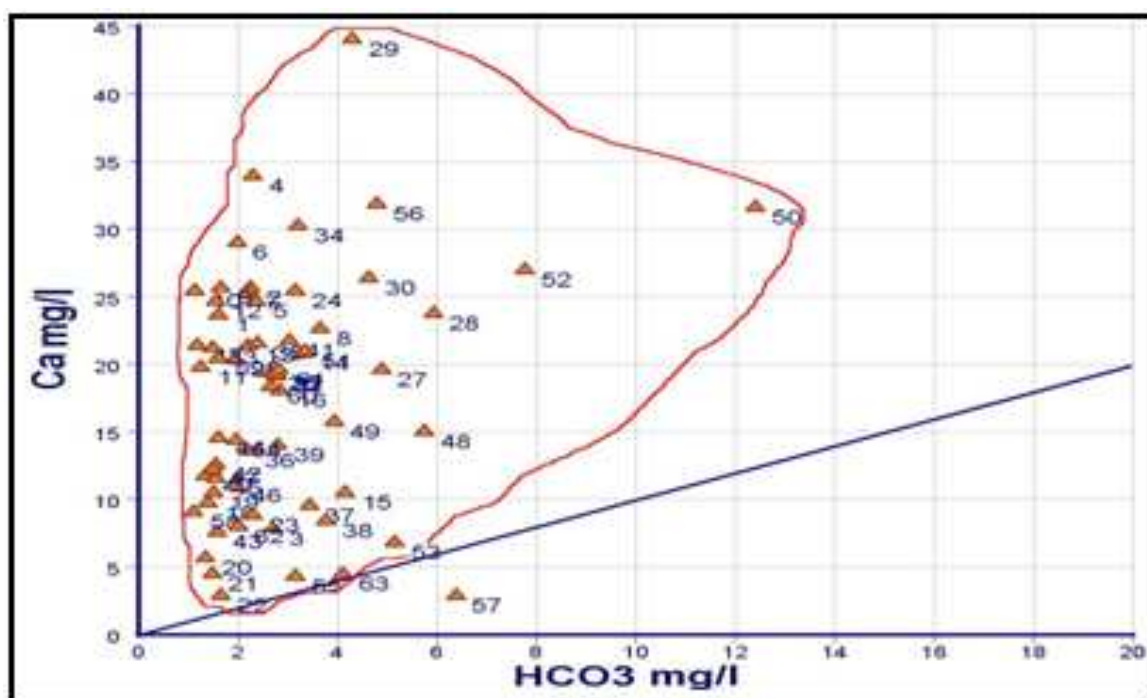


Figure III-7 Couple Ca^{++} - HCO_3^- des eaux de la nappe phréatique cuvette d'Ouargla
(Compagne 1994-1996)

III -5-1-7-6-Tous les éléments en fonction de Cl :

Nous avons une très bonne corrélation entre la somme des cations et anions et la concentration en chlorures, donc a chaque somme (cation +anions) on a une augmentation de Cl (Figure III-8) cela nous laisse supposer que la roche mère dans laquelle l'eau s'écoule est de type évaporitique et ces eaux sont dites des eaux évaporées et nous allons les voir par les isotopes stables dans le chapitre suivant.

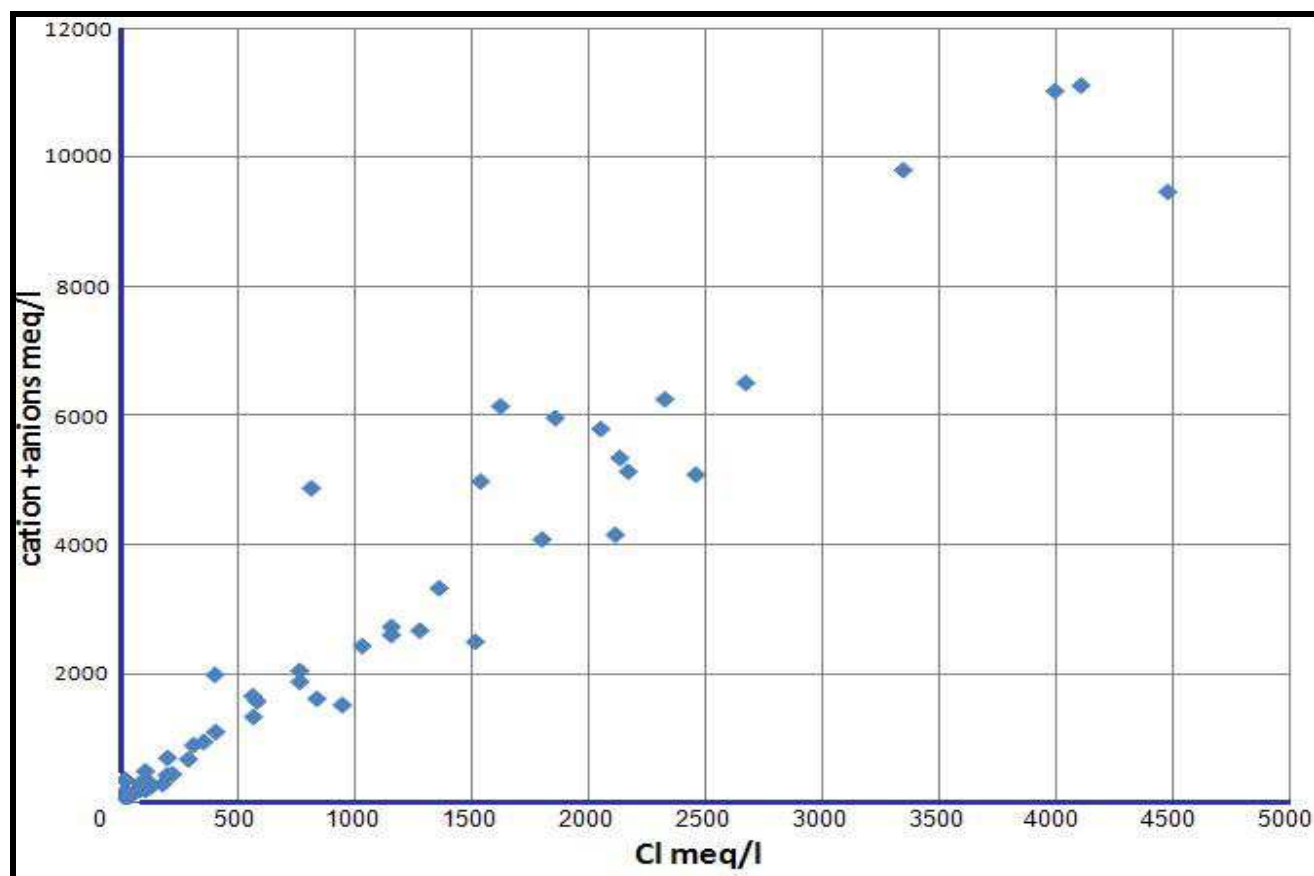


Figure III-8 : Relation entre (cations+anions) Vs Cl des eaux de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla 1994-1996

Chapitre IV : Géochimie isotopique

IV -1-Introduction:

On appelle **isotopes**, des éléments chimiques dont les atomes comportent le même nombre de protons (électriquement positifs) mais un nombre de neutrons (sans charge électrique) différents. Ils ont donc le même numéro atomique (c'est le nombre de leurs protons) mais des masses atomiques différentes (c'est le total de leurs nucléons : protons et neutrons). Comme les propriétés chimiques de ces éléments sont liées au nombre de leurs protons, les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques. Mais comme la masse de leurs atomes n'est pas la même, ils ont des propriétés physiques légèrement différentes. L'identité des propriétés chimiques fait qu'ils sont inclus indistinctement dans des composés les contenant; la différence des propriétés physiques fait qu'eux, ou leurs composés, sont affectés différemment par des transformations physiques telles que fusion, cristallisation, évaporation, etc. (A. FOUCAULT 2009). Par exemple, la vapeur d'eau H_2O , comporte une moindre proportion de ^{18}O que l'eau liquide dont elle est issue. Certains isotopes sont radioactifs et se transforment, au cours du temps, en d'autres isotopes ou en d'autres éléments, d'autres sont stables.

Toutes les études concernant les isotopes nécessitent l'utilisation de **rapports isotopiques**, c'est-à-dire des proportions de deux isotopes d'un même élément. Généralement, on utilise ces rapports par référence à un standard, qui est un échantillon de composition connue avec une grande précision et qui est distribué entre différents laboratoires, ce qui a l'intérêt de rendre leurs mesures à coup sûr comparables.

IV -2-Historique:

Becquerel découvrit en 1886 que l'uranium et ses composés émettent continuellement un rayonnement qui comme les rayons X, traverse d'assez grandes épaisseurs de matière, noircit la plaque photographique, ionise l'air, et rend lumineuse de nombreuses substances. Il apparut de plus, que l'intensité de ce rayonnement ne peut être modifiée, ni par voie chimique, ni par voie physique.

Pierre et Marie Curie, réussirent un peu plus tard à séparer de l'uranite, un élément, le radium (ce qui leur a valu le prix Nobel) dont l'intensité d'émission dépassait celle de l'uranium de plusieurs ordre de grandeur.

Aujourd'hui, Il est bien établi que ce rayonnement résulte d'une transformation spontanée de noyaux atomiques instables d'un élément en noyaux d'autres éléments: c'est le phénomène de la radioactivité naturelle. Elle peut bien être provoquée dans les éléments légers par bombardement de noyaux de ces éléments: la radioactivité ainsi observée est dite artificielle.

Grâce aux travaux de Pierre et Marie Curie, Becquerel, et Rutherford, il a été établi que ce rayonnement renferme trois catégories de rayons qui se distinguent par leur pouvoir de pénétration et d'ionisation: Alpha, Bêta et Gamma. Depuis ces découvertes de nouvelles voies ont été ouvertes à la science en général et à la science de la terre en particulier.

Dés l'année 1947, l'américain Kanem (1947) découvre l'isotope ^{14}C , son compatriote Simson en étudiant le rayonnement cosmique met en évidence sa composante neutronique. Le chimiste Libby (1947) de l'université de Chicago pose les hypothèses de bases de la méthode de datation par le radiocarbone: existence de ^{14}C dans la stratosphère, et participation de ^{14}C au cycle général du carbone. Ces deux hypothèses furent rapidement vérifiées par Libby. Des auteurs dont Arnold et Libby (1949) furent les premiers essais de datation par le radiocarbone sur du bois provenant de nécropoles égyptiennes calées chronologiquement, et les premières datations confirmèrent les âges historiques prouvant ainsi l'efficacité de la méthode de datation au radiocarbone.

La mise en évidence des isotopes naturels et artificiels, la mise au point du spectromètre de masse et le scintillateur liquide, ont contribué à l'émergence d'une discipline dénommée:

Hydrologie Isotopique.

La datation des eaux souterraines par le radiocarbone a été proposée par Munich en 1957, et élaborée au symposium de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique à Tokyo (AIEA, 1963).

Actuellement l'utilisation de ces techniques en hydrologie est largement développée en sa méthodologie analytiquement et théoriquement détaillée. Il en a été mis en place à travers le monde, un réseau de stations de collecte des eaux de précipitations pour définir des niveaux de référence notamment pour le deutérium, l'oxygène-18, et le tritium. Il a été de même pour le radiocarbone dont l'exploitation a servi à la mise en évidence des différentes variations climatiques dénommées: **Paléoclimat**.

Les explosions thermonucléaires au cours des années 1950 à 1960 ont eu pour conséquence un accroissement très important des teneurs en tritium dans les précipitations, jusqu'au moratoire sur les essais nucléaires aériens en 1963, date à partir de laquelle les teneurs ont commencé à diminuer. L'estimation de la recharge par la localisation du pic de tritium des années soixante a été efficacement employée dans la zone non saturée pendant une vingtaine d'année. La mise en évidence du pic de tritium thermonucléaire de 1963 à 12 et 20 m de profondeur sur deux profils, effectués dans les sables dunaires de la région de Louga au Sénégal, a permis d'estimer l'infiltration efficace locale.

IV -3-Techniques isotopiques :

Les traceurs naturels isotopiques permettent d'obtenir des informations concernant l'âge, l'origine des eaux, et leur vitesse d'écoulement. Ces traceurs isotopiques donnent en particulier accès à des indications sur l'origine et le temps de résidence des eaux souterraines, c'est-à-dire, en termes de gestion, sur les sources d'alimentation du réservoir et sur le taux de renouvellement de l'eau dans ce réservoir.

Les isotopes constitutifs de la molécule d'eau (^{18}O ; ^2H ; ^3H) sont caractérisés par le fractionnement isotopique. Ce fractionnement est régi par des phénomènes tels que: l'évaporation, la condensation, et la diffusion d'une part, et par les réactions d'échanges isotopique et cinétique d'autre part. Ces réactions obéissent aux lois d'action de masse. Le degré de fractionnement est une fonction complexe de la température, la pression partielle de la vapeur d'eau au dessus de la phase liquide, et de la salinité.

IV -4-Isotopes stables:

La molécule d'eau est constituée de deux éléments (O et H) possédant chacun trois isotopes stables ou radioactifs. L'abondance relative d'un isotope dépend de plusieurs Facteurs, dont le lieu de précipitation de la pluie (altitude, latitude, distance de l'océan), le cycle d'évaporation-condensation, les échanges avec les minéraux, le mélange avec l'eau magmatique, etc. L'abondance relative moyenne de ces isotopes (FRITZ et FONTES, 1980 In GUENDOUZ 1985) est:

$$^1\text{H} : 99,984\% \quad ^{16}\text{O} : 99,76\% ; \quad ^{18}\text{O} : 0,10\%.$$

$$^2\text{H} : 0,015\% \quad ^{17}\text{O} : 0,037\%;$$

IV -4-1-Variation isotopique naturelle :

Cas de l'eau:

Les isotopes rares obéissent aux mêmes lois de la thermodynamique chimique que les isotopes banales. Lors de changement de phase, il se produit des transferts isotopiques entre phases, par exemple, entre les phases liquides et vapeur:



IV -4-2-Abondance isotopique ou Delta pour mille (δ ‰)

Dans un échange isotopique de l'atome d'oxygène entre deux phases de la molécule d'eau:



La mesure de la différence relative des rapports isotopiques de ces deux phases est suffisante, de plus, elle est plus facilement mesurable que les rapports eux mêmes (Friedman et al. 1977 In GUENDOUZ 1985). Cette différence que l'on nomme exprime la concentration en isotope lourd d'un échantillon relativement à un étalon; elle est exprimée en part pour mille:

$$\delta = (R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}} - 1) * 10^3$$

Ou, R (échantillon), est le rapport isotopique de l'échantillon ou teneur en isotope lourd, ou concentration de l'espèce isotopique rare, et R (standard), le rapport isotopique du standard.

IV -4-3-Facteur de fractionnement: α

Lors des réactions chimiques et différents processus physiques, les molécules contenant des isotopes différents subissent une séparation ou un fractionnement isotopique. Le facteur de

fractionnement est exprimé généralement par rapport à la valeur δ que l'on mesure par

$$\text{spectrométrie de masse:} \quad \alpha = (\delta_1 + 10^3) / (\delta_2 + 10^3)$$

Les réactions isotopiques obéissent à la loi d'action de masse sous conditions d'équilibre, le facteur de fractionnement est alors relié à la constante d'équilibre K par:

$$\alpha = K^{1/n} = R_{\text{échant 1}} / R_{\text{échant 2}}$$

où, n, est le nombre d'atomes échangés (Friedman et al., 1977 In AMMARY 2007). On note $K = a$, si la réaction est monoatomique. Le facteur α est corrélé avec la température par:

$$10^{+3} * \ln \alpha = a + 10 T^{-1} + c T^{-2}$$

T, étant la température en degré kelvin; a, b et c, étant des paramètres empiriques propres à chaque système (Fritz et Fontes.1980 In AMMARY 2007).

IV -4-4-Facteur d'enrichissement: ϵ

La plupart des facteurs de fractionnement isotopique sont proches de l'unité. C'est la raison pour laquelle on exprime le facteur ϵ en part pour mille. Cette valeur est appelée: facteur d'enrichissement, exprimée par:

$$\epsilon = (\alpha_{1-2} - 1) \cdot 10^3$$

ϵ peut prendre des valeurs positives ou négatives, et on peut en obtenir une approximation en reprenant la définition de α et en tenant compte du fait que δ est très petit devant mille par:

$$\epsilon = \delta_1 - \delta_2$$

IV -4-5-Standards internationaux:

Toute espèce chimique est exprimée par rapport à un standard approprié conventionnellement admis. L'étalon utilisé pour le deutérium (^2H) et l'oxygène-18 (^{18}O), est le SMOW ou le Vienna SMOW: une eau océanique moyenne. Les teneurs en espèces chimiques du SMOW ou VSMOW, sont des standards fixés d'après l'analyse d'un échantillon moyen d'eau de l'océan Atlantique, prélevé à la verticale d'un lieu situé à 0° de latitude et 0° de longitude, et dont la composition isotopique est: $\delta^{18}\text{O} = 0 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = 0 \text{ ‰}$

Le standard, VSMOW, est distribué par l'AIEA aux différents laboratoires qui sont appelés à exprimer les résultats d'analyses par rapport au VSMOW (Gonfiantini, 1984 In AMMARY 2007). Pour le ^{13}C , l'étalon international, est le PDB (Peedee Belemnite americana); une calcite biogénique marine (rostre de la Belemnite Americana de "la Peedee formation") du crétacé supérieur de la Caroline du sud aux USA (Craig, 1957).

IV -4-6-Composition isotopique lors d'échange de base:

Les processus de changement de phase dans le cas de l'eau peuvent s'effectuer suivant deux modes: la condensation et l'évaporation.

IV -4-6-1-Condensation:

La condensation est une réaction qui a lieu à l'équilibre. Le fractionnement isotopique entraîne un enrichissement en isotopes lourds de la phase liquide au détriment de la phase vapeur (Craig, 1961, Fontes, 1976). Dans le cas de précipitation, la masse de vapeur qui leur donne naissance est soumise à ce processus de condensation chaque fois que, au voisinage de la saturation la température s'abaisse, ou la pression augmente. Dansgaard, 1964 a montré que la teneur en isotopes lourds des précipitations diminue avec la température de condensation. Il a

établi les relations suivantes à l'échelle globale entre les teneurs en Oxygène 18 et en ^2H et la température moyenne annuelle au niveau de sol pour la station océaniques, $T < 10^2 \text{ C}$.

$$\delta^{18}\text{O} = 0,69T^2\text{C} - 13.6 \quad \delta^2\text{H} = 5.6 T^2\text{C} - 100 \text{ \%}.$$

Toutefois, cette relation n'est en générale pas vérifiée à l'échelle locale et en particulier pour les stations très continentales ou celles de moyenne et basses latitudes à saison contrastées. Cette dépendance entre les teneurs en isotopes lourds des précipitations et les températures est importante puisqu' elle conduit à des variations de la composition isotopique des précipitations en fonction des paramètres géographiques ou paléogéographiques suivantes: La latitude, l'altitude, la saison et la période climatique (Fontes, 1976).

A l'échelle du globe, les teneurs en ^{18}O et ^2H des précipitations d'origine océaniques qui sont corrélés linéairement à la température de condensation sont donc corrélés entre elles de façon également linéaire, la relation:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ (Craig 1961, Dansgaard, 1964)}$$

Est en général acceptée pour les précipitations d'origine océanique et à l'échelle globale. La constance de la pente 8 de cette relation montre que la condensation est un phénomène qui a lieu à l'équilibre. Toutefois, des variations locales de pentes peuvent avoir lieu; elles seraient dues à des effets d'évaporation cinétique en cours de précipitation.

L'excès en deutérium $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$ ou ordonné à l'origine de la corrélation des précipitations d'origine océanique est $d = +10 \text{ ‰}$. Cependant cette valeur peut devenir plus élevée, $+22 \text{ ‰}$ en méditerranée orientale (Nir, 1967 In GUENDOUZ 1985), $d = +13,4 \text{ ‰}$ à Alexandrie, Egypte (Yartsever et Gat 1981 In GUENDOUZ 1985). La valeur du paramètre (d) est liée à l'humidité relative de l'air et à la température de l'interface océan-atmosphère dans les zones de formation des masses de vapeur atmosphérique (Jouel et Merlivat, 1979 In GUENDOUZ 1985).

IV -4-6-2-Evaporation:

L'évaporation est une réaction qui à lieu dans des conditions de non équilibre. Les variations isotopiques engendrées au cours de l'évaporation d'une masse d'eau, consistent en un enrichissement de la fraction restante du liquide en isotope lourds. Le fractionnement isotopique est alors régi non seulement par le partage à l'équilibre mais aussi par des effets cinétiques dus à des vitesses de diffusion différentes des molécules d'eau dans l'air humide.

L'ensemble des résultats obtenus expérimentalement (Craig et al, 1963, fontes et Gonfiantini, 1967 In GUENDOUZ 1985) montrent que les enrichissements en ^{18}O et en deutérium causés par l'évaporation des masses d'eau est un phénomène complexe qui fait intervenir différents paramètres: température, vitesse d'évaporation et teneur en eau de l'atmosphère. Il est bien établi que ce processus d'évaporation hors d'équilibre est caractérisé par une droite de pente variable et inférieure à 8.

IV -4-7- Relation: $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$

D'une façon générale, aussi bien sur terre que sur les océans, les teneurs en ^{18}O et ^2H des eaux de pluies vérifient la droite des eaux météoriques mondiales (DMM) de Craig (1961), d'expression: $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰ SMOW}$, appelée GMWL (Global Météorique Water Line). Cependant, localement et notamment dans les mers fermées et sur les continents où le recyclage de la vapeur est important, l'excès en deutérium ($d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$) peut être plus grand que 10 (Nir, 1967 In AMMARY 2007). Celle des eaux de la Méditerranée orientale présente un excès en deutérium de 22 ($\delta^2\text{H} = 8^{18}\text{O} + 22 \text{ ‰ SMOW}$: (Gat et Yourtsever, 1981 In AMMARY 2007).

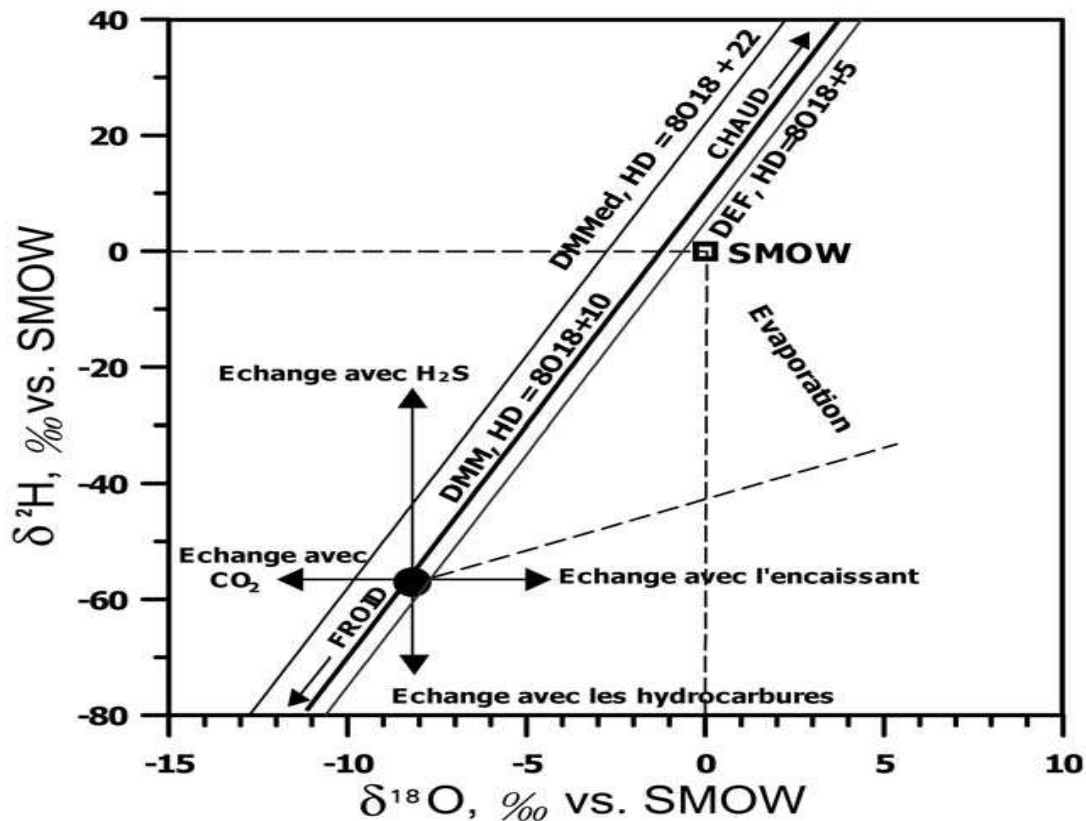


Figure IV-1 : Domaine de répartition des eaux naturelles sur diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$

MOULLA A 2005

La pente est inférieure à 8, ceci traduit une ré-évaporation des gouttes de pluies en cours de chute, en milieu non saturée. Cette diminution de la pente est due à l'effet de fractionnement cinétique, lui-même, lié à la différence entre les taux de diffusivité des isotopes. La tendance horizontale d'enrichissement en ^{18}O (Figure IV-1) indiquerait un processus d'échange avec l'encaissant rocheux.

Dans la zone non saturée du sol, qui est le siège d'un fractionnement de type cinétique entre l'eau et la vapeur du sol, (Barnes et Allison 1988 In AMMARY 2007) montrent que les teneurs isotopiques des eaux des sols, sont également corrélées selon des droites décalées par rapport à la DMM, dont la pente varie de 2 à 5.

IV -4-8-Application de la relation: $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$

Les applications de cette corrélation sont multiples en hydrologie: les teneurs en deutérium et oxygène-18 des eaux continentales, de surface ou souterraines, résultent des teneurs isotopiques des précipitations dans les zones de recharge.

L'étude des isotopes stables ^{18}O et ^2H des eaux de pluies et souterraines permet de retrouver l'origine des masses humides qui ont engendré les précipitations.

Dans les zones humides, les eaux souterraines ont pratiquement le même contenu isotopique que celles des précipitations, ce qui atteste d'une recharge récente. En revanche, en zones arides et semi- arides, le contenu isotopique diffère quelques fois de celui des précipitations actuelles.

D'autre part, la présence de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ très appauvris suggèrent des précipitations témoignant d'un climat plus froid; il s'agit alors d'une Paléorecharge (Fontes, 1976).

IV -4-9-Teneur en isotopes stables des précipitations:

La comparaison entre les teneurs en isotopes lourds des précipitations et des eaux souterraines permet de préciser leur origine, leur mode de recharge et leur histoire, ainsi que d'éventuel mélange entre différents types d'eau.

IV -4-10-Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations à Ouargla :

Des mesures en isotopes de l'eau sont faites sur des échantillons collectés par la station d'Ouargla, lors de la mise en place des stations de mesure des teneurs en isotopes stables par OMM (organisation météorologique mondiale) et AIEA ont permis de tracer le diagramme $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ suivant : (Figure IV-2).

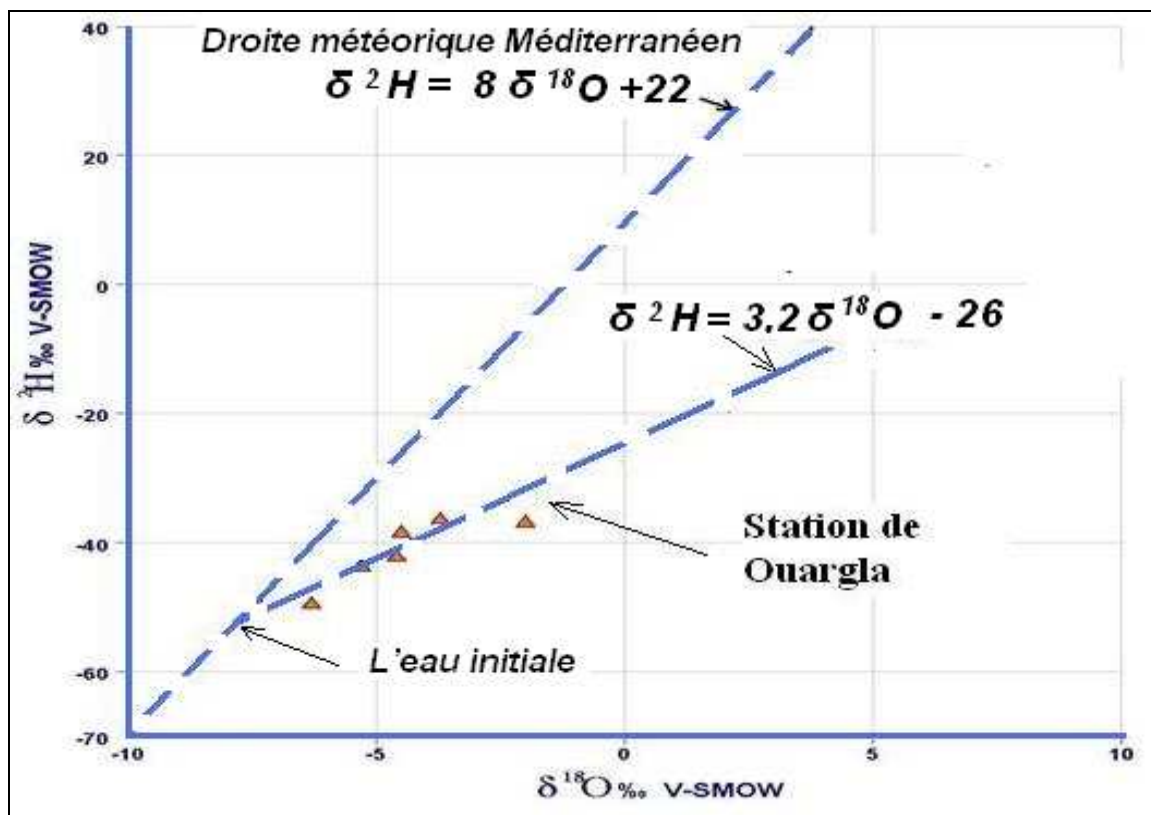


Figure IV-2 : Relation $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations (Guendouz, 1985)

Les points représentatifs s'alignent sur une droite d'évaporation dans un diagramme $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ (Figure IV-2) l'équation de ce droit est:

$$\delta^2\text{H} = 3,2\delta^{18}\text{O} - 26$$

L'intersection de cette droite avec celle de précipitation d'origine méditerranéenne (Tunis-Carthage), donne une teneur en Oxygène 18 = -8 ‰vs SMOW Et un $\delta^2\text{H}$ = -55 ‰vs SMOW. Ces valeurs représentent probablement les teneurs initiales en isotopes lourds des précipitations avant leur chute et avant leur évaporation dans les basses couches de l'atmosphère. (Guendouz, 1985).

IV -4-11-Teneur en isotopes stables des eaux souterraines

La répartition des teneurs en ^{18}O sur la cuvette d'Ouargla de différentes nappes est représentée sur la carte suivante (Figure IV-3) (Annexe III) Pour la nappe phréatique les teneurs sont très dispersées et enrichies en ^{18}O , et pour les nappes du CT et du CI, les valeurs sont plus appauvries et homogènes.

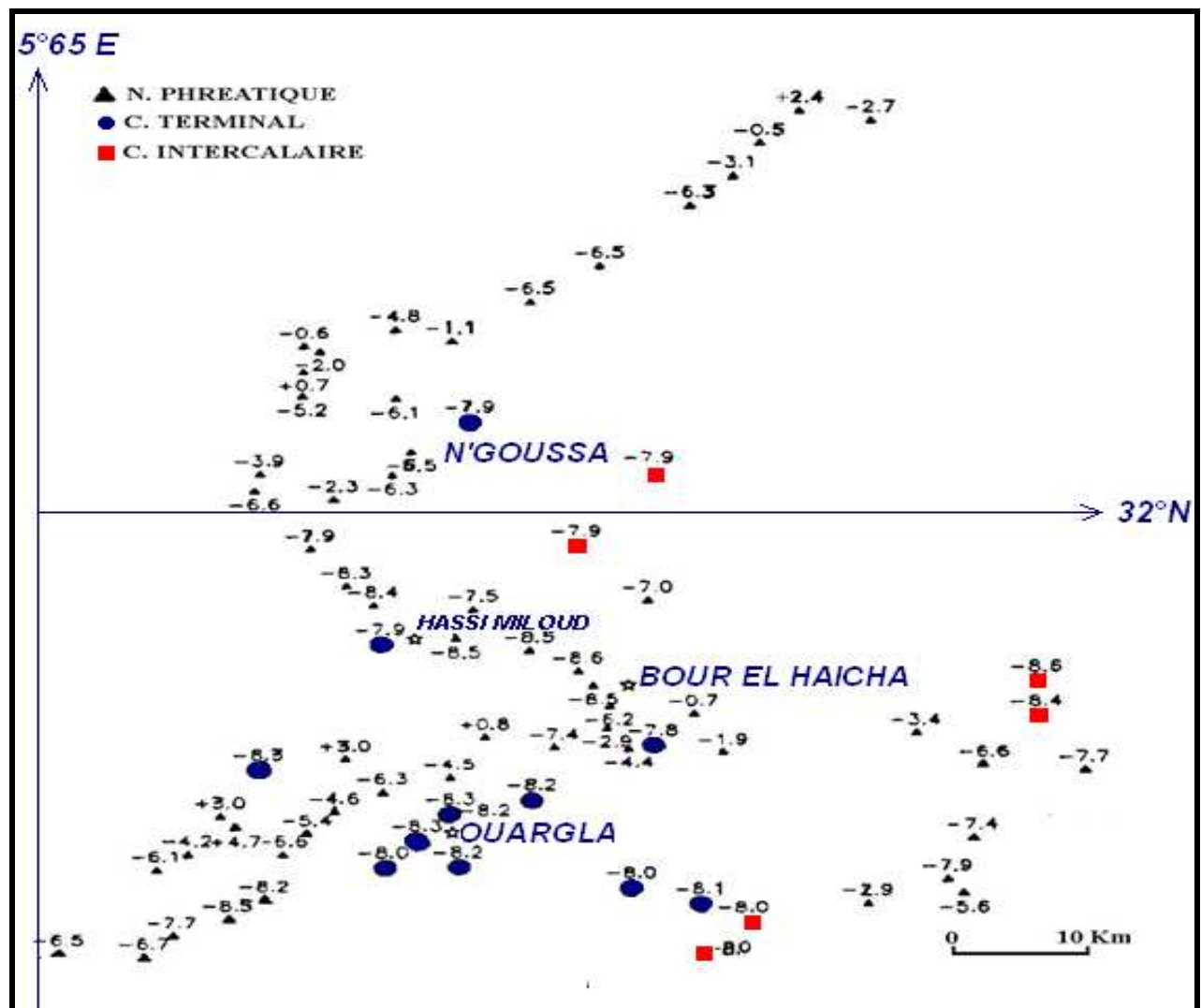


Figure IV-3 : Répartition des teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe phréatique, CTet CI sur la cuvette d'Ouargla (Guendouz et Moulla, 1996)

IV -4-11-1-Nappe du continentale intercalaire:

Les teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe du continentale intercalaire à l'échelle de la cuvette sont homogènes et prennent le caractère appauvri en cet isotope. Les valeurs sont variant entre -7,88 et -8,02 ‰ Vs SMOW avec une moyenne de -7,9 ‰ Vs SMOW (Annexe III).

IV -4-11-2-Nappe du complexe terminal

Les teneurs en Oxygène 18 des eaux de la nappe de Mio-Pliocène et celle du calcaire montrent de faibles variations, pour les 18 forages échantillonnés, les teneurs varient de -8,23 à -7,85 ‰ VS SMOW (Annexe III) pour la première nappe et de -8,32 à -7,88 ‰ VS SMOW pour la deuxième nappe.

IV -4-11-3- La nappe phréatique:

Les teneurs en ^{18}O des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla montrent une grande dispersion, elles oscillent entre -8,84 et +3,42 ‰ Vs SMOW (Annexe III). Elles montrent un caractère assez enrichi en isotopes stable ce qui témoigne de leur caractère évaporé et confirment ainsi le processus d'acquisition de la minéralisation qui se fait conjointement par dissolution et évaporation, Comparée aux eaux de pluie sur la région Ouargla, ces eaux reflètent le caractère évaporé des eaux de pluie mais aussi, une origine différente qui pourrait correspondre à des eaux de mélange entre différentes masses d'eau.

IV -5-Les isotopes radioactifs:

IV-5-1-Principe de datation radiométrique:(*Rappel général sur les isotopes radioactifs, d'après documents consultés au CRNA*)

Toutes les datations radiométriques sont basées sur le phénomène de désintégration des éléments radioactifs naturels, qui est le changement de composition de leur noyau atomique. Cette désintégration est marquée par une radioactivité qui se manifeste par un ou plusieurs des trois phénomènes suivants :

- radioactivité a (alpha) : émission d'un noyau d'hélium (2 neutrons et 2 protons)
- radioactivité b (bêta) : émission d'un électron
- radioactivité g (gamma) : émission de photons de haute énergie

Pour chaque atome d'un corps radioactif, il existe une certaine probabilité de se désintégrer (c'est-à-dire de voir la composition de son noyau se modifier) pendant un intervalle de temps donné. En pratique, cela signifie que, durant un petit intervalle de temps, une quantité proportionnelle à la masse du corps va se désintégrer. La masse du corps va diminuer d'autant, et le processus va se continuer, la quantité qui se désintègre diminuant toujours, puisque la masse diminue. Cette décroissance est exponentielle et obéit à la loi :

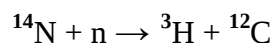
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 étant le nombre d'atomes au début de la réaction, N ce nombre au temps t et λ une constante qui dépend de l'élément

Il n'est pas possible de caractériser ce phénomène par sa durée totale puisque, théoriquement, il restera toujours une certaine quantité de l'élément radioactif. On utilise, pour ce faire, le temps que met le corps à se désintégrer de moitié, que l'on nomme la période radioactive de ce corps ou, improprement, mais ce terme est consacré, sa demi-vie. Les périodes de radioactivité sont très diverses, par exemple 5730 ans pour le ^{14}C , 1,31 millions d'années pour le ^{40}K , 4,51 millions d'années pour le ^{238}U .

IV -5-2-Tritium: ^3H

Le tritium isotope de l'hydrogène, (Figure IV-4) de période 12,43 ans, est produit naturellement dans l'atmosphère par interaction entre les neutrons cosmiques libres et les noyaux d'azote-14 selon la réaction suivante:



Lors des essais nucléaires de surface de 1952 à 1963, le tritium a été produit artificiellement en abondance dans l'atmosphère. Sa concentration est passée dans l'hémisphère nord de 25 à 2200 UT en 1964. Depuis le moratoire de 1963 sa concentration décroît pour tendre actuellement vers des activités faibles de l'ordre de quelques unités :

1UT = 7,1 désintégration de tritium par minute et par litre d'eau (d/mn/l).

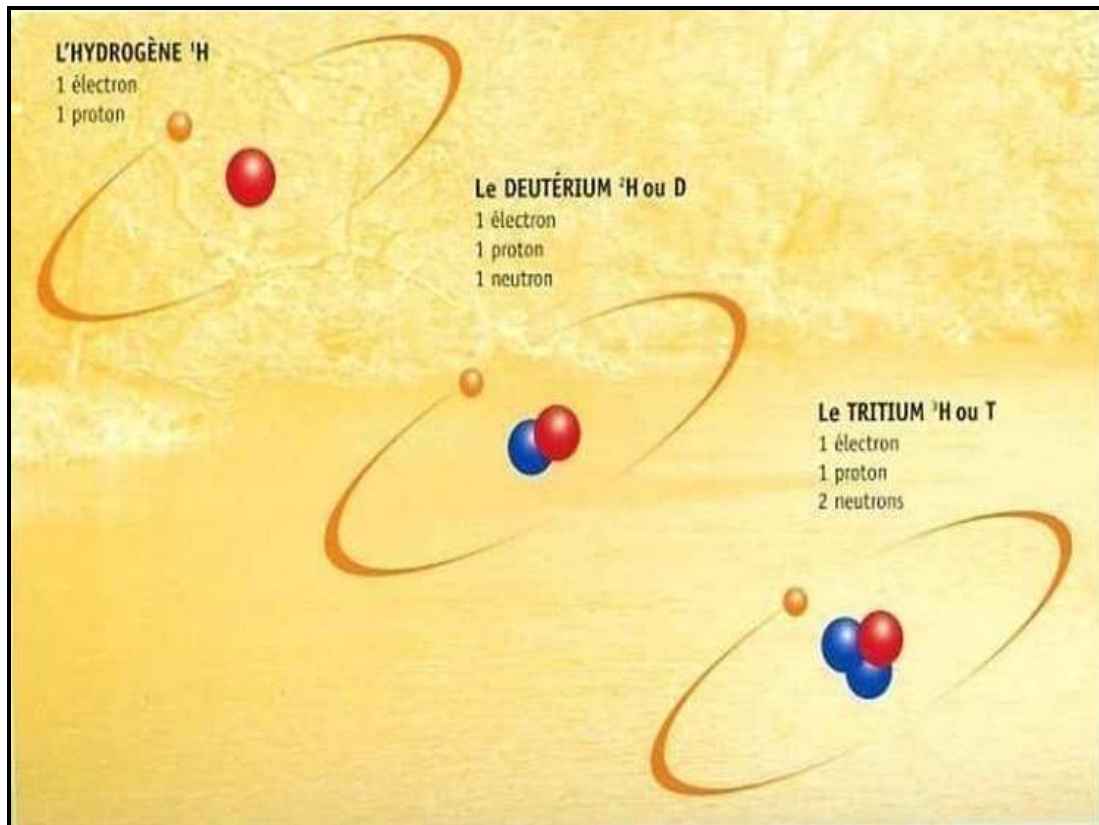


Figure IV-4 : Les isotopes de l'hydrogène (SFRP 2002).

IV -5-2-1-Tritium artificiel:

Le tritium a été produit par tous les types de tests nucléaires en atmosphère, sachant que les bombes à fission produisent quatre fois moins de tritium que les bombes à fusion. La quantité de tritium injectée dans l'environnement a été énorme. Entre octobre 1952 et la fin de 1962, approximativement 600 kg de tritium ont été injectés dans l'atmosphère par les tests russes, américains et anglais.

Les explosions en atmosphère ont cessé en 1963 quand ces pays ont signé un traité de limitation des tests. 1963 est l'année où les activités en tritium dans l'atmosphère ont atteint leur maximum. On parle du «pic de 1963». Par la suite, seules la Chine et la France ont effectué de tels tests produisant dans l'atmosphère environ 20 kg de tritium entre 1967 et 1980. A partir de 1980, aucune explosion en atmosphère n'a eu lieu. Environ 75% de tout ce tritium a été injecté dans l'hémisphère nord (Figure IV-5) de la stratosphère, et le reste dans la partie équatoriale de la stratosphère. La stratosphère au dessus du pôle sud n'a subi aucune injection de tritium.

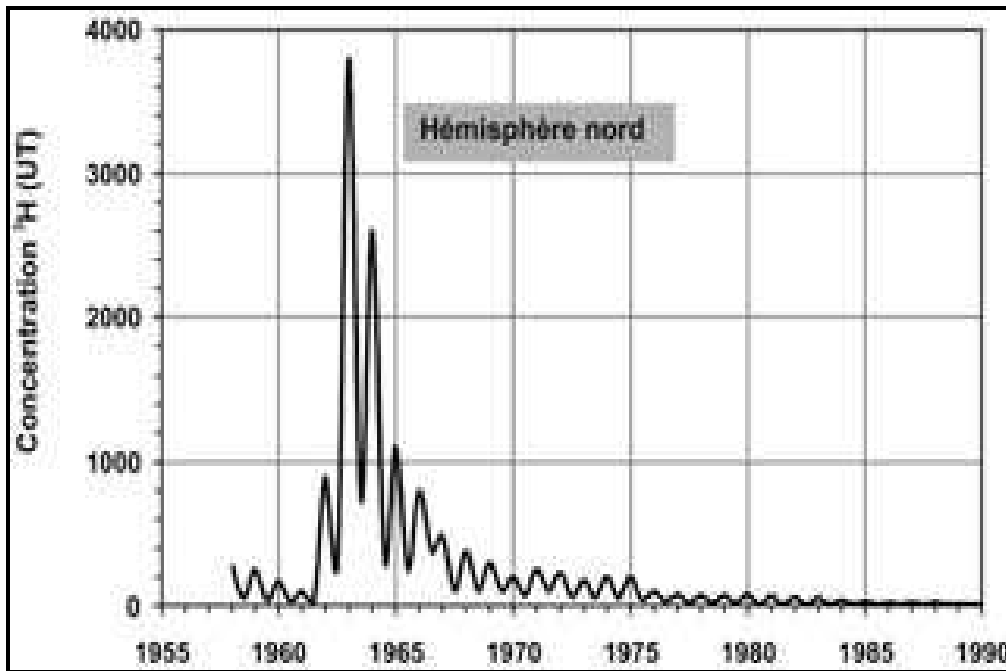
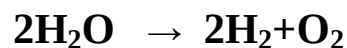


Figure VI-5 : Courbe lisse représentant la teneur moyenne en ^3H des précipitations au-dessus de la surface continentale de l'hémisphère Nord. (AIEA 2008)

IV -5-2-2-Méthode d'enrichissement électrolytique du tritium:

Cette méthode est relativement simple et nécessite peu de manipulation ou de surveillance si ce n'est les précautions contre l'accumulation d'hydrogène et les risques d'explosion associés. La conductivité de l'eau est augmentée par l'ajout de Na_2O ou de NaOH , l'eau est ensuite décomposée par le passage d'un courant électrique :



Le fractionnement isotopique de l'hydrogène est élevé, 90 % du tritium de l'échantillon restant dans l'eau. Ainsi, si le volume d'eau diminue d'un facteur 10, l'enrichissement est environ d'un facteur 9.

A la fin de l'électrolyse, l'échantillon est distillé à nouveau pour supprimer l'électrolyte avant la mesure de la radioactivité.

IV -5-2-3-Traçage par le Tritium:

L'estimation quantitative des teneurs en tritium utilise la distribution de ces teneurs dans les précipitations (fonction entrée) à la quelle sont comparées les teneurs mesurées sur les eaux prélevées, ce qui permettra de préciser plusieurs paramètres du système:

Paramètres de dispersion, vitesse d'infiltration, taux de renouvellement. Dans le cas de mélange des eaux de recharge successive, ces teneurs pourraient être estimées par model de mélange

L'évaluation qualitative est basée sur une estimation empirique des teneurs en tritium qui permettent d'identifier :

Les eaux infiltrées avant ou après les essais Thermonucléaire de 1952-1962.

Mélange des eaux, présence de recharge récente.

IV -5-2-4-Le tritium dans les eaux des précipitations:

L'IAEA mesure à l'échelle mondiale les concentrations isotopiques dans les eaux de précipitations. Les activités du tritium dans l'hémisphère sud sont largement inférieures à celles de l'hémisphère nord. Les plus grosses activités dues au pic de 1963 ne sont arrivées dans l'hémisphère sud qu'à partir de 1964-1965 du fait des circulations atmosphériques globales.

La répartition des activités en tritium à l'échelle d'un pays est fonction essentiellement des zones climatiques et des sources industrielles de tritium.

Les teneurs en tritium des quelques précipitations recueillies aux stations de Ouargla et Bini-Abbès sont disponibles d'après les travaux de GUENDOUZ en 1985. Les mesures ont été effectuées par l'AIEA (1964-1972).

Les deux échantillons sont recueillis lors des orages en avril 1983 ont fourni que;

-à Laghouat la teneur en tritium =12,7 UT (lame d'eau est de 30mm)

-à Ouargla la teneur en tritium =14,7 UT (lame d'eau est de 12mm) (GUENDOUZ 1985).

IV -5-2-5-Tritium dans les eaux souterraines:

IV -5-2-5-1-Nappes profondes (CI et CT):

Après le dosage du tritium par le compteur à scintillation liquide sur quatre échantillons prélevés de la nappe du continental intercalaire, le résultat montre que les activités en cet isotope sont très faibles, dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1,1 UT.

Pour la nappe du complexe terminal, les forages de Elgherbouz, Ain Smara chott, et Elbour représentent des teneurs faibles en tritium, allant de 2,6 à 4,3UT .les autres teneurs sont très faibles pour la majorité des échantillons prélevés de cette nappe, autrement, les valeurs sont inférieure à 2UT, (Tableau IV-1).

Tableau IV-1 : teneur en tritium des eaux du CI et CT. Cuvette d'Ouargla 1994-1996

Code	Désignation Points d'eau		H-3 U.T. $\pm$ s
1	CT Station Pompage	Miopliocène	\
2	CT Irrig. Rouissat	"	1.4 $\pm$ 0.2
3	CT Irrig. Rouissat	"	0.8 $\pm$ 0.1
4	CT Frane	Sénonien	0
5	CT El-Bour	"	2.6 $\pm$ 0.4
6	CT Hai-Bouزيد	Miopliocène	0.6 $\pm$ 0.1
7	CT Dom. Said Otba	Sénonien	0.6 $\pm$ 0.1
8	CT Bamendil	"	0.1 $\pm$ 0.1
9	CT Ch. EDEMIAO	"	0
10	CT El Gherbouz	"	0.4 $\pm$ 0.1
11	CT El Gherbouz	"	4.3 $\pm$ 0.7
12	CT Ain-Smara	Miopliocène	1.8 $\pm$ 0.3
13	CT Ain-Smara Chott	"	3.7 $\pm$ 0.6
14	CT ITAS 1	Sénonien	1.1 $\pm$ 0.2
15	CT ITAS 2	Miopliocène	0.7 $\pm$ 0.1
16	CT Transat	Sénonien	0.2 $\pm$ 0.1
17	CT N'gouça	"	1.5 $\pm$ 0.2
18	CT Hassi-Miloud	"	0.7 $\pm$ 0.1
19	CI Hadeb 1	Albien	0
20	CI Hadeb 2	"	0
21	CI Aouinet Moussa	"	0.1 $\pm$ 0.1
22	CI El-Bour	"	1.1 $\pm$ 0.2

Les teneurs faibles voir nulles en tritium dans les deux nappes suggèrent qu'il s'agit d'une eau infiltrée avant les années des essais thermonucléaires en 1952-1962 ; dont l'âge dépasse 50 ans (portée théorique du tritium), Dans ce cas, l'utilisation d'autres traceurs isotopique comme le carbone 14 peut apporter de nouvelles informations concernant les âges de ces eaux, et on vira plus loin par cet isotope.

IV -5-2-5-2-Nappe phréatique :

Pour la nappe phréatique les teneurs en tritium des eaux sont relativement basses pour la majorité des échantillons prélevés Tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Teneur en tritium des eaux de la nappe phréatique cuvette d'Ouargla 1994-1996

Désignation Points d'eau	H-3 U.T. $\pm$ s	Désignation Points d'eau	H-3 U.T. $\pm$ s
PZ 07	0	PZ 92	3.7 $\pm$ 0.6
PZ 09	1.2 $\pm$ 0.3	PZ 93	5.1 $\pm$ 0.8
PZ 10	1.6 $\pm$ 0.3	PZ 96	4.8 $\pm$ 0.8
PZ 18	6.2 $\pm$ 1.1	PZ 98	1.1 $\pm$ 0.2
PZ 19	5.6 $\pm$ 0.9	PZ 103	1.3 $\pm$ 0.2
PZ 20	8.1 $\pm$ 1.3	PZ 104	3.0 $\pm$ 0.5
PZ 22	0.2 $\pm$ 0.1	PZ 109	2.5 $\pm$ 0.4
PZ 23	5.9 $\pm$ 0.9	PZ 110	0
PZ 34	5.7 $\pm$ 0.9	PZ 111	2.9 $\pm$ 0.5
PZ 36	2.1 $\pm$ 0.4	PZ 113	0.8 $\pm$ 0.2
PZ 37	1.8 $\pm$ 0.3	PZ 114	0.3 $\pm$ 0.1
PZ 38	2.2 $\pm$ 0.4	PZ 115	6.8 $\pm$ 1.2
PZ 42	7.3 $\pm$ 1.3	PZ 116	1.1 $\pm$ 0.2
PZ 44	2.7 $\pm$ 0.5	PZ 117	0.1 $\pm$ 0.0
PZ 50	2.8 $\pm$ 0.5	PZ 119	0.2 $\pm$ 0.1
PZ 51	2.2 $\pm$ 0.4	PZ 120	0.9 $\pm$ 0.2
PZ 53	6.0 $\pm$ 1.0	LTP 30	1.1 $\pm$ 0.2
PZ 54	0.5 $\pm$ 0.1	LTP 33	0
PZ 57	1.1 $\pm$ 0.2	LTP 38	3.0 $\pm$ 0.5
PZ 59	0	LTP 06	2.8 $\pm$ 0.5
PZ 60	0	LTP 16	1.6 $\pm$ 0.3
PZ 61	0.6 $\pm$ 0.1	LTP Ain-Kheir	1.0 $\pm$ 0.2
PZ 62	0.8 $\pm$ 0.1	LTP St.Epuration	2.4 $\pm$ 0.4
PZ 64	0	PT 01	0.6 $\pm$ 0.1
PZ 67	8.7 $\pm$ 1.5	PT Ain-Beida	1.2 $\pm$ 0.2
PZ 68	8.8 $\pm$ 1.4	PT Hassi-Miloud	1.6 $\pm$ 0.3
PZ 75	2.4 $\pm$ 0.4	PT Bamendil	2.5 $\pm$ 0.4
PZ 76	2.8 $\pm$ 0.5	LTP 33	0
PZ 77	6.8 $\pm$ 0.8	LTP Ecole F.Chott	1.7 $\pm$ 0.3
PZ 82	2.6 $\pm$ 0.4	LTP Ch.Hai.Bouزيد	1.0 $\pm$ 0.2
PZ 84	3.1 $\pm$ 0.5	Drain Chott Ou	1.9 $\pm$ 0.3

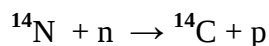
Les piézomètres PZ 20 et PZ 67 et PZ 68 ont des teneurs proches de 8 UT, d'autres (7piézometres), représentent des teneurs variant entre 5 et 6 UT, et pour le reste des échantillons les valeurs sont inférieures à 2 UT.

Lorsqu'on compare ces résultats avec les teneurs en tritium des eaux de pluie de la station d'Ouargla en 1992 qui est 16 UT (GUENDOZ A., MOULLA A S., REMINI B., MICHLEOT J L. (2005), nous pouvons suggérer l'existence d'un mélange entre une eau ancienne infiltrée avant les années 50 et d'autre récente, par conséquent, le résultat de cet éventuel mélange donne une eau mixte dont l'activité en tritium est diluées

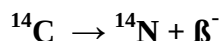
IV -5-3-Le Carbone:¹⁴C

IV -5-3-1-Généralités

L'isotope radioactif du carbone a la même origine que le tritium. La formation naturelle de ¹⁴C dans la haute atmosphère est le résultat d'interactions des neutrons induits par le rayonnement cosmique avec les noyaux de ¹⁴N selon la réaction:



Par décroissance radioactive β^- , le carbone-14 entame sa désintégration et régénère l'azote-14 selon la réaction:



La production du carbone-14 obéit aux mêmes règles que celle du tritium en ce qui concerne l'influence de la latitude. Toutefois, en raison de sa nature gazeuse permanente et de son temps de séjour troposphérique relativement long (5 à 7ans), le radiocarbone est beaucoup mieux homogénéisé à l'échelle du globe (Levin, 1978) que ne l'est le tritium dans la vapeur et les aérosols de la basse atmosphère.

Deux phénomènes ont modifié radicalement les teneurs en isotopes du carbone depuis un siècle. Le premier mis en évidence par H. E Suess a pour cause le développement industriel qui en utilisant massivement charbons et pétrole a déversé dans l'atmosphère de grandes quantités de carbone inactif, ce qui a eu pour conséquence de diminuer l'activité initiale du carbone-14 entre 1850 et 1950.

L'atmosphère contient approximativement 320 ppm de CO₂ et l'augmentation annuelle est actuellement de 0,7 ppm/an. La plus grande partie de ce CO₂ est toutefois absorbée par les océans.

Un deuxième effet, aux conséquences inverses, est dû aux essais des bombes thermonucléaires, qui en libérant les neutrons ont augmenté la production de ¹⁴C dans l'atmosphère.

La concentration en ¹⁴C a doublé entre 1850 et 1963 dans l'atmosphère, et depuis l'arrêt des essais thermonucléaires, la concentration en ¹⁴C a diminué (Figure IV-6).

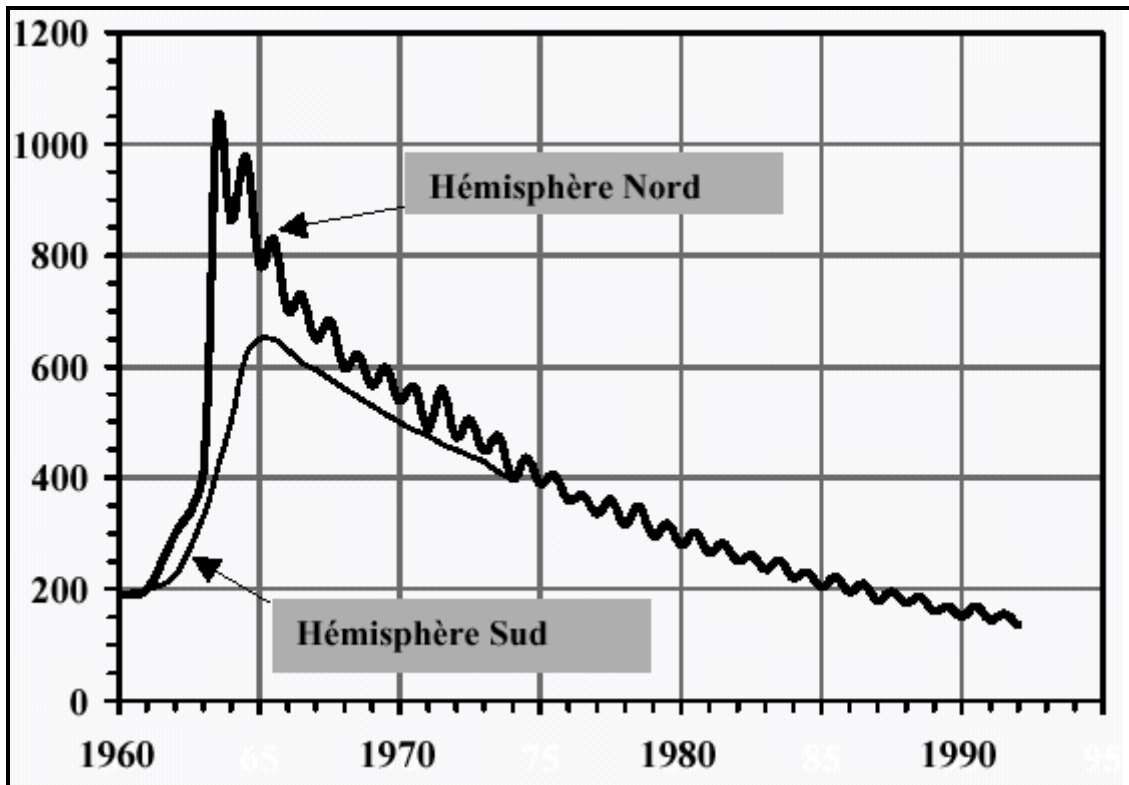


Figure IV-6 : Evolution de la teneur en ^{14}C du CO_2 atmosphérique. Les tests des armes nucléaires au début des années 1960, ont temporairement doublé la concentration en ^{14}C . Le retour progressif à "l'état normal" est lié aux échanges avec l'océan (AIEA 2008).

Les mesures de l'activité en carbone-14 sont réalisées par comptage β dans le compteur à scintillation liquide et les résultats sont exprimés en part pour cent de "carbone moderne".

Le carbone moderne est censé posséder l'activité spécifique du CO_2 de l'atmosphère avant qu'elle ne se trouvât diluée par suite de l'utilisation massive de combustibles fossiles. Cette activité a été estimée à $13,56 \pm 0,07$ dpm/g de carbone (Olsson, 1968 In AMMARY 2007) par analyse d'un bois élaboré à la fin du XIX siècle

Au laboratoire le standard international est un benzène distribué par l'AIEA, dont l'activité A_0 est égale 13,56 dpm/g de carbone.

IV -5-3-2-Cycle général du carbone:

Après sa production par les rayons cosmiques, le carbone-14 est brassé dans la haute atmosphère sous forme de gaz carbonique $^{14}\text{CO}_2$, où il participe ensuite au cycle général du carbone, mélangé aux isotopes ^{12}C et ^{13}C . (Figure IV-7).

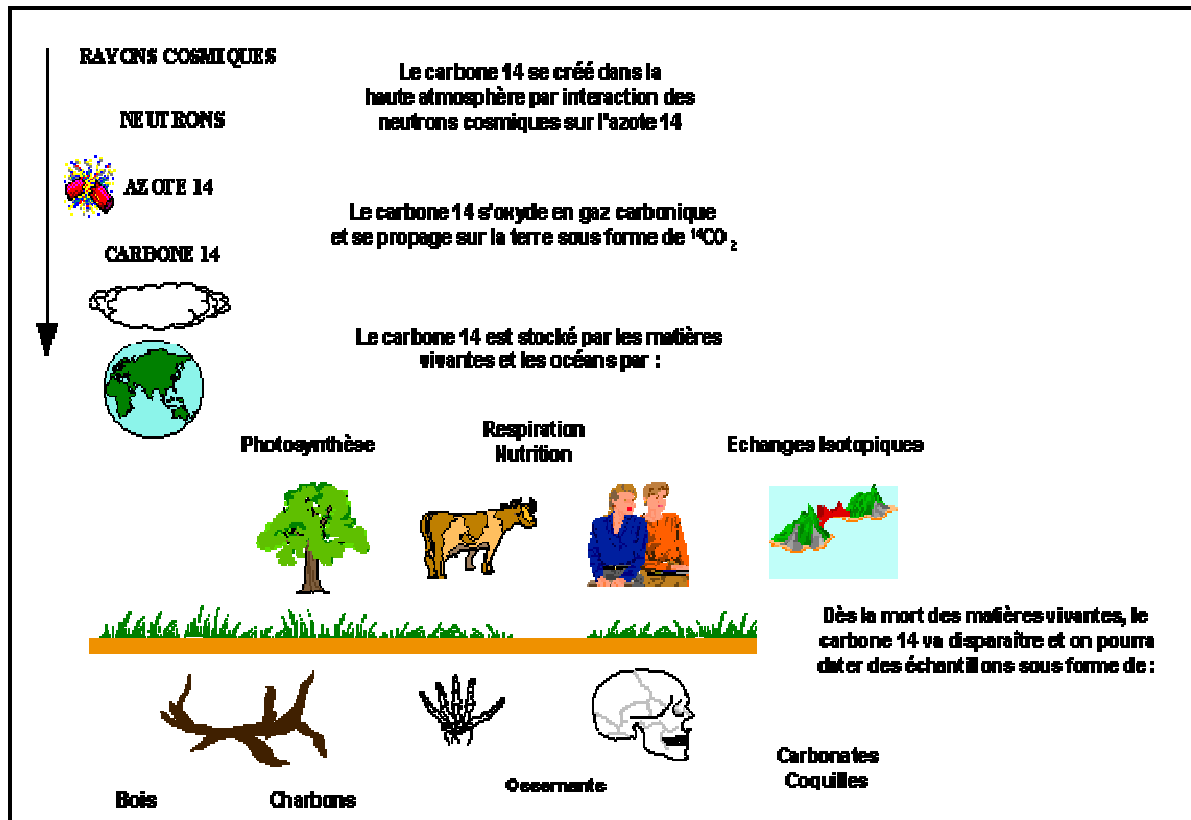


Figure IV-7 Cycle générale du carbone 14 (<http://www.google.dz>)

Le $^{14}\text{CO}_2$ aussitôt formé, pénètre dans les autres portions du cycle selon deux mécanismes principaux, l'un de ces mécanismes est la dissolution purement chimique tamponnée par la saturation en carbonate solide par réalisation des équilibres:



L'autre est la minéralisation biochimique du carbone électronégatif issu de la photosynthèse, et c'est la voie préférentielle pour la partie continentale du cycle: l'assimilation du CO_2 de l'atmosphère par les végétaux chlorophylliens (photosynthèse) s'accompagne d'un dégagement de carbone dans les sols par fermentation et décomposition (oxydation ou décarboxylation) de la matière organique (acides fulviques, flaviques et humiques) et surtout par respiration dans la zone des racines. Ce CO_2 biogénique évolue ensuite en fonction des conditions géologiques locales.

L'eau agressive chargée en acide carbonique est ensuite saturée par des cations, le plus souvent alcalino-terreux, pour donner les bicarbonates. La réaction de l'acide carbonique actif

(chargée en ^{14}C) qui provient du sol sur les carbonates morts, peut se résumer à une dilution de l'activité du CO_2 de l'atmosphère dans le carbone dissous.

Le CO_2 atmosphérique est pratiquement en équilibre isotopique avec les eaux océaniques de surface. Tant que ces cycles sont ouverts (c'est-à-dire à l'équilibre isotopique) le taux de ^{14}C reste stationnaire dans chaque réservoir. Par contre la mort des végétaux, la cristallisation des carbonates, ou la rupture des équilibres $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{CO}_3 - \text{HCO}^-$, marque la fermeture du système ouvert, en conséquence, l'assimilation de ^{14}C n'est plus renouvelable. On conçoit alors, que la quantité de ^{14}C sera fonction de l'instant à partir duquel l'échantillon est préservé de tout apport postérieur de carbone (système clos). Il devient possible grâce à la mesure de l'activité de ^{14}C résiduelle de dater tout échantillon carboné par simple application de l'équation:

$$\text{Age } ^{14}\text{C} = (T_{1/2} / \ln 2) \cdot \text{Log} (A_0/A)$$

Comme $T_{1/2} = 5730$ ans,

il devient alors; $\text{Age } ^{14}\text{C} = 8266,6 * \text{Log} (A_0/A)$ où

A_0 est l'activité initiale du radiocarbone,

A l'activité mesurée par comptage bêta exprimée en pour-cent de carbone moderne (pmc).

Pour déterminer l'âge d'un fossile, il suffit de connaître l'activité spécifique d'un matériau connu (standard). Celui-ci est un bois qui a poussé en l'absence de CO_2 fossile en 1850. Ainsi, pour les calculs d'âge radiométrique on fait l'hypothèse qu'au cours du temps, A_0 reste égale à une valeur stationnaire atmosphérique qui correspond à un équilibre entre la production, la décroissance, et surtout le transfert dans les portions ultérieures du cycle.

Cette valeur d'état stationnaire serait donc reflétée par l'activité de 100 % de "carbone moderne". Il est donc implicitement admis que pendant toute l'étendue de la gamme d'âges exploitables par le radio chronomètre ^{14}C le taux de production du carbone-14 naturel est resté constant.

Les seuls éléments de vérifications directe de cette hypothèse sont représentés par le bon accord qui se manifeste entre les âges calendaires et les âges radiométriques obtenus pour du matériel d'âge connu, comme les graines des nécropoles égyptiennes, les anneaux de croissances des arbres à développement très lent.

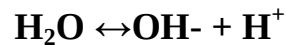
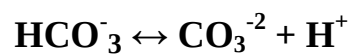
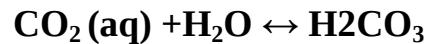
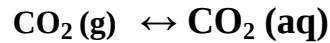
Moyennant toutes ces hypothèses, il est plus aisé d'appliquer la datation par le ^{14}C aux fossiles plutôt qu'aux eaux souterraines. En effet, en raison du comportement complexe, tant chimique qu'isotopique du carbone dans la nature, l'utilisation du radiocarbone pour la détermination du temps à partir duquel une eau a cessé d'être réalimentée en ^{14}C , ne peut être accomplie directement à partir de la mesure de l'activité en ^{14}C d'un échantillon carbonaté.

Les processus géochimiques et isotopiques subis par les carbonates provoquent des dilutions et fractionnement, et compliquent la datation de l'eau souterraine.

Une estimation d' A_0 du carbone totale dissous est essentielle étant donné que les conditions initiales du cycle sont inconnues.

IV -5-3-3-Estimation de A_0 du CITD

Pour les carbonates et bicarbonates dissous dans les cycles hydrologiques, le problème de l'activité initiale A_0 est lié à l'origine du carbone dissous qui suit la chaîne de réactions suivante :



(STUMM et MORGAN, 19970 In FONTES 1995)

avec Me (Ca ou Mg) (Soluble ou aqueux)

On devrait considérer l'activité du carbone dissous sous forme de bicarbonate comme le résultat d'un mélange équiatomique de deux espèces de carbone: le CO_2 atmosphérique essentiellement produit par l'activité biogénique, et le carbonate solide dépourvu de radiocarbone.

Avec 100 % de carbone moderne dans le CO_2 d'origine biologique, et 0 % dans le carbone minéral, on obtient une activité théorique de 50 % pour le bicarbonate dissous (CITD), que l'on peut appeler correction de Munnich (1957), ou de supposer que l'activité est restée constante, tout au long de la période d'infiltration.

Le temps écoulé entre deux points serait alors:

$$t_2 - t_1 = \lambda / \ln 2 * \text{Log} (A_2/A_1)$$

La réalité est loin de correspondre à ces deux schémas simples. Le carbone en phase liquide est susceptible d'échange isotopique, soit avec un excès de CO_2 , soit avec des carbonates solides de l'aquifère (Fontes et Garnier, 1979 In AMMARY 2007).

IV -5-3-4-Modèles de correction de l'activité initiale A_0 :

Il s'agit des modèles suivants:

- Age conventionnel, $A_0 = 100$ pmc (pour-cent de carbone moderne)
- Modèle statistique de Vogel (1967/70): $A_0 = 85$ pmc

- Tamers (1967/75): mélange chimique
- Pearson (1964): mélange chimique et isotopique
- Mook (1972/80): mélange isotopique avec des échanges de CO₂ dans un système fermé,
- Fontes et Garnier, 1979: mélange isotopique, avec échange de ¹⁴C entre CO₂ dissous et une phase solide,
- Echinger (1983): mélange chimique et isotopique, et échange isotopique à l'équilibre
- Equilibre de masse (Plummer et al., 1990). Ce modèle permet la détermination

du temps de transit de l'eau plutôt que son âge apparent. La correction demande les données chimiques et isotopiques entre deux points B1 et B2. L'équation de décroissance du radiocarbone entre B1 et B2 devient alors :

$$\Delta T = \lambda \ln 2 * \text{Log} (^{14}\text{A}_{\text{Corrigée en B2}} / ^{14}\text{A}_{\text{Mesurée en B2}})$$

La correction de l'activité du radiocarbone est faite par l'ajustement de $\delta^{13}\text{C}$ final et initial tenant compte du transfert de masse du carbone et les fractionnements susceptibles de se produire.

Toutefois, selon Fontes (1986), quels que soient les modèles de correction adoptés, la complexité de l'utilisation de la méthode de radiocarbone dans la datation des eaux souterraines, nécessite en particulier:

- la définition précise du problème à examiner, donc le choix des analyses à effectuer, et de l'aire d'étude
- un échantillonnage bien mené, et la détermination de préférence, sur le site des paramètres physiques très instables: T°, pH et conductivité.
- d'avoir des données de ¹⁴C et ¹³C du CITD du sol, et de l'alcalinité
- une disponibilité de données hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques.

IV -5-3-5-Détermination des âges radiométriques des eaux:

IV -5-3-5-1-La nappe du complexe terminal

A Ouargla les mesures effectuées sur 11 échantillons (forages) prélevées dans la nappe du complexe terminal montrent que les teneurs en ¹⁴C sont variées entre 6.4 ± 0.7 et 11.1 ± 0.6 (pmc), les teneurs en ¹³C sont presque constants (-6.7 à -7.8 ‰ VS PDB), (Tableau IV-3).

Tableau IV-3: les teneurs de ^{14}C et ^{13}C , dans la nappe du complexe terminal

Localité	Activité mesurée ^{14}C (pmC)	^{13}C ‰ V S PDB
Ouargla (Hassi.Benabdellah)	8.4 ± 0.8	-7.58
Ouargla (Said Otba)	10.0 ± 0.7	-7.60
Ouargla (Rouissat)	11.1 ± 0.6	-7.80
Khchem Er'rih	7.2 ± 0.7	-7.10
Sidi-Belkheir	6.50 ± 0.8	-7.00
El-Bekrat	6.80 ± 0.9	-6.90
Bamendil	9.50 ± 0.7	-7.2
Ouargla Chott	8.9 ± 0.7	-7.3
Ouargla Ain Beida	7.8 ± 0.7	-7.05
Ngoussa	6.4 ± 0.7	-6.7

Pour obtenir l'âge des eaux de différents forages on applique l'équation suivant

$$t = T / \ln 2 * \ln(A_0 / A_t) : \dots\dots\dots 1$$

T=la période du Carbone 14

A_0 =l'activité initiale au temps 0

A_t = l'activité au temps t

Les âges calculés (Tableau IV-4) sont obtenu par l'application de la formule 1 en tenant compte :

A_0 = 100 pmC pour obtenir l'âge conventionnel dit brut (non corrigé).

A_0 =85 pmC pour obtenir l'âge corrigé par le model de Vogel.

Tableau IV-4 : l'âge des eaux (CI, CT, et nappe phréatique) cuvette d'Ouargla

localité	Aquifère	âge brut ans	âge vogel ans	age moyen ans
PZ152	Nappe phréatique	12078	10747	11412,5
PZ160	-	19460	18021	18740,5
PZ173	-	3741	2149	2945
PZ150	-	26207	24717	25462
PZ50	-	5864	4381	5122,5
PZ53	-	17324	15955	16639,5
PZ121	-	29269	27859	28564
PZ44	-	14698	13227	13962,5
PZ174	-	2716	1488	2102
PZ110	-	7575	6117	6846
PZ85	-	11460	10085	10772,5
Ouargla (Hassi.Benabdellah)	Complexe terminal	20477	19112	19794,5
Ouargla (Said Otba)	-	19035	17691	18363
Ouargla (Rouissat)	-	18173	16864	17518,5
Sidi-Belkheir	-	22597	21245	21921
El-Bekrat	-	22224	20832	21528
Bamendil	-	19460	18021	18740,5
Ouargla Chott	-	19999	18683	19341
Ouargla Ain Beida	-	21090	19675	20382,5
Ngoussa	-	22725	21328	22026,5
Ouargla (Hassi.Benabdellah)	continental intercalaire	27255	25875	26565
HADEB I	-	43801	42408	43104,5
HADEB II	-	37283	35877	36580
KhchemEr'rih	-	35289	33893	34591
Aoinet Moussa	-	34719	33140	33934

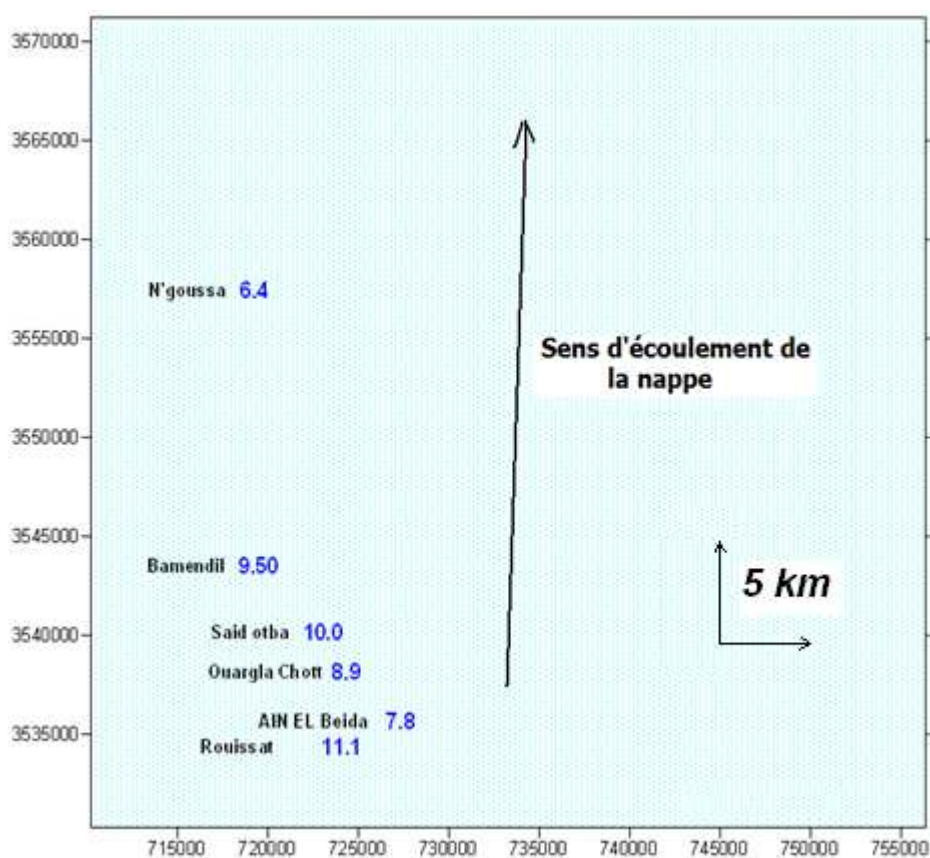


Figure IV-8 : Carte représente l'activité en ^{14}C du CT (cuvette d'Ouargla)

L'âge moyen des eaux (entre l'âge conventionnel et l'âge corrigé par le model de VOGEL) des différentes nappes sont utilisés pour l'interprétation. Les activités du carbone 14 (Figure IV-8) montrent qu'il ya une décroissance des activités le long d'axe d'écoulement. Les eaux de cette nappe s'écoulent du sud vers le nord avec une diminution du teneur de ^{13}C et l'activité ^{14}C , cela traduit une augmentation des âges des eaux vers le nord selon la direction d'écoulement sud-nord reconnu à l'échelle du bassin comme le montre la Figure VI-8 , et si on compare les activités en ^{14}C et les âges radiocarbone (âges non corrigés) entre deux forages, l'un (forage Ruissat) situé au sud et le deuxième (N'Goussa) situé au nord dont les valeurs sont respectivement ; 11,1 pmC , 18173 ans et 6,4pmC, 22725 ans, on voit bien la diminution des activité en carbone 14 et les eaux deviennent de plus en plus âgées en s'écoulant vers le nord de la cuvette, donc les eaux s'écoulent depuis Ruissat pour atteindre N'Goussa, le temps radiométrique de transit (parcours) serait de 4552 ans.

Les vitesses radiométriques d'écoulement des eaux de la nappe du complexe terminal à l'échelle de la cuvette d'Ouargla sont :

Vitesse radiométrique d'écoulement = distance entre deux points / temps de transit (parcours)

Le temps de parcours désigne la différence des âges entre deux points.

Par l'application numérique on obtient les valeurs suivant :

- entre Ruissat et Bamendil $V \approx 5 \text{ m /an}$
- entre Bamendil et N'Goussa $V \approx 5,1 \text{m/an}$
- entre Ruissat et N'Goussa $V \approx 5,1 \text{m/an}$

Ces vitesses d'écoulement dans ce type de nappe sont conformes aux résultats déterminés dans plusieurs zones arides par l'utilisation de ce radioisotope (Guendouz, 1985, Zouari, et al, 1985).

IV-5-3-5-2-la Nappe du continental intercalaire:

Les eaux de cette nappe ont des teneurs faible en ^{13}C , elles oscillent entre -7,5 à ‰ Errih et -9,1 ‰ VS PDB à Hassi ben Abdallah, pour l'activité en carbone 14, les teneurs sont faibles à nulles ; Un échantillon parmi cinq présente une activité de l'ordre de 3.7 %, le reste des échantillons ont des activités très faibles et comprises entre 0,5 à 1,5% pmC (Tableau IV-5).

Tableau IV-5 : les teneurs de ^{14}C et ^{13}C , dans la nappe de continental intercalaire

Localité	Activité mesurée ^{14}C (pmC)	^{13}C ‰ vs. PDB
Ouargla (Hassi.Benabdellah)	3.7 ± 0.8	-9.1
HADEB I	0.5 ± 0.7	-8.90
HADEB II	1.1 ± 0.8	-8.80
Khchem Er'rih	1.4 ± 0.7	-7.5
Aoinet Moussa	1.5 ± 0.8	-8.50

Les résultats obtenus impliquent que l'âge apparent des eaux de cette nappe est supérieur à 27000 ans (Tableau IV-4), ce qui montre et confirme qu'il s'agit bien d'une paléorecharge et que ces eaux se sont rechargés pendant les périodes humides du quaternaire (pléistocène), par ailleurs ces âges sont en parfaite concordance avec ce qui a été trouvé sur tout le bassin du Sahara septentrional (pléistocène inférieur 38000-14000 ans BP) (GUENDOUZ 1985).

IV-5-3-5-3-la nappe phréatique:

Les activités mesurées en ^{14}C et en ^{13}C des eaux de la nappe superficielle sont hétérogènes et les valeurs enregistrées sont variables d'un piézomètre à autre (Tableau IV-6).

Tableau IV-6 : les teneurs de ^{14}C ^{13}C dans la nappe phréatique

Localité	Activité mesurée ^{14}C (pmC)	^{13}C ‰ vs. PDB
PZ152	23.2 ± 0.8	-9.9
PZ160	9.5 ± 0.6	-8.90
PZ173	63.6 ± 0.7	-10.2
PZ150	4.2 ± 0.8	-7.5
PZ50	49.2 ± 0.6	-10.5
PZ53	12.3 ± 0.7	-8.1
PZ121	2.9 ± 0.8	-7.6
PZ44	16.9 ± 0.7	-8.2
PZ174	72 ± 0.5	-11.8
PZ110	40 ± 0.7	-11.7
PZ85	25 ± 0.8	-10.2

L'activité en carbone 14 est élevée dans les piézomètres : PZ50 (49%), PZ173 (63%) (pmC) pour atteindre 72% pmC au PZ174, d'autres activités basses sont enregistrés dans les piézomètres ; PZ150 et PZ121 dont les valeurs sont inférieures à 4 % pmC. Sur le reste de la cuvette les activités oscillent entre 12 et 40 % pmC. Pour les teneurs en carbone 13, les valeurs varient de -7.5 à -11.7 ‰ VS PDB.

Les âges ainsi obtenus pour les échantillons de cette nappe varient sur une grande échelle de temps, les eaux qui ont des âges relativement récentes (inférieur à 2900 ans) sont celles des piézomètres : PZ173 et PZ174. L'âge le plus ancien (dépassent 28000 ans) est calculé pour les eaux du piézomètre PZ121.

De ce qui précède, on constate que la nappe superficielle a une eau des origines différents ; des eaux anciennes (mélanges avec les nappes sous jacentes) et celle récentes, ce dernier est mis en évidence par les teneurs en tritium et ceux des isotopes stables.

L'eau récente correspond aux eaux des précipitations faibles, crues exceptionnels et des apports provenant de ruissèlement par les oueds (Oued N'sa et Oued M'Zab) dont nous supposons que l'activité en carbone 14 au moment de l'infiltration doit être égal à celle de CO₂ atmosphérique actuel, qui ce n'est pas le cas pour la majorité des échantillons prélevés. Cette diminution est traduit par la dilution des teneurs en carbone 14 lorsque le mélange est mis en évidence et on a vu que cette activité est faible pour la nappe de continental intercalaire (1 à 3 pmC).

Les eaux anciennes reflètent les apports provenant par les forages exploitant les nappes profondes (complexe terminal et continental intercalaire) où la surexploitation actuelle de ces nappes pour différents besoins, provoque une augmentation du niveau piézométrique de la nappe, et par conséquent le phénomène de la remontée des eaux qui est en cours de traitement.

IV-5-3-6-Cartographie des âges des eaux du continental intercalaire :

La figure suivante (Figure IV-9) est le résultat d'une interpolation d'une série des données représentatives collectées, sur un support cartographique, représente la répartition des activités en ^{14}C mesurées aux forages, traduite en âges-équivalents des eaux de la nappe du Continental intercalaire à l'échelle du bassin saharien (OULD BABA SY, 2005)

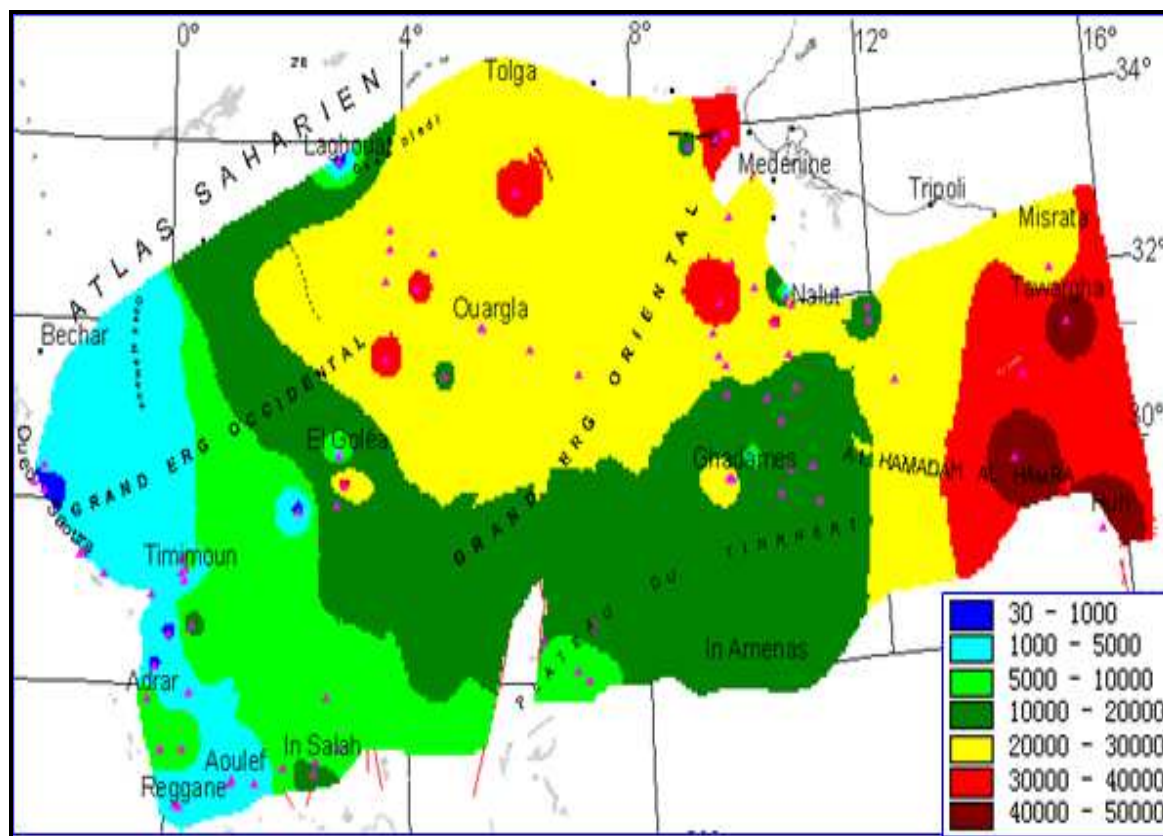


Figure IV-9 : Age des eaux du CI d'après la teneur en carbone 14 (OULD BABA SY, 2005)

La répartition géographique de ces âges montre que les âges les plus élevés (20000 à 40000 ans) s'observent dans la partie confinée de la nappe, ce qui est le cas d'une grande partie du Continental Intercalaire du bassin du Grand Erg oriental en Algérie (CONRAD et FONTES, 1972 ; ERESS, 1972d ; GONFIANTINI et al., 1974 ; ARANYOSSY et MAMOU, 1985 ; GUENDOUZ, 1985 ; EDMUNDS et al., 2003 ; GUENDOUZ et al, 2003 In OUEL D BABA SY 2005). La dispersion des autres valeurs traduit une certaine répartition sur l'aire de recharge de la nappe. Plus les conditions d'infiltration de l'eau moderne sont favorables, moins est élevée la valeur de l'âge de l'eau. Ainsi les eaux des nappes de la cuvette d'Ouargla s'intègrent dans cet ensemble à l'échelle saharien.

La cuvette d'Ouargla fait partie du grand Erg oriental du Sahara septentrional, elle est caractérisée par un climat aride avec faiblesse et irrégularité des précipitations, température élevée et évaporation forte.

La reconnaissance géologique et hydrogéologique faite sur cette région a permis de distinguer trois niveaux aquifères qui sont ; le continental intercalaire, le complexe terminal et la nappe superficielle

L'étude hydrogéologique faite sur la nappe phréatique montre que le sens d'écoulement principale des eaux de cette nappe est de Sud vers le Nord avec l'existence des dômes d'eau apparus sous la ville d'Ouargla et au niveau de Bour el aicha où a ce point les eaux se partagent formant un écoulement vers le nord c'est-à-dire vers Sebkhet Safioune et d'autre écoulement vers le sud de la cuvette.

Hydro chimiquement, les eaux de trois nappes ont généralement des facies chimiques homogènes ; le facies dominant est de type Chloruré sodique calcique et magnésien.

Les eaux de la nappe phréatique sont caractérisées par une salinité forte liée à l'évaporation intense dans cette région. La minéralisation des eaux de la nappe de continental intercalaire est d'ordre 1,5g/l.

L'étude isotopique faite sur les eaux de la cuvette montre les résultats suivants :

Les isotopes stables (^{18}O)

Nappe du continentale intercalaire:

Les valeurs sont homogènes et prennent le caractère appauvri, elles varient entre -7,88 et -8,02 ‰ Vs SMOW avec une moyenne de -7,9 ‰ Vs SMOW.

Nappe du complexe terminal

Dans cette nappe les eaux ont des teneurs comprises entre -8,23 à -7,88 ‰ VS SMOW

La nappe phréatique:

Les teneurs en ^{18}O des eaux oscillent entre -8,84 et +3,42‰ Vs SMOW, montrent un caractère assez enrichi, témoigne de leur caractère évaporé et confirment ainsi le processus d'acquisition de la minéralisation qui se fait conjointement par dissolution et évaporation.

Ces eaux reflètent le caractère évaporé des eaux de pluie mais aussi, une origine différente qui pourrait correspondre à des eaux de mélange entre différentes masses d'eau.

Les isotopes radioactifs (^3H ^{14}C)

Tritium :

Les nappes profondes (CI, CT) :

Les eaux de ces deux nappes ont des teneurs faibles voir nulles, elles sont comprises entre 0 et 1,1 UT pour la nappe du continental intercalaire et de 0 à 4,3UT pour la nappe du complexe terminal. ces résultats montrent que les eaux sont infiltrées avant les années des essais thermonucléaires (1952-1962).

La nappe phréatique :

Les teneurs sont très dispersées, allant de 0 à 8UT, elles montrent l'existence d'un mélange entre une eau ancienne infiltrée avant les années 50 et eau récente infiltrée après cette date.

Carbone 14:

La nappe de continental intercalaire

Les activités en ^{14}C des eaux sont très faible et de l'ordre de la limite de détection de cette méthode de datation, ce qui suggère que les eaux sont très anciennes.

La nappe du complexe terminal

Dans cette nappe les teneurs en ^{14}C sont comprises entre 6.4 ± 0.7 et 11.1 ± 0.6 pmC, les âges bruts calculés par la méthode de radiocarbone sont allant de 18173 à 22725 ans. La vitesse radiométrique d'écoulement mesurée à l'échelle de la cuvette est d'ordre 5,1 m/an avec un écoulement de sud vers le nord.

La nappe phréatique :

Les activités en carbone 14 sont très variables, elles oscillent entre 2 pmC et 72 pmC et les teneurs en carbone 13, les valeurs se varient de -7.5 à -11.7 ‰ VS PDB.

Les âges ainsi obtenus pour les eaux de cette nappe varient sur une grande échelle de temps, ils sont entre 2900 ans et plus de 28000 ans.

De ce qui précède, on constate que ces résultats confirment le mélange entre les différentes masses d'eau dans cette, ce dernier est mis en évidence par les teneurs en tritium et par les isotopes stables.

Les eaux anciennes reflètent les apports provenant par les forages exploitant les nappes profondes (complexe terminal et continental intercalaire).

Annexe I

Les paramètres climatiques 1997-2009 ONM Ouargla 2010

Ministère Transport Office Nationale de Météorologie direction Nationale Sud-est BP 637 Ouargla													
ANNÉE	Données Climatologique D'Ouargla Période 1997-2009												
	Paramètre	JAN	FEV	MRS	AVR	MAI	JUN	JUIL	AOT	SEP	OCT	NOV	DEC
1997	TX (1/10 °C)	19,9	22,4	23,9	27,3	35,9	43,2	45,2	41,8	35,5	30,3	25,3	20,6
	TN (1/10 °C)	6	6.4	8.2	12.9	19.6	26.6	27.2	27.2	22.4	17.5	10.3	6.8
	H%	61	59	42	40	32	22	20	26	41	48	48	56
	V m/s	2.4	2.1	3.2	3.9	4.3	4.1	3.7	3.3	3.5	2.3	2.7	2.9
	EVAP0	57	68	113	131	178	263	260	162	98	96	93	74
	INSOL	209	258	312	251	221	272	346	301	204	362	262	227
	TM (1/10 °C)	13	14.4	16	20.1	27.8	34.9	36.2	34.5	29	23.9	17.5	13.7
	RR (mm)	2	4	N T	4.8	NT	TRC	TRC	00.3	9	8.3	2.9	1.6
1998	TX (1/10 °C)	19.2	21.7	24.5	31	33.5	39.8	42.8	38.9	42.1	28.6	32.7	17.7
	TN (1/10 °C)	4.2	6.2	5.6	15.3	18.7	24.1	26.8	24.7	27.3	15.4	8.6	2.5
	H%	58	49	37	30	29	24	23	35	34	53	51	60
	V m/s	2	2.8	2.5	3.4	4.5	5.3	4.8	5.0	4.9	5.3	3.4	3.3
	EVAP0	77	116	177	233	285	379	489	409	488	238	154	112
	INSOL	247	210	247	281	279	313	***	***	***	***	***	***
	TM (1/10 °C)	11.2	13.9	16.5	23.1	26.1	31.9	34.8	31.8	34.7	21.4	16.2	9.7
	RR (mm)	NT	NT	2.1	2.7	NT	1	NT	TRC	NT	3.6	1	0.2
1999	TX (1/10 °C)	17.4	18.9	25.5	31.3	33.5	43.3	43.5	45.4	39.3	34.3	22.4	17.5
	TN (1/10 °C)	5.8	5.4	10.2	14.9	18.7	27.0	28.3	29.2	24.9	19.3	10.1	5.6
	H%	69	53	42	32	29	26	29	24	35	46	67	68
	V m/s	4.1	4.7	5	5.6	5.2	4.8	4.8	4.5	5.9	4.5	3.8	3.3
	EVAP0	96	145	224	357	286	546	544	622	463	323	148	98
	INSOL	,,,	191	293	295	279	336	351	316	270	288	205	167
	TM (1/10 °C)	11.6	12.2	17.9	23.1	26.1	35.2	25.9	27.3	32.0	26.8	16.3	11.5
	RR (mm)	19	0.7	NT	0.6	NT	NT	7	NT	8	NT	22.9	4.1
2000	TX (1/10 °C)	16.5	21.2	26.8	31.5	35.7	38.4	43	41.1	37.7	28	24.6	21.3
	TN (1/10 °C)	1.8	5.3	10.1	15.6	21.6	24.2	27.1	25.4	22.8	15.9	10.6	7.4
	H%	63	56	40	33	41	29	23	30	37	52	57	54
	V m/s	2.4	3.4	4	5.7	5.1	4.7	4.6	4.3	4.4	3.3	2.2	2.2
	EVAP0	273	291	281	299	194	377	363	353	182	255	264	153
	INSOL	9.2	13.2	18.5	23.6	28.5	31.3	35.1	33.3	30.2	21.9	17.6	13.5
	TM (1/10 °C)	NT	NT	NT	1	10.2	NT	NT	NT	NT	36.4	NT	NT
	RR (mm)	19.7	21.1	30.4	29	34.9	40.9	44.6	42.6	39.2	35.3	24.3	18.1

2001	TX (1/10 °C)	19.7	21.1	30.4	29	34.9	40.9	44.6	42.6	39.2	35.3	24.3	18.1
	TN (1/10 °C)	4.9	5	13.3	14.5	20	25.3	28.2	28	25.1	20.7	10.5	5.3
	H%	54	53	39	35	33	25	24	28	41	42	58	65
	V m/s	2.5	2.3	3.4	3.9	5.1	4	4.2	3.4	4.2	2.8	2.8	3
	EVAPO	146	149	254	296	381	350	339	338	237	263	235	132
	INSOL	261	270	302	308	316	350	339	338	237	263	235	132
	TM (1/10°C)	12.3	13	21.8	21.7	27.5	33.1	36.4	35.3	32.2	28	17.4	11.7
	RR (mm)	NT	NT	NT	0.4	NT	NT	NT		1	0.6	0.3	3.6
2002	TX (1/10 °C)	17.4	22.5	26.9	29.4	34.8	31.9	44.0	42.4	37.2	31.0	24.6	21.0
	TN (1/10 °C)	02.7	05.7	11.8	15.4	20.8	24.9	29.0	28.3	23.6	16.2	11.1	06.7
	H%	50	55	37	32	29	23	26	29	37	47	56	60
	V m/s	2.4	1.6	3.2	4.4	4.7	3.6	4.8	4.0	1.6	3.0	2.9	1.9
	EVAPO	10.1	15.7	24.6	29.9	37.4	43.5	42.6	47.3	33.7	23.5	176	119
	INSOL	26.1	25.7	28.3	28.5	28.8	27.8	28.5	28.9	27.7	26.0	23.7	25.0
	TM (1/10°C)	10.0	14.4	22.5	27.8	32.4	36.6	35..4	23.4	17.	23.4	17.4	13.5
	RR (mm)	NT	NT	NT	NT	5.0	NT	NT	2.4	1.5	2.6	2.4	NT
2003	TX (1/10 °C)	23.3	18.9	18.6	30.2	35.4	33.7	44.6	41.4	37	33.8	24.1	18.5
	TN (1/10 °C)	10	10.5	6.4	15.5	20.9	25	29.4	26.5	23.3	20.5	10.7	5.8
	H%	48	55	58	35	32	28	23	26	36	42	43	56
	V m/s	4	4	3.3	4.6	4.7	3.9	5.5	4	3.5	3.4	2.5	3.6
	EVAPO	19.6	13.8	12.2	30.9	40.4	43.9	53.8	46.8	32.9	26.8	14.1	11.6
	INSOL	26.5	22.7	21.4	28.5	30.8	32.5	33.3	34.9	29.3	21.5	23.3	20.2
	TM (1/10°C)	16.6	12.7	12.5	23.4	28.2	32.3	37	34	30.1	27.2	17.1	11.8
	RR (mm)	6.1	6.4	15.5	TRC	NT	NT	NT	NT	NT	3.9	0.2	
2004	TX (1/10 °C)	19.0	22.3	26.2	28.5	31.7	39.3	41.6	46.5	35.4	34.0	20.1	18.5
	TN (1/10 °C)	6	8.6	12.4	15.6	17.7	27.4	26.9	28.9	28.4	18.6	10.6	8.2
	H%	56	47	43	39	37	30	26	27	37	37	73	66
	V m/s	2.7	3.6	4.3	3.8	5.5	4.5	3.8	3.5	3.7	3.6	2.6	2.9
	EVAPO	100	161	249	283	371	480	512	513	567	310	82	9.8
	INSOL	254	227	236	276	323	276	365	301	299	246	219	203
	TM (1/10°C)	12.5	15.4	19.3	28.4	25.2	32.4	34.2	35.2	28.9	26.3	15.4	15.4
	RR (mm)	6.5	TRC	21.7	5.4	NT	0.2	NT	13.1	TRC	19.6	43.3	8
2005	TX (1/10 °C)	16.1	18.3	25.8	29.9	35.5	39.3	45	42.2	36.3	32.3	24.6	17.2
	TN (1/10 °C)	3	4.8	12.3	15	21.4	25.8	29.8	27.9	23.6	18.7	11.5	5.4
	H%	62	47	39	33	26	28	22	28	41	50	52	66
	V m/s	2.8	3.9	4.8	5.1	4.4	4.8	3.7	3.6	0.4	3.3	2.8	2.4
	EVAPO	114	156	300	367	466	448	563	521	304	269	190	91
	INSOL	252	247	202	296	308	248	313	312	251	258	231	210
	TM (1/10°C)	9.6	11.6	19.1	28.4	29	32.6	37.4	35	30.1	25.5	18.1	10.8
	RR (mm)	0.2	TRC	1	NT	NT	TRC	NT	NT	3.2	2	17.2	0.1

2006	TX (1/10 °C)	15.6	19.8	27.7	32.7	36.7	40.2	42.5	42.8	35.2	32.8	25	18
	TN (1/10 °C)	2.4	5.5	9.7	15.8	20.7	23.5	26.9	26.4	20.6	16.1	8.8	5.4
	H%	65	53	38	31	30	21	23	27	38	42	51	65
	V m/s	2.8	4	3.8	4.4	4.9	5.1	4.3	4.2	4.1	2.8	2.5	3
	EVAPO	94	145	278	353	452	583	568	508	319	268	141	87
	INSOL	222	226	308	261	254	282	343	315	272	283	262	213
	TM (1/10°C)	9.8	13.4	19.7	25.1	29.6	32.5	35.4	35.4	28.5	25.3	17.8	12.9
	RR (mm)	94	TRC	TRC	12	NT	NT	NT	TRC	30	59	NT	8
2007	TX (1/10 °C)	20	22.7	24.3	28.6	35	42	41.4	42.6	39.1	32.1	23.9	18.2
	TN (1/10 °C)	4.8	9.2	10.1	14.9	19.8	25.5	26.5	27.6	25.6	18.4	9.2	4.8
	H%	60	47	39	46	32	24	26	27	33	40	48	58
	V m/s	1.5	3.3	4.3	5.1	4.4	5.1	4.3	4.8	5	4.3	2.5	2.9
	EVAPO	93	164	256	283	418	499	469	517	395	276	131	109
	INSOL	261	217	287	199	225	270	366	317	268	267	40	212
	TM (1/10°C)	12.4	16	17.2	21.8	27.4	33.8	33.9	35.1	32.4	35.2	267	11.5
	RR (mm)	NT	TRC	TRC	3.5	0.3	NT	NT	2.9	NT	0.3	TRC	6.1
2008	TX (1/10 °C)	18.3	21.3	26.3	31.9	36	39.1	44.9	46.6	38.5	30.1	22.1	18.6
	TN (1/10 °C)	5.5	6.1	10.9	15.7	21.1	23.9	29	28	24.6	18.7	9.8	5.4
	H%	65	53	43	31	30	32	24	29	38	58	62	62
	V m/s	2.7	3.2	4.2	4.9	5.1	5.5	3.8	3.2	4.4	4.1	3.2	2.6
	EVAPO	76	137	210	291	323	286	434	323	313	174	114	78
	INSOL	254	259	263	301	244	292	306	308	243	209	261	192
	TM (1/10°C)	11.9	13.7	18.6	23.8	28.5	31.5	37	35.6	31.6	24.4	16	11.4
	RR (mm)	5.7	TRC	1.2	NT	NT	0.4	NT	TRC	14.2	24.1	0.2	0.6
2009	TX (1/10 °C)	17.8	20.3	24.7	27.5	34.4	40.9	44.6	43	36.1	30.8	25.5	22.9
	TN (1/10 °C)	6.8	7.8	10.1	12.1	18.5	25.4	28.7	27.2	22	15.7	9.4	7.7
	H%	70	54	48	42	39	28	25	26	46	46	58	51
	V m/s	4.1	3	3.6	2.7	XX	3.8	2.2	XX	3.7	2.4	2.1	1.4
	EVAPO	81	115	152	173	153	333	417	384	222	167	110	111
	INSOL	196	254	267	321	338	270	337	344	257	312	275	255
	TM (1/10°C)	12.3	13.8	17.4	19.8	26.4	33.1	36.7	35.1	29.1	23.1	16.7	14.9
	RR (mm)	54.1	1.5	10.6	0.8	NT	2.5	NT	NT	6.3	0.1	NT	NT

Annexe II

Inventaire des piézomètres fonctionnels et quelques paramètres (ANRH 2010)

Piézomètre	NUMERO	Localisation	pH	Cond (mS/Cm)	R.S (mg/l)
P001	1	Route Frane	7,37	128,2	132044
P002	2	Route Frane	7,71	77,4	86184
P003	3	Route Frane	8,02	35,6	37446
P006	4	Prés branchement El BOUR	7,74	25,74	22220
P007	5	Branchement N'goussa-El Bour à gauche	7,89	31,1	34956
P009	6	N'Goussa	7,73	29,4	29708
P012	7	Aouinet Moussa	8,26	74,5	75536
P014	8	Ain Moussa	7,93	55,5	57834
P015	9	Ain Moussa	7,48	23	20050
P017	10	N'Goussa	7,93	165	170200
P018	11	N'Goussa	7,66	63,1	66504
P019	12	N'Goussa	8	56,6	58734
P021	13	Sebkhet Safioune	7,49	165	170217
P023	14	Sebkhet Safioune	7,92	112,2	123688
P030	15	Sebkhet Safioune	7,8	102	115804
P031	16	Sebkhet Safioune	7,8	129,9	138772
P034	17	Sebkhet Safioune	7,8	123,8	135920
P041	18	N'Goussa	7,98	28,1	28394
P054	19	Route Hassi miloud Ouargla	8,24	4,05	3866
P056	20	Route Aouinet moussa	8,28	6,99	5284
P057	21	Route Aouinet moussa	8,15	6,08	5009
P058bis	22	Hassi miloud (Segar Ahmed)	8,3	3,3	2036
P059	23	Route Hassi Miloud	8,31	2,57	1534
P064	24	en face prison Said outba	7,4	163,8	161297
P096	25	Branchement Said Otba-Chott	7,8	81,8	90296
P113	26	sonelgaz-route Ghardaia	7,97	72,7	87772
P116	27	Prés branchement El Goléa	8,32	6,43	5220
P117	28	Prés branchement El Goléa	8,51	5,97	6002
P162	29	Sebkhet Oum Raneb(sur tube P13)	7,1	167,6	178154
P163	30	Oum Raneb(sur tube P14)	5,88	162,4	176416
P164	31	Oum Raneb(sur tube P12)	7,95	122,6	130624
P401bis(puits)	32	El Koum	8,1	3,94	2540
PZ09	33	Aouinet Moussa-Cemitière	7,76	69,8	71246
P408bis(puits)	34	Bour El Haicha	8,2	9,45	8942
P413 bis(puits)	35	Palmeraie Gara Krime	8,29	10,96	9526
P416(puits)	36	Hassi Debiche	8,37	5,18	4386
P419	37	vers chott-prés de PL04	7,07	8,01	6816

P422 bis(puits)	38	Frane (Anke Djemel)	8,28	3,85	3198
P423	39	vers chott	6,69	156,9	162,454
P430bis(puits)	40	Ville Oglet Larbaa	8,12	4,42	4630
P433(puits)	41	Route Ouad N'ssa (khzana)	8,16	1,963	2000
P506 bis(puits)	42	El Hdeb			
P566bis (puits)	43	Said Otba(Bab sbaa)	8,08	15,7	144,22
PL03	44	CEM Malek Ben Nabi	8,06	11,3	10204
PL10	45	DSA	7,8	5,8	6174
PL13	46	PARC HYDRAULIQUE	7,78	6,5	6400
PL15	47	Château d'eau Gherbouz			
PL17	48	CEM Larbi Ben M'hidi_mekhadma	8,11	11,21	10960
PL21	49	ENTV-vers rouissat	7,9	18,08	20412
PL23	50	Hôtel Transat	7,72	1932	18838
PL25	51	Château d'eau Mekhadma	7,49	11,77	10514
PL27	52	CNMC-vers sokra	7,57	30	26606
PL28	53	PARC SONACOM	8,23	6,06	
PL30	54	Station d'epuration-Lasilis	6,91	14,52	13400
PL31	55	Maison de la culture	7,51	4,79	4274
PL32	56	Ecole paramédicale	7,6	4,59	5002
PL41	57	Ecole Okba Bnou Nafaa -sahat chohada	7,66	6,67	5968
PL44bis	58	Château d'eau beni thour	8,31	27,6	28552
PLSN1	59	Complexe hydraulique Tazegrart	7,73	14,83	13128
PZ12	60	Oum Raneb	7,46	176,4	174500
P538(PLX2)	61	Route Ain Bida (chott)	8,16	43,6	42078
PLX3(Puits)	62	Route Ouad N'ssa (Hassi Naga)			
PLX4	63	Route Ouad N'ssa-Hassi Chegga	8,01	5,91	5554
PLX5	64	Park khamgani (Mekhadma)	7,99	14,26	13404
LTPS SN°2	65	Hôpital Boudiaf	7,16	5,24	5186

Annexe III

Teneur en ^{18}O et des eaux (Cuvette d'Ouargla) :

La nappe phréatique

Code	Désignation Points d'eau	O-18 (%) vs SMOW	Code	Désignation Points d'eau	O-18 (%) vs SMOW
1	PZ 07	-2,49	32	PZ 92	-2,89
2	PZ 09	-6,6	33	PZ 93	-2,64
3	PZ 10	-6,83	34	PZ 96	-6,13
4	PZ 18	-2,95	35	PZ 98	-5,6
5	PZ 19	-4,67	36	PZ 103	-7,6
6	PZ 20	-2,31	37	PZ 104	-6,77
7	PZ 22	-2,62	38	PZ 109	-4,66
8	PZ 23	-7,88	39	PZ 110	-5,81
9	PZ 34	-1,77	40	PZ 111	-7,03
10	PZ 36	3,33	41	PZ 113	-4,75
11	PZ 37	3,12	42	PZ 114	-7,1
12	PZ 38	0,97	43	PZ 115	-2,54
13	PZ 42	-0,58	44	PZ 116	-7,18
14	PZ 44	-4,46	45	PZ 117	-6,92
15	PZ 50	-6,9	46	PZ 119	-7,31
16	PZ 51	-6,41	47	PZ 120	-7,41
17	PZ 53	2,05	48	LTP 30	-7,5
18	PZ 54	-6,64	49	LTP 33	-8,84
19	PZ 57	-7,33	50	LTP 38	-6,06
20	PZ 59	-7,81	52	LTP 06	-1,97
21	PZ 60	-7,92	53	LTP 16	-7,48
22	PZ 61	-7,85	54	LTP Ain-Kheir	-8,13
23	PZ 62	-8,14	55	LTP St.Epuration	-7,48
24	PZ 64	-6,1	56	PT 01	-5,71
25	PZ 67	-3,4	57	PT Ain-Beida	-7,65
26	PZ 68	-3,04	58	PT Hassi-Miloud	-7,38
27	PZ 75	-6,57	60	LTP 33	-8,84
28	PZ 76	-5,56	61	LTP Ecole F.Chott	-7,35
29	PZ 77	3,42	62	LTP Ch.Hai.Bouزيد	-8,82
30	PZ 82	-5,16	63	Drain Chott Ouargla	-7,44

Les nappes de CI et CT

Code	Désignation Points d'eau		O-18 (‰) vs SMOW
1	CT Station Pompage	Miopliocène	-7,85
2	CT Irrig. Rouissat	"	-8,14
3	CT Irrig. Rouissat	"	-7,97
4	CT Frane	Sénonien	\
5	CT El-Bour	"	\
6	CT Hai-Bouزيد	Miopliocène	-8,18
7	CT Dom. Said Otba	Sénonien	-8,23
8	CT Bamendil	"	-8,27
9	CT Ch. EDEMIAO	"	-8,3
10	CT El Gherbouz	"	-8,32
11	CT El Gherbouz	"	-8,28
12	CT Ain-Smara	Miopliocène	\
13	CT Ain-Smara Chott	"	-8,23
14	CT ITAS 1	Sénonien	-7,97
15	CT ITAS 2	Miopliocène	-8,13
16	CT Transat	Sénonien	-8,23
17	CT N'gouça	"	-7,88
18	CT Hassi-Miloud	"	-7,9
19	CI Hadeb 1	Albien	-8,02
20	CI Hadeb 2	"	\
21	CI Aouinet Moussa	"	-7,93
22	CI El-Bour	"	-7,88

Bibliographie

- ABH. (2006).** Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional, rapport de mission, Ouargla.5P.
- ADE (2011) :** Algérienne des eaux (Ouargla).Rapport interne de laboratoire des analyses d'eau .
- A. FOUCAULT 2009 .**Climatologie et paléoclimatologie, 138P. DUNOD. ISBN 978-2-10-054165-2.
- AIEA (2008).** Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique AIEA, vienne, 2008, iaea-tcs-32/f Issn 1018–5518
- AMMARY. B. (2007).**Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet. Thèse de Doctorat, Univ rabat Maroc.
- ANRH (2008, 2010)** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Ouargla Inventaire des forages. Rapport interne.
- BELLAOUER. A (2008).** Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région d'Ouargla Soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives. Mémoire Magister, Université de Batna.
- BESBES M., et ALL (2003) :** Système Aquifère du Sahara septentrional. Gestion commune d'un bassin transfrontière. Eau et environnement ; la houille blanche/N°5-2003
- BG. (2004).** Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Rapport de la mission II A .Essai de pompage. Bonard & Gardel, Lausanne.
- CHABOUR. N (2006).**Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie, Thèse de doctorat d'état Université De Constantine
- Cornet A. (1964) :** Introduction à l'hydrogéologie saharienne, Rev. de géogr. Phys. et de géol. Dyn. 2, Vol. VI, Fasc. 1, 5-72.
- Craig, H., 1957.** Isotopic standars for carbon and oxygen and factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide, Geochim. Cosmochim.Acta, 12: 133-149.
- Craig, H., 1961.** Standard for reporting concentrations of deuter.and Oxyg-18 in natural waters, SC., 133: 1833-1834.
- CRNA (1991) :** Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Rapport interne.
- DANSGAARD W. (1964).** Stable isotopes in precipitation. Tellus.

- DJIDEL.M. (2009).** Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- DUBIEFJ (1959-1963).** Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors série, tome 1 et 2.- ALGER.
- ENAGEO (1993).** Etude géophysique et hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. Rapport final 1993.
- ERESS. (1972).** Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris.
- Fontes J. CH. (1976).** Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles. Quelques aspects. Thèse de Docteur ès Sciences. Université de Paris VI. Paris.
- GUENDOUIZ A. (1985).** Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-est septentrional (Algérie). Thèse 3ème cycle - Paris.
- GUENDOUIZ A., MOULLA A S., REMINI B., MICHLEOT J L. (2005)** Hydrochemical and isotopic behavior of Saharan phreatic aquifer suffering server natural and anthropic constraints (case of Oued-Souf region, Algeria) Hydrogeology journal 2005.
- GUENDOUIZ A. et MOULA. A.S (1992-1995).** Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla 1er rapport interne 1992 et 2ème rapport interne 1995 CDTN/DDHL- ALGER.
- GUENDOUIZ A et MOULLA A.S (1996).** Drainance de la nappe profonde du continental intercalaire vers les aquifères superficielles à Ouargla: argument isotopiques. Colloque internationale sur l'application des techniques isotopique dans les sciences de l'eau et du sol. Mahdia, Tunisie.
- KILIAN. C. (1931).** Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris .
- HADJ-ABDERRAHMANE (1998).** Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla. Rapport interne ANRH, Ouargla.
- HOUARI.M., et S (2009).** Reconnaissance géologique des formations aquifères de la basse vallée de l'oued M'ya (Région de Ouargla) Thèse d'ingénieur, Université de Ouargla.
- MOULLA A. (2005).** Colloque international "Les Ressources en Eau Souterraine au Sahara" ABH, OUARGLA.
- NEZLI. IE. (2009).** Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla) thèse doctorat Université d'OUARGLA,

OULD BABA SY.M.(2005).Recharge et Paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse Doctorat en Géologie. Faculté des Sciences de Tunis. Tunisie.

OULED BELKHIR. C. (2002).Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette d'Ouargla (Sahara Nord-est septentrional). Mémoire de Magistère, Université de BLIDA.

ONM (2011).Bulletin climatologie des stations sahariennes (1997-2009).

OSS (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional, gestion commune d'un bassin transfrontière, Edition Observatoire du Sahara et du Sahel.

SAIGHI. Omar (1999).Hydrogéologie en zones arides ; Hydrochimie isotopique des eaux naturelles de l'AHAGGAR et modélisation de nappe d'INFEROFLUX. Thèse Doctorat, Université USTBH 257P.

SFRP. (2002).Société française de radioprotection, Le tritium et l'environnement. Cedex France.

ZOUARI K., ARANIOSSY J.F., MAMOU A., FONTES J.C. (1985) : Etude isotopique et géochimique des mouvements et de l'évolution des solutions de la zone aérée des sols sous climat semi-aride (Sud tunisien). Programme de Recherches coordonnées IAEA-GSF sur l'étude de la zone non saturée. IAEA, Vienne.

Sites internet:

- **www.crna.dz**

-**http://www.google.dz/search?um=1&hl=ar&biw=978&bih=530&tbm=isch&sa=1&q=cycle+de+carbone+14&oq=cycle+de+carbone+14&gs_l=img.12...193450.193990.0.196465.3.3.0.0.0.0.0..0.0...0.0...1c.1.IKwUvyCbZkI/**

-**<http://fr.wikipedia.org/wiki/Tritium>**

-**<http://www4.paca.inra.fr/emmah/Les-moyens/Laboratoire-d-analyses-et-d-essai/Isotopes-radioactifs-et-stables>**, Rédaction : M. Babic, D. Michel, N. Bertrand, M. Weiss, Mise à jour : 25 Janvier 2011