

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE KASDI MERBAH

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES ET DES SCIENCES

DE LA MATIERE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE

Mémoire

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

N° d'ordre :

Spécialité : HYDRAULIQUE

N° de série :

Option : AMENAGEMENT HYDRAULIQUE EN ZONES ARIDES

Présenté par :

M^r: DEBBAKH ABDERREZAK

THEME

**Qualité et dynamique des eaux des systèmes
Lacustres en amont de l'Oued Righ**



Soutenu publiquement le : 25/04/2012

Devant le jury d'examen :

Président : KRIKER Abdelouahed (Professeur à Université de Kasdi Merbah à Ouargla).

Examineur : BOUTAOUTAOU Djamel (Maître de conférences à Université de Kasdi Merbah à Ouargla).

Examineur : HACINI Messaoud (Maître de conférences à Université de Kasdi Merbah à Ouargla).

Promoteur : SAKER Mohamed Lakhdar (Maître de conférences à Université de Kasdi Merbah à Ouargla).

Co-Promoteur : ZEDDOURI Aziz (Maître de conférence B à Université de Kasdi Merbah à Ouargla)

Année Universitaire : 2011/2012

A la mémoire de mon
Inoubliable père

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie infiniment le bon Dieu puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il me donnée tout le long de mon étude.

Je présent mes sincères remerciements avec mes profonds respects à mon encadreur, Dr SAKER Mohamed Lakhdar de m'avoir encadré et suivi mon travail de près avec sa rigueur scientifique, ses conseils ainsi que sa gentillesse qui m'ont permis de mener à bien ce travail ;

Je tiens à remercier ausi le Dr ZEDDOURI Aziz, qui a accepté de diriger ce travail et a veillé au bon déroulement de ces années, en m'apportant des critiques constructives et des conseils pertinents, et ce suite à l'intérêt qu'il a accordé à mes travaux de recherches.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont accepté de lire et juger ce travail. Le Pr KRICKER Abdelouahed, qui a bien voulu m'honorer en présidant ce jury, malgré ses énormes préoccupations, de même que le Dr BOUTAOUTAOU Djamel, le Dr HACINI Messaoud , qui ont bien voulu juger ce travail et enrichir le débat aux cotés du docteur SAKER Mohamed Lakhdar, mon encadreur et de docteur ZEDDOURI Aziz, mon co-encadreur .

Nous remercions les responsables et l'ensemble du personnel de l'I.N.R.A.A, pour leur contribution, en particulier, Monsieur HAFOUDA L, pour son aide et les services rendus.

Nos remerciements les plus sincères vont aussi à l'ensemble du personnel de l'A.N.R.H de Touggourt (SAYAH Y, SENOUSI S, SALAH, et FOUJIL), pour leurs conseils et encouragements.

Nous remercions l'ensemble du personnel de bureau d'études Feldspath, pour leur contribution, en particulier Monsieur le directeur, Monsieur Belkacem sans oublier monsieur Hacini Hechani

Nous remercions l'ensemble du personnel de bureau d'expertise topographique, pour leur contribution, en particulier Monsieur Boudaoued Abdelkarim et monsieur Ben Zahra Abdelkader

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et toutes celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés. Je suis redevable à mes parents, mes frères et sœurs, mes oncles et tantes, mes cousins et cousines, que chacun se sente ici vivement remercié pour son amour et son soutien.

Résumé

Les petites zones humides de la région de Oued Righ algérien constituent des milieux particulièrement sensibles. Elles jouent un rôle écologique très important au sein de l'hydrosystème et un rôle économique pour les acteurs locaux. Ces zones humides de faible extension connaissent souvent une dégradation générale, liée en particulier à la dégradation de leur milieu naturel.

Le choix de ce thème de recherche a été guidé par le souci de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement de ces systèmes lacustres, depuis ses conditions aux limites jusqu'à ses caractéristiques hydrodynamiques et physico-chimiques, ainsi que les questions d'ordre environnemental. Suite à l'analyse de la situation actuelle des lacs et de leurs environnements, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques au cours de plusieurs campagnes (depuis mars 2010 jusqu'à septembre 2010). L'interprétation de ces données a révélé ce qui suit :

L'écoulement souterrain se fait, en général, suivant une direction du Sud Ouest vers le Nord Est . L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de canal de Oued Righ .

La qualité chimique de l'eau est médiocre, résultant d'une forte salinité influencée par la lithologie de la nappe et les facteurs climatiques (les précipitations et les températures).

Mots clés : hydrochimie, hydrogéologie, systèmes lacustres, environnement, Oued Righ.

Abstract

Limited wetlands of Algerian Oued Righ valley represent very sensitive environments because they play a very important role for local human activities in both levels ecological and economical as well. These regions of limited extension often know a general deterioration, related particularly with their natural environment. The choice of this topic of research was guided by the need to better understanding all mechanisms of work of these systems belong to lakes since its limited conditions till its hydrodynamics and physic-chemical properties, as well as different environmental issues.

After analyzing the current situation of these wetlands and their environments, an action program designed to conduct of follow-up variations, depending on lithology and climatic factors, in order to be able to study the evolution of hydrodynamics and physic-chemical parameters,

The interpretation of these data revealed the following results:

Groundwater flow is generally in a direction from south west to north-east.

The axis of drainage of groundwater substantially coincides with the Oued Righ valley canal The chemical quality of water is poor, resulting of high salinity influenced by the lithology of the water and climatic factors (precipitation and temperature)

Key words: hydrochemistry, hydrogeology, lake systems, environment, Oued Righ valley.

ملخص

تشكل المناطق الرطبة ذات المساحات المحدودة لناحية وادي ريغ الجزائرية أوساطا جد حساسة لأنها تلعب دورا جد هام على مستوى النظام البيئي من جهة و من جهة أخرى على مستوى اقتصادي بالنسبة للنشاطات المحلية, فهذه المناطق ذات الامتداد الضيق تعرف باستمرار تدهورا و انحسارا عاما يرتبط بالخصوص بأوساطها الطبيعية واختيارنا لهذا الموضوع كان موجها من منطلق الحرص على فهم أفضل الآليات عمل هذه الأنظمة المتعلقة بالبحيرات ابتداء من شروطها الحدية وصولا إلى خصائصها الهيدروديناميكية و الفيزيو كيميائية فضلا عن قضايا بيئية مختلفة و بعد تحليل الوضع الراهن للبحيرات و بيئاتها المختلفة, ثم وضع برنامج عمل بهدف متابعة المتغيرات تبعا للخصائص الجيولوجية و العوامل المناخية , حتى تتمكن من دراسة تطور المعايير الهيدروديناميكية و الفيزيو كيميائية. أظهر تفسير هذه البيانات مايلي:

التدفق المائي الباطني ينطلق من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي .

- مسار جريان مياه الجوفية يتلاقى بصفة مطابقة تماما مع مجرى قناة وادي ريغ الخصائص الكيميائية للمياه ذات نوعية جد سيئة.

- الملوحة الشديدة متأثرة بخصائص الجيولوجية و العوامل المناخية (التساقط و درجة الحرارة)

كلمات مفتاحية: هيدروكيميائية, هيدروجيولوجية, نظام البحيرات, بيئة , وادي ريغ.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement d'une qualité médiocre à d'autres endroits. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource.

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. Les principaux vecteurs impliqués dans la salinisation des masses d'eau sont l'intrusion marine, le mélange avec des saumures anciennes, la dissolution de formations évaporitiques, mais aussi diverses sources anthropiques. Il faut noter que les phénomènes d'origine naturelle cités plus haut peuvent être influencés par l'intervention humaine (exemple : surexploitation d'une ressource en eau).

La région dite "Oued Righ" qui est située dans le Sahara algérien septentrional (Sud-est algérien), encore appelée bas-Sahara, se présente comme une vaste fosse synclinale dissymétrique caractérisée par l'existence de plusieurs zones humides.

Les zones humides de la région de l'Oued Righ sont vulnérables, car elles dépendent de leur survie de l'eau provenant des écoulements des oueds, de sources, de drainage des palmeraies ou de remontée des nappes phréatiques. Ces zones sont menacées par la dégradation de leur milieu naturel qui est utilisé comme (rejets d'eaux usées, dépotoirs et des débris etc....).

La qualité des eaux superficielles de cette région a subi ces dernières années une certaine détérioration, à cause de rejets urbains non contrôlés, de l'utilisation intensive d'engrais chimiques et de fertilisants dans l'agriculture ainsi que de son exploitation désordonnée. Ces éléments modifient le chimisme de l'eau et la rendent impropre aux usages souhaités.

Quelques études, déjà réalisées sur la région de Oued Righ (Benabdasadok Djahida ; 2004), (Taliouine Fatima.2006), ont signalé l'influence de la nature lithologique sur la minéralisation des eaux souterraines. Les facteurs climatiques ont également contribué à la variation de cette minéralisation.

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité de ces ressources superficielles et d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques en utilisant des moyens plus adéquats.

Le programme d'action pour la réalisation de ce travail doit répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux des systèmes lacustres?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant l'évolution des éléments chimiques dans le temps et dans l'espace (influence de la lithologie et des facteurs climatiques sur le chimisme de la nappe)?

Afin de répondre à ces préoccupations, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Étude du cadre naturel et hydrodynamique en relation avec la qualité chimique.
- Étude des paramètres physiques et chimiques de l'eau.
- Étude des dépendances et relations entre les divers paramètres physico-chimiques de l'eau.

Pour concrétiser ce programme de travail, un suivi saisonnier (basses et hautes eaux) de la qualité physico-chimique et piézométrique des eaux souterraines a été réalisé. Ainsi, trois campagnes (depuis mars 2010 jusqu'au mois de septembre 2010) ont été entreprises. Plusieurs outils (géographique, hydrodynamique, chimique, statistique et informatique) ont été utilisés afin de mieux interpréter les données acquises.

En fin, il est nécessaire de ressortir des recommandations concernant l'impact de ces facteurs sur l'environnement pour bien préserver et conserver ce dernier.

Le présent travail s'articule en trois parties: étude bibliographique et présentation du matériel et méthodes, et présentation des résultats et discussions.

La première partie est constituée d'un seul chapitre (I) de Synthèse bibliographie sur les mécanismes de salinisation des eaux.

La deuxième partie avec deux chapitres, chapitre (II) a été consacrée à la présentation de la région d'étude (cadre géographique, géologique, hydrogéologique, climatique et tectonique). Le chapitre (III) a été la présentation des matériels et méthodes utilisées.

Le troisième partie (résultats et discussion) est constituée de deux chapitres: tous d'abord un chapitre (IV) pour la caractérisation hydrogéologique, situation environnementale des systèmes lacustres et la bathymétrie, en suit un chaque (V) sur la caractérisation physico-chimique de l'eau de surface et souterraine.

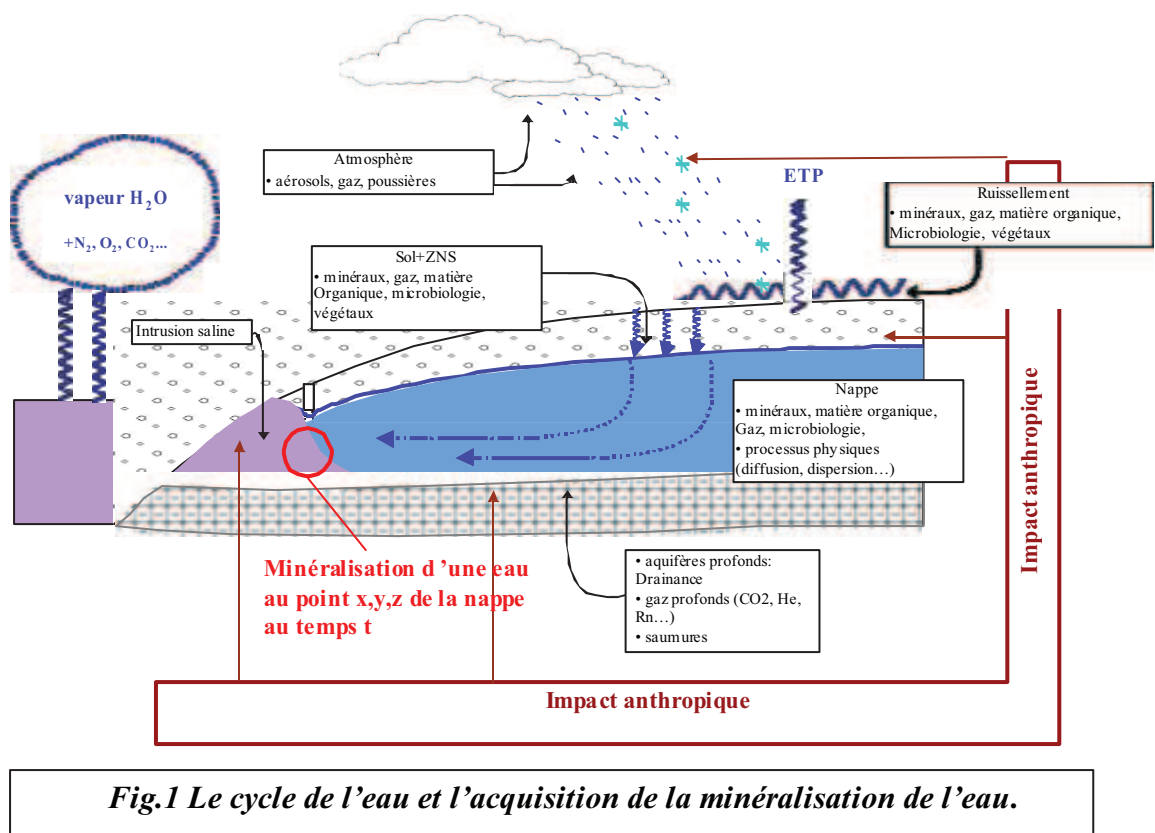
Chapitre I : MÉCANISMES DE SALINISATION

I.1. CYCLE DE L'EAU ET MINÉRALISATION

I.1.1. Définition

Le cycle hydrologique désigne le cycle complet des phénomènes subis par l'eau depuis la vapeur d'eau atmosphérique, en passant par l'état liquide ou solide sous forme de précipitations, pour s'écouler sur ou sous terre jusqu'à la mer, et finalement retourner à la forme de vapeur d'eau atmosphérique par l'action de l'évaporation et de la transpiration (**Dictionnaire de l'Eau, Office de la langue française, Québec, 1981**).

Au cours de ce cycle, l'eau acquiert sa minéralisation au contact des différents réservoirs géologiques, biologiques et atmosphériques, processus auxquels se superposent les impacts des activités humaines sur la qualité de l'eau (Fig.1).



I.1.2. Acquisition de la minéralisation au cours du cycle de l'eau

I.1.2.1. L'évaporation

L'évaporation désigne le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Elle nécessite un apport énergétique (énergie solaire) et peut être importante si l'étendue d'eau est vaste. Au cours de ce processus, les molécules d'eau (H_2O) de l'étendue (mer, lacs...) sont vaporisées vers l'atmosphère.

L'évaporation partielle laisse la phase liquide enrichie en éléments solubles, augmentant ainsi la minéralisation de cette dernière. Ce processus peut aller jusqu'à la formation de saumures et engendrer, si la saturation vis-à-vis de certaines phases minérales est atteinte, la précipitation de minéraux évaporitiques. La phase gazeuse est du H_2O pur qui se mélange avec les autres gaz (diazote, dioxygène, dioxyde de carbone...).

I.1.2.2. La condensation et la précipitation

Lorsque les conditions de pression et de température favorables à la condensation sont réunies, les molécules d'eau passent de l'état gazeux à l'état liquide. Cette transformation nécessite la présence de grains de poussières atmosphériques qui agissent comme noyaux de condensation. Les grains de poussières atmosphériques d'origine terrestre produits par érosion éolienne, tout comme les embruns ou les aérosols marins peuvent jouer ce rôle. La minéralisation de la gouttelette initiale dépend donc directement de la nature du noyau sur lequel elle se forme (rain out). Ce phénomène est à l'origine de la formation des nuages. Les gouttelettes interagissent avec la phase gazeuse et dissolvent les gaz atmosphériques en fonction de leur pression partielle et la température selon la loi de Henry. Lorsque le poids de la goutte d'eau est suffisamment important, celle-ci est entraînée par gravité vers la surface terrestre. On parle de précipitation. Pendant sa chute, l'eau de pluie lessive les couches basses de l'atmosphère (Wash out), interagit avec les aérosols qui s'y trouvent et s'enrichit considérablement en éléments dissous.

Les eaux de pluie participent ainsi à la minéralisation des eaux de surface (rivières, lacs, zones humides) et, dans une moindre mesure, des eaux souterraines. Globalement, les concentrations en Chlorures des eaux pluies décroissent de la côte vers le continent et diminuent avec l'altitude (Meybeck 1986).

I.1.2.3. Le ruissellement et l'infiltration

Au cours de l'évènement pluvieux, l'eau météorique est retenue dans les dépressions du sol. L'interaction eau-roche commence dès l'arrivée des premières gouttes sur le sol. Les réactions avec le réservoir géologique dépendent directement du caractère agressif de la pluie qui est, en conditions naturelles, essentiellement lié à sa teneur en dioxyde de carbone (CO_2) dissous. Dans un milieu pollué, les composés du soufre et azotés (SO_2 , NO_x) peuvent jouer un rôle déterminant dans la formation de pluies acides. Les eaux de ruissellement et d'infiltration interagissent avec les minéraux, les gaz, la matière organique, les végétaux et la microbiologie du sol et de la zone non saturée. Sur tout le trajet du transfert sol-rivière et sol-aquifère, la minéralisation des eaux est influencée par les gaz du sol et par la minéralogie des ensembles pédologiques et lithologiques traversés.

L'agressivité chimique de l'eau dépendra principalement de sa température, de son pH, de sa charge en éléments déjà dissous et du temps de contact eau/roche (notion de temps de renouvellement de l'eau dans le réservoir aquifère par les apports d'eau météoritiques).

I.1.2.4. L'influence du réservoir géologique

Une fois en contact avec l'aquifère, l'eau de la nappe peut s'enrichir d'éléments nouveaux provenant du réservoir géologique. Cette interaction est d'autant plus importante que le temps de résidence est long et les minéraux des roches aquifères solubles. De plus, la nappe peut être contaminée par d'autres systèmes hydrologiques contigus ou sous-jacents au moyen de processus comme la convection, la diffusion ou la dispersion. La minéralisation/salinisation de la nappe peut également être imprégnée par des systèmes plus profonds, à travers des phénomènes de drainance, de migration de saumures (primaires ou secondaires) et de remontées de gaz profonds (CO₂, He, Rn...) ou de fluides hydrothermaux (Vengosh, 2003).

Dans le cas des aquifères côtiers, la nappe peut être envahie par l'eau de mer en faveur d'une avancée du biseau salé. Dans ces conditions, la composition chimique de l'eau souterraine est fortement liée à celle de l'eau de mer. On parle d'intrusion marine si des actions humaines (pompages) sont à l'origine de l'avancée. Dans le cas d'un simple mélange eau douce-eau de mer, l'analyse des teneurs de Cl⁻ et du rapport ionique Br/Cl permet de montrer la contribution de l'eau de mer à la salinisation de la nappe côtière. Le plus souvent, l'analyse des autres éléments (calcium, strontium, sulfates...) met en évidence l'influence de processus complémentaires jouant sur la chimie des eaux : échanges nappe-encaissant, interaction eau-roche (échange de cations monovalents contre bivalents), réduction des sulfates, ou précipitation de calcite/dolomite (Vallet-Coulomb *et al.*, 2009). Les processus d'échanges cationiques sont à l'origine des eaux de type Ca-Na-Cl et même Ca-Cl en zone côtière.

Au terme de son écoulement dans les réservoirs souterrains et superficiels, l'eau douce arrive à la mer, où elle sera reprise dans le cycle hydrologique.

I.2. TERMINOLOGIE DES EAUX SALINES

Un grand nombre de termes descriptifs est utilisé dans la littérature pour décrire la minéralisation des eaux souterraines. Il n'existe pas de système de classification globale car les caractéristiques de ces eaux sont définies en fonction de plusieurs critères différents. Ces critères comprennent la salinité de l'eau, la concentration et l'origine des divers éléments dissous, et même l'origine de la molécule de l'eau (H₂O) qui est souvent différente de celle des solutés.

La terminologie utilisée ici (Fig.2) est établie d'après Kharaka et Hanor, (2005), Hanor (1987) et d'après Kharaka et Thordsen (1992). Le lecteur pourra se référer également à Sheppard (1986) ou à White *et al.*, (1963), pour une nomenclature plus complète.

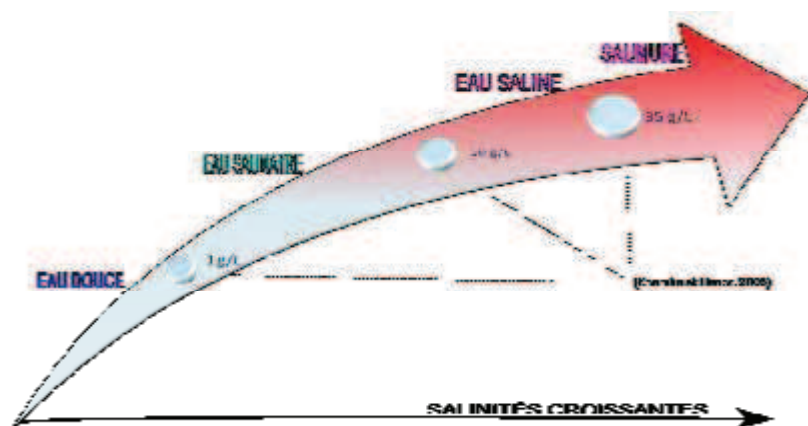


Fig.2 Gammes de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2005).

*- **Biseau salé** : Partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau salée (généralement marine), comprise entre la base de l'aquifère et une interface de séparation eau douce / eau salée : le coin d'eau salée est sous l'eau douce. L'intrusion d'un biseau salé au delà d'une position naturelle de faible pénétration, est quasi systématiquement la conséquence d'une surexploitation de l'aquifère. Une diminution suffisante des exploitations, dans le cadre d'une gestion concertée par exemple, permet d'envisager un retour à la normale à moyen terme (Glossaire SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse).

*- **Eau douce** : une eau dont la salinité est inférieure à 1 g/L (1000 mg/L).

*- **Eau fossile** : une eau météorique peu mobile dans la roche (aquifère ou aquiclude) qui ne participe pas au cycle actuel de l'eau.

*- **Eau météorique** : une eau issue de la pluie, de la neige, des ruissellements et d'autres plans d'eaux de surface qui percole dans les roches et remplace les eaux interstitielles qui peuvent être météoriques, magmatiques (dites aussi "juvéniles") ou connées (ou innées). Cependant, la contribution des eaux "juvéniles" reste assez hypothétique. L'eau météorique dans les bassins sédimentaires est généralement rechargée à de plus hautes altitudes, le long des marges du bassin. Le temps du dernier contact avec l'atmosphère n'est pas pris en compte dans cette définition, mais peut être précisé pour définir davantage l'eau météorique par rapport à son temps de résidence dans l'aquifère. Ainsi, les expressions comme 'eau météorique récente', 'eau météorique Pléistocène', ou 'eau météorique Tertiaire' pourraient indiquer l'époque du dernier contact avec l'atmosphère (Kharaka et Carothers, 1986).

*- **Eau salée** : une eau dont la salinité est comprise entre 10 et 35 g/L (entre 1 et $3,5 \cdot 10^4$ mg/L).

*- **Eau saumâtre** : une eau dont la salinité est comprise entre 1 et 10 g/L (0,1 et $1 \cdot 10^4$ mg/L).

*- **Intrusion marine** : invasion de l'eau de mer dans les nappes d'eau douce du littoral. Ce phénomène est provoqué par une avancée du biseau salé vers l'intérieur des terres souvent consécutive à une surexploitation de la nappe.

*- **Minéralisation** : concentration des solides totaux dissous (STD ou TDS). La minéralisation est aussi utilisée comme synonyme de salinité (Banton et Bangoy, 1999).

*- **Rain out** : première phase de la minéralisation. Processus ayant lieu dans les nuages, au cours duquel la goutte de pluie interagit avec la particule sur laquelle elle condense (noyau de condensation).

*- **Salinisation** : accumulation de sels dans les eaux ou les sols. Processus selon lequel l'eau souterraine ou la solution du sol se minéralise sous l'influence de mécanismes physiques comme l'évaporation, accentué par un drainage interne insuffisant, la dissolution de minéraux, l'interaction avec l'eau de mer actuelle et le mélange avec une saumure (primaire ou secondaire). La salinisation des eaux consiste en une augmentation de la salinité des eaux douces de surface et souterraines. Les activités anthropiques peuvent provoquer l'intrusion d'eau marine suite au pompage excessif en zone littorale et à la construction d'ouvrages aquacoles contenant de l'eau de mer en région côtière. Cette dégradation de la qualité de l'eau peut rendre cette ressource impropre à la consommation humaine, à l'usage industrielle et affecter l'agriculture locale, en particulier les rizières.

*- **Salinité** : ce terme est synonyme de TDS et s'exprime généralement en mg/L ou en gramme de sels par kilogramme de solution. La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous ou par le poids du résidu solide après évaporation et, indirectement et approximativement, à partir de la conductivité électrique (mS/cm) ou le potentiel électrique spontané (mV). Toutefois, le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de chlorinité. Usuellement, on considère en fonction de leur salinité, les eaux douces, saumâtres, salines et les saumures.

*- **Saturation** : en chimie des solutions, la saturation est la concentration maximale à partir de laquelle une substance ne peut plus se dissoudre dans un solvant. Ce point de saturation dépend

de la température, et de la nature du solvant et du soluté ainsi que de la force ionique de la solution.

*- **Saumure** : une eau dont la valeur de salinité est supérieure à la valeur moyenne de celle de l'eau de mer, c'est-à-dire plus de 35 g/L TDS ($3,5 \cdot 10^4$ mg/L TDS). D'après cette définition, la majorité des eaux des champs de pétrole sont des saumures. Cependant, seulement une faible fraction d'entre elles pourrait être classée comme saumures conformément aux définitions de **Davis (1964)** et **Carpenter et al., (1974)** qui placent la limite inférieure de salinité des saumures à 100 g/L TDS ($1 \cdot 10^5$ mg/L TDS).

*- **Saumure primaire** : eau de mer évaporée à différents degrés.

*- **Saumure secondaire** : saumure issue de la dissolution de sels solides (évaporites).

*- **Solutions hypersalines** : solutions dont les concentrations des différents sels dissous dépassent les seuils de saturation respectifs.

*- **Wash out** : lessivage de l'atmosphère par les gouttes de pluie au cours de l'évènement pluvieux. Ce processus contribue considérablement à la minéralisation de l'eau de pluie.

I.3. MECANISMES DE SALINISATION DES SYSTEMES HYDROLOGIQUES

I.3.1. Sources de salinité dans le cycle de l'eau

La composition chimique des eaux de surface est très influencée par les pluies (source de chlorures sur la bande côtière), les roches et sols du bassin versant ainsi que par les apports d'origine anthropique (eaux usées domestiques, effluents industriels, eau de retour d'irrigation...). L'évaporation peut provoquer une concentration des sels dans les eaux superficielles et souterraines, et à un stade très avancé, la formation des évaporites en surface.

Dans l'aquifère, les interactions avec l'encaissant et les mélanges entre différentes nappes complètent le processus de minéralisation des eaux souterraines.

Enfin, selon le contexte hydrogéologique, les mélanges avec d'autres fluides comme les saumures sédimentaires, l'eau de mer ou les fluides hydrothermaux peuvent complexifier la composition des eaux souterraines.

I.3.2. L'apport des eaux météoriques

A l'échelle globale, les volumes d'eau précipités sont très variables en fonction des zones géographiques (Fig.3). La chimie (éléments dissous, pH...) de ces eaux dépend essentiellement de la distance à la côte, de l'altitude, de la géodynamique régionale (éruptions volcaniques) et des activités anthropiques à l'échelle locale (industries pétrochimiques, cimenteries...) et régionale (combustion de combustibles fossiles...).

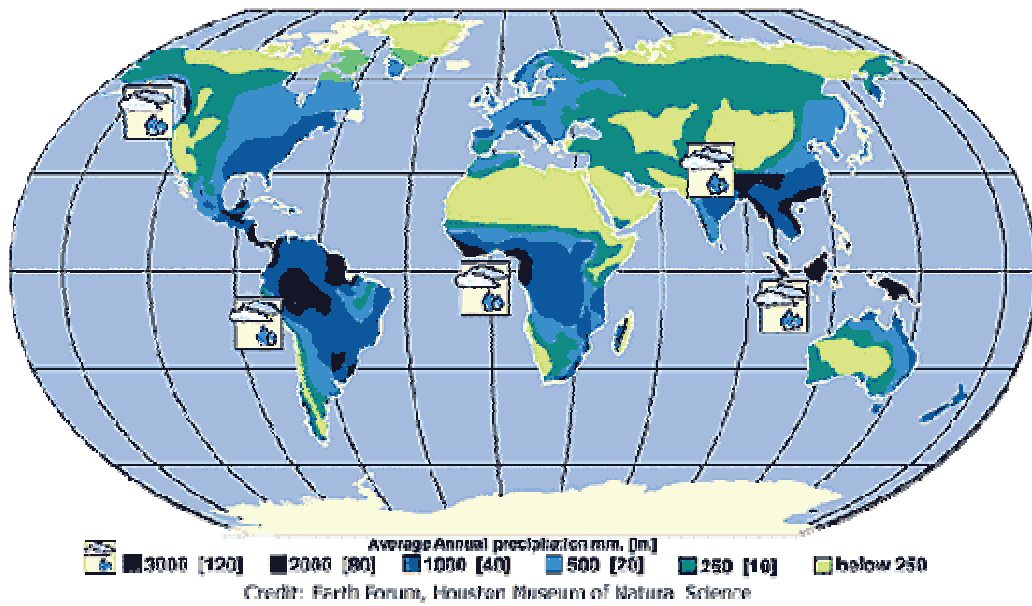


Fig.3 Précipitations annuelles moyennes à l'échelle globale. (USGS).

La présence de gaz carbonique dissous dans l'eau de pluie induit des pH acides de 5,6 environ et souvent plus faibles. Les émissions naturelles (volcanisme) ou anthropiques d'oxydes de soufre, qui conduisent à la formation d'acide sulfurique dissous, contribuent à accentuer l'acidité. Les faibles pH des eaux météoriques sont à l'origine de leur caractère agressif vis-vis des lithologies traversées.

La proximité de la mer influence très largement la composition chimique de la pluie et donc, de façon plus atténuée, celle des nappes. Le paramètre chlorure est l'un des éléments particulièrement sensibles. Les concentrations en chlorures des eaux de pluies en domaine continental dépassent rarement les 25 mg/L. Il existe en outre un gradient de concentrations décroissant de la côte vers l'intérieur des terres. Près des côtes, les eaux de pluie ont des teneurs en chlorures pouvant atteindre 40 mg/L, contre 2,5 mg/L en altitude dans le Massif Central. Au delà de 100 km des côtes, on peut considérer qu'il n'y a plus d'influence marine dans la composition chimique des eaux de pluie (Fig.4).

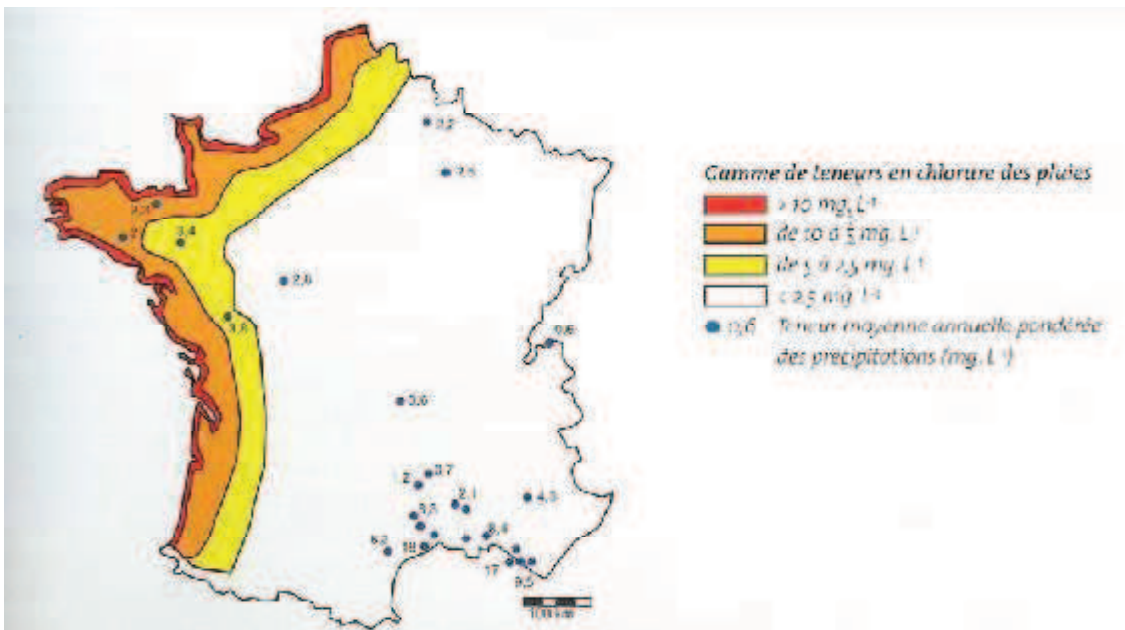


Fig.4 Gammes des teneurs en chlorures des eaux de pluie en France (Blum et al, 2002).

Sur l'illustration ci-dessus, le gradient mer-continent des chlorinités des eaux de pluie apparaît sur tout le littoral atlantique de la France et sur une partie du littoral méditerranéen (**Meybeck, 1986**). On remarque les très faibles teneurs à l'intérieur du continent, dans le Massif Central et les Alpes. Au cours de la migration des masses d'air, de la côte vers le continent, les précipitations successives appauvrissent les nuages en éléments dissous. Ce phénomène explique les fortes concentrations en chlorures dans les pluies de la bande côtière et l'absence d'influence marine dans les précipitations du domaine continental et en altitude.

I.3.3. Salinisation des sols

La salinisation des sols se traduit par une accumulation de sels solubles à la surface ou en dessous de la surface des sols, à des niveaux de salinité nuisibles pour la croissance des plantes qui rendent les sols impropres à l'agriculture. Elle est due à l'évaporation qui laisse sur place les sels qui étaient dissous dans l'eau. La salinisation peut résulter de l'ascension capillaire des eaux souterraines salines ou de l'irrigation avec des eaux salées. En dépassant un certain seuil de minéralisation, le sol acquiert un caractère salé et les végétaux subissent une sécheresse physiologique due à une pression osmotique trop forte et à une toxicité due à l'adsorption de certains éléments comme le sodium, par échange cationique.

La salinisation est dite "secondaire" lorsqu'elle est produite par des activités anthropiques (agricoles, industrielles...) telles que l'irrigation, l'exploitation minière, le salage des routes ou le rejet d'eaux usées domestiques.

I.3.4. La salinisation des cours d'eau

La salinisation concerne une grande partie des rivières, surtout dans les régions endoréiques (les bassins fermés, sans exutoire vers la mer). La salinité dans ce type de contexte peut résulter d'un processus d'origine naturelle ou anthropique. Le processus naturel est enclenché par le dépôt de sels sur le sol, en particulier dans les environnements arides. Il s'agit le plus souvent d'aérosols météoriques ou de sels précipités suite à l'évaporation. Ces sels sont temporairement stockés dans la subsurface (zone non-saturée superficielle) avant de migrer vers la nappe sous-jacente. Une fois en solution dans l'eau souterraine, ils sont transportés par l'écoulement (advection) vers le cours d'eau qui draine la nappe (**Vengosh, 2003**). La salinité de l'aquifère qui alimente la rivière peut être due à d'autres mécanismes de salinisation qui sont développés plus bas (dissolution de minéraux salifères, mélange avec des saumures...).

L'intervention humaine peut provoquer ou aggraver le processus de salinisation. Par exemple, le détournement des eaux des fleuves Amu Darya et Syr Darya pour l'irrigation des champs de coton, en Asie centrale a entraîné une diminution des débits de ces fleuves à l'origine de la salinisation suivie de l'assèchement des cours d'eau (**Weinthal, 2002**). D'autre part, la hausse de la salinité dans le delta du Nil est attribuée à une rupture de l'équilibre naturel des sels ; l'évacuation naturelle des sels du Nil vers la Méditerranée ayant diminué considérablement après la construction du barrage d'Assouan (**Vengosh, 2003**). Dans certains cas, la salinisation des cours d'eau est directement liée à une contamination anthropique. Par exemple, en Europe, le Rhin reçoit les eaux de drainage des mines de potasse, essentiellement des saumures de type Na-Cl (**Kloppmann et al., 2009**), depuis l'ouverture des mines, il y'a près d'un siècle. Les flux salins arrivant dans le fleuve, les teneurs en chlorures ont temporairement augmenté d'un facteur de 15 à 20 (**Meybeck et Helmer, 1989**). Enfin, le fleuve Arno, au nord de la Toscane (Italie) est pollué par les rejets d'eaux usées domestiques (**Cortecchi et al., 2002**). Cette pollution se traduit par une augmentation dans les eaux du fleuve des concentrations en ions sodium (Na^+), chlore (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}).

I.3.5. La salinisation des lacs et des zones humides

La salinisation affecte fréquemment les lacs des bassins endoréiques, surtout en zone aride. Deux types de configurations susceptibles d'entraîner une salinisation de ces types de milieu ont été distingués. La première intervient lorsque le volume d'eau perdu par évaporation est supérieur au volume d'eau douce arrivant dans le lac. Cette situation peut être observée notamment en cas de détournement des cours d'eau alimentant le lac, ce qui provoque une diminution des flux entrants et de la recharge. L'autre configuration se manifeste en cas d'apport d'eaux salées. Dans cette situation, l'arrivée de flux salins accentue la salinisation initiée par l'évaporation. Ces flux peuvent avoir une origine naturelle comme dans le cas de la salinisation du Lac de Tibériade (ou mer de Galilée) au nord de la vallée du Jourdain, par des sources à forte salinité (**Kolodny et al., 1999, Nishri et al., 1999**). Par ailleurs, le cas de la salinisation du lac Salton Sea par les eaux d'irrigation de la plaine agricole de la vallée impériale, en Californie (États-Unis) illustre bien l'exemple d'une origine anthropique de la salinité (**Vengosh, 2003**).

D'autres processus sont impliqués dans le phénomène de salinisation des lacs et des zones humides (étangs, marais, tourbière...) :

- une modification de la composition des flux entrants, avec l'exemple du Grand Lac Salé, dans l'Utah, aux États-Unis (**Spencer et al., 1985**),
- l'accumulation d'aérosols marins sur un continent exposé comme le montre le cas du Lac Eyre, en Australie (**Chivas et al., 1991, Vengosh et al., 1991a, Herczeg et al., 2001**).
- le mélange avec une eau de mer résiduelle (Mer Morte, en Jordanie ; **Starinsky, 1974, Stein et al., 1997**).
- une remontée de fluides hydrothermaux comme le prouve le cas du bassin de Qaidam, en Chine, (**Vendosh et al., 1995**).

I.3.6. L'intrusion marine

L'intrusion marine représente l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus impactant la qualité de l'eau des aquifères côtiers. Ce phénomène entraîne des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau mais également compromettre son aptitude à l'irrigation. Cette problématique se trouve aggravée par une concentration de la population sur les côtes (environ 70% de la population mondiale vit en zone de plaine littorale), et par une forte croissance démographique (environ 9 milliards d'habitants en 2050 selon les estimations). Les activités humaines concentrées sur ces zones (industries, agriculture, tourisme...) provoquent une augmentation de l'exploitation de la ressource et favorisent une hausse du taux de salinisation (**Jones et al., 1999**).

Déterminer la forme ainsi que la position de la zone de contact entre l'eau douce et l'eau de mer a motivé de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle. Les premiers travaux sur les aquifères littoraux poreux ont été réalisés à la fin du XIXe siècle par **Ghyben (1889)** et **Herzberg (1901)** sur la base du principe des équilibres hydrostatiques. Dans un aquifère poreux à l'équilibre, les deux milieux se mélangent très peu. En effet, l'eau douce, moins dense ($\rho_f=1000$ g/L) flotte sur l'eau de mer ($\rho_s=1025$ g/L) avec un contact incliné assimilé à un plan (Fig.5).

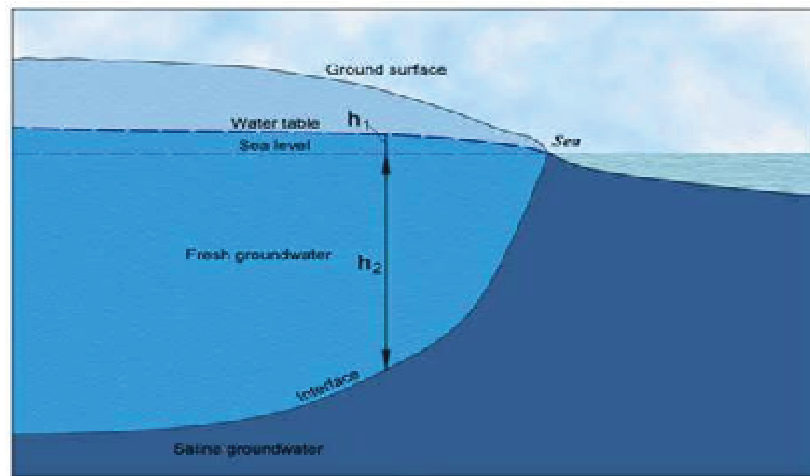


Fig.5 Position de l'interface eau douce-eau salée selon la loi de Ghyben-Herzberg. (British Geological Survey. © NERC. [IPR/47-4], UK Groundwater Forum).

Conformément à figure ci-dessus, la loi de **Ghyben-Herzberg** définit la position du contact entre les deux milieux à l'équilibre par l'équation suivante : $\rho_f \cdot (h_2 + h_1) = \rho_s \cdot h_2$

soit approximativement $h_2 = 40 \cdot h_1$, avec h_2 : la profondeur de l'interface, h_1 : la charge hydraulique (ou niveau piézométrique) par rapport au niveau de base, (ρ_f : densité de l'eau douce et ρ_s : densité de l'eau de mer).

En d'autres termes, la profondeur de l'interface est déterminée en résolvant l'équation d'équilibre entre les charges de deux fluides de densité différente (cas analogue à un tube en U comme sur Fig.6). La profondeur de l'interface est alors proportionnelle à la piézométrie ; la référence étant le niveau moyen local de la mer (Zéro m NGF, en France).

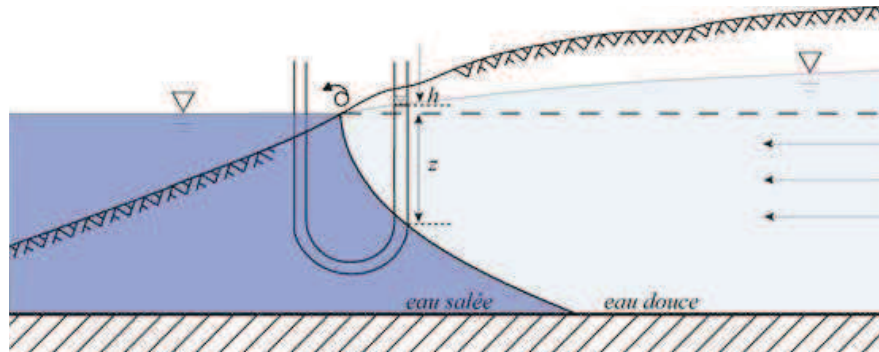


Fig.6 position de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg (Custodio, 2002), modifié par (de Montety, 2008) et détermination de la profondeur de l'interface. L'échelle verticale a été exagérée par rapport à l'échelle horizontale.

I.3.7. Mélanges avec des saumures anciennes

La salinisation des nappes peut provenir de diffusion et/ou convection de saumures qui sont des solutions hypersalines préservées dans des aquifères qui échangent peu avec les eaux de surface (aquifères profonds, captifs, peu perméables). Il s'agit le plus souvent d'eaux marines résiduelles fortement concentrées en sels, formées suite à l'évaporation d'une eau de mer ancienne (**saumure primaire**, **Vengosh, 2003**). On parle alors d'eaux connées. Par exemple, dans la vallée du rift de la Mer Morte, des saumures profondes, résidus d'une eau de mer ancienne partiellement évaporée, sont en connexion hydrologique avec la nappe d'eau douce superficielle (**Starinsky, 1974 ; Vengosh et Rosenthal, 1994 ; Marie et Vengosh, 2001**). Dans de telles situations, les concentrations en sels peuvent être très importantes, si bien qu'une petite portion de saumures suffit à provoquer une salinisation importante. L'augmentation graduelle de

la salinité et la modification de la composition chimique de la nappe vers une prédominance des ions chlore et sodium peut également résulter d'un processus de convection et de diffusion des fluides salins piégés dans un aquitard en connexion avec la nappe d'eau douce (**Herczeg et Edmunds, 2000**). Les deux réservoirs, aquifère et aquitard, peuvent être superposés ou contigus. A titre d'exemple, plusieurs modèles ont été proposés afin d'expliquer l'augmentation de la salinité dans l'aquifère des grès du Crétacé de la formation de Milk River, en Alberta, à l'ouest du Canada. **Hendry et Schwartz, (1988)** affirment que l'augmentation de la salinité serait la conséquence directe d'une diffusion de solutés issus d'un aquitard sous-jacent. Autre exemple, dans l'aquifère supérieur floridien, en Géorgie (États-Unis), des failles ont mis en communication cet aquifère à travers les unités imperméables avec l'aquifère captif sous-jacent et ont permis une migration ascendante de la nappe saline inférieure (**Massilia et Prowell, 1990**).

Comme dans la bande de Gaza, la salinisation par migration des saumures peut être accélérée du fait de la surexploitation de la nappe d'eau douce (**Vengosh et al, 2002**). En effet, l'amincissement de la frange d'eau douce superficielle rompt l'équilibre hydrostatique naturel et favorise la progression du panache de salinité. Le processus de salinisation est ainsi déclenché.

L'impact de ce type de salinisation est particulièrement dramatique dans les aquifères où l'eau douce n'est pas renouvelée. Il s'agit par exemple du cas des aquifères fossiles. De nombreuses études ont montré que les ressources en eau souterraine des régions comme le Sahel, le Sahara, et les zones arides du Moyen-Orient sont essentiellement fossiles et reflètent une paléo-recharge qui remonte du Pléistocène tardif (**Cook et al., 1992**).

Dans les régions polaires, les saumures résiduelles d'une eau de mer gelée peuvent provoquer également une salinisation de la ressource (**Marison et al., 1999 ; Bottomley et al, 1999 ; Yaqing et al., 2000**). En se basant sur la composition géochimique d'aquifères profonds à forte salinité en Suède et au Finlande, Bein et Arad (1992) ont conclu que les eaux salées proviennent d'une eau de mer gelée pendant la dernière glaciation, ensuite diluée par une eau météorique. La concentration des sels dissous par l'effet du gel (exclusion des sels de la glace et surconcentration dans la phase liquide résiduelle) s'opère aussi dans les eaux douces superficielles et peut donner lieu à des lacs salés (Canada, Antarctique) et contribuer à la salinisation des aquifères en relation avec ces lacs.

I.3.8. La dissolution des formations évaporitiques

La dissolution des minéraux des évaporites dans les bassins sédimentaires constitue une source fréquente de salinité dans les aquifères. Ce type de salinisation a été observé dans plusieurs régions, notamment dans la formation d'Ogallala, au sud des Hautes Plaines, au Texas (États-Unis), (**Mehta et al., 2000ab**), dans l'aquifère de Dammam, au Koweït (**Al-Ruwaih, 1995**), dans l'aquifère des grès nubien dans le Sinai et le Negev (**Rosenthal et al., 1998**) et dans le Grand Bassin Artésien en Australie (**Love et al., 2000, Herczeg et al., 1991**).

Les halogénures comme par exemple l'halite (NaCl) et les sulfates, comme par exemple le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) font partie des minéraux salifères les plus souvent impliqués dans les cas de salinisation par une réaction eau-roche. Les réactions de dissolution dépendent de conditions physico-chimiques et thermodynamiques bien particulières (pression, température, constante de solubilité du minéral impliqué, force ionique de la solution...). La dissolution de l'halite se traduit par une augmentation de la concentration en ions Chlore (Cl^-) et Sodium (Na^+), tandis que la dissolution de gypse conduit à une augmentation des ions de calcium (Ca^{+2}) et sulfate (SO_4^{2-}). la saturation des ces sels dans la solution contrôle leurs concentrations maximales. Au cours de l'évaporation d'une eau de mer, on assiste successivement à la saturation suivie de la précipitation d'abord de l à calcite, puis du gypse, de l'halite, de l'epsomite, de la sylvite, la carnallite, la bischofite et la tachyhydrite...

Dans la zone non-saturée et dans les nappes en conditions oxydantes, l'oxydation des sulfures comme par exemple la pyrite (FeS_2) peut conduire à une formation de sulfate (SO_4^{2-}) et donc à une augmentation de la salinité de la nappe.

Les activités anthropiques comme l'exploitation minière peuvent provoquer ou accélérer la dissolution des évaporites (exploitation de la potasse) et générer des effluents acides et hautement concentrés en sels (drainage minier acide et salin).

I.3.9. Les fluides salins hydrothermaux

La salinisation d'un aquifère peut résulter du mélange avec des fluides hydrothermaux salins (Vengosh, 2003). Les fluides hydrothermaux, d'origine marine ou non-marine, sont souvent caractérisés par de fortes concentrations en sels. À l'ouest de la Turquie par exemple, la salinité des eaux thermales se situe entre 2 et 66 g/L, avec des concentrations en bore supérieures à 50 mg/L (Vengosh et al., 2002b). Dans la ville de Mexico, les remontées d'eaux thermales sont à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'aquifère local (Edmunds et al., 2002).

En plus de leur forte teneur en chlore, les eaux thermales sont souvent enrichies en sodium, bore, fluor, arsenic et autres contaminants qui présentent une réelle menace sur les ressources en eau douce (Vengosh, 2003).

I.3.10. Sources anthropiques de sels

En zone urbaine, les principales activités impliquées sont l'évacuation des eaux usées industrielles ou domestiques et l'épandage de sels de déneigement sur les routes. La salinité des eaux usées provient essentiellement des rejets de détergents, riches en sodium et en bore (Raymond et Butterwick, 1992), de la lessive en poudre et des liquides utilisés dans les lave-vaisselle (riche en chlore). Ces flux salins industriels ou domestiques peuvent affecter la qualité des eaux souterraines, surtout s'ils sont réutilisés sans traitement approprié (difficile pour des éléments comme le chlore et le bore) pour l'irrigation ou la recharge artificielle des nappes. L'usage de sels de déneigement sur les routes constitue une autre source de salinisation. La pratique la plus courante consiste à appliquer directement sur la route le chlorure de sodium pur (NaCl), très soluble et pouvant être transporté sur de grandes distances. Le chlorure de calcium (CaCl_2) est rarement utilisé car elle rend les surfaces des routes extrêmement glissantes en cas de forte humidité. L'impact du salage des routes par épandage de halite (NaCl) peut-être mis en évidence par un rapport ionique Na/Cl égal à l'unité dans les eaux souterraines impactées.

En zone rurale, l'activité agricole et l'élevage sont les principales sources de salinisation des ressources en eau souterraine. L'usage d'eaux usées ou à forte salinité pour l'irrigation génère un apport des ions comme le chlore (Cl^-) ou le sodium (Na^+). L'épandage de fertilisants artificiels et autres engrais d'origine animale entraîne un apport non négligeable en ions potassium (K^+), ammonium (NH_4^+) ou nitrate (NO_3^-) mais aussi de (Cl^-) dans la nappe, (Bolke, 2002 et Bolke et al., 2000). D'autres formes d'azote sont apportées comme l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), l'ammoniac (NH_3), le nitrate d'ammonium (NH_4^+ , NO_3^-) et l'engrais animal (Bolke, 2002). Enfin, l'exploitation minière (sels, sulfures, or, charbon...) participe de façon non négligeable à la salinisation des eaux souterraines et superficielles à cause du drainage minier acide (mine Doyon, au Québec) ou du drainage minier salin (mines de potasse d'Alsace).

Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

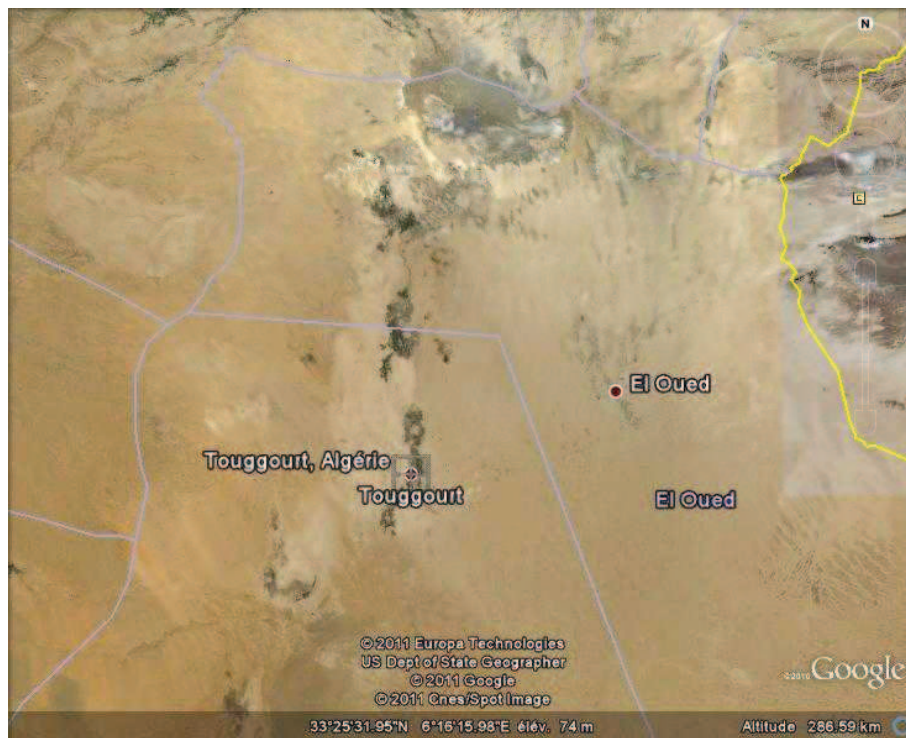
II.1.CADRE PHYSIQUE

II.1.1.Situation géographique et administrative de la région de Touggourt

Touggourt était la capitale historique de la partie amont de l'Oued Righ, comprise entre le grand Erg oriental, au sud-est et la zone des lacs, au nord. D'un point de vue administratif, la daïra de Touggourt appartient actuellement à la wilaya d'Ouargla. Elle est située à 600 Km au sud-est d'Alger dans le Sahara nord oriental entre le grand Erg oriental et le massif des Aurès (**Fig.7**).



Fig.7 Situation géographique de la région de Touggourt, d'après Larousse (2004).



**Photo.1 Photo satellite de la région de Touggourt
(D'après site Google Earth)**

La région de Touggourt est située entre les latitudes nord 32° 54'et 34°9' et les longitudes Est 5°30'et 6°20', L'altitude est proche de 70 m. Cette région, peuplée d'environ 173 000 habitants, couvre une superficie de 1334 km². Elle est divisée administrativement en 3 (trois) daïra et 5 (cinq) communes qui sont les suivantes :

- *-TOUGGOURT
- ZAOUIAT SIDI EL ABED
- EL NEZLA
- TEBESBEST
- *-EL MEGARINE
- SIDI SLIMANE
- *-TEMACINE
- BELIDAT AMOR

Tab.01 Population et surface de chaque commune de la région de Touggourt.

Commune	Population (hab)	Surface en Km ²
TOUGGOURT	38877	172,17
Z. SIDI EL ABED	20526	23,72
TEBESBEST	34866	26,45
NEZLA	50595	120,18
TEMACINE	20011	231,98
BELIDAT AMOR	14529	126,2
MEGARINE	13661	186,78
SIDI SLIMANE	7851	447,13
Total	173262	1334,61

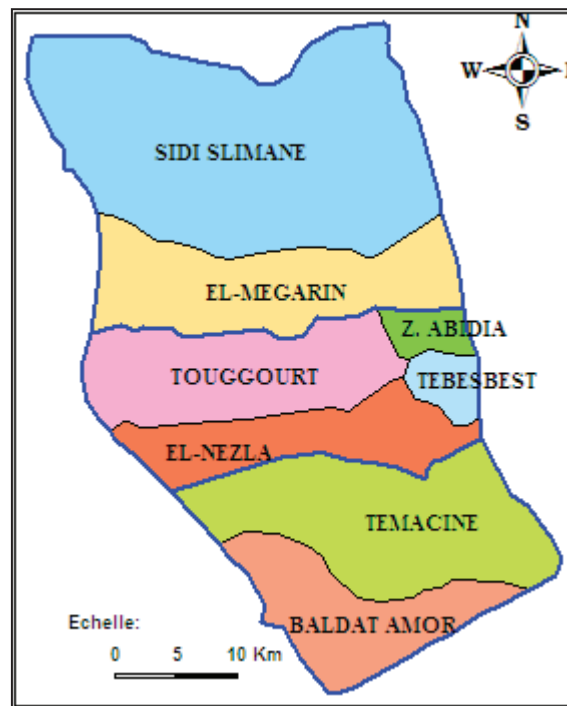


Fig.9 Carte de découpage administratif de la région de Touggourt.

II.1.2. Climat et végétation

Les données de plusieurs décennies d'observations météorologiques à la station de Touggourt (Sidi Mahdi) montrent que la région de Touggourt est caractérisée par un climat typiquement saharien, des précipitations faibles et aléatoires, une température élevée avec une humidité faible. Les études agro hydrologiques font ressortir que les eaux des pluies ne prennent presque aucune part dans l'irrigation des cultures.

II.1.3. Activité économique

De part sa situation géographique au Nord du Sahara, le voisinage des champs pétroliers et gaziers et la production des dattes, cette région est devenue actuellement un pôle économique important.

La ville de Touggourt est aussi le dernier point, vers le sud est, du chemin de fer. L'activité principale a longtemps été basée sur l'agriculture et, notamment, l'exploitation du palmier-dattier. Mais, au fur et à mesure que Touggourt devenait une cité administrative importante, d'autres activités, initialement embryonnaires, se sont développées : L'artisanat, le tourisme et plus récemment, quelques petites industries.

Le domaine agricole qui était jadis la principale activité, est quelque peu délaissé actuellement à cause du faible rendement des palmiers, dû aux effets néfastes de la « salinisation » des eaux et des sols, du phénomène de « remontée des eaux », du vieillissement des palmiers etc.... De plus, les sociétés pétrolières offrent des emplois plus rémunérés et accentuent, malgré l'aide de l'état pour la mise en valeur des terres, le déséquilibre au détriment de l'activité agricole.

Les dernières statistiques montrent que l'agriculture n'occupe, dans la région de Touggourt, qu'une faible main d'œuvre.

Etant donné le contexte climatique hyper aride, l'agriculture est très consommatrice d'eau. Parmi les espèces cultivées on note la prédominance du palmier dattier, notamment la variété « Daglat Nour ».

En dehors du palmier dattier, les autres espèces culturales sont peu développées et n'occupent que 10 à 15% de la superficie cultivée.

On note aussi l'existence d'élevage de quelques espèces animales typiques. Dans le domaine de l'industrie, il existe plusieurs petites usines, surtout des briqueteries (8), implantées à proximité de

la source de matière primaire, ainsi que des complexes de transformation d'hydrocarbures (DTP, transformation de plastique), fabrique d'aluminium, ainsi que des entreprises de conditionnement de dattes.

Le tourisme existe aussi, Il occupe une partie importante de la population de Touggourt à cause de l'existence de quelques repères touristiques comme les Oasis, le lac de Témacine, les anciennes médinas de Touggourt et de Témacine etc....

Enfin, citons l'existence dans cette région de la Zaouïa Tijaniïa qui accueille de nombreux visiteurs chaque année.



Photo.2 lac de Témacine.

II.1.4.Géomorphologie

La région de Touggourt occupe un large fossé en forme d'arc orienté Nord-Sud, le plus souvent dénommé « Oued Righ », qui repose sur les formations du Mio-pliocène et de l'Eocène.

Les pentes topographiques y sont faibles et les reliefs peu marqués. La dénivellation entre le haut et le bas du paysage ne dépasse pas la centaine de mètres sur 100km ; la pente globale est de l'ordre de 1‰.

Cette région est connue sous le nom de Bas Sahara, à cause de sa basse altitude, notamment dans la zone des chotts au Nord, où les altitudes sont inférieures au niveau de la mer.

II.1.5. Besoins et ressources en eau

Tab. 02 Estimations des débits de la région de Touggourt.

Commune	Besoin	Ressources			Débit du canal en différentes stations m ³ /s
	l/ j/ hab	AEP l/s	AEI l/s	AEA l/s	
Beldat Amor	150	50	0,00	1234,50	0,26
Témacine	170	70	0,00	687,82	0,81
Touggourt	200	120	15,00	417,00	1,30
Sidi El Abed	200	120	0,00	543,52	1,30
Tebesbest	200	120	2,50	535,26	1,30
Nezla	200	120	0,00	1590,44	1,30
Megarine	200	120	0,00	653,84	2,14
Sidi Slimane	240	120	0,00	663,00	2,45
Total		840	17,50	6325,38	2,45
Moyen	195				

Dans la région de Touggourt, les ressources en eau existantes sont actuellement supérieures aux besoins. Le besoin journalier (en moyenne : 195 l/j/h) dépasse les normes mondiales (100 à 150 l/j/hab). De ce fait, les ressources mobilisées pour l'AEP (alimentation en eau potable), l'AEI (alimentation en eau industrielle) et l'AEA (alimentation en eau d'irrigation) sont supérieures aux besoins respectifs. On constate aussi que le débit fourni pour l'agriculture est très supérieur à ceux des autres secteurs d'activité.

Le débit du canal de l'Oued Righ est de l'ordre de 260 l/s au point de départ (Beldat Amor) et augmente progressivement vers l'aval (2450 l/s à Sidi Slimane).

II.2. ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE

L'établissement d'un bilan hydrique nécessite une étude précise des différents paramètres du climat, tels que les précipitations, les températures et l'évapotranspiration...etc. Pour cela, on va étudier les paramètres climatiques de la station de Touggourt.

Dans notre région d'étude, on dispose d'une seule station, celle de Touggourt dont les coordonnées sont les suivantes :

Latitude : 33°11'N

Longitude : 06°13'E

Altitude : 85 m.

Le climat de la vallée de l'Oued Righ est typiquement saharien qui se caractérise par des précipitations très faibles, capricieuses, une température élevée et une humidité relativement faible.

II.2.1. Les précipitations

La vallée subit l'influence d'un gradient pluviométrique décroissant du Nord vers le Sud ; dans les régions sahariennes les pluies sont rares et aléatoires. D'après la figure 10, on remarque que le mois le plus pluvieux est janvier (19.99 mm), juillet (1.32 mm) étant le mois le plus sec.

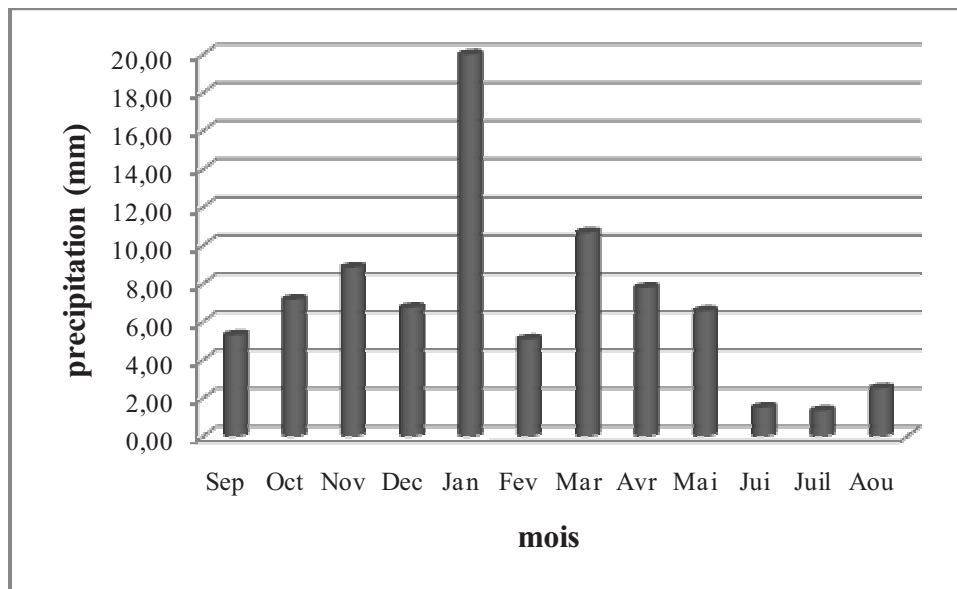


Fig.10 précipitations moyennes mensuelles période (1975-2009)

II.2.2. Humidité relative de l'air

Les valeurs de l'humidité relative de la station de Touggourt sont relativement homogènes. Les moyennes mensuelles varient entre 31% et 64 %, sachant que la moyenne annuelle est de l'ordre de 47%.juillet est le mois le plus sec et janvier est le mois le plus humide, selon la figure 11.

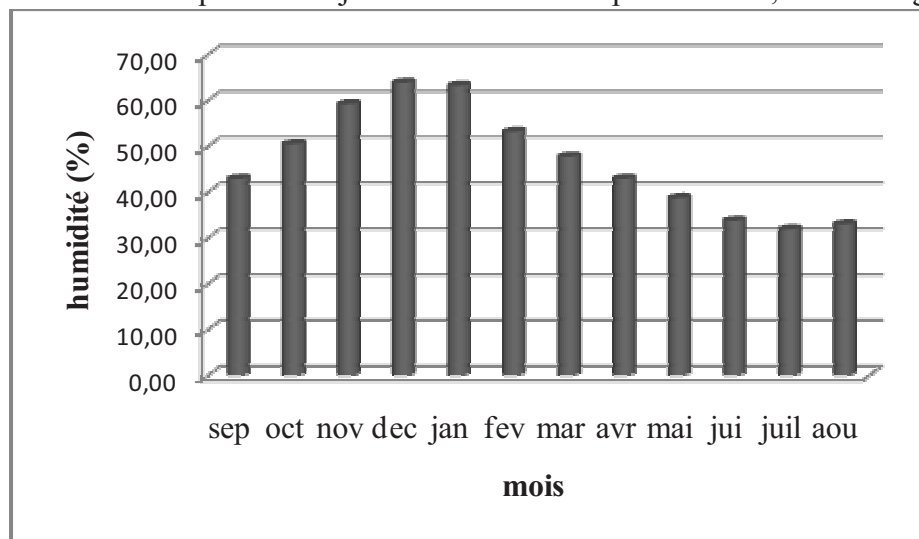


Fig.11 humidité moyenne mensuelle période (1975-2009)

II.2.3. Les vents

D'après la figure 12, le maximum de vent est enregistré au mois de mai avec une vitesse de 4.2 m/s et le minimum en décembre est de 2.6 m/s .Ces vents soufflent suivant des directions différentes.

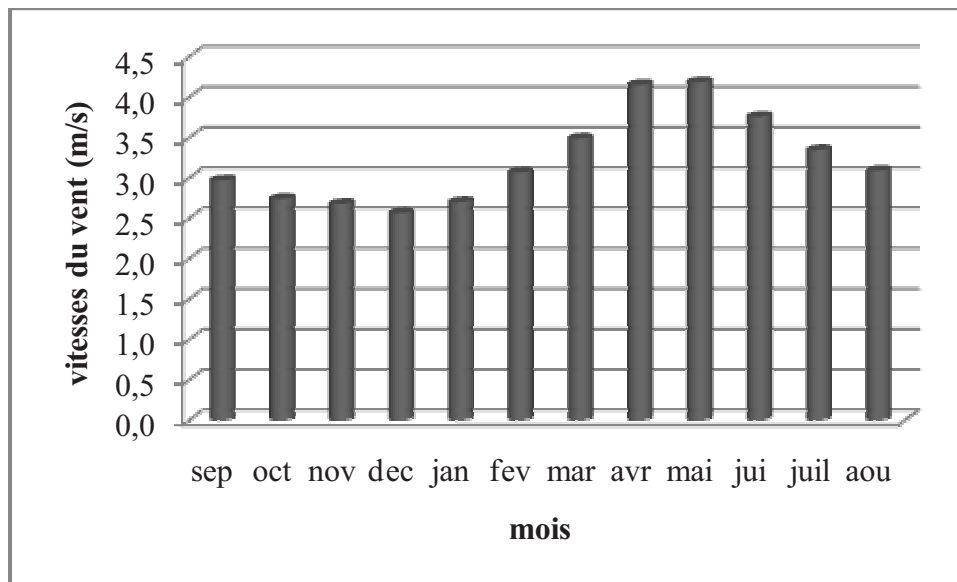


Fig.12 Les vitesses du vent moyennes mensuelles, période (1975-2009).

II.2.4. Durée d'insolation

La vallée de l'Oued Righ reçoit une quantité de la lumière solaire relativement très forte, le maximum est atteint au mois de juillet avec une durée de 361 heures d'insolation et le minimum au mois de janvier avec une durée de 235 heures. (Fig.13)

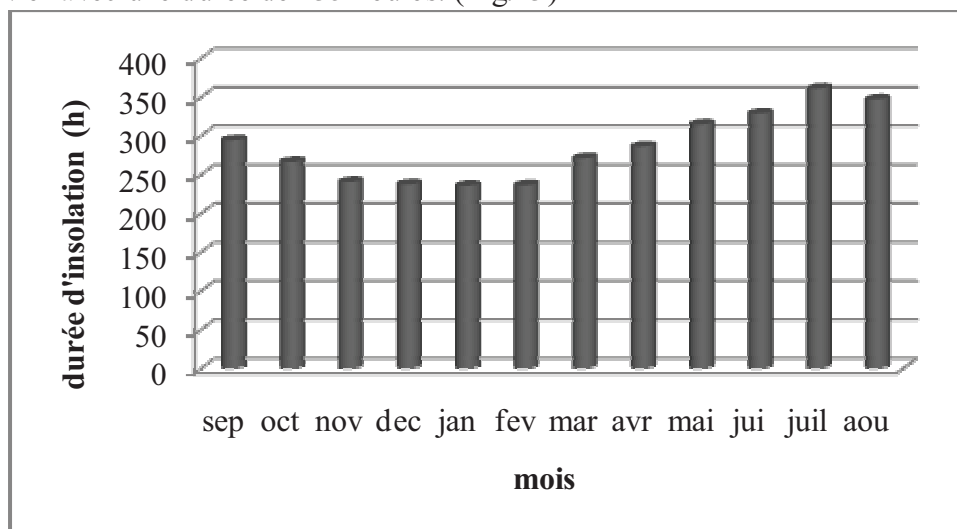


Fig.13 Durée d'insolation moyenne mensuelle, période (1975-2009).

II.2.5. La Température

Selon la figure 14 le maximum des moyennes mensuelles est atteint au mois de juillet 33.48 °C et le minimum au mois de janvier 10.17 °C. D'après les moyennes annuelles, les années 1999 et 2001 sont les années les plus chaudes durant la période (1975-2009). 1976 est l'année la plus froide durant cette période.

La température moyenne maximale absolue est atteinte en mois de juillet avec 41.04°C, et le minimum absolu au mois de janvier 4.59 °C.

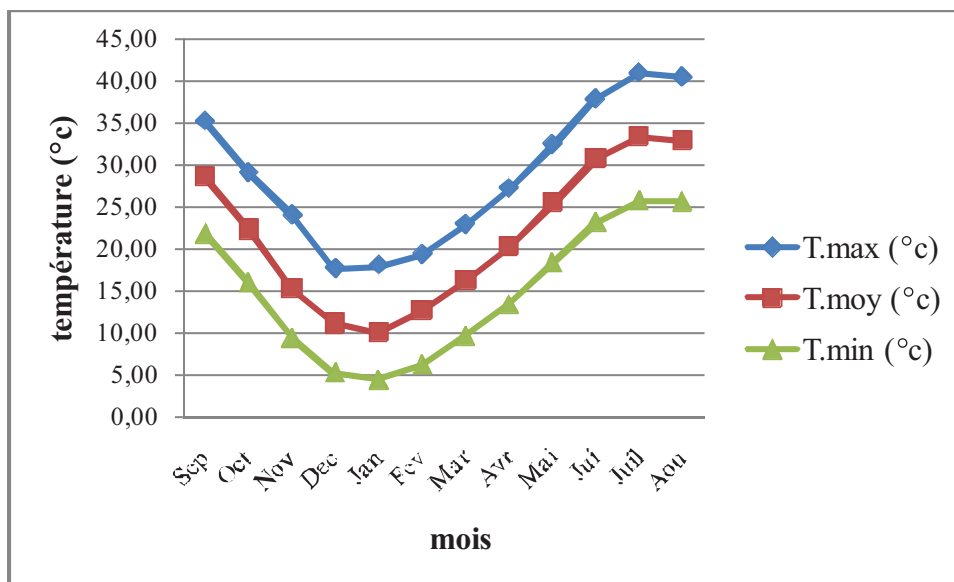


Fig.14 Températures moyennes mensuelles minimales et maximales période (1975-2009).

II.2.6. Évaporation

Selon la figure 15, l'étude du phénomène d'évaporation intervient dans le cycle de l'eau au moment où les précipitations atteignent la surface du sol.

Le maximum d'évaporation est enregistré au mois de juillet avec 407 mm et le minimum au mois de décembre avec une évaporation de 110mm.

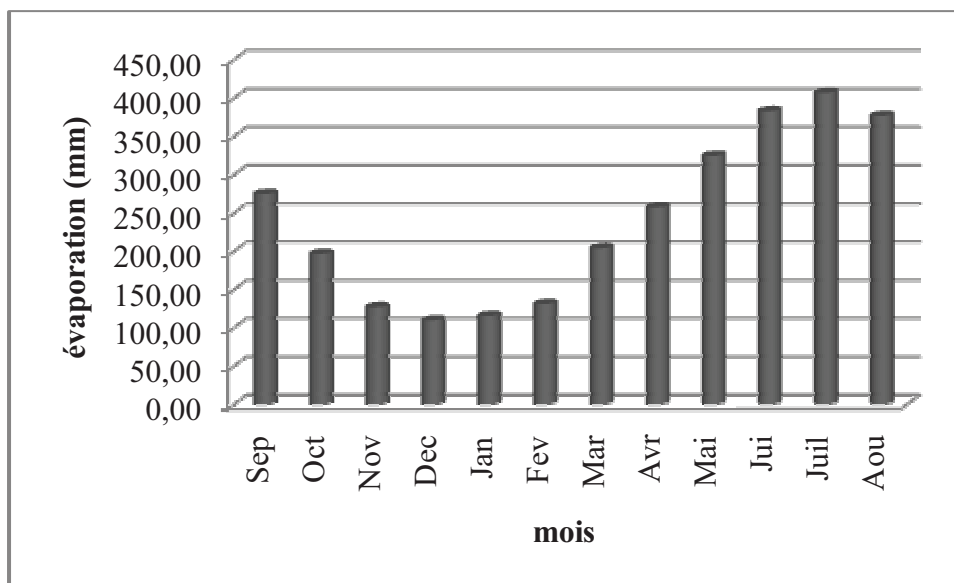


Fig.15 L'évaporation moyenne mensuelle, période (1975-2009).

II.3. CARACTÉRISATION DU CLIMAT

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou de diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent généralement en compte l'offre pluviométrique, la demande évaporatoire et les températures. Ceux qui sont les plus couramment utilisés sont les suivants :

II.3.1. Diagramme ombrothermique de Gaussen

Un mois se définit selon (Bagnouls et Gaussen, 1953,1957) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température. Le diagramme ombrothermique permet de suivre les variations saisonnières de la réserve hydrique. L'aire comprise entre les deux courbes (Fig.16) représente la période sèche. Dans la région d'Oued Righ cette période s'étale sur toute l'année.

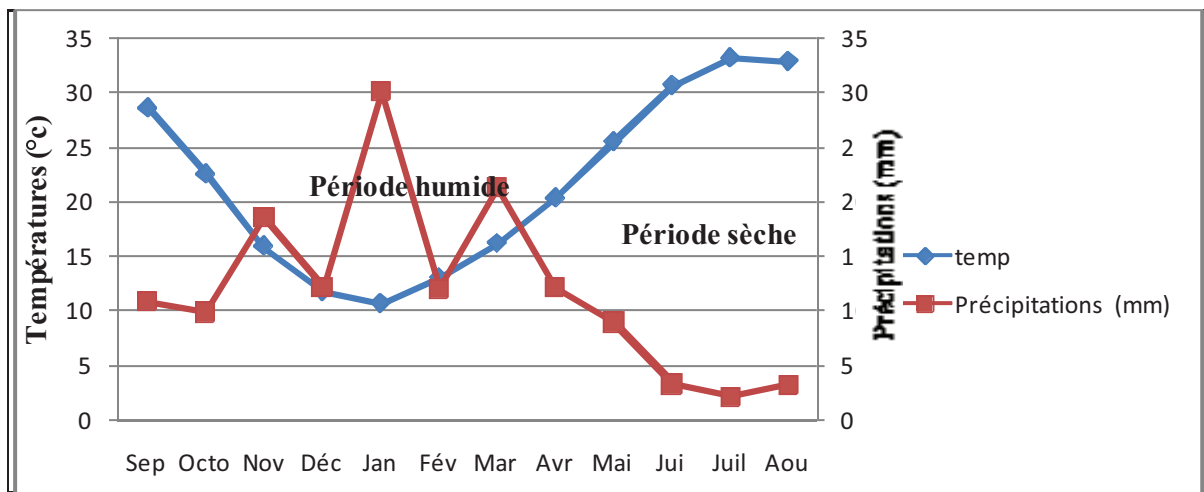


Fig.16: Diagramme ombrothermique de la région d'étude (1975-2009)

II.3.2. Le climagramme d'Emberger

Il permet de connaître l'étage bioclimatique, il est représenté :

- En abscisse par la moyenne des minima du mois le plus froid.
- En ordonnées par le quotient pluviométrique (Q_2).

Nous avons utilisé la formule suivante :

$$Q_2 = 2000 [P / (M^2 - m^2)] \quad (01)$$

Q_2 : quotient thermique d'Emberger.

P : précipitation moyenne annuelle en mm.

M : moyenne de maxima du mois le plus chaud en degré kelvin (°K).

m : moyenne des minima du mois le plus froid en degré kelvin (°K).

L'application numérique donne les résultats suivants :

$$P = 83.30 \text{ mm.}$$

$$M = 314.19 \text{ °K}$$

$$m = 277.74 \text{ °K}$$

$$\text{Ce qui donne : } Q_2 = 7.74$$

Grâce à cette formule, Les valeurs obtenues sont en suite portées sur le climagramme pour savoir dans quel étage se situe la zone d'étude. D'après la figure 17, notre région est située dans l'étage bioclimatique Saharien à hivers doux.

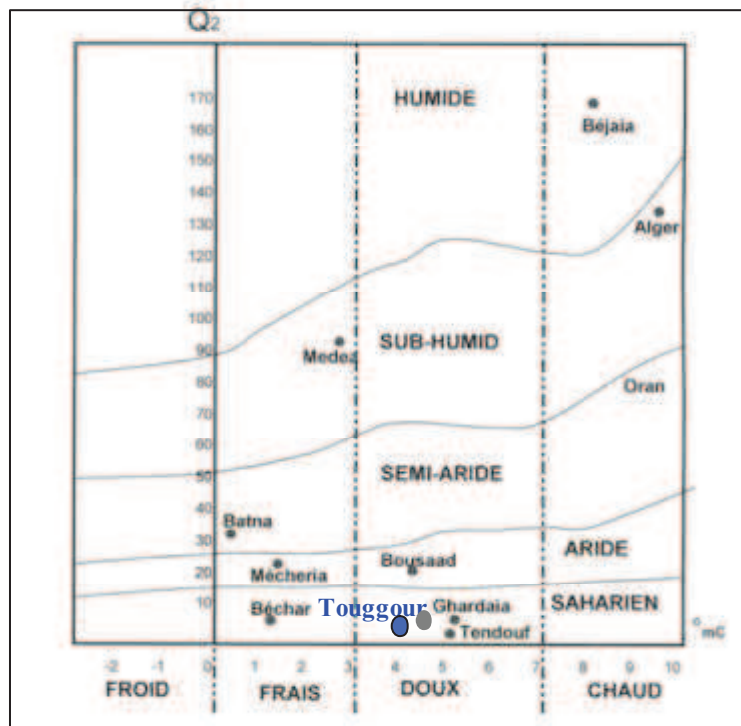


Fig.17 Climagramme d'Emberger de la région d'étude (1975-2009).

II.3.3. Indice d'Aridité de De Martonne :

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

$$I = P / (T + 10) \quad (02)$$

Avec :

P : La précipitation moyenne mensuelle en mm.

T : la température moyenne mensuelle en °C.

Tab.03 Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne.

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

Les calculs des indices de De Martonne de la région d'étude ont donnés les résultats dans le tableau 04

Tab.04 Indice d'Aridité de De Martonne.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Ma	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
P (mm)	5.28	7.15	8.83	6.72	19.99	5.06	10.66	7.77	6.55	1.49	1.32	2.49
T (C°)	28.78	22.42	15.37	11.24	10.17	12.73	16.27	20.34	25.61	30.88	33.48	33.11
I = P/(T+10)	0.14	0.22	0.35	0.32	0.99	0.22	0.41	0.26	0.18	0.04	0.03	0.06

En comparant les valeurs calculées de l'indice d'aridité avec la classification du tableau 03, les valeurs du tableau 04 varient entre 0.03 et 0.99 d'où le type de climat de notre région est Hyperaride.

II.3.4. Méthode d'Euverte

La méthode d'Euverte fait intervenir deux paramètres qui sont la température et la précipitation dans le rapport P/T, ce dernier permet de mieux connaître l'humidité du sol.

Tab.05 Relation température précipitation, méthode d'Euverte.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Ma	Av	Mai	Jui	Juil	Aou
P (mm)	5.4	4.93	9.27	6.04	15.02	5.98	10.64	6.05	4.47	1.62	1.05	1.61
T (°C)	28.86	22.21	15.49	11.22	10.16	12.74	16.11	20.25	25.47	30.78	33.27	32.93
P/T	0.18	0.32	0.57	0.60	1.97	0.40	0.66	0.38	0.26	0.05	0.04	0.08

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

$P/T < 1 \Rightarrow$ régime très sec. La période très sèche caractérise toute l'année à l'exception du mois de Janvier.

II.4 ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Introduction

L'évapotranspiration est déterminée par l'ensemble des processus d'évaporation (phénomène physique) et de transpiration (phénomène biologique). On distingue alors l'évapotranspiration potentielle (**ETP**) 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 (**ETR**) qui correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée par le sol, végétauxetc.

II.4.1. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Pour le calcul de l'ETR nous avons utilisé plusieurs formules : de **Turc** et de **Coutagne**.

II.4.1.1. Formule de Turc

Cette formule est applicable dans tous les climats, elle est fonction de précipitation moyenne annuelle et de la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} \quad (03)$$

Avec

ETR : l'évapotranspiration réelle en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : pouvoir évaporant de l'atmosphère telle que $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

T : température moyenne annuelle de l'air en (°c).

Pour la vallée de l'Oued Righ, on a :

P= 83.30mm, **T** = 21.70 °c, **L** = 1353,41. Donc :

ETR= 87.62 mm

II.4.1.2. Formule de Coutagne

Ce déficit d'écoulement est rapproché de l'ETR, cette formule fait intervenir la pluviométrie et la température selon l'équation suivant :

$$\text{ETR} = \text{D} = P - \lambda P^2 \quad (04)$$

$$\lambda = 1/(0.8 + 0,14T)$$

Où :

D : déficit d'écoulement en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

T : température moyenne annuelle en °c.

Cette formule est applicable pour les valeurs de λ comprise entre $\frac{1}{8}\lambda$ et $\frac{1}{2}\lambda$.

Dans notre région :

$$P = 83.30 \text{ mm}, T = 21.70 \text{ °c}$$

$$\frac{1}{8}\lambda = 0,48, \quad \frac{1}{2}\lambda = 1,92 \quad \lambda = 0,26$$

N.B : La formule de **Coutagne** n'est pas applicable car la valeur de λ n'est pas comprise entre $\frac{1}{2}\lambda$ et $\frac{1}{8}\lambda$.

II.4.2. Estimation de l'évaporation potentielle (ETP)

De nombreux auteurs ont établis des formules empiriques donnant une approximation de l'ETP à partir de paramètres climatiques facilement accessibles.

L'ETP se calcule par les formules suivantes :

⇒ La formule de **Turc**.

⇒ La formule de **Serra**.

⇒ La formule de **Thorntwaite**.

⇒

II.4.2.1. Formule de Turc

Suite à ses expériences faites sur des cuves lysimétriques à Versailles, Rothamsted et Groningen, L.Turc a publié une gamme de formules permettant le calcul de l'ETP. En 1962, il ajouta à sa formule de calcul de l'ETR, le bilan radiatif et introduisit l'humidité relative. En gardant la simplicité et disponibilités des données météorologiques, la formule de Turc s'écrit ainsi :

$$\text{ETP} = 0.40 [T/(T+15)](I_g+50) \quad (05)$$

Dans laquelle on a :

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm/mois).

T : température moyenne mensuelle en (°c), mesurée sous abri.

I_g : radiation solaire globale exprimée en cal/cm²/jour.

I_g : $I_{ga}(0.25+0.45 h/H)$.

I_{ga} : radiation maximale théorique tirée de tableau (voir annexes Tab.36).

La constante 0.4 est remplacée par 0.39 pour les mois de 30 jours et par 0.37 pour le mois de février.

H : durée astronomique du jour, définie à partir de tableau (voir annexes Tab.35).

h : durée d'insolation effective mesurée par l'héliographe.

Quand l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%, on multiplie la valeur de l'ETP par le coefficient de correction suivant :

$$K = 1 + [(50-hr)/70] \text{ avec}$$

hr : humidité relative de l'air durant le mois en question.

Les résultats de l'application de cette formule sur notre région sont présentés dans le tableau 06 :

Tab.06 valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Des	Jan	Fèv	Mars	Avril	Mai	Juin	Jouit	Août
T (c°)	28,81	22,34	15,4	11,19	10,12	12,70	16,20	20,31	25,48	30,78	33,34	33,01
Iga	463,41	366,71	289,22	253,01	271,48	342,00	425,87	502,01	548,11	579,42	594,09	552,08
H	12,39	11,36	10,47	9,98	10,23	10,96	11,99	13,01	13,91	14,34	14,10	13,36
h	9,80	8,59	8,01	7,65	7,59	8,14	8,74	9,53	10,14	10,95	11,64	11,18
Ig	463,41	366,71	289,22	253,01	271,48	342,00	425,87	502,01	548,11	579,42	594,09	552,08
Hr	42,86	50,45	59,17	63,82	63,19	53,13	47,72	42,88	38,67	33,71	31,86	32,93
ETP	135,01	99,87	68,68	51,91	51,95	66,57	99,03	127,09	150,87	169,45	177,91	165,75
K	1,10						1,03	1,10	1,16	1,23	1,26	1,24
ETPc	148,78	99,87	68,68	51,91	51,95	66,57	102,26	140,02	175,28	208,88	224,03	206,17
ETPctotale = 1544,39 mm.												

II.4.2.2. Formule de Serra

L'ETP exprimée par la formule de Serra s'écrit :

$$ETP = 1,6 \cdot \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \quad (06)$$

$$I = \sum_{I=i}^K i \quad i = 0,09T^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{Avec : } \alpha = \left(1,6 \cdot \frac{I}{100} + 0,5 \right) \quad (07)$$

Et $\alpha = 2,33$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

T : température moyenne mensuelle en (°c).

I : indice thermique annuel

i : indice thermique mensuel.

Tab.07 L'ETP moyenne mensuelle, calculée par la formule de Serra

Mois	T (en °c)	I	ETP en mm	K	ET P C en mm
Sep	28,81	13,91	137,18	1,03	141,29
Oct.	22,34	9,50	75,84	0,97	73,56
Nov.	15,4	5,43	31,87	0,86	27,40
déc.	11,19	3,36	15,14	0,84	12,71
Jan	10,12	2,89	11,98	0,87	10,42
Fév.	12,70	4,07	20,3	0,85	17,29
Mars	16,20	5,86	35,87	1,03	36,94
Avril	20,31	8,23	60,74	1,1	66,81
Mai	25,48	11,57	103,04	1,21	124,67
Juin	30,78	15,36	160,0	1,22	195,2
Jouit	33,34	17,32	192,7	1,24	238,9
Août	33,01	17,06	188,37	1,16	218,5
	24,39	114,56	1033,39		1157,69

II.4.2.3. Formule de Thornthwaite

C'est l'une de plus anciennes formules mises au point, elle reste très employée en hydrologie car sa résolution ne nécessite que la connaissance de la température moyenne mensuelle :

L'ETP par la formule de **Thornthwaite** s'écrit :

$$ETP_c = ETP \times k = 1,6 \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha \times k \quad (08)$$

Avec :

k : coefficient d'ajustement mensuel.

I: indice thermique mensuel $i = \left(\frac{T}{I} \right)^{1,514}$

I: indice thermique annuel $I = \sum 12i$

α : Exposant climatique :

$$\alpha = 0,49239 + [1792 \cdot 10^{-5} \cdot I] - [771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2] + [675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3] \quad (09)$$

T : température moyenne mensuelle du mois considéré en °c.

Tab.08 Calcul de l'ETP d'après Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Des	Jan	Fèv	Mars	Avr	Mai	Jui	Joui	Août
P mm	6.24	7.52	12	5.92	16.02	5.74	10.59	6.05	6.27	1.64	0.98	2.05
T c°	28,81	22,34	15,4	11,19	10,12	12,70	16,20	20,31	25,48	30,78	33,34	33,01
I	14,17	9,64	5,50	3,38	2,90	1,67	5,92	8,35	11,67	15,66	17,68	17,41
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16
Etp	166,88	87,70	34,21	15,25	11,82	21,08	38,89	68,91	122,31	197,28	241,47	235,47
Etpc	171,88	85,07	29,42	12,81	10,28	17,85	40,05	75,80	147,99	240,68	292,78	273,14
ETPc totale = 1397,14 mm.												

II.4.2.4. Discussion des résultats

Il est utile de comparer les résultats obtenus par les méthodes utilisées afin de connaître celle qui s'adapte le mieux à la région. le graphe relatif (fig.19) a permis de conclure que les résultats auxquels nous avons aboutis sont relativement égaux. pour notre région, nous allons appliquer la méthode de Thornthwaite, qui est universellement appliqué pour le calcul des bilans hydrologiques.

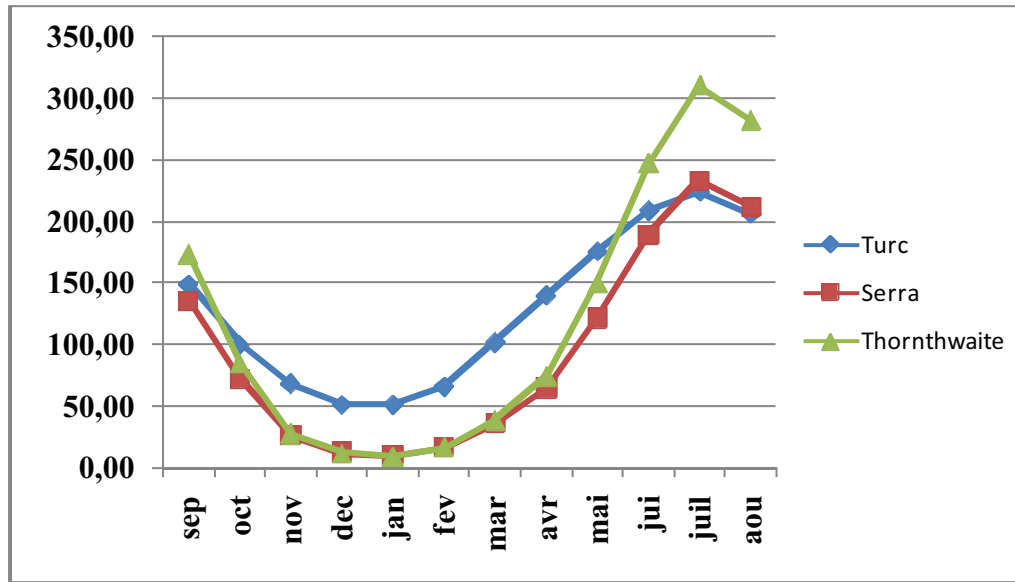


Fig.19 L'ETP estimée par différentes méthodes.

II.5. LE BILAN HYDROLOGIQUE

Le calcul du bilan d'après la méthode de **Thornthwaite** fait intervenir l'évapotranspiration potentielle et la pluviométrie, le principe est le suivant :

- lorsque $P \geq ETP$: l'ETR sera égale à l'ETP.
- lorsque $P \leq ETP$: l'ETR sera égale à l'ETP aussi longtemps que les réserves en eau du sol seront capables d'équilibrer la balance, au delà il y aura déficit.

Cette méthode a été basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule de Hallaire 1960 (cité par J.Richard 1979)

$$RFU = \frac{Da \cdot He \cdot P}{100} \quad (10) \quad \text{Où}$$

Da : densité apparente du sol.

He : humidité équivalente en %.

P : profondeur de la couche traversée par les racines.

Thornthwaite, dans ces calculs, utilise une valeur moyenne de la réserve utile (RFU) égale à **100 mm** mais dans notre cas (région saharienne), on prend (RFU) égale à **50 mm** (d'après les agronomes de l'institut national d'agronomie d'Alger)

Tab.09 Calcul de l'ETR d'après THORNTHWAITE

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juit	Août
P	5.28	7.15	8.83	6.72	19.99	5.06	10.66	7.77	6.55	1.49	1.32	2.49
ETP	168.5 9	87.73	32.71	14.41	11.09	19.95	37.92	68.03	124.19	202.62	250.2 4	243.2 4
ETPc	173.6 5	85.10	28.13	12.10	9.65	16.96	39.06	74.83	150.27	247.19	310.2 9	282.1 6
±RFU						-11.9	-28.4	-9.7				
RFu	0	0	0	0	50.00	38.1	9.7	0	0	0	0	0
ETR	5.28	7.15	8.83	6.72	9.65	19.96	39.06	17.47	6.55	1.49	1.32	2.49
D	168.3 7	77.95	19.30	5.38			18.70	67.06	143.72	245.70	308.9 7	279.6 7
Excéde nt					10.34							
P-ETP	- 168.3 7	-77.95	-19.30	-5.38	10.34	-11.90	-28.40	- 67.06	-143.72	-245.70	- 308.9 7	- 279.6 7

Le déficit atteint son maximum au mois de juillet 308,97 mm.
Il nous donne une approximation des besoins en eau d'irrigation des cultures.

II.6.GEOLOGIE

II.6.1.Cadre géologique régional du bas Sahara

La région de Touggourt que nous étudions fait partie du bas Sahara qui est limité :Au nord par l'accident sud atlasique, et les premiers contreforts des monts des Aurès, au sud, par la falaise méridionale du Tihert, à l'est par les affleurements crétacés du Dahar, et à l'ouest par la dorsale du Mزاب.

C'est donc entre la bordure septentrionale du Hoggar et la bordure méridionale de l'Atlas saharien que se situe le grand bassin sédimentaire du Bas-Sahara. Avec plus de 600 Km de diamètre il couvre 720 000 Km² de superficie. Il s'étend des pieds de l'Aurès au Nord jusqu'au Tassilis au Sud. Une grande partie du bassin est recouverte par le grand Erg oriental, soit 125 000 Km². La région de Touggourt que nous étudions fait partie de cet ensemble.

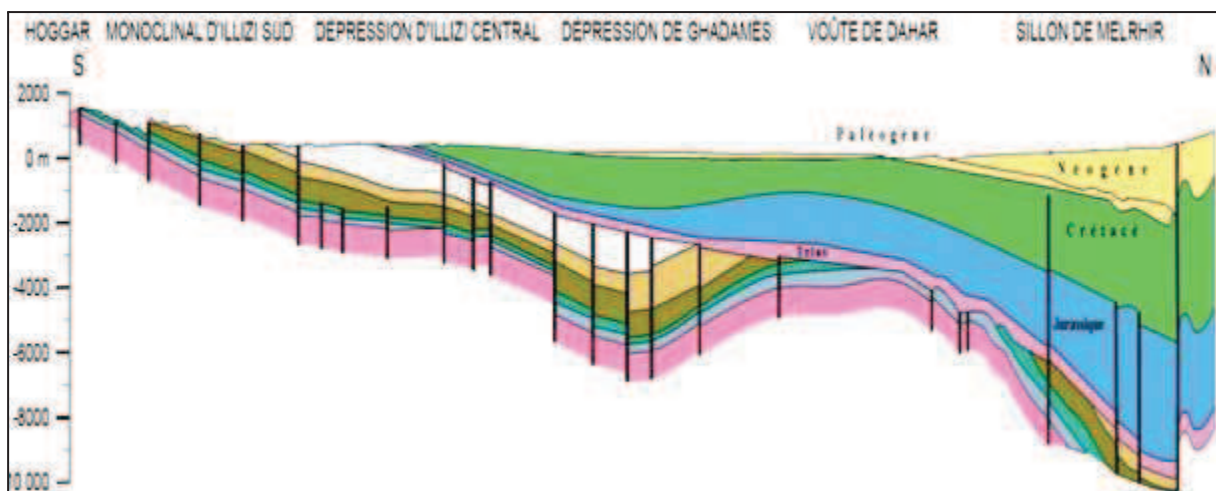


Fig.20 Coupe géologique synthétique du Sahara oriental, d'après Sonatrach.

Le Bas-Sahara est caractérisé par l'extrême simplicité de sa topographie. Mis à part le côté Nord, les autres bordures sont de hauteur modeste et s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée, matérialisée par l'axe SSW-NNE et parcourue par les oueds Mya et Righ. Vers le nord au contraire, se dresse une haute barrière composée des monts des Ouled Nail, des Aurès et des Nemamcha, bordant une dépression longitudinale occupée par des chotts, et dont le fond est inférieur au niveau de la mer.

Le bas Sahara se présente ainsi comme une cuvette synclinale. Tous les terrains, depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie par le grand erg oriental. Cependant, quelques affleurements sont observés sur les bordures.

II.6.2.Cadre géologique local

II.6.2.1. Introduction

Pour étudier la géologie de la zone de Touggourt, nous étendrons le champ d'investigation à tout le Bas-Sahara, en raison de l'ampleur des structures géologiques, stratigraphiques et tectoniques, caractérisant la région. Nous distinguons de bas en haut, trois ensembles (fig. 20):

- Les terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux du Tademaït et Tinghert et le massif du Hoggar,
- Les terrains du Mésozoïque et Cénozoïque, constituent l'essentiel des affleurements des bordures du bas Sahara.,
- Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaires, occupent le centre de la cuvette (fig. 21).

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

Dans cette étude, nous nous intéresserons surtout à la couverture sédimentaire post Paléozoïque, qui renferme les principaux aquifères du Sahara. La série géologique (fig. 22) renferme deux ensembles hydrogéologiques importants dénommés : Continental Intercalaire (à la base) et Complexe terminal (au sommet), présents dans tout le Sahara Nord oriental.

Les nombreux travaux d'auteurs tels que : (J. Savorin 1931, R. Karpoff 1952, A. Cornet 1961 et R. Furon 1968) ont permis de reconstituer une série stratigraphique, aussi complète que possible.

Les formations géologiques seront décrites du plus ancien au plus récent.

II.6.2.2.Le Mésozoïque

II.6.2.2.1. Le Crétacé

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

II.6.2.2.1.1. Le Néocomien

Se subdivise en deux séries :

*- la série inférieure

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

*- la série supérieure

On distingue deux ensembles :

L'ensemble supérieur, constitué de dolomies et de calcaires microcristallins, avec des intercalations d'argiles, de pélites et de marnes blanches et grises,

L'ensemble inférieur, surtout anhydritique avec intercalations d'argiles. Plus ou moins anhydritique, grises, vertes et rouges ces argiles passent à des marnes avec lits dolomitiques.

L'épaisseur du néocomien est de 350m.

II.6.2.2.1.2. Le Barrémien

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

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

II.6.2.2.1.3. L'Aptien

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

II.6.2.2.1.4. L'Albien

Il est essentiellement constitué de grés faibles à ciment argileux et d'argiles sableux. Les grés et les sables sont fins à très fins passant parfois à des pélites, Les argiles souvent pélitiques sont de couleur grise ou verdâtre. Cette formation albienne présente les caractéristiques suivantes :

Épaisseur croissante d'est en ouest, teneurs élevées en éléments clastiques, les teneurs en carbonates décroissantes d'Est en Ouest depuis les valeurs supérieures à 10% jusqu'à des valeurs proches de zéro.

L'Albien se présente comme une série très épaisse.

II.6.2.2.1.5. Le Vraconien

Il est constitué d'une alternance irrégulière de niveaux argileux et dolomitique, d'argiles sableuses et plus rarement de passées de grés à ciment calcaire. Le Vraconien est imperméable, son épaisseur est de 110 m environ.



Légende :

A	Alluvions actuelles, lacs, marécages, Dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-Salines.	p	Pliocène marin Conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées
D	Dunes récentes.	mp	Pontien (localement équivalent du mc)
qt	Quaternaire continental : alluvions, regs, terrasses.	ms	Miocène terminal marin et lagunaire : couche à tripoli, marnes à gypse.
qta	Quaternaire marin : plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent.	mmi	Miocène supérieure marin : calcaire, grès ; argiles
qc	Calabrien : grès marins formations dunaires associées.	mc	Miocène continental anté Pontien
qv	Villafranchien : calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges.	mi	Miocène inférieur marin (burdigalien)
pA	Pliocène continental et Villafranchien non séparés.		
pc	Pliocène continental poudingues, calcaires lacustres.		

Fig.21 carte géologique de la région de Touggourt, extrait de la carte géologique 1/500 000 de l'Algérie, (feuille de Constantine Sud).

II.6.2.2.1.6. Le Cénomanien

Cet étage marque, pour la première fois, depuis le paléozoïque, le retour de la mer au Sahara, jusqu'aux régions les plus lointaines. Selon Karpoff, son faciès est partout lagunaire ou détritique, on peut alors en déduire que le Bas-Sahara, au moment de cette transgression, était partout ramené à une pénéplaine extrêmement plate.

L'immense transgression n'a pas dû se faire partout au même moment et les faciès continentaux montent plus au moins haut dans l'étage.

Le Cénomanien est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Son épaisseur est de l'ordre de 170 mètres.

II.6.2.2.1.7. Le Turonien

Au Turonien, le régime marin persiste dans le Bas-Sahara et la mer présente le maximum d'extension. Dans l'ensemble, le Turonien est calcaire et dolomitique, marneux à la base et dolomitique ou calcaire au sommet. Son épaisseur est de 70 mètres.

II.6.2.2.1.8. Le Sénonien

Dans tous le bas-Sahara, le sénonien est formé de deux ensembles très différents de point de vue lithologique :

Le sénonien lagunaire, à la base,

Le sénonien carbonaté, au-dessus.

Sénonien lagunaire

La limite inférieure, du sénonien lagunaire est généralement nette. En effet, les évaporites et argiles sénoniens sont aisément différenciables des calcaires et dolomies du Turonien. Le passage est beaucoup moins net entre Sénonien lagunaire et Sénonien carbonaté. Bel et Demargne ont pris comme limite supérieure du Sénonien lagunaire, soit le dernier banc lorsque le passage est franc, soit le point où le pourcentage des carbonates dépasse celui des évaporites lorsque le passage se fait de façon progressive.

Du point de vue lithologique le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. Le Sénonien lagunaire est imperméable.

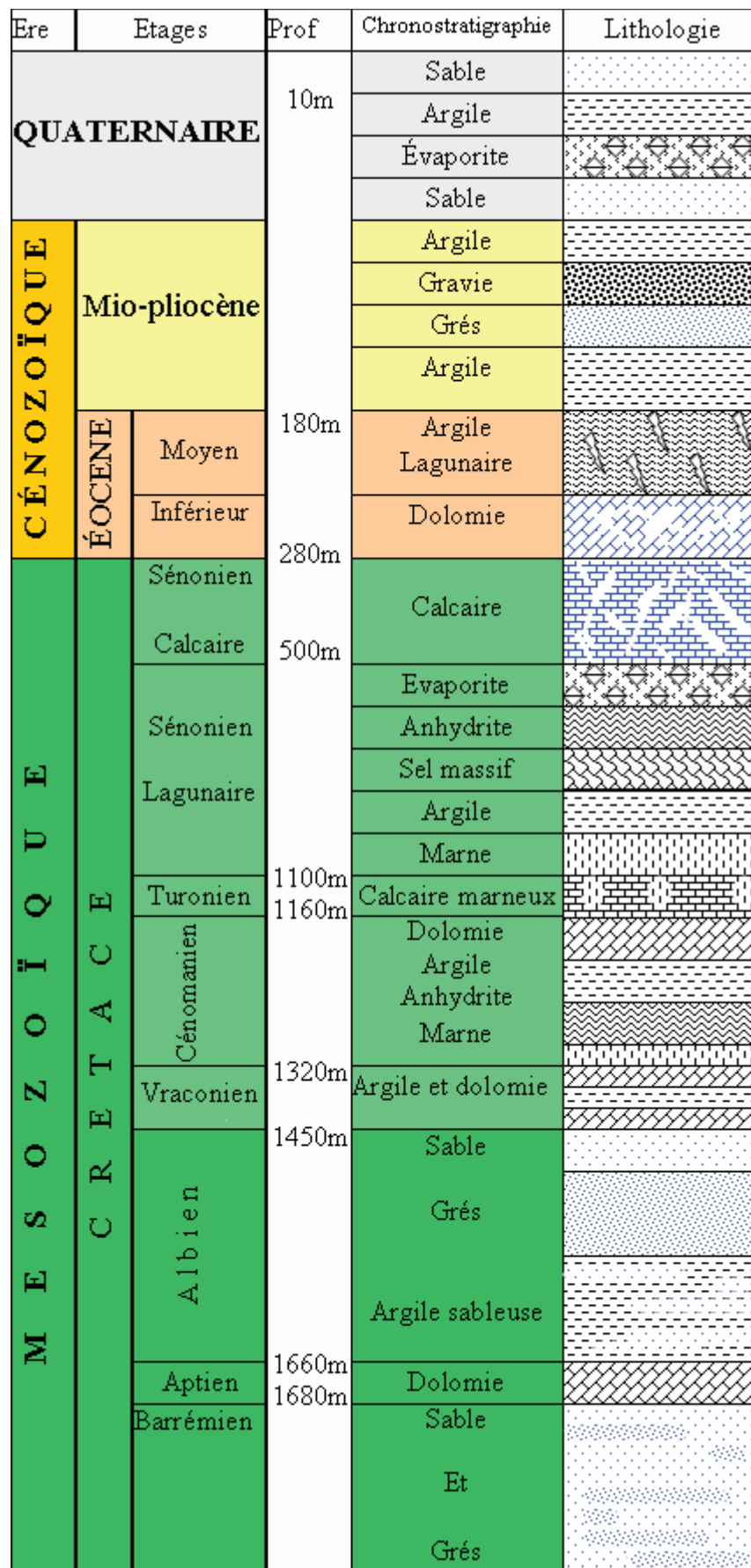


Fig.22 Log stratigraphique synthétique de la région de Touggourt, (sans échelle).

Le sel n'existe que dans certaines zones, son épaisseur totale peut atteindre 140 mètres, mais l'épaisseur maximum d'un banc ne dépasse pas 10 mètres. De plus, les bancs de sel se présentent toujours à la base du Sénonien lagunaire.

Au point de vue hydraulique, ce niveau jouera le rôle d'imperméable de base, son épaisseur est de l'ordre de 270 mètres.

Sénonien carbonaté

Le Sénonien supérieur est carbonaté: il est essentiellement constitué de dolomies et de calcaires microfissures avec des intercalations de marnes d'argiles et plus rarement d'anhydrite. La limite entre Sénonien lagunaire et Sénonien carbonaté n'est pas toujours bien nette. La limite supérieure du Sénonien carbonaté est encore plus floue, en effet, il y a pratiquement continuité de point de vue lithologique entre le Sénonien et l'Eocène carbonaté. Les deux niveaux étant formés de calcaires de même nature. Seule la présence de nummulites permet d'identifier l'Eocène.

Le Sénonien carbonaté est essentiellement formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec des intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrite. Son épaisseur dépasse parfois 200 mètres.

II.6.2.3. Le Cénozoïque

II.6.2.3.1. L'Eocène

Comme pour le Sénonien, on distingue dans l'Eocène deux ensembles lithologiques:

- ✓ L'Eocène carbonaté à la base,
- ✓ L'Eocène évaporitique au-dessus.

- L'Éocène inférieur (carbonaté)

Il est composé de bancs de dolomies, de calcaires dolomitiques, de calcaires à nummulites et à rognons silex. Avant la fin de l'Eocène carbonaté, la mer quitte définitivement le Sahara, qui ne connaîtra plus qu'un régime continental, souvent désertique et ce jusqu'à nos jours.

- L'Éocène moyen (évaporitique)

Au-dessus de l'Eocène carbonaté, on rencontre une formation constituée par une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrites. Elle renferme une faune d'âge Eocène à nummulites et globigérines. C'est cette formation que l'on désigne dans le Bas-Sahara sous le nom d'Eocène évaporitique.

Les bancs carbonatés sont suffisamment importants pour constituer des niveaux aquifères.

II.6.2.3.2. Le Mio-Pliocène

Le Mio-pliocène correspond au Continental Terminal de C. Kilian, 1933. C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance, indifféremment sur le primaire, le C.I., le Cénomaniens, le Turonien, le Sénonien ou l'Eocène.

Bel et Demargne distinguent de bas en haut quatre niveaux dans ces dépôts lenticulaires :

Niveau 1

Argileux, peu épais, il existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène évaporitique, ces argiles de la base du Mio-Pliocène constituent une barrière très peu perméable entre la nappe du Sénonien et de l'Eocène carbonaté et celle des sables du niveau 2.

Niveau 2

Gréso-sableux, c'est le niveau le plus épais et le plus constant. A sa base on trouve parfois des graviers, alors que le sommet se charge progressivement en argiles pour passer au niveau 3. Le niveau 2 est le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène.

Niveau 3

C'est une formation argilo-sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. La couche n'existe que dans certaines zones.

Niveau 4

C'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène, parfois en continuité avec le niveau 2. Le sommet du niveau 4 affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaires gréseux (croûte hamadienne). L'épaisseur de cet horizon est de l'ordre de 300 mètres.

II.6.2.4. Le Quaternaire

Le Quaternaire est constitué de sables éoliens, localement intercalés de lentilles d'argiles sableuses et gypseuses. Ces sables forment d'énormes accumulations dans le grand Erg oriental. C'est à ce niveau que l'on rencontre la nappe superficielle qui est alimentée principalement par l'infiltration des eaux déficitaires lors d'irrigation. Son épaisseur est variable et peut atteindre localement une dizaine de mètres.

II.7. TECTONIQUE GÉNÉRALE

La géométrie actuelle des formations du continental intercalaire et du complexe terminal du Sahara est caractérisée par l'absence des déformations tectoniques importantes (fig. 23).

La chaîne des Maghrébides qui a subi plusieurs phases orogéniques au Tertiaire, va avoir des contrecoups sur la plate-forme saharienne :

les mouvements de l'Eocène moyen à supérieur, sont bien nets, la phase du Miocène inférieur qui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès, enfin la phase plio-quaternaire qui s'inscrit avec les précédentes dans la phase alpine ; d'où l'apparition des fractures de direction Est-Ouest, forment la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie sud « sillon Sud auresien », ces fractures régissent l'écoulement des eaux souterraines d'où la naissance des chotts. La flexure Sud atlasique de direction Est-Ouest qui sépare deux domaines distincts, c'est aussi qu'on, peut avoir au Nord des points culminant « monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés.

Nous présentons un tableau récapitulatif des étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien données par R. Karpoff en 1952 :

Tab.10 Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien, Karpoff, 1952.

AGE	STYLE
1- Antécambrien	Plis très aigus, failles.
2- Paléozoïque.	Mouvements amples d'axe Est-Ouest Formation de chaînes orientées N-S, NNE-SSW ou NW-SE sur des axes antécambriens.
3- Post-éocène et anté-Miocène.	Rejeu des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne.
4- Post-Miocène (?).	Premiers plis d'axe NW-SE.
5- Post-Pliocène (?).	Mouvements peut-être dans la région Nord seule. Plis en genou de l'Aurès d'axe E-W.
6- Fin du Quaternaire ancien.	Plis affectant le Mio-pliocène seul ou accompagné du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux dont l'axe NW-SE est le principal.
7- Néolithique.	Mouvements de grande amplitude à plis faibles et localisés.

II.7.1.Néotectonique

Une hypothèse récente met en évidence trois phases dans l'évolution du relief du bas Sahara durant le Quaternaire :

- Un affaissement brusque du centre de la cuvette (région actuelle des chotts). Les cours d'eau venant de l'Ouest et du Sud entaillant de larges et profondes vallées dans la couverture Mio-pliocène.

- L'Oued Righ et Oued Igharghar formaient probablement alors un seul grand Oued avec Oued M'ya comme affluent.

- Un comblement partiel de la région effondrée et des vallées qui l'entaillent et l'exhaussement local du sel à la suite duquel l'Oued Righ se sépare de l'oued Igharghar.

Un affaissement lent de la région des grands chotts et comblement de la vallée de l'Oued Righ à la suite d'importants apports pluviaux et éoliens. Ces apports finiront par ennoyer l'oued.

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

II.8.PALÉOGÉOGRAPHIE

Les caractéristiques paléogéographiques du Sahara oriental, du Mésozoïque à l'actuel sont :

L'existence d'une plate forme très régulière sur laquelle toute variation du niveau de la mer, provoque des changements remarquables dans la sédimentation ; l'existence d'une mer peu profonde à partir de laquelle se produisent plusieurs transgressions dont les plus importantes a celles du Cénomaniens et du Sénonien supérieur ; la régression définitive de la mer à la fin de l'Eocène qui s'accompagne de l'érosion d'une partie des calcaires de l'Eocène et du régime continental qui a remplacé le régime marin.

Cette reconstitution paléogéographique, est tirée des travaux de F. Bel et F. Demargne, 1966, elle s'applique à l'ensemble du Bas Sahara.

Durant la première moitié du secondaire, la sédimentation dans la région du Touggourt et dans tout le Sahara oriental a été de type continental et lagunaire. En effet, du Trias à l'Albien, se sont déposés des argiles et des sables d'origine éolienne ou fluviatile et des évaporites d'origine lagunaire. On note cependant, quelques intrusions marines, en particulier en Jurassique et à l'Aptien.

Durant la seconde moitié du secondaire, d'autres phénomènes se sont succédés : Au Cénomaniens les calcaires marins viennent se déposer en transgression sur les grès continentaux albiens. Ces calcaires qui s'intercalent avec les argiles et des évaporites traduisent un régime marin peu profond, évoluant vers un régime lagunaire responsable du dépôt des évaporites et des argiles gypsifères.

Au Turonien, le régime marin s'est stabilisé, permettant le dépôt d'une série calcaire homogène, atteignant parfois plus de 100 mètres dans le Sahara oriental. La stabilisation du régime marin durant le Turonien n'est que temporaire.

En effet, dès le début du Sénonien dans Touggourt se dépose en alternance de l'anhydrite, des argiles, des dolomies ainsi que quelques bancs calcaires. Le dépôt parfois d'un banc de sel massif à la base dans le bas Sahara témoigne particulièrement du régime lagunaire qui s'était installé sur le Sahara oriental.

Au Sénonien supérieur, le régime marin réapparaît une nouvelle fois déposant ainsi la seconde série calcaire. Cette transgression Sénonienne semble moins importante que celle du Turonien. En effet, on note la présence de petites intercalations d'évaporites dans les calcaires Sénoniens, ce qui n'est pas le cas des dépôts turoniens.

Au début de l'Eocène inférieur, la mer recouvre toujours le Sahara oriental, c'est le dépôt des calcaires à Nummulites.

Durant l'Eocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Eocène inférieur sont peu à peu remplacés par des dépôts lagunaires où alternent les argiles, les évaporites et les calcaires. La

faible extension de ce golfe marin localisé dans le bas Sahara marque les dernières manifestations de la mer saharienne dont la disparition définitive se situe vers la fin de l'Eocène.

A la fin de l'Eocène, le Sahara oriental se présente sous l'aspect d'une plate forme calcaire émergée qui sera exposée à l'érosion durant tout l'oligocène.

Au Mio-pliocène, suite à l'épirogénèse alpine, des sédiments argileux et sableux continentaux se déposent sur l'ensemble du Sahara oriental. Cette sédimentation continentale se poursuit durant le Quaternaire. C'est donc aux époques Tertiaires et Quaternaire que le Sahara oriental a pris la configuration que nous lui connaisant aujourd'hui.

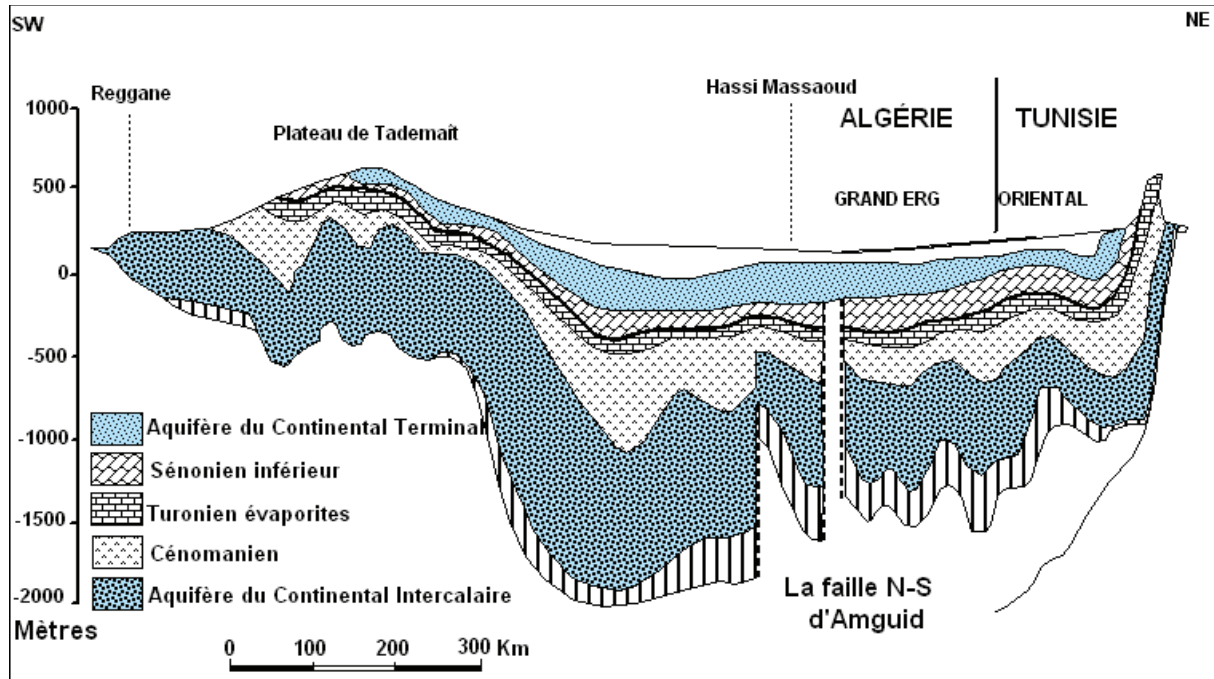


Fig.23 Coupe géologique du Sahara septentrional d'après UNESCO1972.

II.9.HYDROGÉOLOGIE

II.9.1. Introduction

Dans la région étudiée, il existe deux systèmes aquifères, séparés par d'épaisses séries argileuses et évaporitiques, de la base du Crétacé supérieur (fig. 24). Il s'agit du :

- ◆ Continental Intercalaire (CI), aquifère profond composé de sable gréseux ou gréseux argileux,
- ◆ Complexe Terminal, composé de trois nappes superposées:
 - L'une dans les sables et argiles du Pliocène (CT 1).
 - L'autre dans les sables grossiers à graviers, du Miocène supérieur (CT 2).
 - La troisième dans les calcaires fissurés, plus ou moins karstiques, de l'Eocène inférieur (CT 3).

Au dessus, existe un aquifère superficiel à nappe libre, dite nappe phréatique.

Ces deux systèmes hydrauliques font du Sahara algérien une région considérée comme très riche en ressources hydriques.

II.9.2. Hydrogéologie régionale

II.9.2.1. Le Continental Intercalaire (CI)

C'est une nappe qui est partagée entre trois pays maghrébins : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. La partie algérienne du Continental Intercalaire couvre 600 000 Km² (fig. 24). Elle stocke un volume d'eau considérable, estimé à 50 000 milliards m³ environ. Située à plus de 1400 m de profondeur dans la zone de Touggourt, 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.

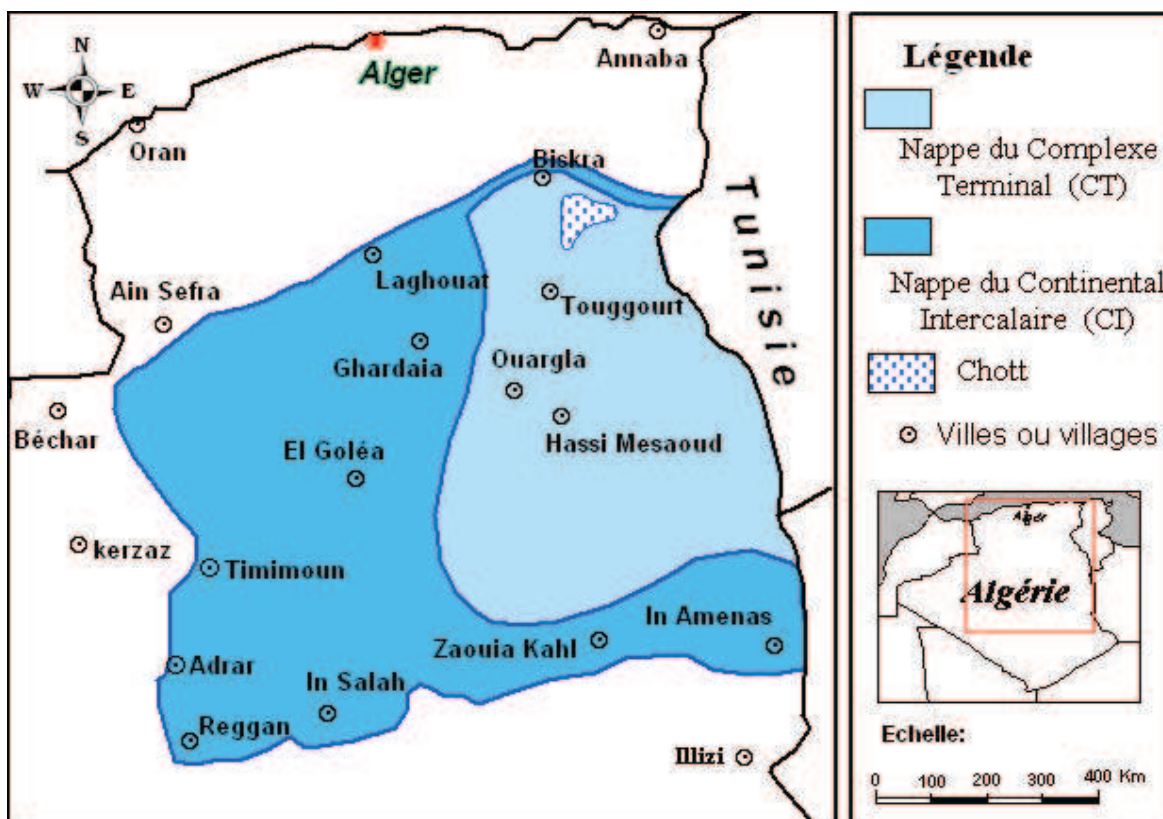


Fig.24 Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal), TESCO, 1992

Limites et morphologie du Continental Intercalaire

Le continental intercalaire est limité au Nord par l'Atlas saharien, à l'Ouest par l'axe Béchar-Reggane et au Sud par l'axe Reggane- Ain Amenas (fig.25).

A l'est, il se prolonge au-delà des frontières Algéro-Libyenne et Algéro-Tunisienne.

Il est partagé par la dorsale M'zab en deux bassins:

- le bassin occidental oriental,
- le bassin oriental qui englobe le bas Sahara, dont une partie la zone d'étude.

La transgression céno manienne, très générale au Sahara, donne au Continental Intercalaire une limite supérieure beaucoup plus uniforme que sa limite inférieure. Ainsi, sur la plus grande partie du Sahara algérien, les grès du Continental Intercalaire sont recouverts par une série argilo-gypseuse lagunaire d'âge probablement Céno manien inférieur, tandis qu'une transgression du céno manien supérieur est très générale.

A la périphérie du Sahara, le Continental Intercalaire se termine évidemment en biseau sur les anciens reliefs hercyniens, mais il atteint très vite une grande puissance dans les anciennes cuvettes d'accumulation. Au sens large, le Continental Intercalaire (CI) occupe l'intervalle

stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. La définition donnée par l'UNESCO dans "l'étude sur les ressources en eaux du Sahara Septentrional" 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 cénomanien 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 (fig. 25). 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%.

La figure au dessous illustre l'évolution Est-Ouest du toit du CI.

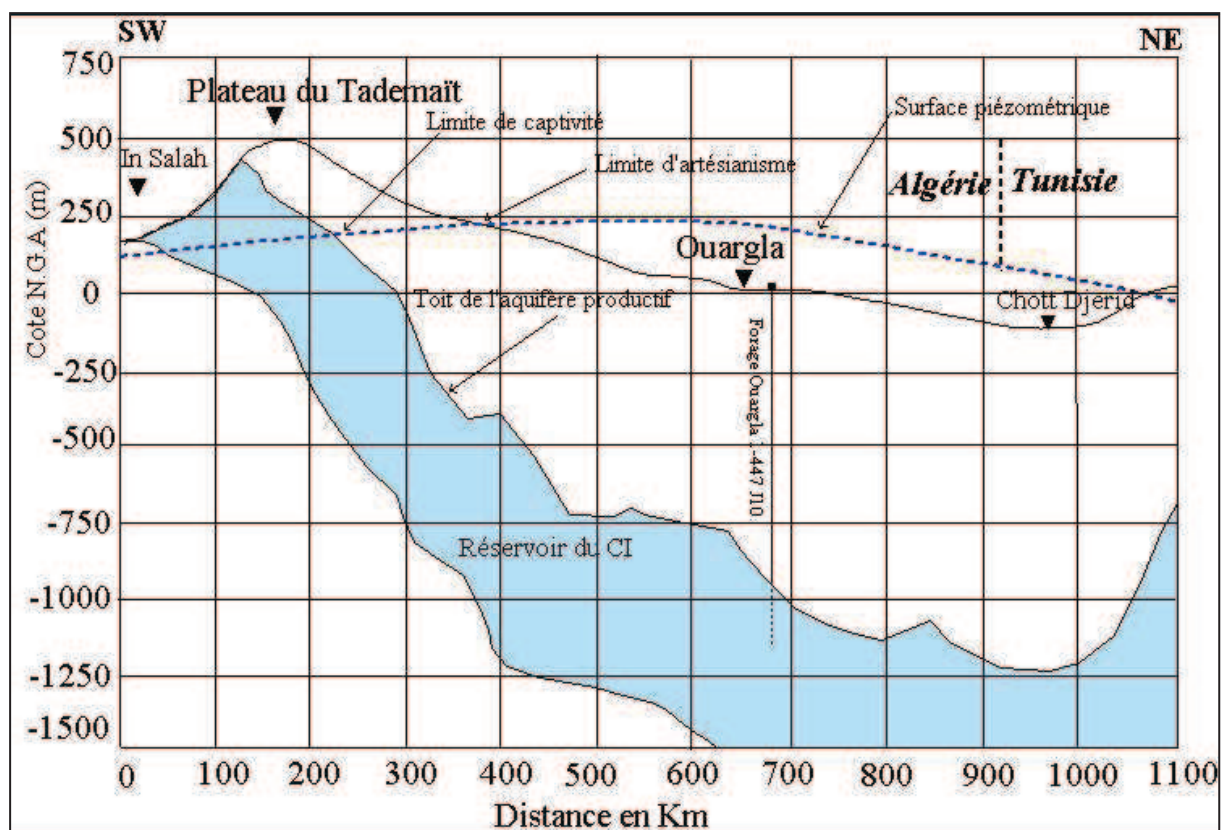


Fig.25 Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI.

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 de l'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.

Alimentation

Cette nappe s'est chargée au cours des périodes pluviales du Quaternaire. Actuellement, elle reçoit une faible recharge, surtout à partir du piémont de l'Atlas saharien : la quantité d'eau tombent

annuellement sur les affleurements du crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards m^3/an . Mais, il est difficile d'appliquer à ces formations un coefficient d'infiltration, les conditions climatiques (hauteur de pluies faibles et évaporation intense), étant très différentes de celles des régions où ces coefficients ont pu être expérimentés.

Le volume d'eau emmagasiné dans le CI, évalué à 50 000 milliard m^3 correspondant, en théorie, à un débit fictif continu de 1000 m^3/s pendant 2000 ans.

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.

II.9.2.2. Le Complexe Terminal (CT)

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que le CI. Néanmoins, il couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur environ 350 000 km^2 . Sa profondeur oscille entre 100 et plus de 500m et son épaisseur, en moyenne de 220 m. Sont désignées sous le nom de Complexe Terminal (CT) les formations les plus récentes, déposées au bas Sahara. Il se compose de deux ensembles aquifères principaux, d'âge et de lithologie différents, séparés par des formations semi-perméables ou imperméables (fig. 17). Ce sont :

- Au sommet, le Continental Terminal, constitué par les sables du Mio-Pliocène, couvrant en discordance, pratiquement la totalité de l'Erg oriental depuis la dorsale du M'zab à l'Ouest jusqu'au Dahar tunisien à l'Est. L'épaisseur de l'aquifère des sables du Mio-Pliocène est de 50 à 100 m en moyenne. Elle est minimale dans la région de Hassi Messaoud (30 m) et augmente vers le Sud (400 m), et le Nord où elle peut atteindre 600 m.

- Les formations carbonatées du Sénonien supérieur, s'étendent sur l'ensemble du bassin oriental. L'Eocène inférieur ne couvre que la zone située au Nord d'une ligne Djemaa-Tozeur.

- Les calcaires et les dolomies du Turonien sont reliés hydrauliquement aux formations carbonatées précédentes par l'aquifère des sables du Mio-Pliocène.

L'épaisseur moyenne du réservoir carbonaté est de 100 à 200 m, augmentent vers le Nord où elle atteint 500 m sous le Chott Melghir et 600 m dans la fosse atlasique.

◇ Le substratum du complexe aquifère est, d'une manière générale, constitué par la formation lagunaire du Sénonien. La couverture est formée par les argiles plus ou moins sableuses du sommet du Mio-Pliocène et les marnes et évaporites de l'Eocène moyen pour l'aquifère Eocène.

◇ La nappe est en charge au Nord et libre dans sa partie Sud. Sa porosité dépend de la lithologie. Elle est estimée à 30% dans les sables du Mio-Pliocène et à 20% dans les calcaires du Sénonien et de l'Eocène supérieur.

◇ L'écoulement se fait du Sud vers le Nord. Il converge des zones d'alimentation vers les chotts Merouane et Melghir, ainsi que vers l'exutoire souterrain du golfe de Gabes.

◇ L'alimentation se fait sur les affleurements perméables, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds qui descendent les reliefs de bordure. Un apport non négligeable se fait par l'impluvium propre du Grand Erg oriental.

La nappe phréatique

Elle est contenue dans les niveaux sableux et argilo-évaporitiques du Quaternaire. Elle se présente sous forme pelliculaire, par rapport à la nappe des sables qui lui succède en profondeur et dont elle est généralement séparée par un niveau semi-perméable du Mio-Pliocène. Dans cette région, on assiste au phénomène de remontée du niveau hydrostatique de la nappe phréatique, lié au développement de l'irrigation (prélèvements excessifs dans les nappes profondes CT, CI) et l'insuffisance du drainage.

ERE	Etage		Lithologie	Nature Hydrogéologique
Q u a t e r n a i r e			Sables.	Nappe superficielle (la nappe phréatique)
			Argiles, évaporites.	Substratum (imperméable)
T e r t i a i r e	Mio-Pliocène		Sables.	1 ^{ère} nappe des sables (Complexe Terminal).
			Argiles gypseuses	(semi-perméable)
		Pontien	Sables, graviers et grès	2 ^{ème} nappe des sables (Complexe terminal).
	Eocène	Moyen	Argiles lagunaires	Substratum
Inférieur		Dolomies et calcaires	Nappe des calcaires (Complexe Terminal).	
S e c o n d a i r e	C r é t a c é			Sénonien calcaire
		Sénonien lagunaire	Evaporites, argiles	
		Cénomaniens	Argiles, marnes	Substratum
		Albien Barrémien	Sables et grès	Nappe albienne (Continental Intercalaire).

Fig. 26 Synthèse hydrogéologique régionale des différents aquifères (sans échelle).

IV.1 HYDROGEOLOGIE LOCALE

L'existence dans la région de l'Oued Righ de deux ensembles aquifères (CI, CT) ainsi que les particularités de cette région (captivité des réservoirs, fort artésianisme, température de l'eau élevée et maximum d'épaisseur des couches aquifères), font d'elle une région bien étudiée sur le plan hydrogéologique. Elle est partagée en deux secteurs : l'Oued Righ nord et l'Oued Righ sud, qui fait l'objet de notre étude.

IV.1.1 La nappe phréatique

La nappe phréatique est contenue dans les sables fins à moyens, d'âge Quaternaire, contenant des cristaux de gypse. Elle s'épaissit du sud vers le nord et sa puissance moyenne est d'une vingtaine de mètres. Caractérisée par des eaux à fortes salinités, la nappe phréatique est « gonflée » par l'excès de l'eau d'irrigation et des pompages du CI et du CT. C'est pour drainer cet excès d'eau que le réseau de drainage artificiel a été réalisé dans la dépression de l'Oued Righ.

La nappe phréatique est principalement alimentée par les eaux d'irrigation et de distribution urbaine, les eaux des forages dont les tubages sont détériorés, par les faibles précipitations et par les percolations des nappes du Complexe Terminal. Les pertes sont surtout le fait de l'évaporation.

IV.1.2 Les Nappes du Complexe Terminal

Le Complexe Terminal est constitué de deux grands ensembles, l'un continental au sommet, l'autre marin à la base.

Les dépôts continentaux (Continental Terminal) sont représentés par des sables de taille variable, intercalés de lentilles argileuses parfois évaporitiques, d'âge Mio-pliocène. En revanche, les formations marines sont essentiellement carbonatées, déposées au cours de la transgression marine du Sénono-Eocène.

Le Continental Terminal se distingue en deux formations aquifères très exploitées dans la région de Touggourt. Ce sont :

IV.1.2.1 La première nappe des sables

Hormis la nappe phréatique, cette nappe est la moins profonde 50 à 100 m. Elle est constituée de sable fin à moyen, sable argileux et grès, d'âge Mio-pliocène. Le faciès sableux varie largement, latéralement. Un niveau d'argiles constitue son substratum et son toit est formé par des argiles et des évaporites.

C'est une nappe captive qui était jadis très exploitée, avec un débit faible à moyen, de l'ordre de 20 à 40 l/s, (le débit global d'exploitation proche à 6 m³/s). Cependant, à cause de la salinité élevée de l'eau, les forages qui la captent sont actuellement moins utilisés.

IV.1.2.2 La deuxième nappe du sable

Les formations contenant cette nappe sont également d'âge Mio-pliocène. Comme la première nappe, elle est formée essentiellement des grès, de gravier et de sables avec la présence de quelques lentilles argileuses. L'épaisseur de la couche aquifère est de 20 à 36 m. Cette nappe captive est très exploitée par des forages moyennement profonds (100 et 165 m), avec un débit variant entre 25 et 45 l/s. Des argiles à niveaux calcaires et des marnes, forment son substratum, alors que des argiles et les argiles sableuses constituent son toit.

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

Ces deux nappes du Mio-Pliocène surmontent l'autre ensemble du Complexe Terminal (CT), constituant la troisième formation aquifère, formée par les carbonates de l'Eocène inférieur – Sénonien supérieur.

IV.1.2.3 La nappe du Sénonien-Eocène

Ces deux étages géologiques ont été regroupés parce qu'ils forment un ensemble lithologique et hydrogéologique homogène. Essentiellement carbonaté, il est formé de calcaires, calcaires dolomitiques ou marneux, d'anhydrite et gypse. Il n'est pas très exploité à Touggourt, donnant un débit de 25 à 40 l/s et parfois présentant un artésianisme à faible débit (0,3 à 0,6 l/s). Leur toit est supérieur à 180 m, dont le débit global peut atteindre 2,8 m³/s.

A la base, le sénonien lagunaire forme le substratum de cette nappe et au sommet, le toit est surtout argileux. La porosité moyenne de cette nappe est de 20%.

IV.1.3 Nappe du Continental Intercalaire dans le secteur de l'oued Righ Sud

C'est un aquifère profond, composé de sables gréseux ou argileux. L'épaisseur de la couche productive peut dépasser 500 m, mais son épaisseur utile est proche de 400m. Le réservoir du Continental Intercalaire est contenu dans les formations continentales du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien).

La nappe du Continental Intercalaire (CI) dans la région de Touggourt est caractérisée par:

- Sa grande profondeur, plus de 1500 m,
- Un fort artésianisme (15 à 20 bars),
- Un grand débit d'exploitation (250 à 400 l/s),
- Une température de l'eau élevée (50 à 65°C),
- Une charge en CO₂, qui lui donne un caractère corrosif,
- Un résidu sec des eaux variant entre 3 et 5 g/l.

Les apports d'eau au système aquifère s'effectuent par:

- L'infiltration des eaux de ruissellement des reliefs situés à la périphérie du domaine et par des précipitations sur les affleurements,
- Le piémont de l'Atlas saharien, au Nord,
- Le plateau de Tinhert, au Sud,

En 1961, A. Cornet estimait cette alimentation à 25m³/s, en 1963 l'étude du BURGEAP la fixait à 15m³/s. Dans ces deux cas, cette alimentation provient en grande partie du piémont de l'Atlas. L'exutoire naturel du Continental Intercalaire est la zone des chotts, avec un sens d'écoulement souterrain Sud -Nord, conformément d'ailleurs à la topographie de la région. D'autre part, les prélèvements par forages représentent une autre sortie. Dans le secteur Sud de l'Oued Righ que nous étudions (région de Touggourt), il y a sept (7) forages albiens, qui débitent 1 400 l/s environ.

II.10. CONCLUSION

La région de Touggourt, d'une altitude proche de 70 m, fait partie du Bas Sahara recouvert au Sud par le grand Erg oriental et bordé au nord par la zone des chotts. Administrativement, elle appartient à la wilaya de Ouargla. Elle couvre une superficie de 1 334 km² et sa population est de 173 000 habitants.

La principale activité est la culture du palmier dattier, mais il y a aussi l'artisanat, le tourisme et une petite industrie basée sur la transformation des dérivés d'hydrocarbures.

Dans cette région, le manque d'eau ne se pose pas en revanche, les rejets d'eaux domestiques et les surplus de l'irrigation posent d'énormes problèmes.

Elle est caractérisée par un climat hyperaride, marqué par de fortes températures estivales et de faibles précipitations annuelles. Les précipitations sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 83.30 mm/an et ne jouent généralement aucun rôle dans la recharge directe des nappes, à l'exception des quelques orages violents qui génèrent des ruissellements.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1397,14 mm pour la période (1975-2009), l'évapotranspiration réelle est de 87.62 mm pour la même période. Les températures sont élevées, 21,70°C en moyenne annuelle et 33,34°C au mois le plus chaud, ce qui explique la forte évaporation.

La région de Touggourt se présente comme une cuvette synclinale du bas Sahara. Toutes les terrains, depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie par le grand erg oriental. Cependant, quelques affleurements sont observés, sur les bordures.

Les prospections géophysiques et les sondages pétroliers ont précisé la profondeur du socle précambrien, situé entre 3000 et 5000 mètres. Il s'ensuit que les dépôts sédimentaires ont environ 4000 mètres d'épaisseur.

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

Les terrains du Mésozoïque et du début du Cénozoïque constituent l'essentiel des affleurements des bordures.

Les dépôts continentaux tertiaires et quaternaires occupent le centre de la cuvette.

La série géologique permet de distinguer deux ensembles hydrogéologiques, post paléozoïques, importants : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal.

Chapitre III : MÉTHODOLOGIES

III.1.L'INSTALLATION DES PIÉZOMÈTRES

Définition et objectifs

Au sens propre, un piézomètre est « un dispositif servant à mesurer la hauteur piézométrique en un point donné d'un aquifère, qui indique la pression en ce point, en permettant l'observation ou l'enregistrement d'un niveau d'eau libre ou d'une pression ». Dans le langage utilisé en environnement, un piézomètre est un ouvrage permanent, généralement de petit diamètre, constitué d'un tube installé dans un trou de forage vertical qui sert à la fois à mesurer le niveau piézométrique et à prélever des échantillons d'eau souterraine pour évaluer sa qualité. Le terme de piézomètre est celui employé couramment, mais il serait plus juste de nommer ce type d'ouvrage « forage de contrôle de la qualité des eaux souterraines ».

La réalisation d'un piézomètre a plusieurs objectifs qui sont essentiellement les suivants :

Mesurer un niveau d'eau indiquant la pression de la nappe.

Évaluer les variations saisonnières de la pression d'une nappe par la réalisation de mesures régulières ou en continu.

- Évaluer le sens d'écoulement des eaux souterraines au droit d'un site (dans ce cas, trois piézomètres au minimum doivent être installés).

- Effectuer des mesures in situ et des prélèvements d'échantillons d'eau souterraine représentatifs de la nappe afin de caractériser la pollution éventuelle des eaux souterraines.

Les piézomètres peuvent également répondre à d'autres besoins tels que :

Réaliser des tests hydrauliques, afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité, transmissivité, etc.). Ces paramètres permettront de mieux comprendre la migration de polluants potentiels et de déterminer les techniques de dépollution les mieux adaptées.

III.1.1. Méthodologie du travail

III.1.1.1. Inventaire des puits existants

La région d'étude contient un réseau des puits à été réalisé en 2004, par le laboratoire des travaux publics du Sud (LTPS) unité de Ouargla, ce projet a pour but de l'étude la protection des berges du canal de l'Oued Righ. Pour cela, on a fait une enquête pour vérifier l'état de chaque puits et son fonctionnement. Après cette visite on a résulte que six (06) puits seulement en bonnes états et peuvent être compte en considération.

III.1.1.2. Choix de localisation des piézomètres :

- Une meilleure représentation spatiale de la région d'étude.
- Puits et piézomètres proches du canal Oued Righ (pour révéler les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines) ;
- Puits et piézomètres se répartissent dans des terrains nus ;
- piézomètres se répartissent dans des terrains cultivés ; (pour révéler les échanges entre les eaux d'irrigation et les eaux de la nappe) ;
- Points de prélèvement de trois lacs étudiés (pour révéler les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines).
- L'installation du piézomètre doit être réalisée de telle sorte qu'il ne puisse être à l'origine d'une dégradation de la qualité de la nappe qu'il intercepte. Il faut donc éviter d'implanter les piézomètres à l'intérieur d'une rétention de stockage.
- il faudra veiller à ce que le piézomètre soit absolument étanche aux infiltrations de surface, par exemple en mettant en place une tête de piézomètre (bouchon).
- Un piézomètre ne doit intercepter qu'une seule nappe afin de ne pas mettre en relation plusieurs aquifères naturellement isolés entre eux.

III.1.1.3. Choix du diamètre de forage

Plusieurs diamètres de forage sont envisageables. Le diamètre de forage dépend du diamètre intérieur du tubage à installer. Il sera également nécessaire de laisser un espace entre le tubage et les instruments utilisés pour le prélèvement afin d'éviter un coincement. Il est important que le diamètre du forage soit sensiblement supérieur au diamètre du tubage pour permettre de laisser un espace (appelé espace annulaire) entre le tubage et la paroi du forage. Cet espace sera rempli par des matériaux dont la nature, le rôle et l'importance sont présentés dans le paragraphe suivant. Le tableau 11 présente les diamètres de forage recommandés par la norme **Afnor FD X 31-614**, en fonction du diamètre intérieur du tubage.

Le diamètre intérieur de tubage le plus couramment utilisé pour le prélèvement d'eau est de 60 mm. Les ouvrages de cette dimension laissent passer des pompes de petit débit ne dépassant pas 2 m³ / h et permettent d'obtenir des échantillons représentatifs des conditions des eaux souterraines. Les tubages de diamètre 25 mm, 80 mm, 120 mm et 150 mm sont aussi employés. L'avantage de tubages de diamètre 25 mm est leur coût peu élevé car ils peuvent être installés avec des techniques légères en raison de la petite dimension du forage. Les tubages de diamètres 120 mm et 150 mm sont utilisés pour la réalisation de piézomètres profonds ou dans le cas où un traitement serait envisagé. Diamètres de forage recommandés par la norme Afnor FD X 31-614 sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tab.11 Diamètres de forage recommandés par la norme Afnor FD X 31-614

Diamètre extérieur du tubage	Diamètre de forage	Espace annulaire
60 mm	130 mm	35 mm
80 mm	160 mm	35 mm
120 mm	194 mm	35 mm
225 mm	311 mm	43 mm

III.1.1.4. Installation de l'ouvrage

Une installation minutieuse de l'ouvrage est primordiale pour que le piézomètre puisse remplir son rôle de surveillance des eaux souterraines. Un piézomètre mal installé peut conduire à l'impossibilité d'échantillonner les eaux souterraines ou à des incertitudes sur la qualité de la nappe échantillonnée.

III.1.1.4.1 Tubages

Le tubage est une colonne constituée de tubes pleins et crépinés et équipant l'intérieur du forage. Les tubages installés peuvent être de plusieurs natures. Ils peuvent être constitués d'acier simple, d'acier inoxydable, de polychlorure de vinyle (PVC), ou de polyéthylène haute densité (PEHD). Leur choix dépend du diamètre de l'équipement nécessaire, de la profondeur du forage, de leur résistance mécanique pour ne pas être déformés par la pression des terrains traversés et/ou par la cimentation, de leur résistance aux agressions des polluants suspectés et de leur faible potentiel d'échange afin de ne pas altérer la qualité des eaux souterraines.

Les tubages les plus couramment utilisés dans la conception de piézomètres sont les tubages en polychlorure de vinyle (PVC) et, dans une moindre mesure, les tubages en polyéthylène haute densité (PEHD). Le PEHD est plus résistant aux attaques chimiques que le PVC, notamment par les composés organiques chlorés si fréquemment rencontrés dans les eaux souterraines au droit des sites industriels. Quelle que soit la nature des matériaux choisis, il est préférable d'utiliser des tubages vissés à des tubages collés. Les tubages collés sont déconseillés car ils présentent une résistance moindre. Par ailleurs, ils sont susceptibles de relarguer des solvants et des colles dans l'eau souterraine ce qui peut perturber les résultats d'analyse sur les échantillons d'eau souterraine. Les tubages collés sont donc à proscrire dans le cas où les composés organiques seraient analysés. Les tubages en acier ou en acier inoxydable peuvent aussi être utilisés, mais les aciers sont des matériaux susceptibles d'être corrodés par réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Les principaux facteurs de corrosion devront être évalués avant d'installer un tubage

en acier (la minéralisation, l'acidité, le potentiel redox, la teneur en oxygène, la température, la pression, la faune bactérienne, etc.).

III.1.1.4.2 Crépine

La crépine est un tubage dont la paroi est percée d'ouvertures disposées régulièrement, à travers lesquelles l'eau de l'aquifère pénètre dans le forage. L'objectif d'une crépine est de laisser passer de manière optimale l'eau de la nappe à échantillonner, d'intercepter un éventuel panache de pollution et de maintenir à l'extérieur du tube les particules solides des formations géologiques et du massif filtrant. Son positionnement dépend du niveau de la nappe, du repérage des niveaux perméables des terrains traversés, du type de formation aquifère à étudier, ainsi que de la solubilité et de la densité des substances à rechercher, il faudra positionner la crépine à la base de l'aquifère.

III.1.1.4.3 Massif filtrant

Le massif filtrant est un dispositif annulaire placé entre le tubage et la paroi du forage (ou espace annulaire) destiné à filtrer les eaux souterraines et notamment limiter les risques de colmatage. Le massif filtrant est placé dans la zone saturée. La mise en place d'un dispositif annulaire filtrant autour de la crépine est presque systématiquement nécessaire à l'exception des forages réalisés dans des terrains qui peuvent servir de filtre naturel. Le massif filtrant a pour but de limiter la venue des particules fines issues de la formation aquifère dans le forage et de faciliter le transfert de l'eau de la nappe vers la crépine. Il doit être placé sur toute la hauteur de la partie crépinée, augmentée de 50 cm au moins en prévision du tassement du massif au cours du développement. Son épaisseur annulaire doit être suffisante (l'Afnor préconise un espace annulaire d'au moins 35 mm) pour permettre une bonne mise en place du massif filtrant autour de la crépine sur toute sa hauteur. Plusieurs types de massif filtrant existent, les plus couramment utilisés sont les graviers roulés siliceux, lavés et calibrés. Le gravier est déversé depuis la surface dans l'espace entre le tube et le trou de forage, et descend par gravité. Lors de la mise en place du gravier, il est nécessaire de s'assurer de la continuité du massif, notamment par un contrôle régulier de la profondeur du toit du gravier en fonction des volumes introduits.

III.1.1.4.4 Bouchon

Le bouchon est mis en place par-dessus le massif filtrant afin d'empêcher les infiltrations depuis la surface ou depuis les nappes sus-jacentes vers la nappe captée par le piézomètre.

III.1.1.4.5 Fiche technique de piézomètre

- Matière : Conduite PVC perforé.
- Diamètre: Ø80 mm.
- Pression: 04 bar.
- Longueur : (03÷04) m.

III.1.2. Mesures après l'installation du piézomètre

Après l'installation du piézomètre, plusieurs paramètres peuvent être suivis.

- Le niveau des eaux souterraines qui permettra de déterminer leur sens d'écoulement (si au moins trois piézomètres non alignés sont installés au droit du site étudié) et d'évaluer l'évolution saisonnière de l'écoulement des eaux souterraines et de leur niveau ;
- Des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température, oxygène dissous) : ces paramètres peuvent être des témoins d'une perturbation de la qualité des eaux souterraines ;
- Avant d'être utilisable, un piézomètre doit être identifié par un numéro. Les piézomètres devront également être localisés sur le plan de masse du site étudié, pour cela on a utilisé un GPS type Magellan pour prendre les coordonnées géographiques (longitude et latitude) pour tous les points d'eau concernés par notre étude, alors que leurs hauteurs sont été nivelées par rapport à un point fixe du site. Le nivellement topographique des piézomètres et leur report sur un plan permettra de calculer la cote de la nappe au droit des différents piézomètres et donc d'évaluer le sens d'écoulement des eaux souterraines.

Tab.12 Coordonnées géographiques des points d'eau

Points des mesures	Coordonnées géographiques			Remarques
	x	y	Z (m)	
1	5°57'45"	32°58'05"	79.09	Puits superficiel
2	6°00'03"	32°59'49"	77.87	Piézomètre
3	6°01'25"	33°01'05"	78.16	Piézomètre (dans la palmeraie) Témacine
4	6°03'31"	33°01'44"	73.66	Piézomètre
5	6°03'32"	33°03'25"	72.87	Piézomètre
6	6°03'48"	33°04'47"	68.61	Puits superficiel
7	6°05'25"	33°06'09"	65.95	Piézomètre
8	6°06'14"	33°08'21"	58.58	Piézomètre
9	6°05'41"	33°09'40"	57.81	Piézomètre
10	6°04'32"	33°10'52"	56.63	Piézomètre
11	6°04'58"	33°12'10"	55.75	Puits superficiel
12	6°05'57"	33°12'25"	58.11	Piézomètre (dans la palmeraie) Megarine
13	6°05'49"	33°13'21"	55.39	Puits superficiel
14	6°06'20"	33°15'01"	52.44	Puits superficiel
15	6°04'56"	33°16'36"	52.09	Puits superficiel
16	6°05'06"	33°17'14"	54.32	Piézomètre (dans la palmeraie) Sidi Slimane
17	6°01'24"	33°00'55"	77.00	Lac de Temacine
18	6°05'54"	33°12'21"	57.00	Lac de Megarine
19	6°05'03"	33°17'18"	53.00	Lac de Sidi Slimane

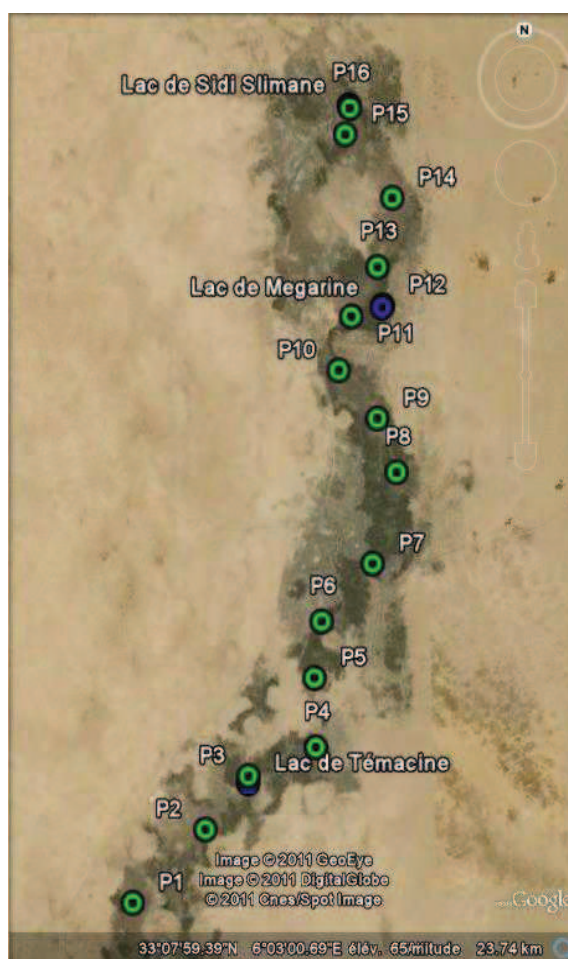


Fig.27 Localisation des points de prélèvements d'échantillons d'eau

III.1.3. L'abandon de piézomètre

Lorsqu'un piézomètre n'est plus utilisé, il faut veiller à le laisser dans un état tel qu'il ne puisse constituer dans le futur un vecteur de migration de pollution vers la nappe.

III.1.4. Matériel utilisé

III.1.4.1. Tarière

Le terme de tarière concerne plusieurs types de matériel de conceptions différentes. Une tarière est de manière générale un outil de forme hélicoïdale enfoncé dans le sol par rotation sans fluide de forage. Les tarières simples comprennent des matériels de taille et de performance très variées. Il existe des tarières légères portatives (tarière à main, ou petite moto tarière) et du matériel plus lourd (tarière montée sur camion ou chenille). La tarière est enfoncée par rotation à l'aide d'un train de tiges. La rotation et la forme hélicoïdale de la tarière permettent son introduction dans le sol. Lorsque la tarière est retirée, les sols forés piégés entre les spires de l'hélicoïde peuvent être remontés en surface. Comme pour le carottier, la tarière simple doit être remontée après chaque passe pour être débarrassée des sols avant d'être réintroduite dans le trou de forage. La tarière simple permet d'avoir une assez bonne caractérisation des terrains traversés, mais ne permet pas de dresser une coupe géologique aussi détaillée que par carottage.

La profondeur d'investigation par tarière simple est généralement de l'ordre de 10 m de profondeur. Des profondeurs plus importantes peuvent être atteintes, mais les performances deviennent alors réduites en raison de la nécessité de remonter la tarière à chaque passe, et les risques d'éboulement augmentent.

III.2 LA BATHYMÉTRIE

III.2.1 Introduction

Une bathymétrie représente un ensemble de mesures de profondeur du lac. Ces mesures visent à connaître la topographie du fond submergé. La méthode proposée pour évaluer ce volume consiste à faire un relevé manuel des profondeurs à l'aide d'une corde graduée et d'une embarcation se déplaçant selon des repères précis. Cette méthode, si elle est appliquée avec minutie, suffit généralement pour évaluer avec une précision adéquate le volume total du lac.

Notre objectif est d'obtenir une représentation graphique de fond du lac sous forme d'un ensemble d'isobathes, et de réaliser pour la première fois une carte bathymétrique à notre système lacustre.

Les mesures ont été réalisées au cours du mois de septembre 2010. Cette période coïncide avec son niveau le plus bas de l'année (évaporation intense d'été).

On prend l'étude bathymétrique du lac de Témachine, lac de Megarine et celle du Sidi Slimane.

III.2.2. Préparation de la bathymétrie

III.2.2.1. Délimitation du lac

On a d'abord fait un levé topographique du périmètre du lac, au moyen d'un appareil topographique afin de dessiner un croquis représentatif du lac.

III.2.2.2. Division du lac en sections

Cette deuxième étape permet la détermination des lignes de section qui seront parcourues en embarcation pour prendre les mesures de profondeur.

Il s'agit donc de diviser le dessin du lac précédemment fait en sections de 5 à 20 mètres, la première étant établie à 1 mètre en avant de la rive.

L'écart entre les sections n'est pas forcément identique pour l'ensemble du lac. Cet écart peut varier sur certaines portions du lac si les particularités de la topographie du fond exigent plus de précision.

III.2.2.3. Détermination des points de mesure

L'étape suivante consiste à déterminer pour chaque section les points où les mesures de profondeur seront faites. Le nombre de points de mesure de profondeur pour chacune des sections varie en de la largeur de la section mesurée.

Pour chacune des sections, les lieux de mesure et de référence sont :

- aux extrémités de la section sur les rives : ce sont des points de référence (la lame d'eau) dont la profondeur est de 0 mètre;
- à 1 mètre de chacune des rives;
- à 5 mètres de chacune des rives;
- au centre de la section.

Des points de mesure intermédiaires additionnels peuvent être nécessaires si le fond varie brusquement à certains endroits, comme un haut-fond ou une fosse.

III.2.2.4 Matériels utilisés

- un appareil topographique SOKKIA ;
- une corde graduée ;
- embarcation.

III.2.3. Réalisation de la bathymétrie

La bathymétrie s'effectue en parcourant chacune des sections avec une embarcation stable et en s'arrêtant à chacun des points indiqués sur le croquis établi précédemment. La profondeur est alors mesurée à chacun des points à l'aide d'une corde graduée munie d'un poids suffisant pour tendre la corde. La longueur de la corde devra au moins être égale à la hauteur de la lame d'eau du lac.

La Localisation des points de mesure est effectuée à l'aide d'un appareil topographique pour plus de précision.

III.3. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE D'EAU

Les prélèvements ont été effectués selon une fréquence saisonnière, pendant trois campagnes où des analyses complètes ont été effectuées. **Tableau 13**

Tab.13 les campagnes d'échantillonnage effectuées durant l'étude.

campagne	Période	Nombre d'échantillons	Eléments dosés	Laboratoire d'analyse
1	Mars 2010	19	Eléments majeurs ; NO ₃ ⁻	ANRH, Ouargla
2	Juin 2010	19	Eléments majeurs ; NO ₃ ⁻	ANRH, Ouargla
3	Septembre 2010	19	Eléments majeurs ; NO ₃ ⁻	ANRH, Ouargla

III.3.1. Prélèvement et conservation d'échantillons d'eau

Le prélèvement des échantillons conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène et conserve les caractéristiques physico-chimiques de la solution.

L'échantillon doit être recueilli dans des flacons hermétiques qui auront été soigneusement rincés sur place avec la solution de la prise, en prenant soin de ne pas laisser des bulles d'air sous le bouchon (Rodier, 1996).

Les flacons destinés au prélèvement seront traités à l'acide nitrique, fermés mais non séchés. Au moment du prélèvement, les flacons seront de nouveau rincés trois fois avec de l'eau à analyser puis remplis jusqu'au bord.

Tous les échantillons doivent être conservés dans un environnement d'environ 4°C entre le moment du prélèvement et la réception au laboratoire (utiliser des glacières et des agents réfrigérants).

III.3.2. Moyens et méthodes d'analyse

III.3.2.1 Mesures *in situ*

Sept paramètres physicochimiques (pH, conductivité électrique, température (°c), TDS, Eh, Résistivité et NaCl) ont été mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une valise multi paramètres de terrain de marque **Cyber Scan séries600**.

III.3.2.2 Analyses aux laboratoires

On procédé à analyses complètes de tous les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-).

Les méthodes analytiques utilisées sont:

- méthode colorimétrique pour les éléments : (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-).
- méthode de spectrophotométrie d'émission de flamme: (Ca^{2+} , Na^+ , K^+).
- Le magnésium a été déterminé par la complexométrie.

On signale que l'analyse spectrophotométrique a été faite **au laboratoire de l'agence nationale des ressources hydriques** en utilisant un spectrophotomètre **DR2000(HACH)** et un **spectrophotomètre de flamme modèle 410**.

III.3.2.2.1 La conductivité électrique

Cette mesure à été faite à l'aide d'un conductimètre équipé d'un dispositif de compensation de température de référence de 25°C, après centrifugation.

III.3.2.2.2 Dosage des éléments majeurs

✓ Dosage de calcium et de magnésium

Le sel di sodique de l'acide Ethylène Diamino Tétra Acétique cristallisé avec H_2O , appelé aussi complexon ou versénate forme avec un nombre de cation des complexes dont la stabilité dépend essentiellement du pH (Voir annexes).

✓ Dosage du sodium, potassium

Le dosage se fait à l'aide d'un photomètre de flamme (Voir annexes).

✓ Dosage des chlorures :

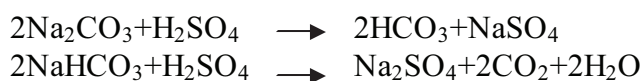
Les chlorures en présence du thiocyanate mercurique et de l'alun donnent en milieu nitrique acide un complexe coloré orange susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 mm. (Voir annexes).

✓ Dosage des sulfates

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu, très fin est stabilisé par la gélatine. On effectue sur le trouble une mesure turbidimétrique à la longueur d'onde de 495 mm. (Voir annexes).

✓ Dosage des carbonates et bicarbonates

Les carbonates n'existent qu'à $\text{pH} > 8.3$, et les bicarbonates trouvent si $4.4 < \text{pH} < 8.3$ il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrique, lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent en deux étapes



III.4. APPAREILLAGE

III.4.1. PHOTOMETRE DE FLAMME modèle 410

Le photomètre de flamme du modèle 410 de Sherwood mesure directement l'alcali et le sodium de métaux alcalino-terreux (Na), le potassium (K), le lithium (Li), le calcium (Ca), le baryum (Ba), le césium (Cs), le rubidium (Rb) et le strontium (Sr) au moyen d'une flamme de basse température en utilisant le propane, le butane ou le gaz naturel.

Le modèle 410 est pourvu de tous les dispositifs de sûreté nécessaires à tout photomètre de flamme moderne et offre à l'utilisateur le confort d'une surface de travail pratique pour les références et échantillons. Le modèle 410 est doté d'une sortie analogique pour le contrôle continu du seul canal affiché.

Les principes de la spectroscopie d'émission de flamme ont été étudiés la première fois par Kirchoff et Bunsen (1860s). Dans les années 20 Lundengardh a raffiné la technique en incorporant un nébuliseur et un électro détecteur optique qui ont préparé le terrain à l'analyse quantitative moderne.

III.4.2. SPECROMÈTRE DR2000

Les mesures colorimétriques ont été réalisées avec un spectromètre DR2000 HACH qui mesure l'absorption de solution sur une gamme de longueur d'onde comprise entre 340 et 900 nm. L'appareil fonctionne sur le principe de la loi de Beer-Lambert, il donne les résultats en absorbance, en mg/L ou encore en transmission. De plus, pour chaque élément analysable, il existe des protocoles établis par la société LANGE.

Le spectrophotomètre est facile d'utilisation et les analyses sont rapides (quelques secondes), le spectromètre reconnaît par lecture laser la cuve d'analyse LANGE (d'un élément donné) grâce à un code-barres et applique automatiquement la méthode correspondante issue de sa très large banque de données. Lors de l'analyse, le DR2000 effectue une série de 10 mesures sur l'échantillon ce qui contribue à la robustesse de l'analyse.

Chapitre IV : DYNAMIQUE DES EAUX DES SYSTEMES LACUSTRES

IV. SYSTEME LACUSTRE

Définition : C'est un système dynamique qui évolue lentement avec le temps et le climat, et sous l'effet des activités humaines du bassin versant.

Plus le lac est profond, plus l'inertie thermique et chimique de la masse d'eau est importante. Inversement, certains vastes plans d'eau superficiels et très peu profonds seront très sensibles et immédiatement réactifs aux changements de l'environnement (climat, hydrologie, pollution, activités anthropiques). Il est composé de :

IV.1 LA NAPPE PHREATIQUE

IV.1.1 Origine : Depuis l'exécution de premier forage en 1954 à Tamlaht, les forages de l'Albien et du Complexe Terminal fournissent des débits croissants chaque année pour satisfaire les besoins en eau potable et surtout pour l'irrigation des palmeraies, les pompages importants provoquent un excès d'eau en surface et le mauvais fonctionnement de canal de l'Oued Righ contribue à l'augmentation de ce problème. En effet, à cause de la situation en cuvette de cette région, les couches de sub-surface absorbent l'excès d'eau d'irrigation qui relève le niveau de la nappe phréatique.

IV.1.2 ETUDE PIEZOMETRIQUE

Pour la réalisation de la cartographie piézométrique, on a choisi un réseau représentatif de toute la nappe, malheureusement, durant les campagnes piézométriques, quelques points n'ont pas fait l'objet de relevés pour diverses raisons qui sont indépendantes de notre volonté. Nous signalons que les mesures ont été faites en utilisant une sonde piézométrique de 100 m à double signalisation (sonore et lumineuse).

IV.1.2.1 Evolution de la piézométrie et le gradient hydraulique

Le suivi de l'évolution de la piézométrie dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers nous renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche.

La cartographie a été illustrée à la base des relevés piézométriques des différentes campagnes (Tab.37 en annexes), par interpolation basée sur la méthode de krigeage, en utilisant le logiciel **surfer 9(Golden software, 2002)**.

Le calcul du gradient hydraulique a été à partir de la formule suivante :

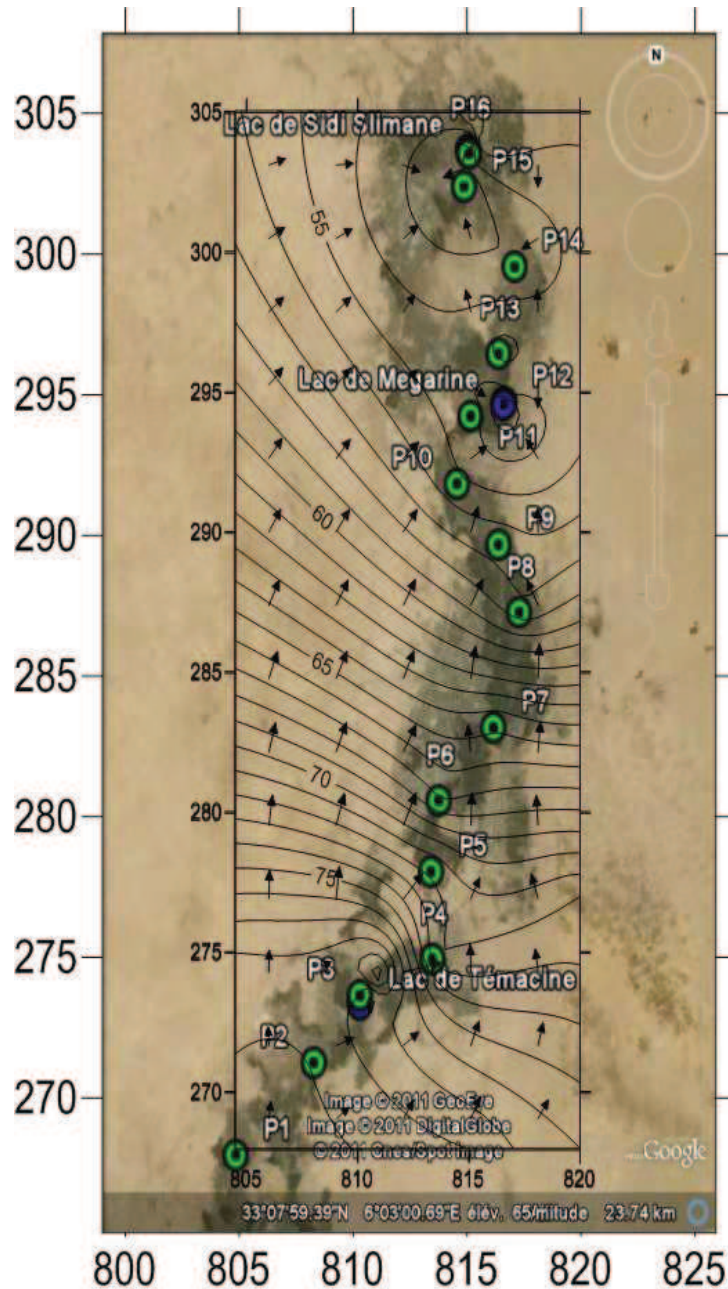
$$I = (H1 - H2) / L \quad (11)$$

Où :

H1 et H2 : désignent les niveaux piézométriques déterminés par les courbes hydro-isohypses ;

L : désigne la distance entre les deux points H1 et H2, déterminée par l'échelle de la carte piézométrique.

IV.1.2.1.1 Carte piézométrique mars 2010 :(Fig.28.a)



→ : Sens d'écoulement
 P10 : point d'eau

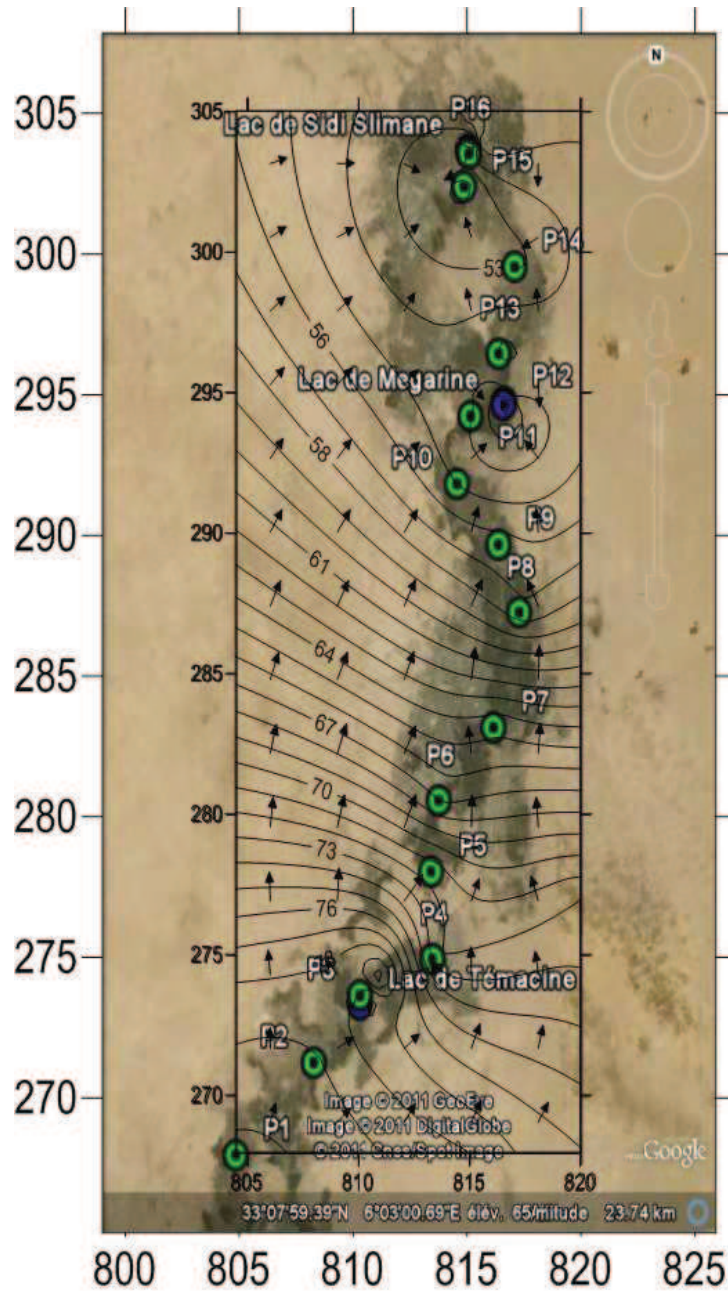
Fig.28.a Carte piézométrique de la nappe phréatique, mars 2010.

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique de la période de mars permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant une direction du sud ouest vers le nord est (Fig.28.a). L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de canal d'Oued Righ qui draine les eaux de surface, les eaux de drainage et les eaux usées.

Dans la zone centrale, les courbes isopièzes sont resserrées, indiquant un gradient hydraulique important, de l'ordre de 1.5‰.

Dans la zone méridionale de la nappe, les courbes deviennent plus espacées suite à un gradient hydraulique faible, de l'ordre de 0.5‰ car c'est la zone d'accumulation des eaux souterraines (zone des lacs de Témacine, de Megarine et de Sidi Slimane).

IV.1.2.1.2 Carte piézométrique juin 2010 :(Fig.28.b)

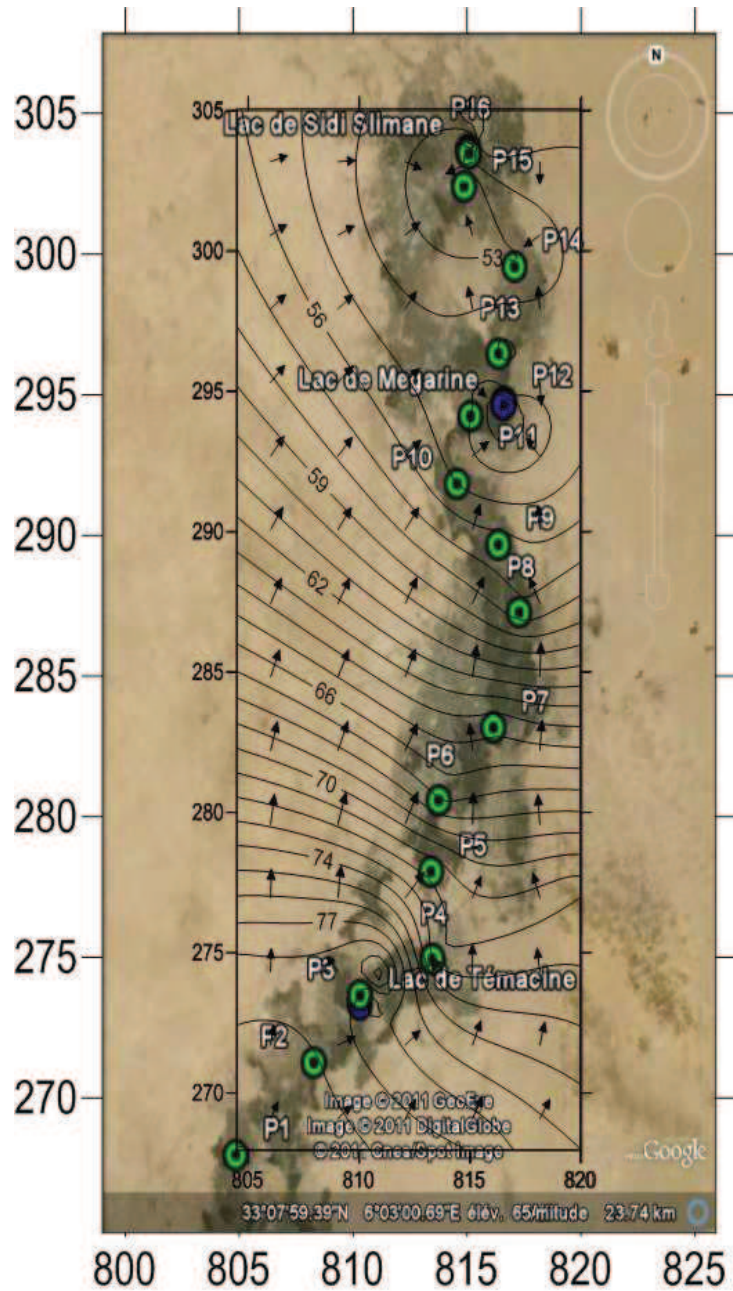


→ : Sens d'écoulement
 P10 : point d'eau

Fig.28.b Carte piézométrique de la nappe phréatique, juin2010.

Les courbes piézométriques montrent une même morphologie que dans la carte précédente, ce qui traduit le même régime d'écoulement. Cependant, on note une diminution des cotes piézométriques des puits par rapport à la période précédente, due à la forte évaporation de la nappe suite à la faible pluviométrie annuelle qui n'excède pas 150 mm (fig.28.b).

IV.1.2.1.3 Carte piézométrique septembre 2010 :(Fig.28.c)



—→ : Sens d'écoulement

P10 : point d'eau

Fig.28.c Carte piézométrique de la nappe phréatique, septembre 2010.

L'examen de la carte piézométrique ne révèle aucun changement que ce soit de la morphologie ou de l'allure des courbes piézométriques, traduisant ainsi le même régime d'écoulement (fig.28.c).

IV.1.2.2 Fluctuations de la nappe:

La comparaison de la piézométrie entre la période de mars et celle de septembre a permis de dresser une carte de fluctuation de la nappe pour l'année 2010. (Fig.29).

Cette opération a montré que les fluctuations les plus importantes se manifestent en amont de la nappe et peuvent atteindre 0.65 m. Au centre de la nappe, celles-ci varient entre 0 et 0.54 m

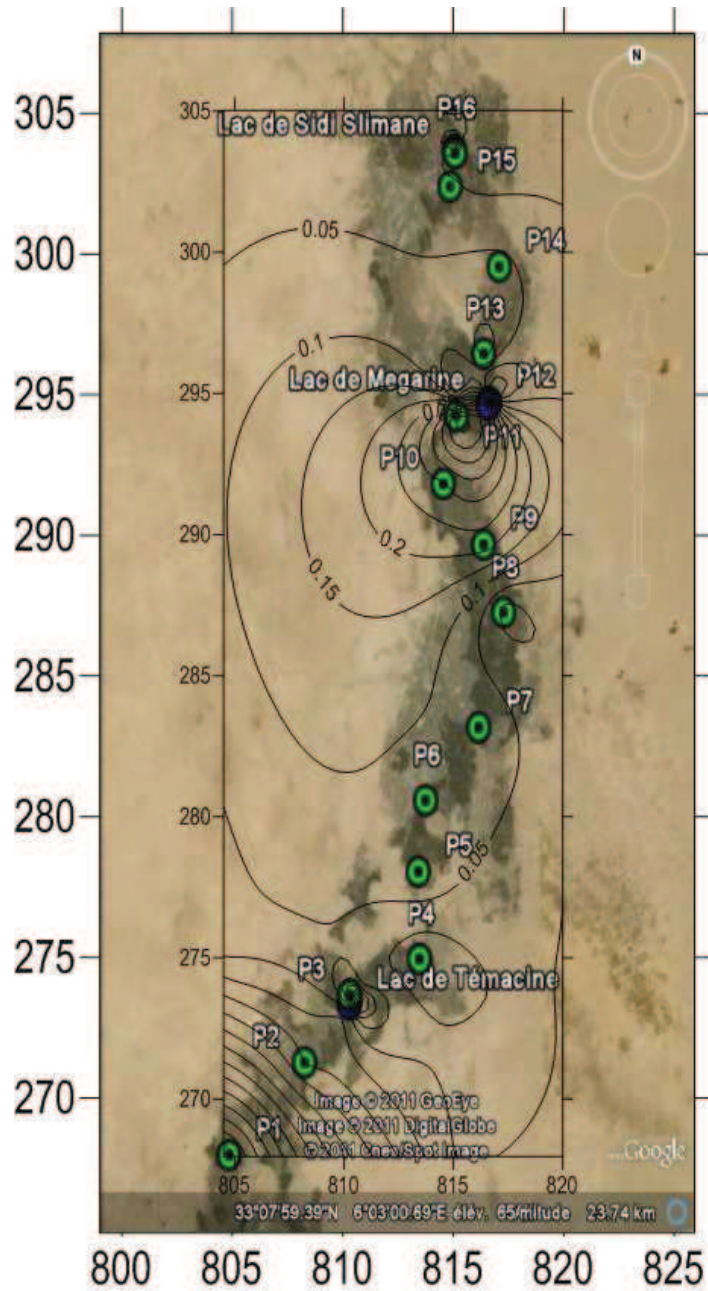


Fig.29 Carte de battement de la nappe Phréatique en (m) durant l'année 2010.

IV.2 CANAL DE L'OUED RIGH

IV.2.1 Introduction

Le canal d'Oued Righ joue un rôle primordial dans la région d'étude, c'est un collecteur des eaux en excès. Il est passé par plusieurs étapes historiques de reconstitution. Dès sa genèse il a subi plusieurs interventions positives et négatives.

IV.2.2 Aperçu sur l'historique du canal de l'Oued Righ

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

Avant 1910, ces eaux d'irrigation ont provoqués la remontée des eaux en surface créant une stagnation des eaux. Cette situation a engendré l'apparition de plusieurs maladies à transmission hydriques. Pour résoudre ces problèmes épineux, la population de la vallée de l'Oued Righ a créé un canal déversant ces eaux le long de cette vallée au niveau du Chott Mérouane.

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

- Réalisation du canal pendant la colonisation
- Réalisation du canal après l'indépendance

IV.2.3 L'impact du canal d'Oued Righ sur la région

Le canal de l'Oued Righ représente le poumon de la vallée Oued Righ comme le dit tous les hydrauliciens et hydrogéologues.

Dans cette région vivent actuellement 331886 habitants qui consomment 36942039 m³/an soit 25859428 m³/an se reversera au réseau urbain d'assainissement.

Il est à noter que 505713923 m³/an est versé aussi dans ce canal collecteur comme débit de drainage des palmeraies. Ces deux facteurs influent automatiquement sur le débit du canal de l'Oued Righ comme représenté dans le tableau 4.

Tab.14 Répartition de débit d'A.E.P et d'Irrigation à Oued Righ [ANRH, 2004.]

	Oued Righ Sud	Oued Righ Nord	Total (m3/an)
AEP CT et CI (m3/an)	26069760	10872279	36942039
Irrigation CT et CI (m3/an)	205130057	300583866	505713923
Total général (m3/an)			542655962

IV.2.4 Evolution du débit du canal au niveau des stations hydrométriques

L'évolution de la région de l'Oued Righ se fait sentir à travers la multiplication du nombre de forages suite à l'augmentation du nombre d'habitants, du développement de leurs nécessités socio-économiques et de l'extension des palmeraies par de nouveaux périmètres irrigués.

Cette évolution a provoqué des débits de forages et des réseaux de drainages supplémentaires et une importante évolution spatiale et chronologique du débit du canal. L'évolution du débit est mentionnée dans le tableau 15.

Tab. 15 Récapitulatif des jaugeages effectués sur la partie amont du Canal de l'Oued Righ), Le Débit en (m³/s) [ANRH, 2008]

Stations	03/10/93	08/05/94	10/10/94	30/01/95	2/12/96	20/03/98	04/05/99	29/01/01	01/03/06	04/04/07	28/01/08
Kerdache	0,258	0,265	0,340	0,166	0,225	0,340	0,200	0,263	1,030	-	-
Ranou	0,470	0,420	0,588	0,728	-	0,530	0,394	0,813	0,615	0,75	0,75
Z- la bidia	1,843	1,386	1,418	2,213	1,230	1,530	1,283				3,66
Bourkhis	1,484	1,570	1,886			2,150	1,33	2,14			2,61
S-Slimane	1,758	1,990	2,00	2,585		2,00	1,93	2,45	2,50	1,95	2,8

Tab.16 les paramètres hydrodynamiques du canal par la méthode de jaugeage au moulinet (Sayah Lembarek Mohamed. 2008)

Stations	Débit	Vitesse moyenne	Vitesse de surface	rapport V _m /VMS	Section Mouillée	Périmètre Mouillé	Rayon Hydraulique	Profondeur moyenne	Nombre de Froude	Régime d'écoulement
	Q (m ³ /s)	V _m (m/s)	(m/s)		S _m (m ²)	P _m (m)	R _h (m)	H _m (m)	F _r	
Ranou (en amont)	0.75	0.25	0.425	0.588	3.00	8.30	0.36	0.375	0.13	fluvial
Sidi Slimane (en aval)	1,95	0.63	0.668	0.943	3.06	5.2	0.588	0.68	0.68	fluvial

IV.3 LES LACS

IV.3.1 Définition

Lac peut être défini comme un plan d'eau continental (séparé de la mer, dominé par son bassin d'alimentation et développant une personnalité propre), dont la profondeur, la superficie ou le volume sont suffisants pour provoquer un étagement, une zonation ou un cubement durable de son fonctionnement.

IV.3.2 Liste des lacs de la région d'étude

- Lac de Témacine (Elbhour)
- Lac de Merjaja
- Lac de Tataouine
- Lac de Megarine
- Lac de Sidi Slimane
- Lac de Naoura



Fig.30 Localisation des lacs en Amont de l'Oued Righ

IV.3.3 CARACTERISTIQUES DES LACS ETUDIÉS

IV.3.4.1 Lac de Témacine (Elbhour)

1. Situation et origine

Le lac de Témacine se trouve au nord de la commune dans l'agglomération d'elbhour, où il a pris son nom, il est entouré par des palmeraies qui contiennent essentiellement des palmiers dattier, les eaux évacuées par le réseau de drainage de ces oasis alimente ce lac, le Canal de l'Oued Righ qui se trouve à l'est du Lac, constitue un exutoire naturel, ils sont en liaison directe avec une distance intermédiaire de 10 m.

il est caractérisé par :

- **Latitude** : 33° 00'46 N
- **Longitude** : 006° 01' 24 E
- **Altitude** : 76 m
- **Superficie** : ~1.5 ha
- **Profondeur** : 2-7 m
- **Bioclimat** : Arid



Photo.3 lac de Témacine

2. Les variations de niveau du lac au cours de l'année

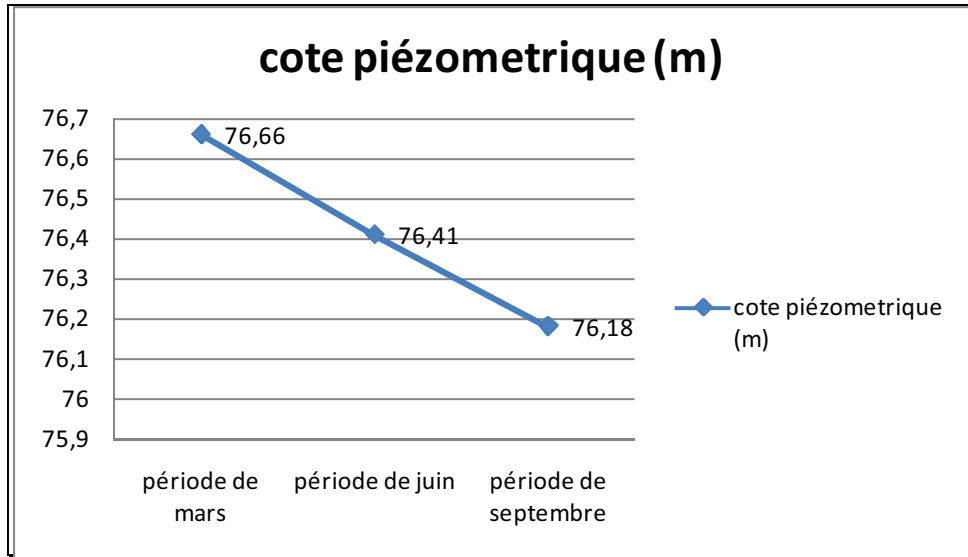


Fig.31 Evolution de niveau du lac de Temacine (année 2010).

Les observations sur le niveau d'eau du lac sont effectuées dans trois périodes d'observations en utilisant un appareil topo numérique. Les données saisonnières sont portées sur la figure 31. Cette vue témoigne de l'abaissement du niveau du lac Sur la période allant de mars 2010 à septembre de même année, les fluctuations annuelles sont faibles. Compte tenu des faibles précipitations, de l'évaporation, mais aussi des apports par les eaux de drainage, il est possible que le lac subisse des pertes alimentant des circulations profondes.

3. Gradient hydraulique

Gradient hydraulique est calculé à partir de la différence de charge hydraulique mesurée sur un ensemble de piézomètres et/ou de puits. Dans le cas d'écoulements souterrains horizontaux, le gradient hydraulique est calculé à partir de la différence de charge hydraulique entre deux points d'un aquifère par unité de distance, selon une direction donnée, en général selon une ligne de courant. Elle a la signification d'une différence de potentiel par unité de longueur, Sans dimension, Symbole (i) ou (grad) en écriture vectorielle. Le Gradient hydraulique obtenu en mois de septembre 2010 entre le niveau du lac et la cote piézométrique du canal est de l'ordre de 65‰

5. Morphologie

Le profil bathymétrique réalisé, en septembre 2010, représente l'état du fond du lac de Temacine à ce moment là. La géomorphologie du lac déduite des isobathes montre une instabilité du fond, avec un accroissement de la profondeur des berges vers le centre et la présence de haut fond et de bas fond (Fig.32). La profondeur maximum observée est de 6.50 m.

Le profil bathymétrique longitudinal (fig.34) illustre la colonne d'eau associée à la vase et l'aspect morphométrique de la cuvette lacustre (Fig.33) avec un volume total est de 68410 m³. Le profil bathymétrique longitudinal le plus long est de 450 m.

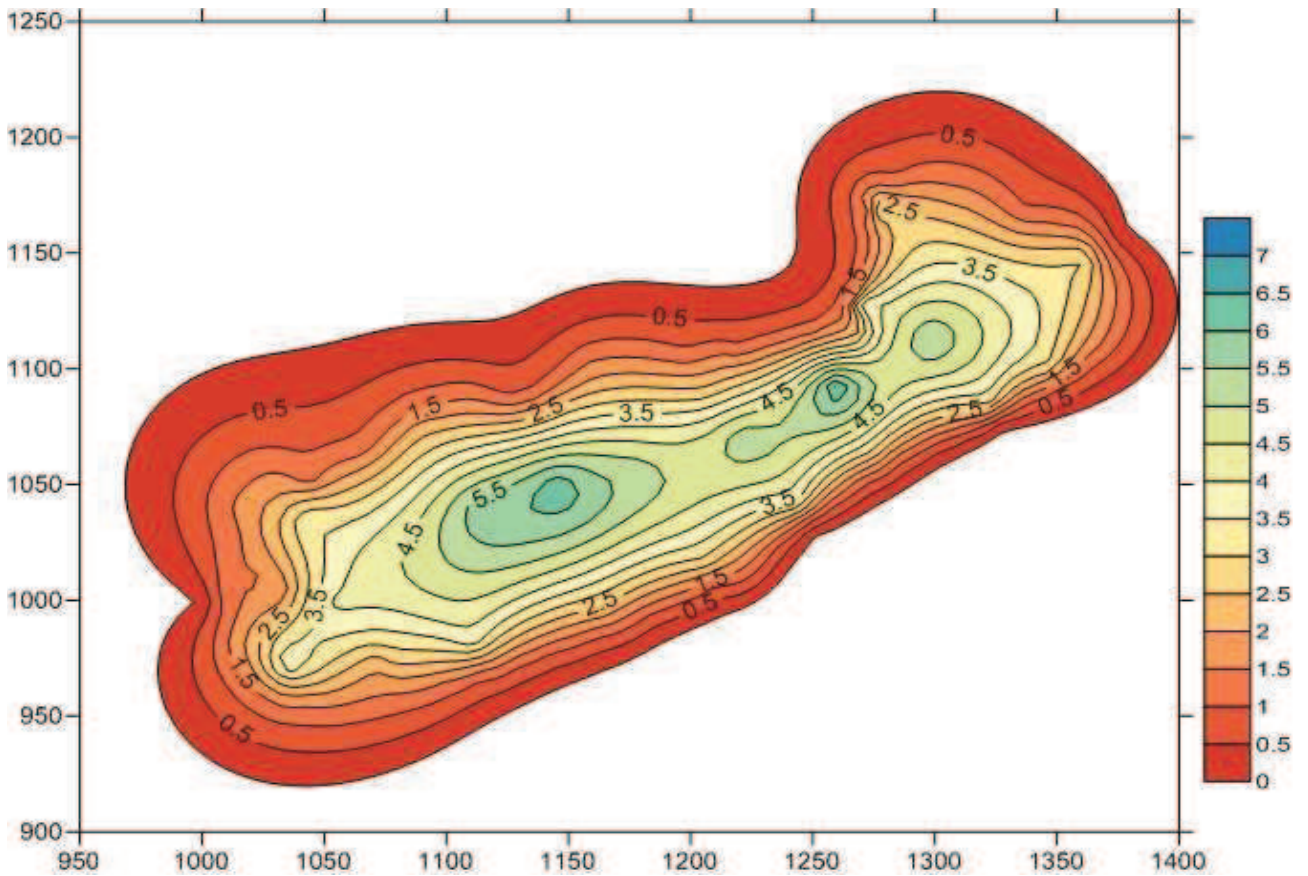


Fig.32 Carte isobathe du lac de Témacine (septembre2010)

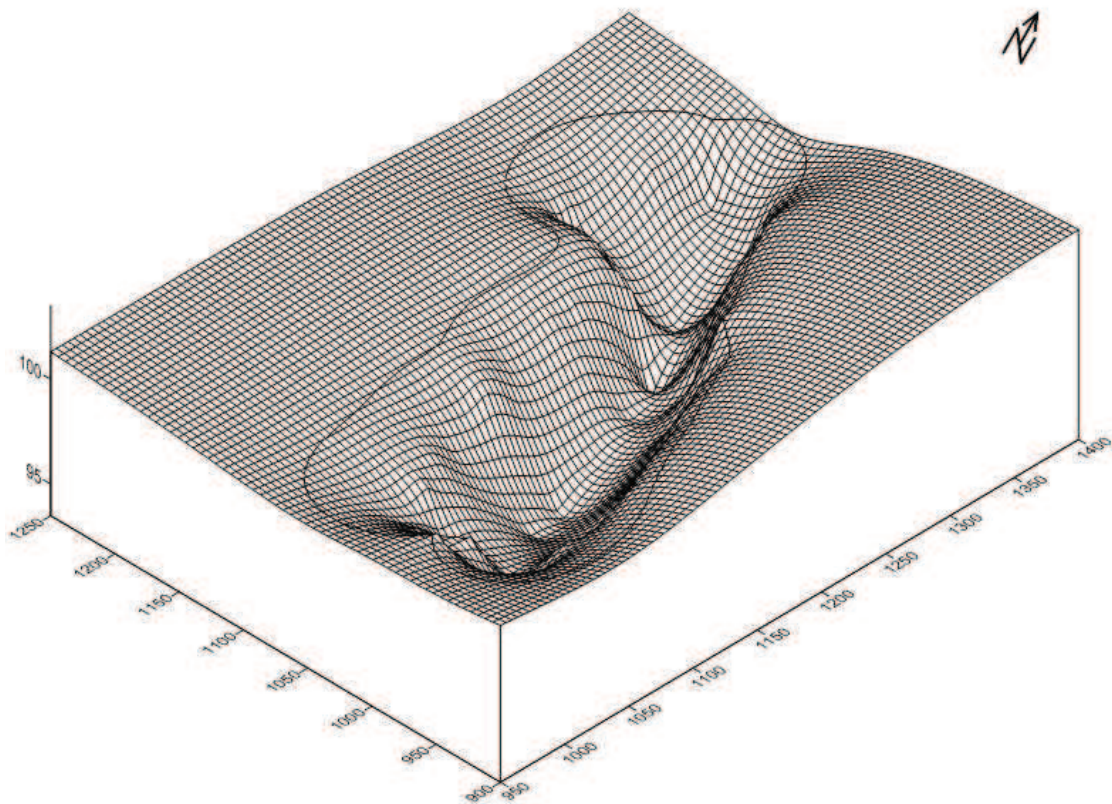


Fig. 33 forme de la cuvette lacustre de Témacine (septembre2010).

V.3.4.2 Lac de Megarine

1. Situation:

Le lac de Megarine se trouve dans la commune de Megarine au centre de la région de Touggourt, bordé des palmeraies de toutes cotés, Il est caractérisé par :

- **Latitude** : 33° 12'24 N
- **Longitude** : 006° 05' 53 E
- **Altitude** : + 53 m
- **Superficie** : ~1.8 ha
- **Profondeur** : 2-4 m
- **Bioclimat** : Arid



Photo.4 lac de Megarine

2. Alimentation

Le lac de Megarine est alimenté par l'excès d'eau d'irrigation provenant des palmeraies voisines à travers deux collecteurs secondaires de drainage liés directement au lac.

3. Les variations de niveau du lac au cours de l'année

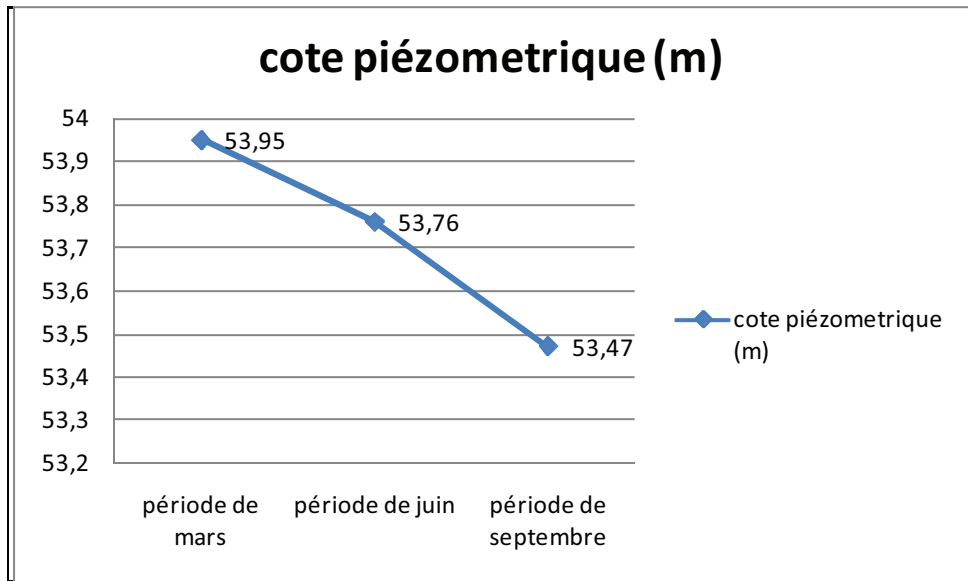


Fig.34 Evolution de niveau du lac de Megarine (année 2010).

Le niveau est maximal en mars et minimal en septembre à cause de forte évaporation de l'été Et de faible alimentation de l'eau par le réseau de drainage à cause de l'accroissement de la demande en eau par les palmiers.

4. Gradient hydraulique

Les observations piézométriques montrent un gradient du lac vers le canal. Les eaux libres du lac représentent un point haut du système, puisque leur cote est située au dessus de celle des eaux du canal de l'Oued Righ. Le Gradient hydraulique obtenu en mois de septembre 2010 entre le niveau du lac et la cote piézométrique du canal est de l'ordre de 1.5 ‰

5. Morphologie

Le résultat de l'étude bathymétrique réalisé, en septembre 2010, représente la morphologie du lac de Megarine a donné :

- La profondeur maximum observée est de 4.23 m.
- un volume total est de 56139 m³.
- Le profil bathymétrique longitudinal le plus long est de 566 m.

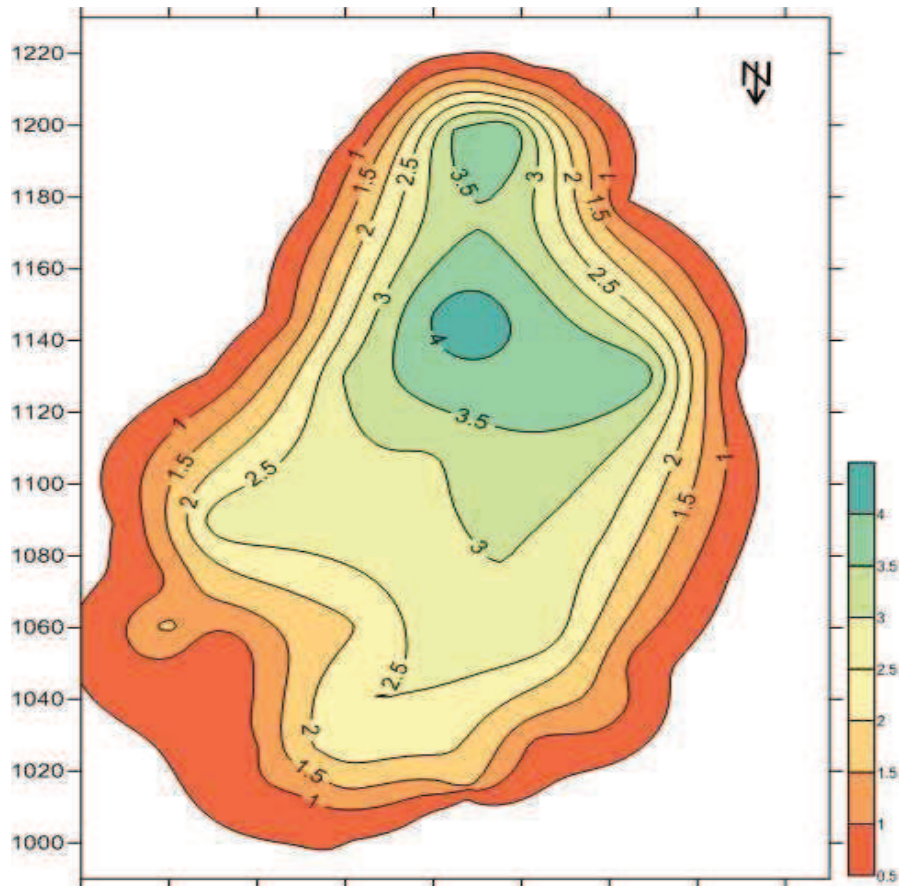


Fig.35 Carte isobathe du lac de Megarine (mai 2012)

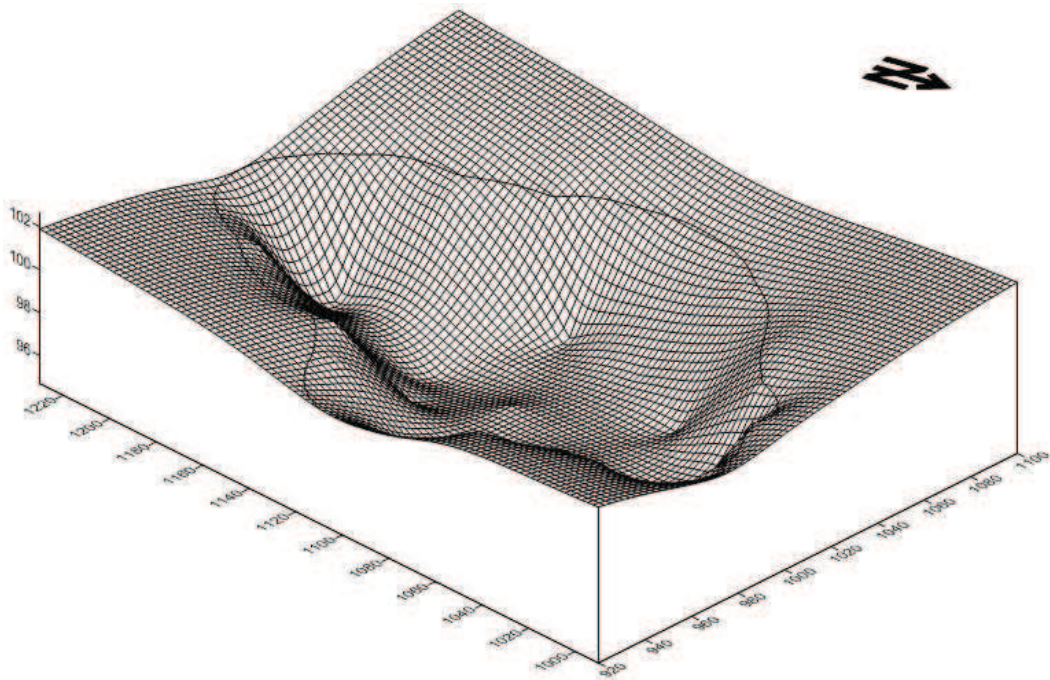


Fig. 36 forme de la cuvette lacustre de Megarine (mai 2012).

IV.3.4.3 Lac de Sidi Slimane

1. Situation:

Le lac de Sidi Slimane se trouve dans la commune de Sidi Slimane à l'aval de la région de Touggourt, bordé des palmeraies de deux cotés, et d'autres cotés par des terrains nus. Il doit signaler qu'il y a une relation directe entre ce lac et le canal de l'oued righ à partir d'un collecteur secondaire de drainage à 754 m de longueur, évacue l'excès d'eau et garde le niveau piézométrique dans le lac.

Il est caractérisé par :

- o **Latitude** : 33° 17' 13 N
- o **Longitude** : 006° 05' 03 E
- **Altitude** : + 49 m
- **Superficie** : ~1.5 ha
- **Profondeur** : 2-4 m
- **Bioclimat** : Arid



Photo.6 lac de Sidi Slimane

2. Alimentation

Le lac de Sidi Slimane est alimenté par l'excès d'eau d'irrigation provenant des palmeraies voisines. Des recherches complémentaires seront nécessaires, d'une part, pour délimiter le bassin d'alimentation du lac en vue de définir les conditions climatiques à prendre en considération et, d'autre part, pour déterminer dans quelle mesure les eaux du lac alimentent des circulations profondes.

3. Les variations du niveau du lac au cours de l'année

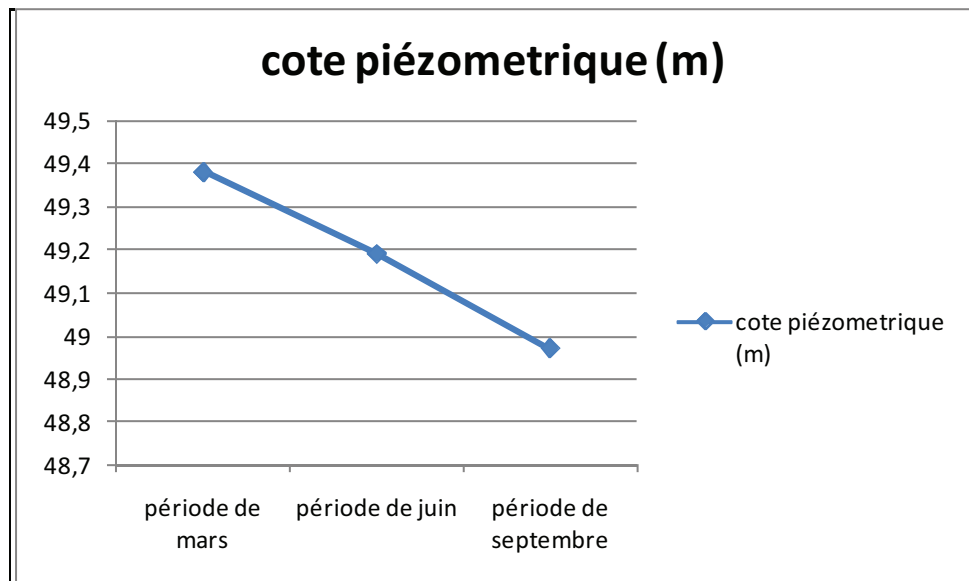


Fig.37 Evolution du niveau du lac de Sidi Slimane (année 2010).

Le niveau du lac de Sidi Slimane fluctue en fonction des conditions climatiques, et tout particulièrement de l'évaporation. À l'échelle annuelle, alors que la période pluviométrique sèche dure en moyenne de avril à septembre et la période humide d'octobre à mars, le niveau du lac diminue de mars à septembre.

4. Gradient hydraulique

Le Gradient hydraulique obtenu en mois de septembre 2010 entre le niveau du lac et la cote piézométrique du canal est de l'ordre de 2.13%

5. Morphologie

Le résultat de l'étude bathymétrique réalisé, en septembre 2010, représente la morphologie du lac de Sidi Slimane a donné :

- La profondeur maximum observée est de 5.43 m.
- un volume total est de 32332 m³.
- Le profil bathymétrique longitudinal le plus long est de 209 m.

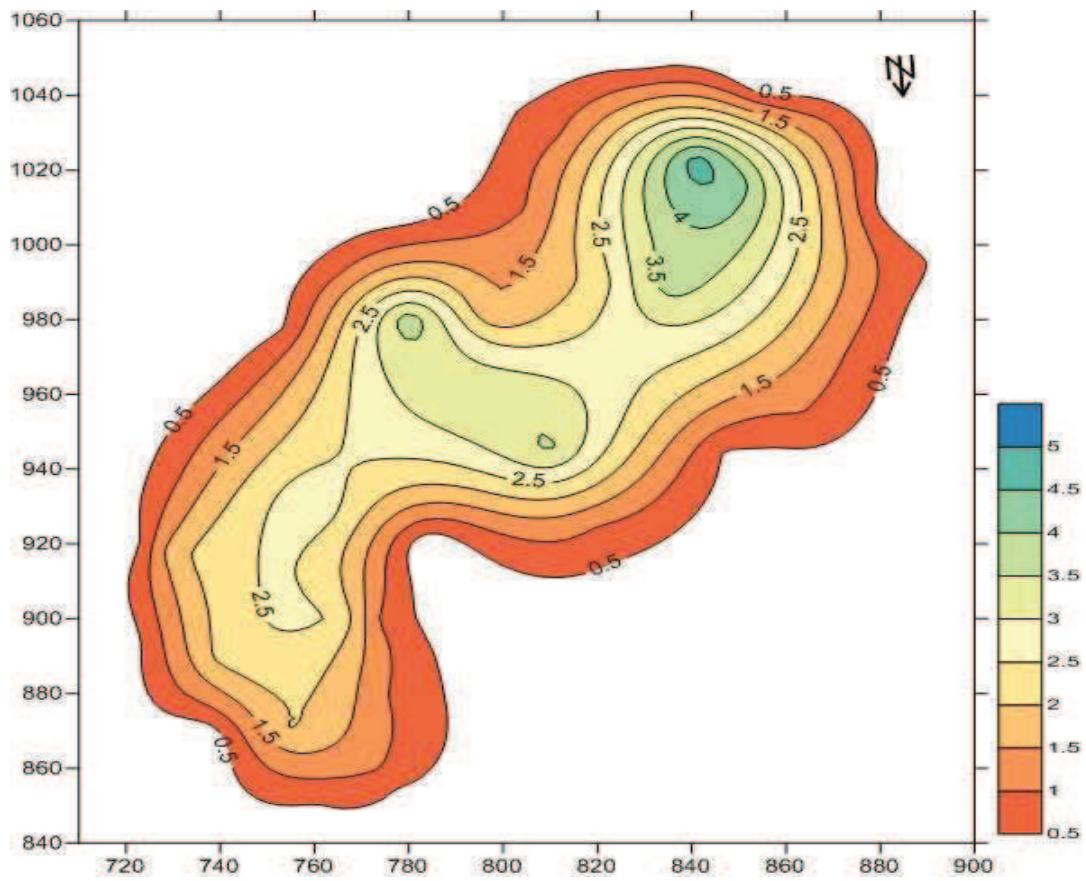


Fig.38 Carte isobathe du lac de Sidi Slimane (mai 2012)

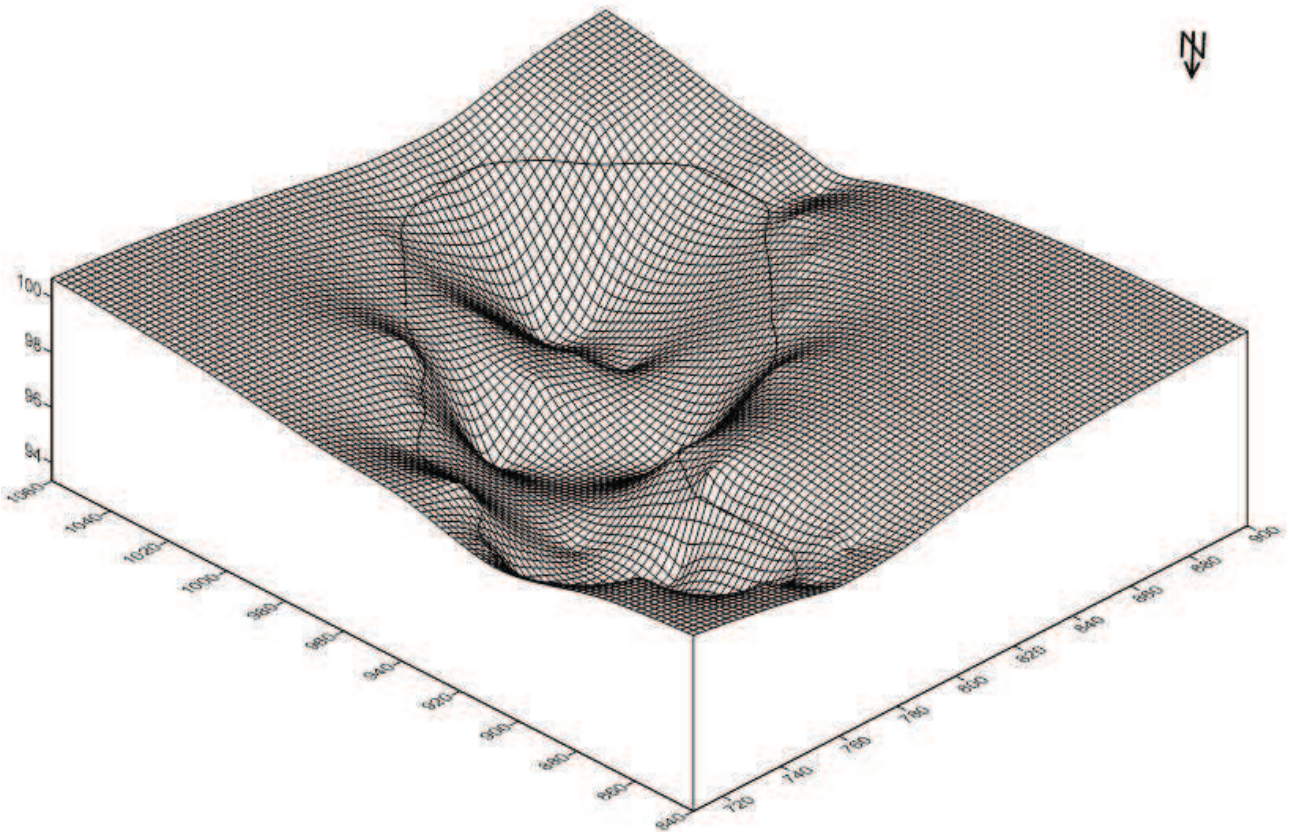


Fig. 39 forme de la cuvette lacustre de Sidi Slimane (mai 2012).

IV.4 LES CONTRAINTES QUI MENACENT LA STABILITE DES SYSTEMES LACUSTRES

Les zones humides de la région de l'Oued Righ, a connu ces dernier années une grande détérioration en raison du développement urbain et industriel. Les rejets des agglomérations ainsi que celles des usines et des agricultures sont souvent rejetés directement au niveau du canal et puis vers un écosystème vivant (Chott Marouane), ces effluent sont souvent chargés en particules polluantes qui éventuellement peuvent s'accumulés dans les eaux et sols. Avec le temps, ceci peut être à l'origine d'une perturbation et même d'une dégradation des écosystèmes existants.

Les zones humides dans les régions arides en général, et ceux de la vallée de l'Oued Righ en particulier, subissent des dégradations d'origines diverses (climatique ou anthropique), l'action anthropique étant de loin la plus importante.

IV.4.1 Les problèmes qui affectent le canal

Le canal collecteur tend vers une dégradation importante à cause des phénomènes suivants :

- Le long du canal on trouve des végétations (roseau) sur les berges provoquant un obstacle à l'écoulement des eaux et détruit les berges non protégées, ce qui conduit à un comblement du lit de l'oued ;
- dans quelques zones de la vallée, on observe que certaines parties du canal sont presque détruites par l'érosion qui reste un danger permanent pour la stabilité des berges ;
- Des glissements au niveau des berges provoqués par une mauvaise gestion de système de drainage (collecteur principal et canaux secondaires).

IV.4.2 Les problèmes qui affectent les lacs

IV.4.2.1 Le climat

Le climat de la vallée de Oued Righ est typiquement saharien qui se caractérise par des précipitations très faibles, une température élevée et une humidité relativement faible. Où la précipitation ne dépasse pas 70 mm, un ensoleillement qui est de plus de 3000 heures par an, les températures sont très élevées pouvant dépasser 45 °C.

Compte tenu de ces conditions climatiques difficiles il est impératif de préserver et de reconstituer les zones humides.

IV.4.2.2 Anthropiques

Il est généralement admis que la plupart des zones humides de la vallée de l'Oued Righ ont été détruits. Les actions humaines influençant la destruction, et la dégradation des zones humides sont diverses.

IV.4. 2.2.1 L'agriculture

La plupart des zones humides de la région de l'Oued Righ sont alimenté par l'eau de drainage. Les produits phytosanitaires (engrais, pesticides) sont à l'origine des phénomènes dits d'eutrophisation. En effet, les sols lessivés par les eaux d'irrigation peuvent véhiculer des produits phytosanitaires qui viennent soit directement détruire la flore et donc la faune des milieux humides s'il s'agit de pesticides, soit au contraire les enrichir excessivement en éléments nutritifs.



(A)



(B)

IV.4. 2.2.2 La pollution

Dans notre région l'homme déverse beaucoup plus des substances chimiques toxiques, antibiotiques utilisés dans l'élevage, eaux usées domestiques non traitées, pesticides, qui sont de potentiels "perturbateurs endocriniens".



(C)



(D)

IV.4. 2.2.3 Gestion des déchets

La plupart des zones humides accentuées par les déchets urbains, autres zone humide utilisé comme un exutoire d'évacuation des déchets solides. L'augmentation de la population est des activités urbaines c'est faite au détriment des zones humides dont la superficie a connu une réduction sensible.

L'évolution de la ville a contribué à l'accroissement des déchets urbains dont les rejets se font actuellement dans la décharge public de Sidi Mahdi à la base d'un ancien chott, c'est Chott de Naoura. Il est aujourd'hui tenu pour certain chott est menacées de disparition car leur surface diminue régulièrement de façon accélérée.



(E)



(F)

IV.4. 2.2.4 Régression de la superficie des zones humides

L'absence et/ou le non application d'une législation en matière d'urbanisme et d'architecture ainsi que l'occupation du sol de manière anarchique ont été à l'origine de l'apparition des risques sérieux sur les zones humides. De plus en plus de nouvelles surfaces des zones humides, sont absorbées par les constructions, surtout dans les zones limitrophes aux agglomérations.



(G)



(H)

IV.4. 2.2.5 Le feu

Les zones humides de la région de l'Oued Righ subissent des dégradations du fait des actions anthropiques telles que les feux. Le feu est un moyen traditionnel de défrichage pour la mise en culture de nouvelles terres ou lutte contre certaines mauvaises herbes (roseau). Les feux non maîtrisés sont aujourd'hui très préoccupants, ils peuvent détruire une grande partie de la biomasse superficielle et ont des effets catastrophiques sur la faune et flore de la zone humide



(I)



(J)

III.5. Relation entre la nappe phréatique et le Canal de l'Oued Righ

le Canal de l'Oued Righ possède un régime permanent, Il traverse la vallée pour aller alimenter chott Merouane. D'après la carte piézométrique établie, le sens d'écoulement tend vers l'exutoire naturel. L'énorme volume conduit par le canal de l'Oued Righ se jette enfin dans le chott.

Le canal collecteur forme un rein dans cette région .Il draine la nappe phréatique par les deux rives de berges non seulement il collecte l'excès d'irrigation par le baie des canaux secondaires mais aussi il évacue les eaux usées rejeté par les réseaux d'assainissement des agglomérations.

On peut dire que la nappe phréatique n'est jamais alimentée par ce canal sauf s'il s'agit du colmatage au droit de la vallée du canal qui remonte le niveau.

III.6. Relation entre la nappe phréatique et les lacs de la région

La géométrie de la nappe ainsi que la géologie du substratum imposent le sens d'écoulement des eaux de cette aquifère et facilitent l'ascension des eaux en surface. Ceci a accéléré la genèse de nouveaux chotts à cette région, Mais cette hypothèse ne s'applique pas au cas des lacs parce que ces derniers prennent leurs origines des eaux d'irrigation à travers des collecteurs secondaires de drainage liés directement aux lacs d'une part, et l'observation de la carte piézométrique, résulte que le niveau de la nappe est inférieur de quelques mètres à celui du lac, crée un gradient orienté vers l'intérieur des terres sur tout le pourtour du lac d'une autre part.

De même, Les lacs situés au cœur de la cuvette de la région d'étude, sont en position perchée au dessus de la nappe phréatique, les gradients hydrauliques soient favorables à l'alimentation par les eaux du lac.

Une approche isotopique basée sur des analyses des isotopes de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H , ^3H) et ceux (^{14}C , ^{13}C) permettra d'identifier des processus de recharge localisés de l'aquifère à partir les eaux des lacs

IV.7 CONCLUSION

La nappe phréatique est contenue dans les niveaux sableux et argilo-éaporitiques du Quaternaire. Elle est principalement alimentée par les eaux d'irrigation et de distribution urbaine. L'évacuation des eaux industrielles, ménagères et agricoles (drainage) de la région vers le chott Marouane se fait à partir d'un canal de Oued Righ dont la longueur dépasse 130 km et largeur de quelque mètre.

La cartographie piézométrique des différentes campagnes d'observation a montré un écoulement se fait, en général, suivant une direction du Sud Ouest vers le Nord Est. L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de canal de l'Oued Righ qui draine les eaux de surface, les eaux de drainage et les eaux usées.

- L'allure générale des courbes piézométriques est restée constante lors des 03 campagnes d'observations.
- Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique connaissent une augmentation en amont de la nappe pour atteindre 0.65 m. Au centre, elles oscillent entre 0.2 et 0.5 m, et sont parfois nulles. Ces fluctuations sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région : faible pluviométrie d'une part et forte évaporation d'autre part.
- Les lacs de la région d'étude, de faible extension connaissent souvent une dégradation générale, liée en particulier à la dégradation de leur milieu naturel qui est utilisé comme (rejets d'eaux usées, dépotoirs et des débris etc...). L'intensification agricole, le développement de l'urbanisation et les aménagements divers ... etc.

Chapitre V: QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES SYSTEMES LACUSTRES

V.1 INTRODUCTION

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Les concentrations de ces éléments sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface.

Les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines. On observe principalement deux types d'influence :

- En agriculture: Apport de K^+ , Ca^{+2} , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , PO_4^- .
- Rejets des eaux usées : Apport de Na^+ , K^+ , NO_3^- , Cl^- et quelques métaux lourds.

Le présent chapitre traite du chimisme des eaux superficielles, et nous permettra d'essayer tentons d'expliquer le comportement, l'origine et l'évolution des éléments chimiques décrits pour expliquer le fonctionnement hydraulique des systèmes lacustres. L'étude se base sur les informations de trois campagnes de prélèvement à partir de 19 points d'eau repartis sur le terrain (06 puits, 09 piézomètres et 03 lacs). Comme la vallée de l'Oued Righ est à vocation agricole. Un intérêt particulier sera accordé à cet effet.

V.2 LES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE

V.2.1 DESCRIPTION SOMMAIRE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux souterraines de la région d'étude, pendant les périodes d'observation, ont été consignés dans le tableau (15) :

V.2.1.1 Paramètres physiques

V.2.1.1.1 Température (T°)

Elle joue un rôle primordial dans la stabilité des sels et des gaz, et dans la dissolution des sels dissous, donc sur la conductibilité.

Ce paramètre est très important de connaître, car elle permet de différencier les eaux qui circulent près de la surface de celles qui circulent en profondeur, et donc la qualité de l'eau.

La variation thermique des eaux souterraines est fonction de la profondeur de l'aquifère et le gradient géothermique.

La température moyenne annuelle d'air est de l'ordre de 21,70°C et les températures des eaux prélevées varient entre 20.30 °C et 31.70 °C.

Tableau.15 Variation des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique.

Eléments	Norme OMS	Période de mars					Période de juin					Période de septembre				
		Max	Min	Moy	Ecart-type		Max	Min	Moy	Ecart-type		Max	Min	Moy	Ecart-type	
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	250	1165	170.8	571.67	333.20	808.25	256.2	482.47	134.12	927.2	149.45	452.93	178.57			
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	147855	2700	35623.13	39380.1	79541	4387	33625.08	31502.24	99896	4388	41525.93	37493.69			
Cl ⁻ (mg/l)	250	172170	800	53834.69	57244.69	172170	5804	57640.38	56221.55	165271	5804	57226.46	55692.51			
Ca ²⁺ (mg/l)	100	96663	400	7363.38	23828.63	2920	460	1555.94	845.38	2842	194	1306.76	974.28			
Mg ²⁺ (mg/l)	50	9095	790	4634.19	3397	17018	1341	6121.50	41769.31	17511	1340	6707.86	6056.32			
Na ⁺ (mg/l)	150	115000	1400	37182.25	41532.43	115004	3102	41769.71	42044.65	118258	3100	40828.01	42275.88			
K ⁺ (mg/l)	12	2233	33	731.19	770.45	8122	80	1709.0	2612.24	8200	64	2168.91	3065.90			
DHT (°F)	50	4499.6	444.2	2202.84	1543.89	7577.6	673.8	2939.14	2339.43	7793	673	3152.53	2632.65			
pH	6.5<pH<9.5	8.21	7.38	7.63	0.40	8.59	6.67	7.65	0.50	8.67	5.96	7.44	0.66			
Cond (mS/m)	250	164.6	11.84	79.73	56.92	175.75	14.71	69.24	52.49	160.3	15.98	79.10	61.41			

V.2.1.1.2 Potentiel Hydrogène (pH)

Il exprime la concentration en ion H^+ d'une solution, c'est-à-dire l'alcalinité ou l'acidité d'une eau. Par définition le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration H^+ :

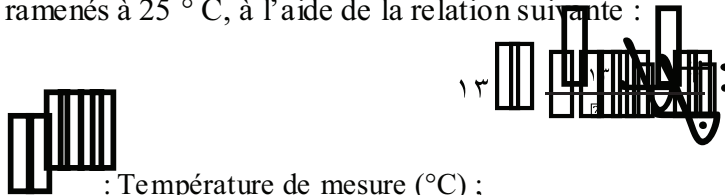
$$pH = -\log [H^+]. \quad (11)$$

Dans notre région d'étude, le pH mesuré des eaux souterraines varie entre :

- 7.28 et 8.21 (période de mars).
- 6.67 et 8.59 (période de juin).
- 5.96 et 8.67 (période de septembre).
-

V.2.1.1.3 Conductivité électrique (CE)

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau, les valeurs mesurées ont été ramenés à 25 °C, à l'aide de la relation suivante :



$$CE_{25} = K \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{T} \quad (12)$$

T : Température de mesure (°C) ;

CE_{25} : Conductivité électrique (S.cm-1) corrigée à 25°C.

Pour la nappe phréatique de la région d'étude, la valeur de la conductivité varie entre 12.34 ms/m et 190.00 ms/m. Elles sont importantes au Nord de la région.

V.2.1.2 Paramètres chimiques

V.2.1.2.1 Résidu sec

Exprimé en gramme par litre (g/l) ou milligramme par litre (mg/l), représente la minéralisation totale de l'eau, c'est-à-dire la totalité des sels dissous et la matière organique contenus dans l'eau, obtenue par dessiccation de l'eau à 110 °c.

D'après le tableau (40.a, 40.b, 40.c) en annexes, on constate que les valeurs obtenues sont relativement faibles à l'amont de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées. On remarque aussi que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au Nord à l'exception des puits 4 et 6 au Sud.

On remarque que les fortes concentrations coïncident avec les périodes de juin et de septembre, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation.

V.2.1.2.2 La dureté totale (degré hydrométrique totale) DHT

Elle indique la teneur totale de l'eau en sel de calcium Ca^{2+} et de magnésium Mg^{2+} exprimé en degré français et est calculée selon la formule suivante :

$$DHT = 5 (r Ca^{2+} + r Mg^{2+}) ^\circ F \quad (13)$$

Où :

$r Ca^{2+}, r Mg^{2+}$: désigne respectivement les quantités en réaction de calcium et de magnésium en méq/l.

Selon l'OMS, les eaux potables de bonne qualité ont une dureté totale inférieure à 15 °F mais acceptable jusqu'à 50 °F, si elle dépasse cette valeur, leur utilisation devient extrêmement difficile et cause des problèmes pour la consommation et pour certains usages domestiques.

Dans l'ensemble des eaux analysées de la nappe phréatique présentent un DHT > 50°f.

V.2.1.2.3 Les éléments majeurs

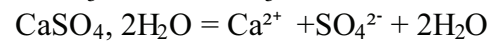
La chimie des eaux dépend des roches traversées lors de leurs circulations dans les formations aquifères et du temps de séjour qui leur permet de s'enrichir en sels minéraux :

V.2.1.2.3.1 Le calcium Ca^{2+}

C'est un élément de la dureté totale. Son origine naturelle provient essentiellement de l'attaque des formations carbonatées par le gaz carbonique. Tous les puits présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux.

Les concentrations oscillent en général entre 194 et 96663 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles à l'amont de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées. On remarque que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au Nord à l'exception des puits 4 et 6 au sud. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 96663 mg/l sont observées au Nord de la nappe pendant la période de mars alors que les valeurs les plus faibles avec un minimum de 194 mg/l sont observées au centre et concernent le puits (06).

Les ions Ca^{2+} proviennent de la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et des gypses (CaSO_4) selon les équations d'équilibre suivantes :



On remarque que les fortes concentrations coïncident avec les périodes de juin et de septembre, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation. L'ion de calcium est sensible au phénomène d'échange de bases

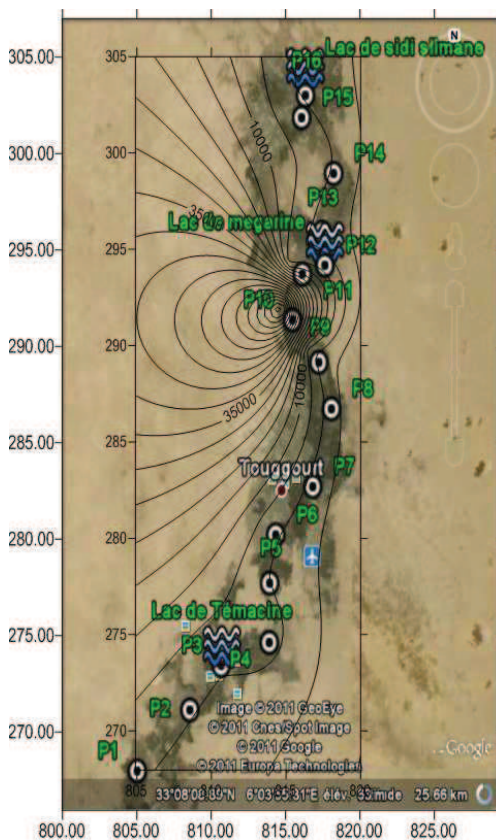


Fig.41.a Carte du calcium, mars (mg/l).

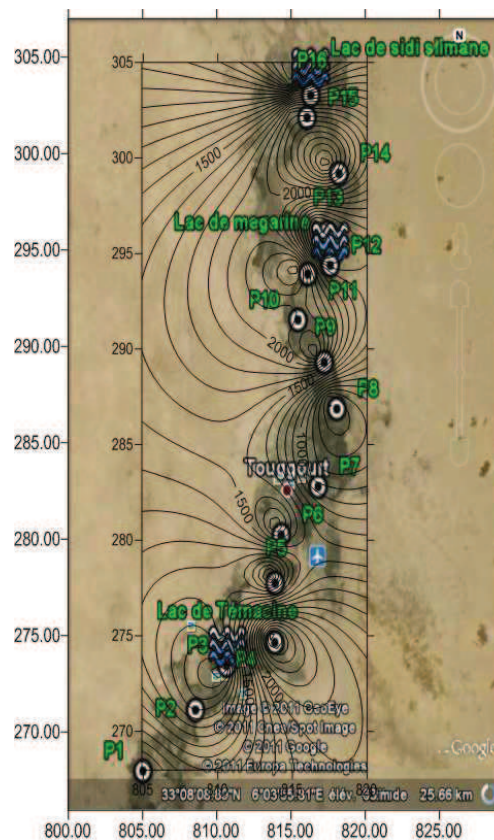


Fig.41.b Carte du calcium, juin (mg/l).

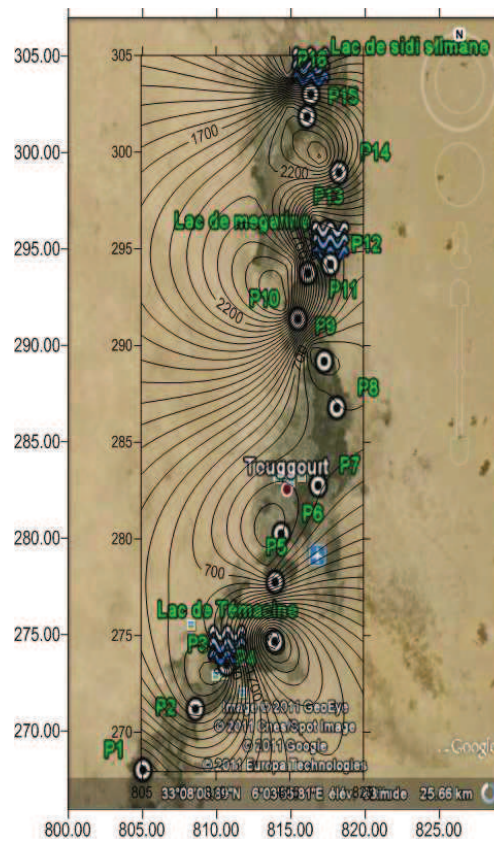


Fig.41.c Carte du calcium,
septembre (mg/l).

V.2.1.2.3.2 Le magnésium Mg^{2+}

C'est aussi un élément de la dureté totale, La mise en solution de cet ion prend beaucoup de temps. Il provient de la dissolution de $MgSO_4$ dans les terrains gypseux entraînant le magnésium et aussi des minéraux ferromagnésiens.

Pour les eaux souterraines la moyenne enregistrée pendant la période de mars (4634.19mg/l) est inférieure à celle des périodes de juin (6121.50mg/l) et de septembre (6707.86 mg/l), ceci montre l'importance de la concentration par rapport à la dilution pour l'acquisition de cet élément. Généralement les concentrations sont relativement faibles à l'amont de la nappe par rapport à l'aval, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées

L'évolution du magnésium est très différente par rapport à celle du (Ca^{2+}), car ce dernier possède de très fortes teneurs provenant de deux origines qui sont mentionnées plus haut

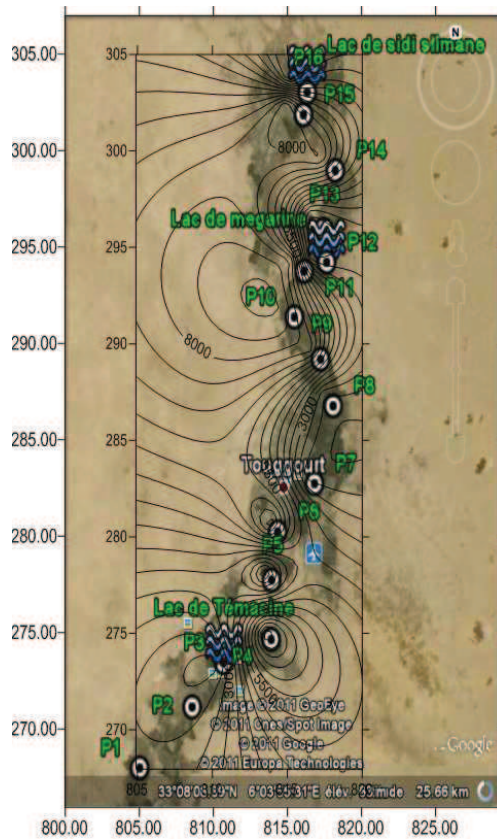


Fig.42.a: Carte du magnésium, mars (mg/l).

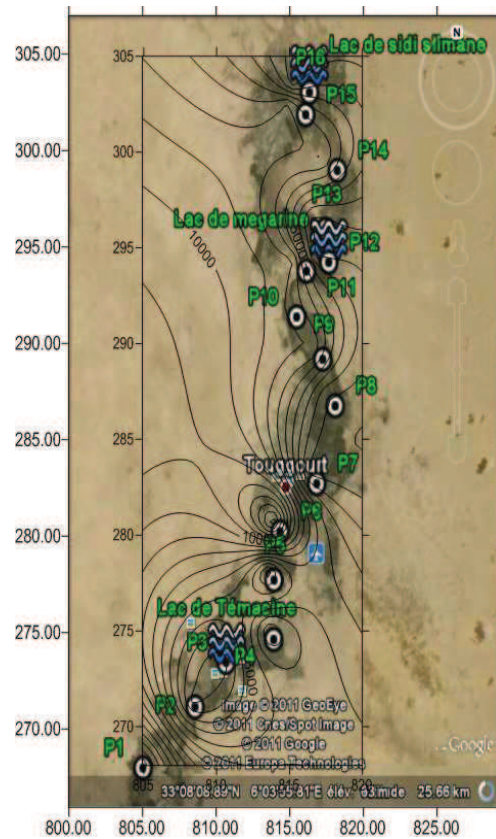


Fig.42.b: Carte du magnésium, juin (mg/l).

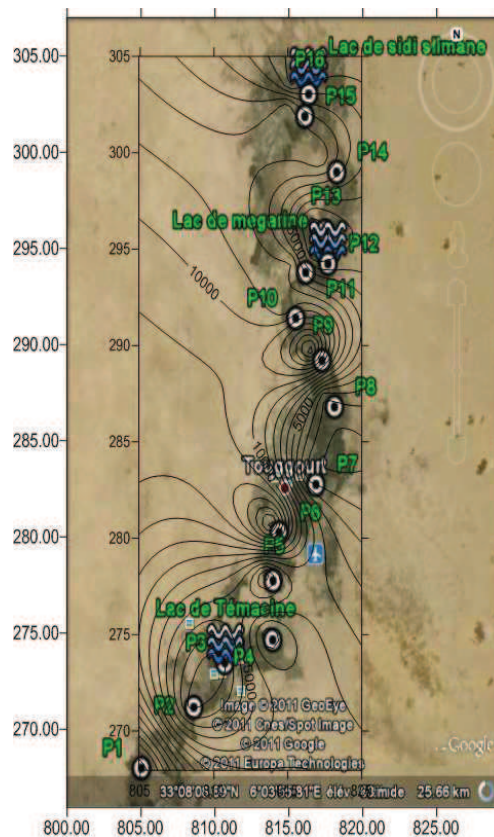


Fig.42.c: Carte du magnésium, septembre (mg/l).

V.2.1.2.3.3 Le sodium (Na^+)

Le sodium est beaucoup plus abondant que le Potassium. Il est toujours présent dans les eaux naturelles avec des teneurs variables. Il provient du lessivage des formations riche en NaCl (argile) et des eaux usées d'origine industrielle et domestique.

Les concentrations varient entre 1400 et 118258 mg/l. L'observation des trois cartes montre que les concentrations sont importantes dans la zone Nord de la vallée pendant la période de juin et la période de septembre, ce qui traduit l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique n'est pas profonde. Les formations évaporitiques constituent l'origine du sodium. Des teneurs assez remarquables sont observées au centre de la nappe, pendant les périodes d'observation, On signale que les faibles concentrations se localisent en amont de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles qui se trouve dans la nappe, peuvent donner du sodium par le phénomène d'échange de base et ce en fixant un ion Ca^{2+} après libération de deux ions Na^+ .

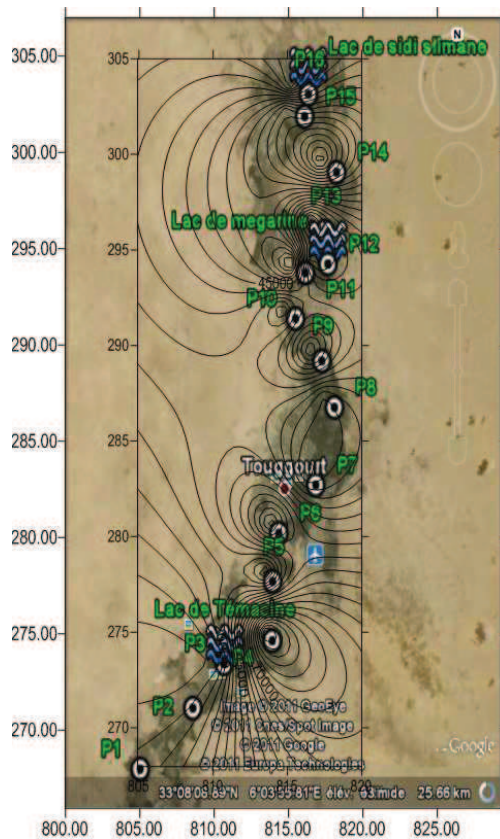


Fig.43.a Carte du sodium, mars (mg/l).

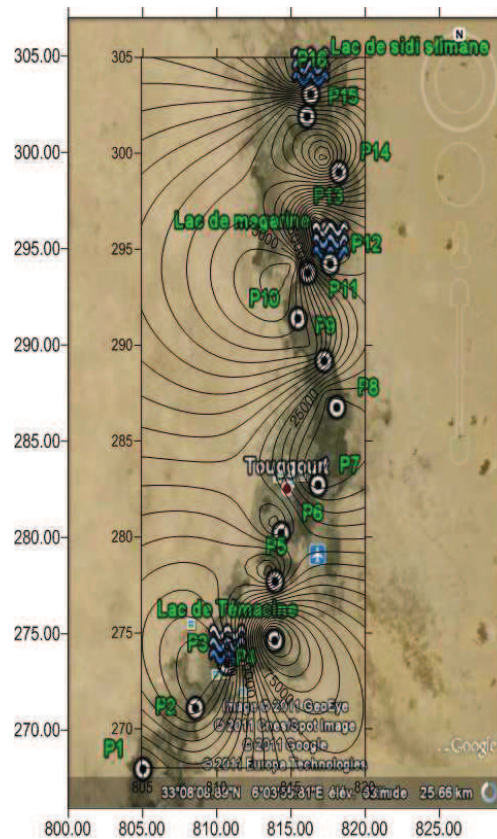
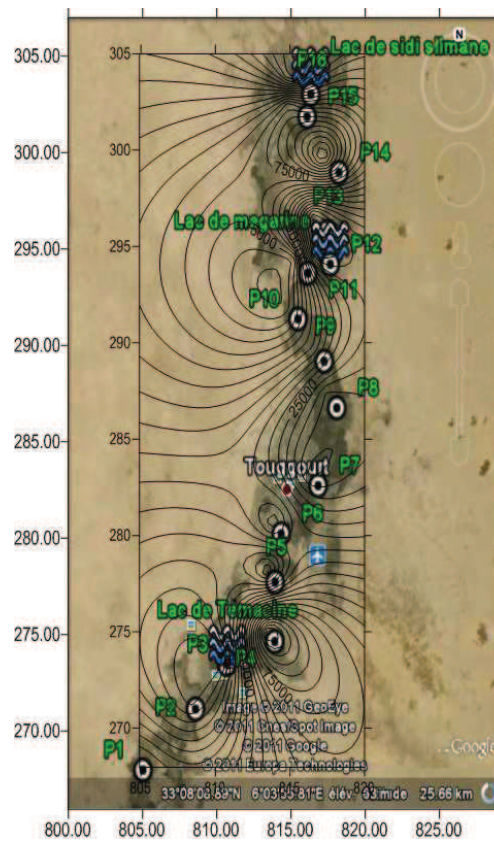


Fig.43.b Carte du sodium, juin (mg/l).



**Fig.43.c Carte du sodium,
Septembre (mg/l).**

V.2.1.2.3.4 le potassium (K^+)

Le potassium (K^+) est assez abondants sur terre, mais peut fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombéné dans les sols (sur les argiles notamment). Les sources principales de potassium sont les évaporites (sylvinite KCl), les argiles, et Aussi par la dissolution des engrais chimiques (NPK) qui sont utilisés par les agriculteurs. La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques dans la région.

Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la période de septembre avec un maximum de 8200 mg/l. sont observées au Nord de la nappe pendant la période de mars alors que Les valeurs les plus faibles avec un minimum de 33 mg/l sont observées au centre et concernent le puits (06).

L'augmentation des valeurs au Nord de la vallée est due aux eaux chargées provenant de l'Amont de la nappe.

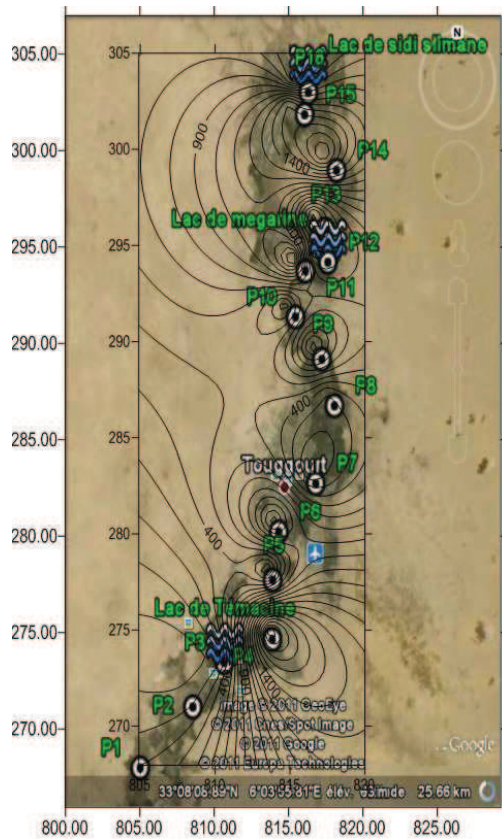


Fig.44.a Carte du potassium, mars (mg/l).

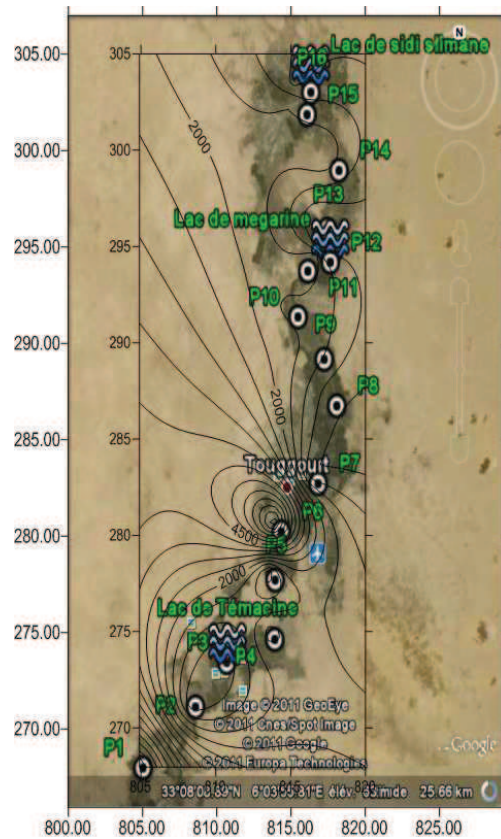


Fig.44.b Carte du potassium, juin (mg/l).

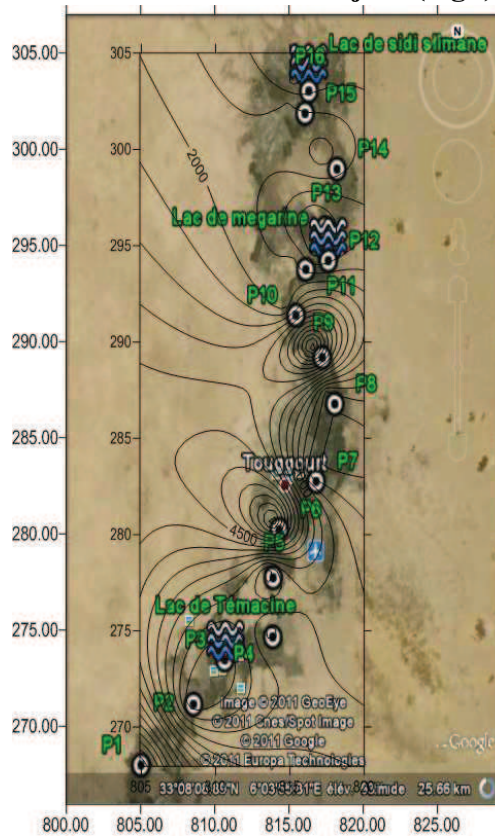


Fig.44.c Carte du potassium, Septembre (mg/l).

V.2.1.2.3.5 Les Chlorures Cl

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles mais à des proportions variables. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par le lessivage des terrains salifères; des rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle.

L'observation des cartes de chlorures montre que les teneurs varient entre 800 et 172170 mg/l. Ces dernières sont importantes au Nord de la région. Les argiles et les évaporites constituent l'origine de ces chlorures.

Au centre de la région, on a enregistré des concentrations importantes en chlorures 99726mg/l, on pense qu'ils tirent leur origine d'un encroustement de gypse. Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant deux facteurs: le premier selon le sens de l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire selon une direction SW-NE, et le second à partir de la saison froide à la saison sèche, c'est-à-dire l'effet d'évaporation. Les activités anthropiques contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures. En effet, le déversement d'eaux usées domestiques, sans qu'elles soient traitées préalablement, nuit à la qualité des eaux souterraines.

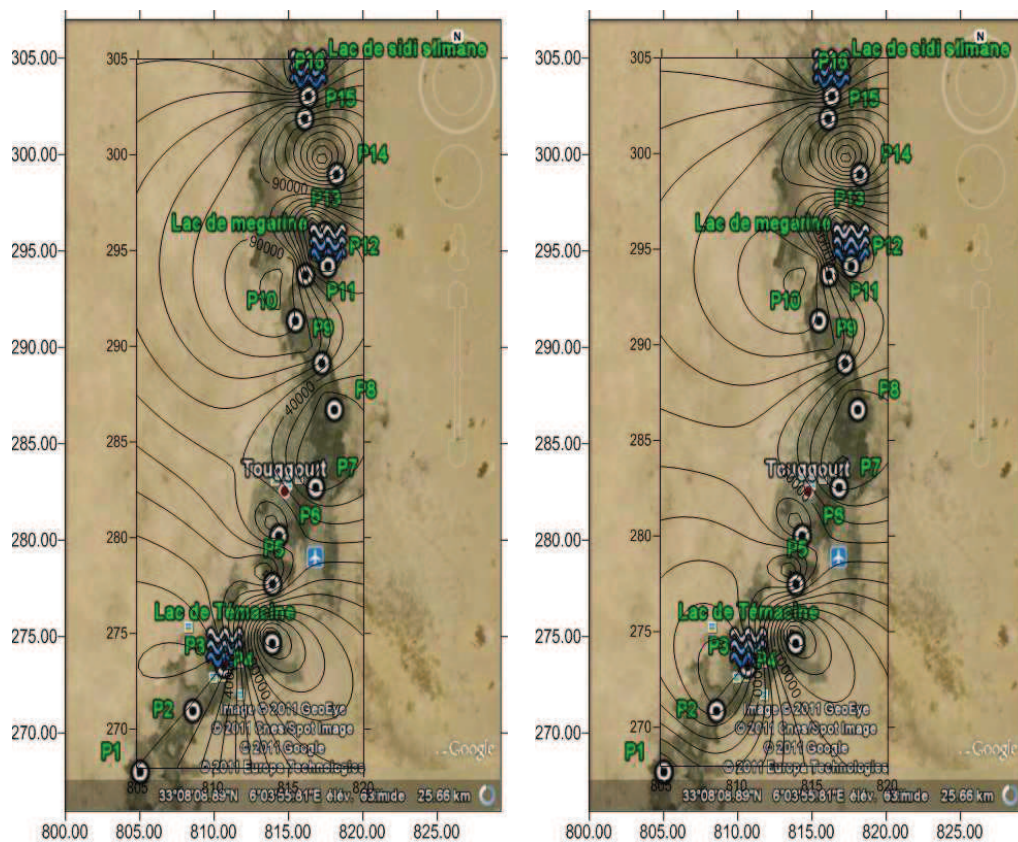


Fig.45.a Carte des chlorures, mars (mg/l).

Fig.45.b Carte des chlorures, juin (mg/l).

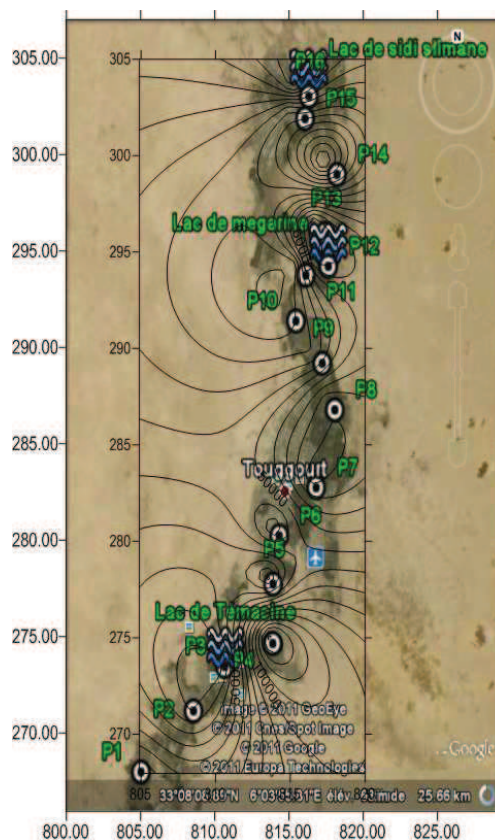


Fig.45.c Carte des chlorures,
septembre (mg/l).

V.2.1.2.3.6 Les sulfates (SO_4^{2-})

La concentration des eaux naturelles en sulfates est très variable. Ils résultent de la dissolution des gypses ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ; l'utilisation des engrais chimiques; des eaux de pluie où le soufre présent dans l'atmosphère subit une oxydation, et du lessivage des terrains argileux et marneux.

Les concentrations, en général, oscillent entre 2700 et 147855 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées durant la période de mars, au Nord de la nappe, Elles sont dues au lessivage des dépôts évaporitiques. Des teneurs remarquables ont été observées pendant les périodes de juin et de septembre, sous l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique se trouve à une faible profondeur. Les plus faibles concentrations sont constatées en Amont de la nappe, car les eaux souterraines sont faiblement minéralisées. En général la présence de fortes concentrations obéit à deux facteurs :

- Le lessivage des formations gypsifères et les dépôts évaporitiques.
- L'évaporation, pendant la période de juin et de septembre, produit de fortes concentrations, car la surface piézométrique n'est pas profonde.

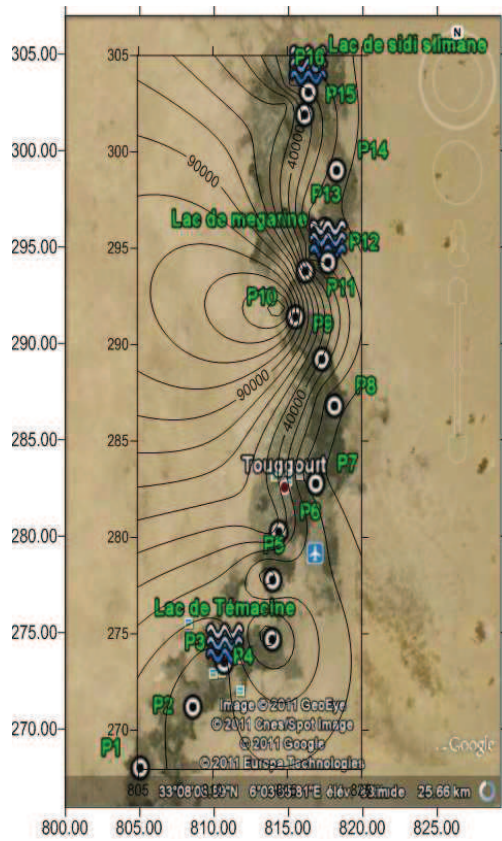


Fig.46.a Carte des sulfates, mars (mg/l).

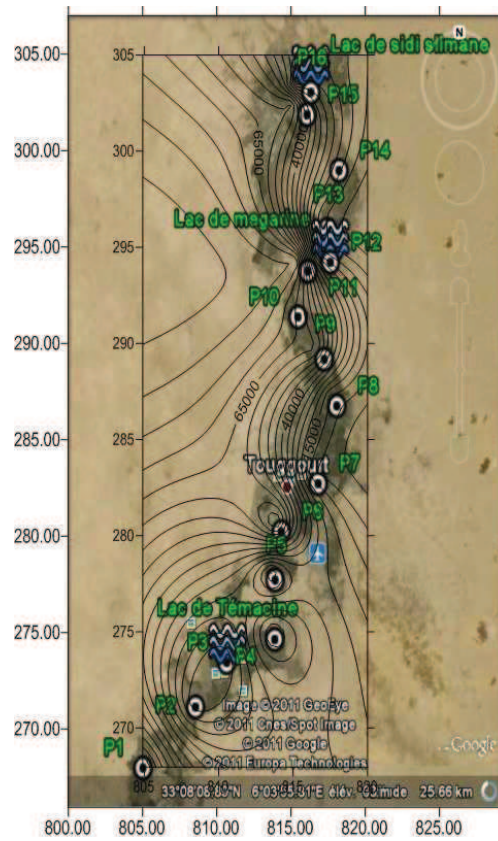


Fig.46.b Carte des sulfates, juin (mg/l).

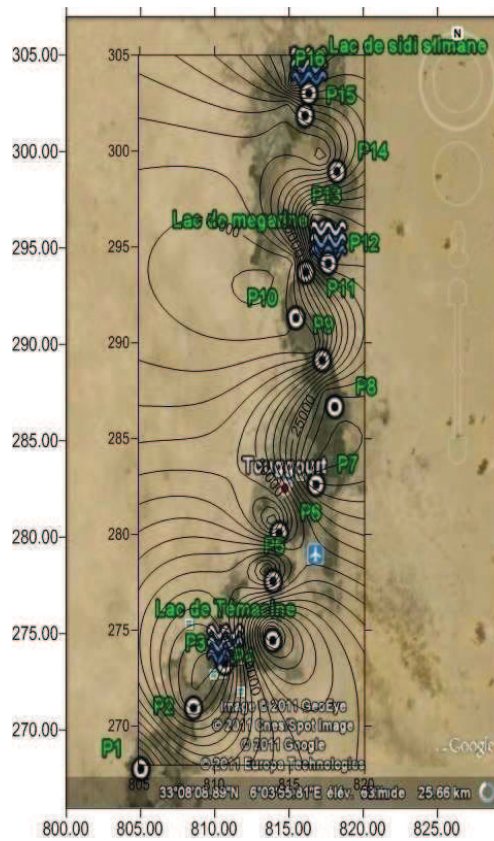
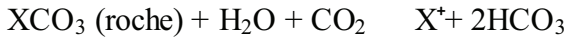


Fig.46.c: Carte des sulfates, septembre (mg/l).

V.2.1.2.3.7 Les bicarbonates HCO_3^-

Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées, ainsi leur concentration dans l'eau est fonction de la nature des terrains traversés ; la température de l'eau ; et la pression du CO_2 dissout, selon l'équation générale suivante :



Les concentrations oscillent entre 149.45 et 1165 mg/l. au sud de la région, les concentrations sont relativement faibles, car les eaux souterraines sont au début de leur cheminement dans la nappe. On note que dans quelques points, les concentrations sont relativement importantes durant la période de mars, ce qui est dû à la dissolution des calcaires en bicarbonates par les eaux d'irrigation. Quelques puits possèdent des concentrations remarquables, malgré qu'ils se situent au centre de la vallée, ceci est probablement dû à l'influence des calcaires.

On signale que les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période de mars par rapport à celle de la période de juin et de septembre.

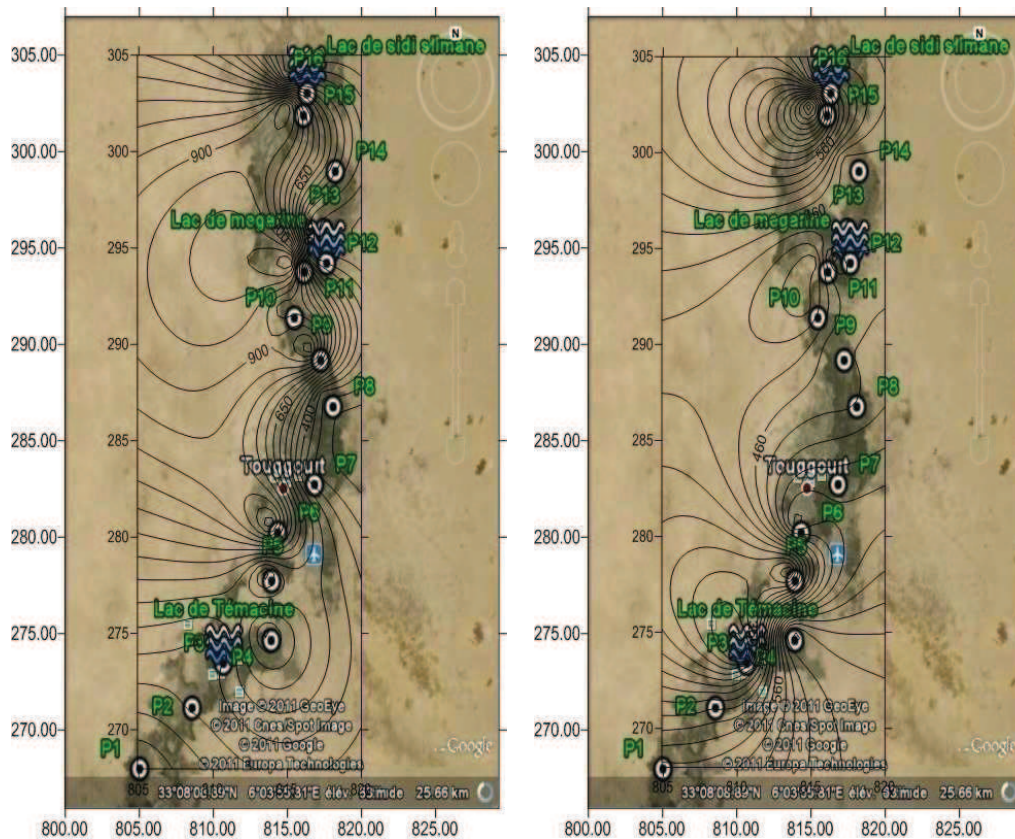


Fig.47.a Carte des bicarbonates, mars (mg/l).

Fig.47.b Carte des bicarbonates, juin (mg/l).

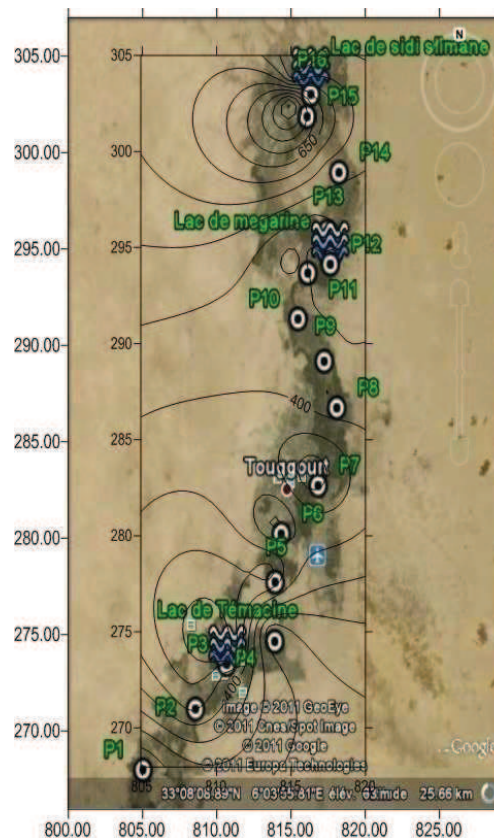


Fig.47.c Carte des bicarbonates,
Septembre (mg/l).

V.2.2 ETUDES DES VALEURS RELATIVES

V.2.2.1 Rapports caractéristiques :

L'étude des variations de ces rapports permet de :

- ✓ Voir l'évolution chimique des eaux pendant leur trajet souterrain ainsi que le contact avec le milieu géologique ;
- ✓ Donner des indications sur la zone d'alimentation et la circulation des eaux souterraines.

Les principaux rapports étudiés sont : rCa^{2+}/rMg^{2+} ; rSO_4^{2-}/rCl ; $r(Na^++K^+)/rCl$.

Tous les résultats des calculs sont mentionnés dans les tableaux (10.a, 10.b et 10.c) en annexes.

V.2.2.1.1 Rapports rCa^{2+}/rMg^{2+} (tab.10)

- durant la période de mars tous les points d'eau, soit 100%, où $rCa^{2+}/rMg^{2+} < 1$, montrent la prédominance du Mg^{2+} sauf le point d'eau (P10) montrent la prédominance du Ca^{2+} .

- durant la période de juin tous les points d'eau, soit 100%, où $rCa^{2+}/rMg^{2+} < 1$, montrent la prédominance du Mg^{2+} . cela est lié au lessivage des argiles et la présence des formations dolomitiques.

- durant la période de septembre tous les points d'eau, soit 100%, où $rCa^{2+}/rMg^{2+} < 1$, montrent la prédominance du Mg^{2+} .

V.2.2.1.2 Rapports rSO_4^{2-}/rCl (tab.10)

- durant la période de mars on a :

04 points d'eau soit 25% où $rSO_4^{2-}/rCl > 1$. cela implique la prédominance des Sulfates. Cela est lié au lessivage des terrains gypsifères et marno-argilux.

12 points d'eau 75% où $rSO_4^{2-}/rCl < 1$. le Cl prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

- durant la période de juin tous les points d'eau, soit 100%, où $rSO_4^{2-}/rCl < 1$. Cl prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

- durant la période de septembre tous les points d'eau, soit 100%, où $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl} < 1$. Cl⁻ prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

Les résultats du calcul montrent la prédominance des Chlorures dans la majorité de la zone d'étude durant les deux dernières périodes, par contre, la zone montre la prédominance de Sulfates avec des valeurs de 1.05 ; 5.26 ; 1.09 et 1.23 pour les points d'eau P1 ; P3 ; P10 et P12 respectivement pour la période de mars.

V.2.2.1.3 Rapports $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl}$ (tab.10)

- durant la période de Mars on a :

9 points d'eau soit 56.25% où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} > 1$. Le sodium prédomine les Chlorures et son concerne les formations salifères (NaCl).

Les autres points d'eau où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} < 1$. traduit prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels

- durant la période de Juin on a :

08 points d'eau soit 50% où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} > 1$. Le sodium prédomine les Chlorures et son concerne les formations salifères (NaCl).

Les autres points d'eau où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} < 1$. Traduit prédominance des chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels.

- durant la période de Septembre on a :

09 points d'eau soit 56,25% où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} > 1$. Le sodium prédomine les Chlorures et son concerne les formations salifères (NaCl).

Les autres points d'eau où $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/r\text{Cl} < 1$. Traduit prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels.

V.2.2.2 Indice d'échange de base (i e b)

Au cours de leur trajet souterrain, les eaux entrent en contact avec différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenues dans les eaux.

Shoeller (1940) appelle l'indice d'échange de base, le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants.

il est exprimé par la formule suivante :

$$i e b = \frac{r\text{Cl}^- - r(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{r\text{Cl}^-} \quad (14)$$

Si $i e b > 0 \Rightarrow$ les eaux échangent des ions de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ contre les ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain encaissant, c'est le cas de 07 points d'eau pour la campagne de mars, 08 points d'eau pour la campagne de juin et 07 points d'eau pour la campagne de septembre.

$i e b = 0 \Rightarrow$ il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et l'encaissant.

$i e b < 0 \Rightarrow$ l'encaissant libère les ions de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et fixe les ions de Ca^{2+} , Mg^{2+} de l'eau, c'est le cas de 09 points d'eau pour la campagne de mars, 08 points d'eau pour la campagne de juin et 09 points d'eau pour la campagne de septembre.

Les résultats sont mentionnés dans les tableaux (10.a, 10.b et 10.c) en annexes.

V.2.3 CLASSIFICATION DES EAUX

V.2.3 1 Classification de Stabler

Dans cette classification, les concentrations exprimées en mg/l sont réduites en quantité en réaction pour cent (r%), par rapport à la concentration (T).

La formule ionique étant obtenue en classant de gauche à droite et pour ordre décroissant, les quantités en réaction pour cent des ions ensuite celle des cations, en se basant sur la prédominance de tel ou tel ion.

Les principaux faciès hydrodynamique déterminés dans les eaux de la nappe phréatique de la région d'étude sont présentés dans les tableaux (10.a, 10.b et 10.c) en annexes.

Tab.16 Faciès chimiques des eaux superficielles de la région d'étude :

Campagne	Faciès chimiques			
	Chloruré sodique (%)	Sulfaté sodique (%)	Sulfaté calcique (%)	Chloruré magnésien (%)
Mars 2010	68.75	18.75	6.25	6.25
Juin 2010	87.50	12.50	0.00	0.00
Septembre 2010	87.50	6.25	0.00	6.25

V.2.3 .2 Représentation graphique des faciès hydrochimiques

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation hydrochimique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et à celui de Scholler-Berkaloff. La réalisation de ces diagrammes à été faite en utilisant le logiciel **Diagrammes**, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004).

V.2.3.2.1 Diagramme de PIPER

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

L'interprétation des résultats d'analyses hydrochimiques pour toutes les périodes d'observation a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique de la région de l'Oued Righ, et leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles à l'origine de ces faciès.

V.2.3.2.1 Période de mars (fig.48.a)

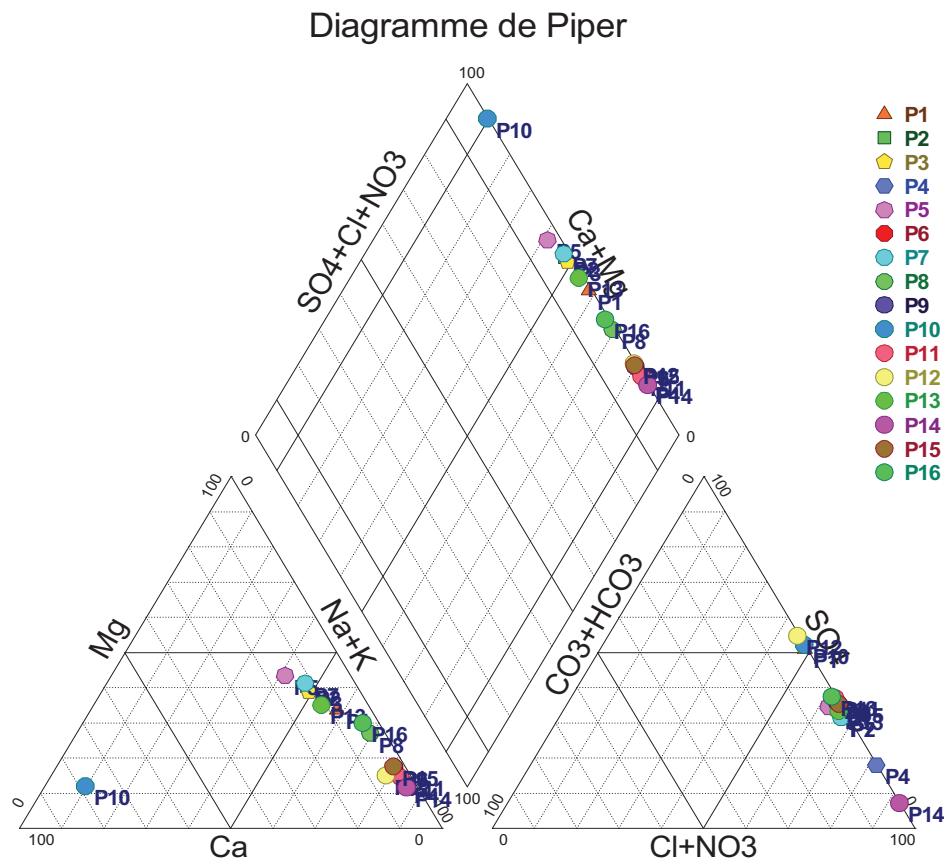


Fig.48.a Diagramme de Piper, campagne de mars.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :

- Le faciès chloruré sodique, il est présenté par (12 points d'eau),
- Le faciès chloruré magnésien, il est présenté par (01 point d'eau),
- Le sulfaté sodique, il est présenté par (02 points d'eau),
- Le sulfaté calcique et il est présenté par (01 point d'eau),
- Les cations ont une tendance vers le pôle sodique sauf les points d'eau P10 ; P5 ; P3 et P7 ;
- Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré sauf les points d'eau P12 et P10.

V.2.3.2.1.2 Période de juin (fig.48.b)

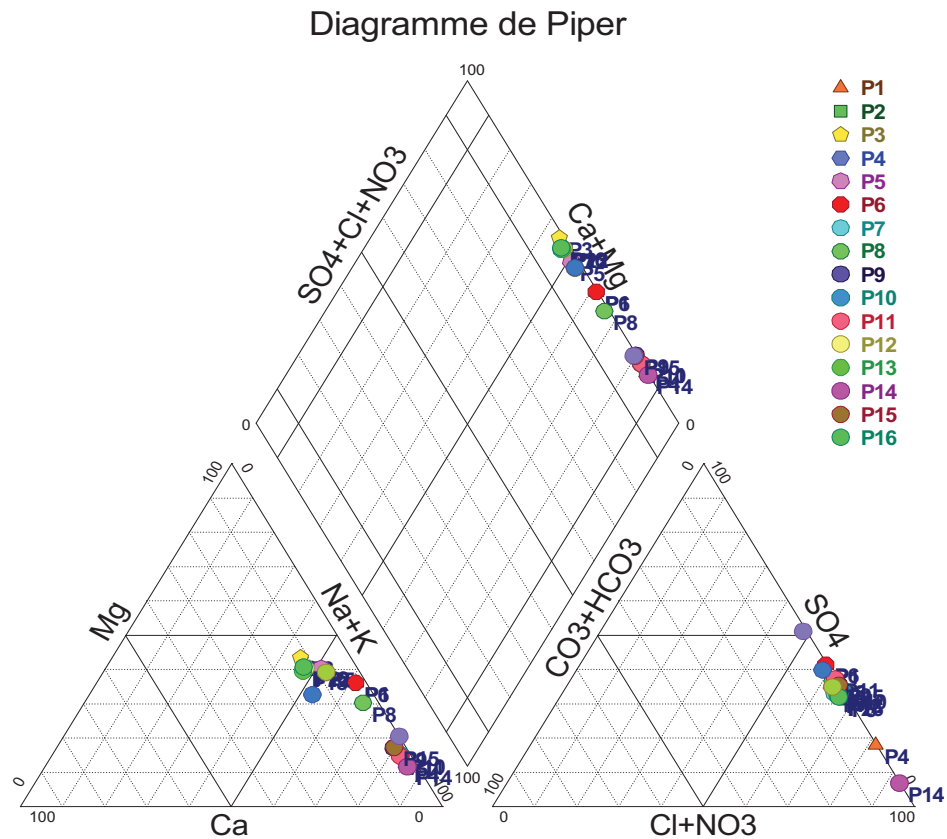


Fig.48.b Diagramme de Piper, campagne de juin.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :

- Le faciès chloruré sodique, il est présenté par (14 points d'eau),
- Le sulfaté sodique, il est présenté par (02 points d'eau),
- Les cations ont une tendance vers le pôle sodique sauf les points d'eau P3, P12, P13 et P16 ;
- Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré.

V.2.3.2.1.3 Période de septembre (fig.48.c)

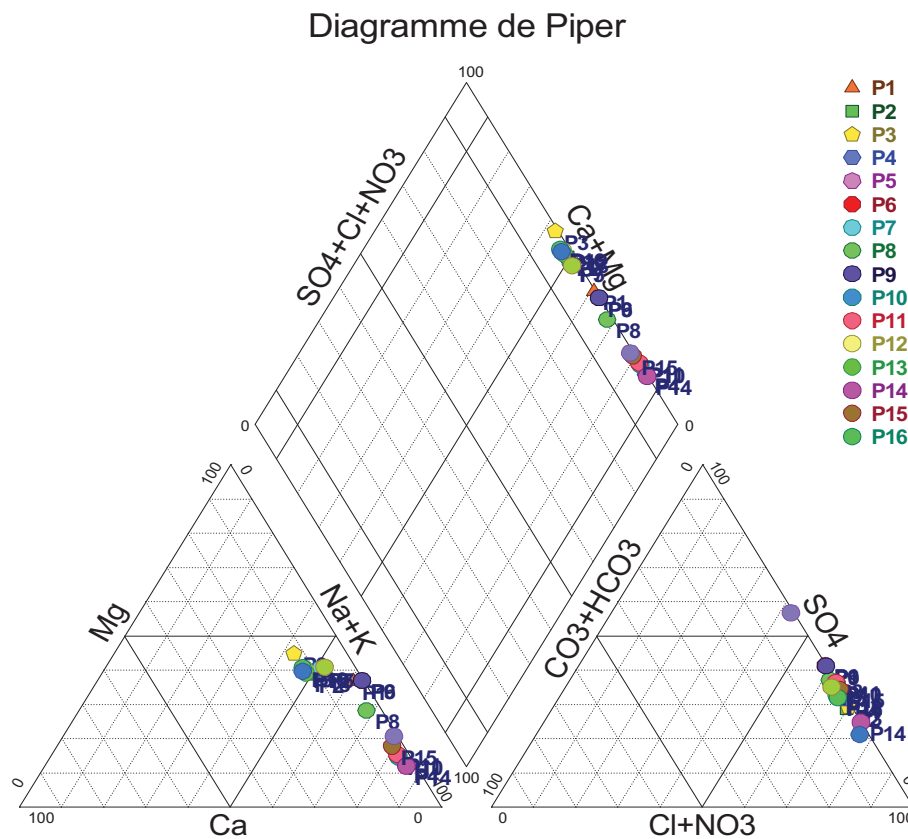


Fig.48.c Diagramme de Piper, campagne de septembre.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :

Le faciès chloruré sodique, il est présenté par (14points d'eau);

Le faciès chloruré magnésien, il est présenté par (01points d'eau);

Le sulfaté sodique, il est présenté par (01point d'eau);

Les cations ont une tendance vers le pôle sodique sauf les points d'eau P3 ; P12 et P13.

Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré.

V.2.3.2.2 Diagramme de SHOELLER-BERKALOFF

Le diagramme de Shoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

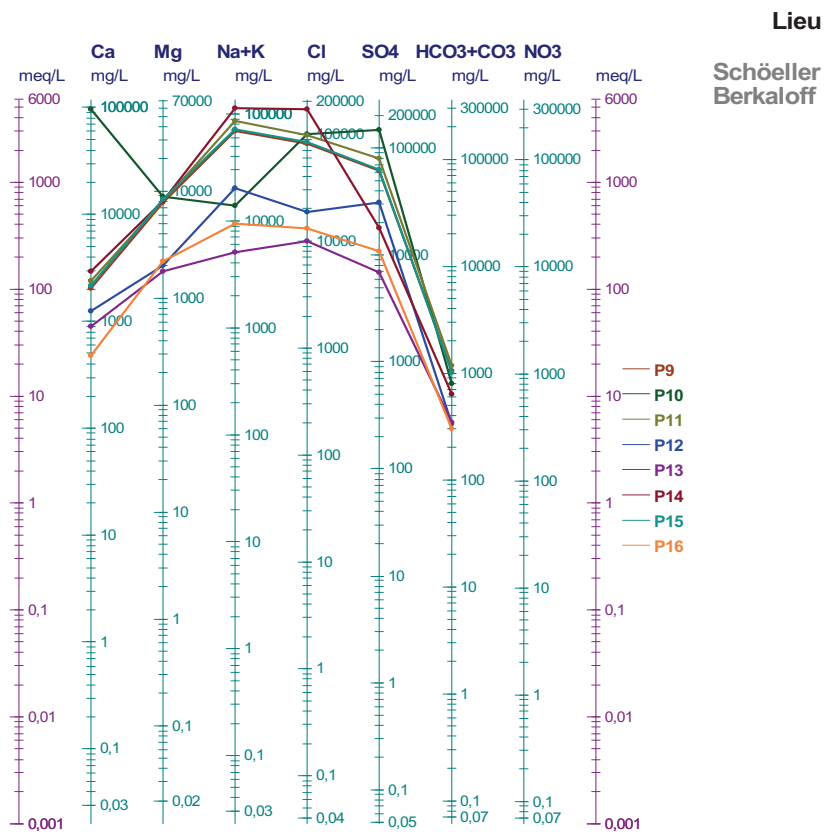
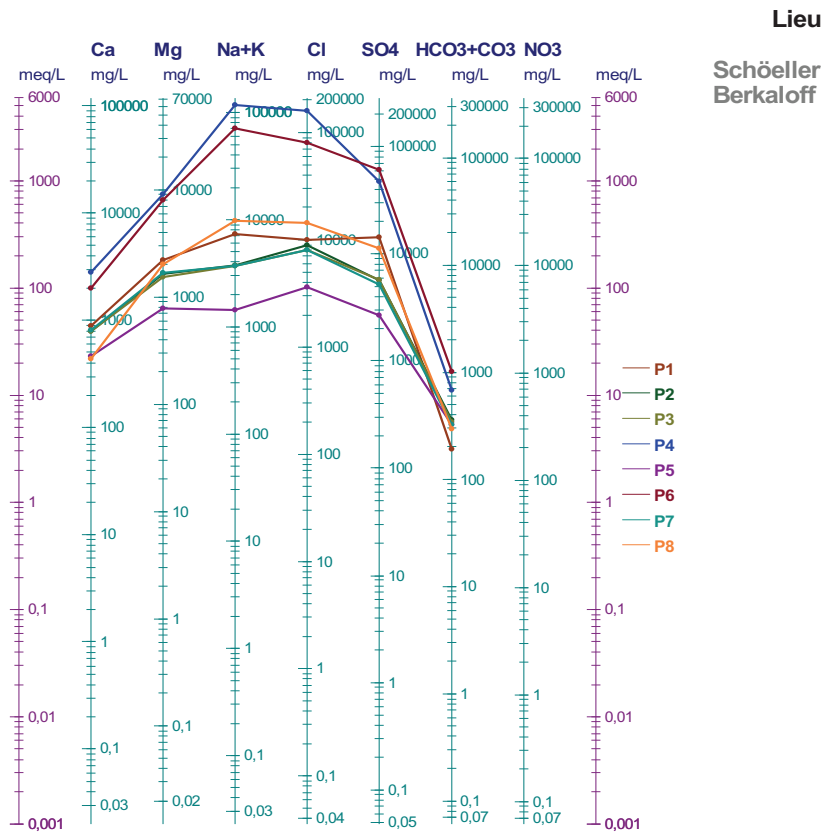


Fig.49.a Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de mars.

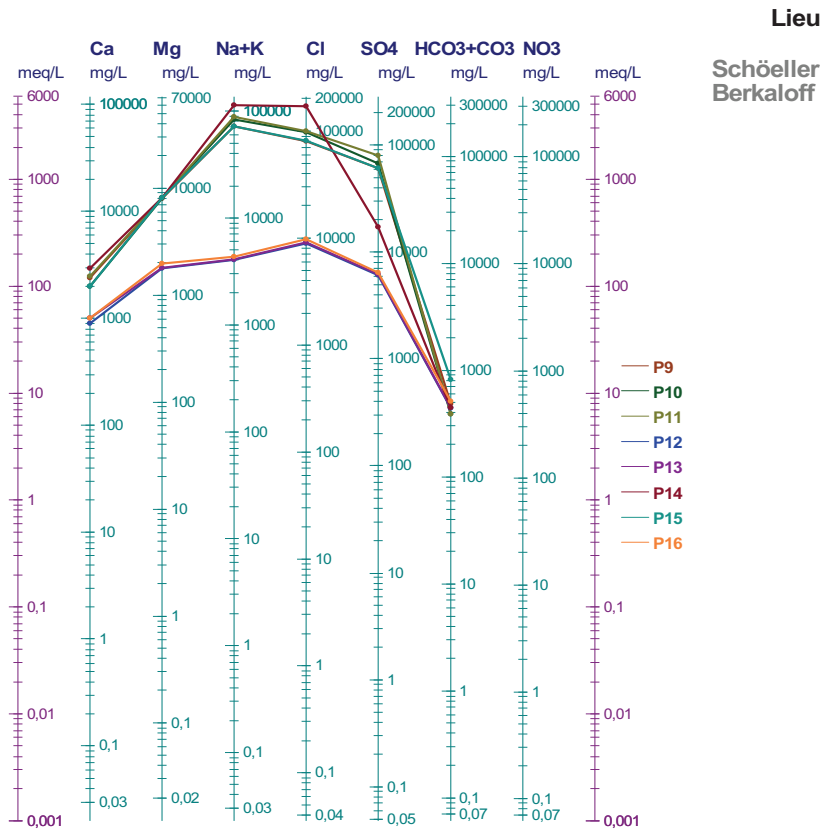
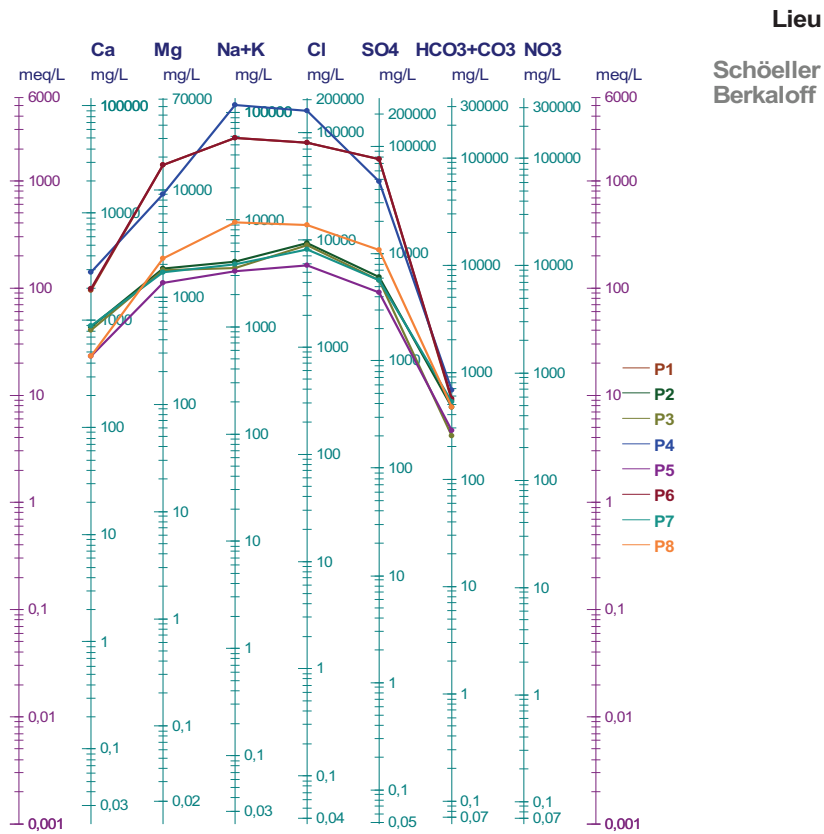


Fig.49.b Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de juin.

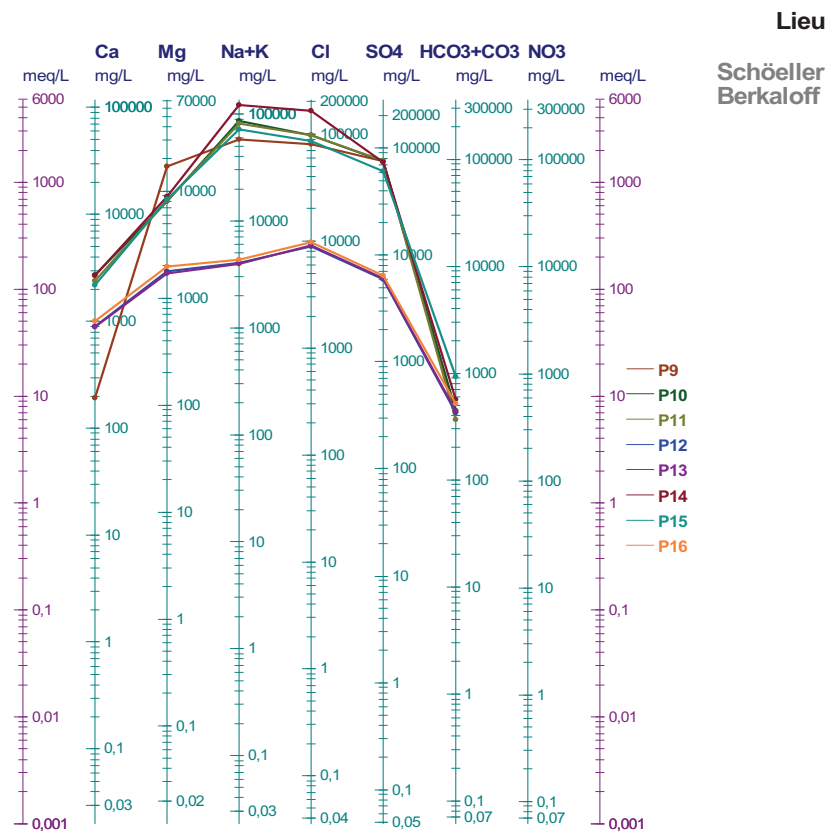
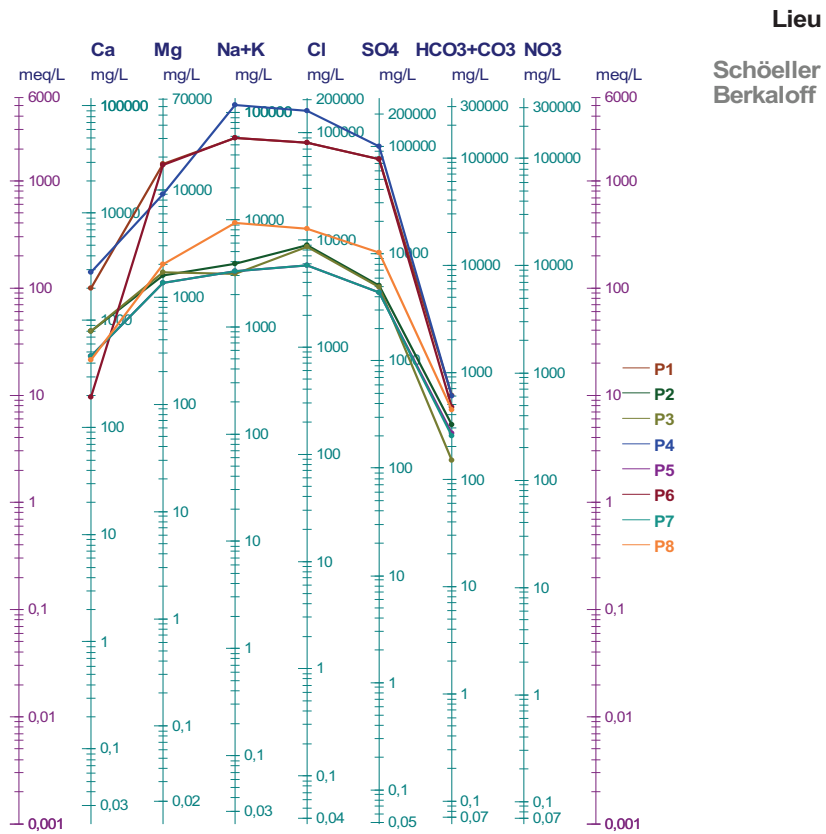


Fig.49.c Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de septembre.

V.2.3.2.2.1 Période de mars (fig.49.a)

L'examen de la figure 49.a montre que les eaux souterraines ont acquis plusieurs faciès chimiques. On rencontre le chloruré magnésien, le chloruré sodique, le sulfaté sodique et le sulfaté calcique.

A l'amont de la nappe, le faciès sulfaté calcique est très remarquable et disparaît en aval. La minéralisation des eaux souterraines est accentuée au niveau des points d'eaux qui se localisent au centre et à l'aval de la nappe.

On signale que la teneur en bicarbonates est faible par rapport à celle des autres anions, ce qui explique l'absence du faciès bicarbonaté.

V.2.3.2.2.2 Période de juin (fig.49.b)

La plupart des points d'eaux ont acquis le faciès chloruré sodique, à l'exception des trois points d'eaux (P4, P10, P15) possèdent le faciès sulfaté sodique. Les profondeurs de la surface piézométrique sont faibles, ce qui intensifie l'effet de l'évaporation. De plus, la vitesse d'écoulement est faible, ce qui favorise l'interaction entre les eaux souterraines et les couches aquifères. Cette situation a engendré de fortes concentrations, plus importantes que celles rencontrées à l'amont de la nappe.

Un certain parallélisme entre les lignes représentant la majorité des éléments majeurs a été observé, ce qui s'explique par une même évolution du chimisme

V.2.3.2.2.3 Période de septembre (fig.49.c)

Les fortes concentrations de Cl^- et Na^{2+} ont donné un faciès dominant qui est le chloruré sodique, suivi des faciès sulfaté sodique et chloruré magnésien. Les concentrations sont relativement fortes par rapport aux campagnes précédentes.

Au centre et au Nord de la nappe, les teneurs deviennent plus importantes.

V.2.4 POTABILITÉ DES EAUX (NORME ET QUALITÉ)

Les eaux destinées à la consommation humaine doivent être dépourvues de tout agent polluant et d'impureté.

Les eaux souterraines présentent toujours une certaine concentration des déférents éléments chimiques élevée. Ces concentrations ne doivent pas dépasser un certain seuil défini par les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) et les services de la santé publique.

Les valeurs d'analyses physico-chimiques des échantillons pour les périodes d'observation montrent que tous les points d'eau dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux.

La classification des eaux de la zone d'étude selon leur potabilité a été mentionnée dans le tableau (14).

V.2.5 APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION**V.2.5.1 Introduction**

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitué l'un des facteurs déterminants, dans la production agricole, aussi bien l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation; alors que dans les zones arides où cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines. Le développement agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué. L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, on a recensé deux séries d'effets de la salinité (M.De FORGES, 1972) : Les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol. En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part et

d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotique de ces dernières.

Comme la région de l'Oued Righ est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en chlorures et en sulfates. Les risques qu'encourt cette oasis imposent une bonne connaissance des régimes hydriques et salins afin de pouvoir assurer une durabilité d'utilisation des ressources en eau et des sols.

Dans la présente approche, on a fait l'estimation des quelques paramètres de salinité en rapport avec l'usage agricole pour les trois compagnes saisonnières.

V.2.5.2 Caractérisation des eaux à l'irrigation

La salinisation peut entraîner, comme on l'a signalé précédemment des effets nocifs sur la qualité des eaux pour l'irrigation, et ce en raison de la fixation du sodium et des chlorures par les colloïdes du sol. La présence du sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation et le sol :

- Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes ;
- Une toxicité de certains ions purs les végétaux (Ca^{2+} et Na^+ , etc.) ;
- Une dégradation du sol (modification de l'état structural, diminution de la perméabilité, etc.).

Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent plus fréquemment les cations Ca^{2+} (échange de base) dans le complexe absorbant.

Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR), pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (15)$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

Les résultats des calculs sont représentés tableaux (10.a 10.b et 10.c) en annexes.

V.2.5.2.1. Classification des eaux par la méthode de Richards

Cette classification a été proposée par **Richards**, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation.

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

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol (Couture, 2004).

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes compagnes sur le diagramme de Richards (voir fig.50 a, fig.50b et fig.50 c), selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, on a pu dégager la présence des classes suivantes.

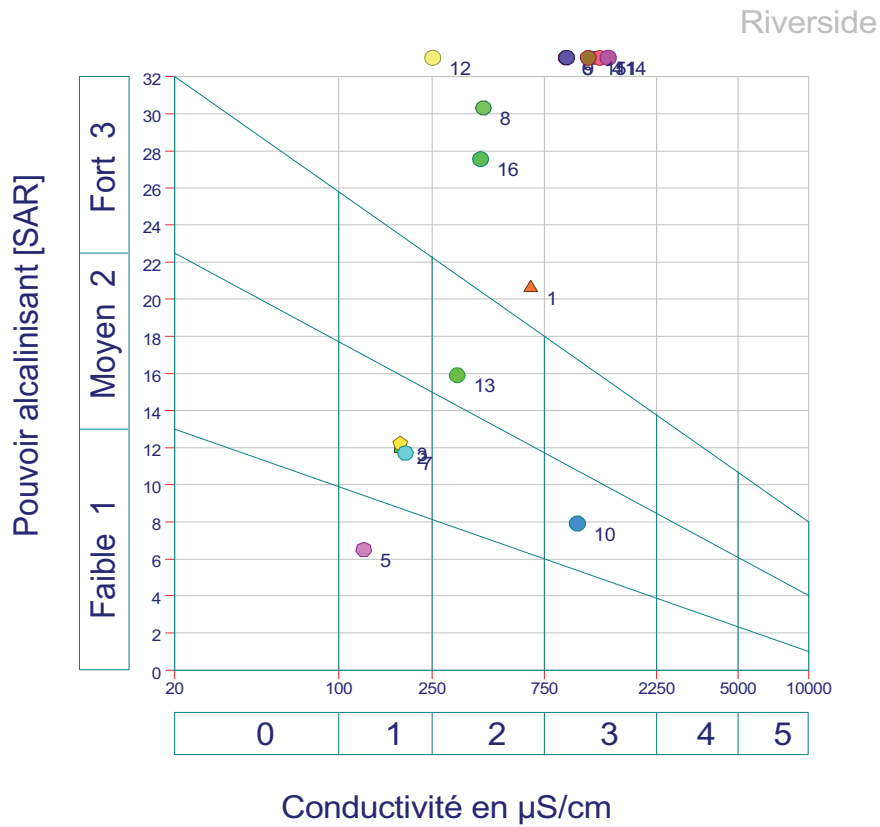


Fig.50.a Diagramme de Richards, campagne de mars

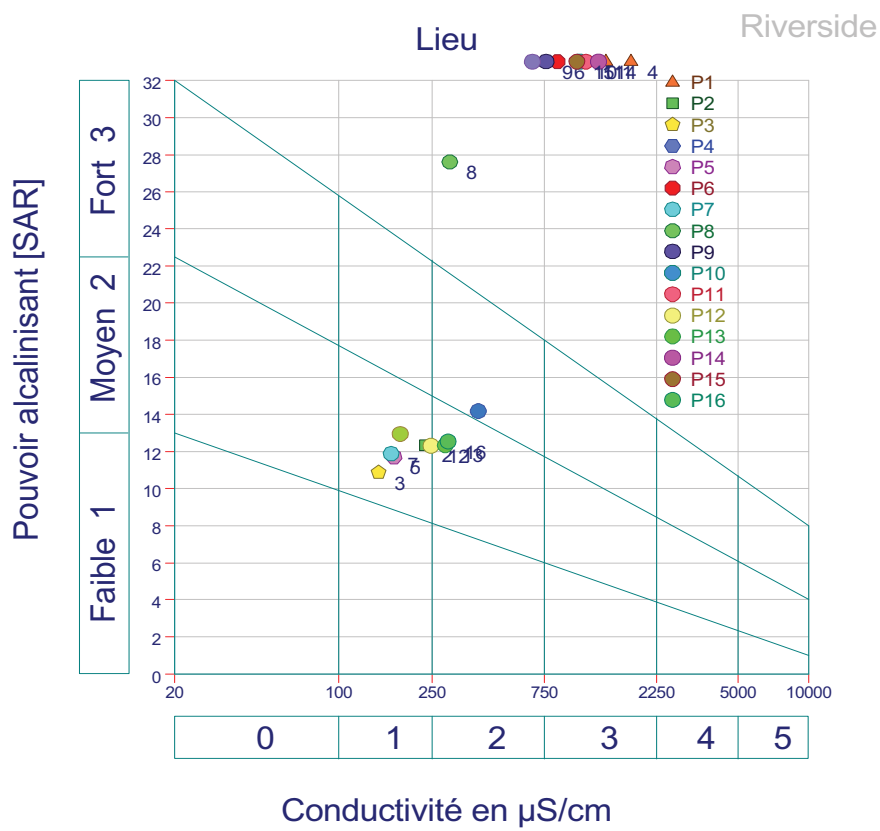


Fig.50.b Diagramme de Richards, campagne de juin

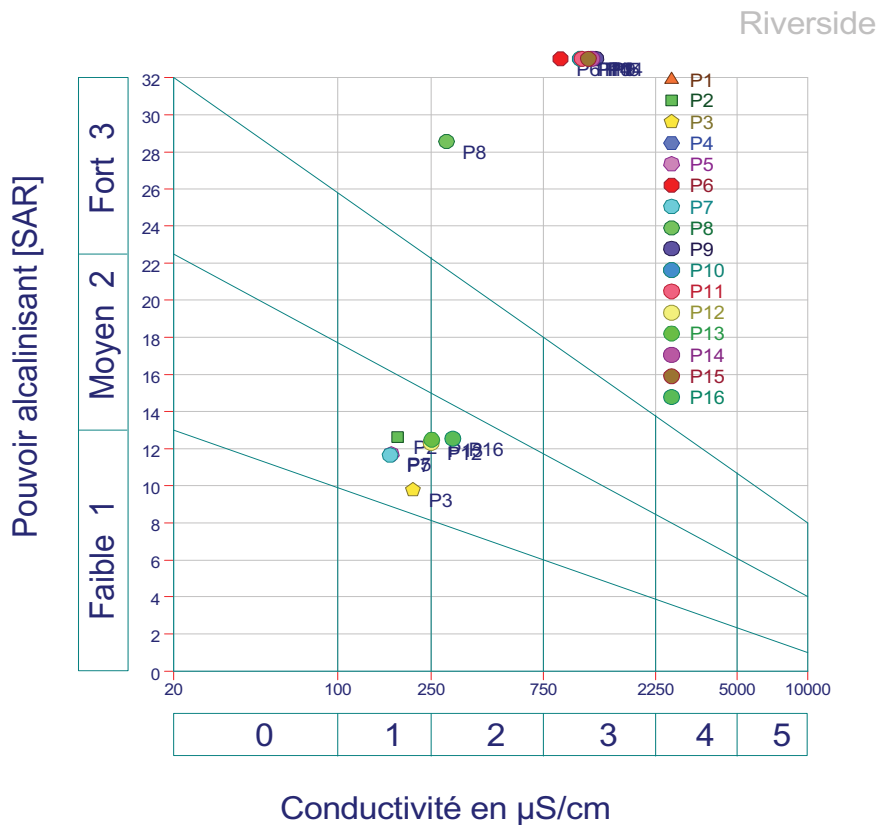


Fig.50.c Diagramme de Richards, campagne de septembre

- C1S1** :- eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées et des sols.
- C1S2** :- eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées ;
- le sol doit être bien drainé et lessivé.
- C1S3** :- le sol doit être bien préparé, bien drainé et lessivé ;
- ajout de matières organiques ;
- la teneur relative en Na peut être améliorée par l'adjonction de Gypse.
- C1S4** :- eau difficilement utilisable dans les sols peu perméables ;
- le sol doit être bien préparé, très bien drainé et lessivé ;
- ajout de matières organiques ;
- la teneur relative en Na peut être améliorée par l'adjonction de Gypse.
- C2S2** :- eau convenant aux plantes qui présentent une légère tolérance au sel ;
- sol grossier ou organique à bonne perméabilité.
- C2S3** :- eau convenant aux plantes qui présentent une certaine tolérance au sel ;
- sol grossier et bien préparé (bon drainage, bon lessivage addition de matières organiques).
- C2S4** :- eau ne convient généralement pas pour l'irrigation.
- C3S2** :- eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel ;
- sol grossier ou organique à bonne perméabilité, bon drainage ;
- contrôle périodique de l'évolution de la salinité ;
- C3S3** :- espèces tolérantes au sel sol très perméable et bien drainé.
- C3S4** :- eau ne convient pas à l'irrigation.

Tab.17 Évolution des classes d'irrigation selon la méthode de Richards.

Classes d'irrigation	Points d'eaux contrôlés
	Campagne de mars
C1S1	P5
C1S3	P7, P3, P2
C1S4	P13
C2S4	P1, P16, P8, P12
C3S3	P10
C3S4	P4, P6, P9, P11, P14, P15
Campagne de juin	
C1S2	P3
C1S3	P5, P2, P7, P12,
C2S3	P16, P13,
C2S4	P8
C3S4	P1, P4, P6, P9, P10, P11, P14, P15
Campagne de septembre	
C1S2	P3
C1S3	P5, P2, P13, P12,
C2S3	P16
C2S4	P8
C3S4	P1, P4, P6, P7, P9, P10, P11, P14, P15

D'après le diagramme de Richards, les eaux de la nappe phréatique de notre région d'étude présentent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute les périodes d'observation (tab.25) .ces eaux ne convenant pas à l'irrigation, elles ont une salinité exagérée, mais pouvant être utilisées sous certains conditions : certains cultures (palmiers), sol très perméable.

V.3 LES EAUX DES LACS ETUDIÉS

La constitution de l'eau des lacs change selon les saisons même quelques fois selon les jours, en fonction des conditions climatiques et de l'activité biologique. Les eaux des lacs sont plus pures vers le centre grâce à la décantation qui s'y produit, elles se trouvent moins chargées que dans les rives (KEMSSI et OUANOUGH, 1997).

Ces études chercheront à suivre l'évolution saisonnière de la qualité et tout particulièrement de la salinité des eaux lagunaires, sur l'ensemble des plans d'eau du Lac de Témacine (P17), lac de Megarine (P18) et lac de Sidi Slimane (P19). La grande variabilité hydrochimique présumée de ce milieu résulte du mélange in situ d'un apport des eaux de drainage non négligeable et des eaux de la nappe phréatique.

V.3.1 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES LACS ETUDIÉS

V.3.1.1 Paramètres physiques

V.3.1.1.1 Température (T°)

pour les eaux superficielles elle est due aux influences atmosphériques et particulièrement les changements de la température de l'air.

La température moyenne annuelle d'air est de l'ordre de 21,70°C et les températures des eaux prélevées des trois lacs étudiés varient entre 20.10 °C et 27.30 °C.

Le fait que les eaux de surface sont plus chaudes en période de juin dû à l'influence des conditions atmosphériques.

V.3.1.1.2 Potentiel Hydrogène (pH)

Le PH du milieu naturel (ne subit pas d'assainissement) est en fonction de leur source, et de la nature géologique de leur cours.

Généralement le pH du milieu naturel est supérieur à 8,5, mais quelques eaux passent par les roches granitiques, au par les forêts, sont acides (pH= 6). L'eau naturel constitue généralement un milieu tampon, n'est pas acceptable aux variations rapides du pH, ça revient équilibres entre ces ions. les eaux d'assainissement urbaines sont neutres au basique faibles,

Alors que les mesures du pH des eaux de surface, montrent que tous les points d'eau se trouvent dans la norme de potabilité. pendant la période de mars, le pH varie entre 8.21 et 7.61, en période de juin les valeurs oscillent entre 8.36 et 7.94, et en période de septembre les valeurs varient entre 8.61 et 8.14.

V.3.1.1.3 Conductivité électrique (CE)

La conductivité augmente avec la teneur en sels électrolysables dissous; elle augmente encore avec la mobilité des ions, donc avec la température.

Cette teneur augmente donc quand des terrains en contact avec l'eau sont chargés en sel, en fonction de la durée de contact, de la surface de contact et parfois, de la vitesse d'écoulement.

Pour les eaux des lacs de la région d'étude, la valeur de la conductivité varie entre 15.80 ms/m et 77.51 ms/m, elles sont importantes au Nord de la région.

Tableau.18 Variations des paramètres physico-chimiques des eaux de surface.

Éléments	Norme OMS	Période de Mars				Période de Juin				Période de Septembre			
		Max	Min	Moy	Ecart-moyenn e	Max	Min	Moy	Ecart-moyenn e	Max	Min	Moy	Ecart-moyenn e
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	250	396.5	298.9	288.73	113.19	533.75	359.9	463.60	91.65	524.6	326.35	440.22	102.36
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	250	22668	4380	10532.67	10509.85	28457	5248	14393.33	12361.51	26414.23	4977.24	13081.28	11635.82
Cl ⁻ (mg/l)	250	17993	5000	9747.67	7167.97	19745	7001	12334.67	6620.94	14583	6589.71	10488.04	4000.27
Ca ²⁺ (mg/l)	100	1133	400	661	409.53	1100	17.22	648.41	736.77	1100	194	504.67	474.92
Mg ²⁺ (mg/l)	50	1940	1292	1532.33	354.93	2736	1400	2046.67	669.02	2856.3	1366.4	2085.90	746.25
Na ⁺ (mg/l)	150	17700	3056	8023.33	8381.33	5042	1987	3503.67	1518.50	4471.4	2004.7	3229.27	1233.44
K ⁺ (mg/l)	12	430	101	233.67	173.49	1875	140	835.23	917.38	502.4	119.7	266.43	206.37
DHT (°F)	50	1091.6	640.8	804.57	249.40	7008	1199.5	3259.33	3251.74	7008	1199.5	1155.87	503.86
pH	6.5<pH<9.5	8.21	7.61	8.01	0.35	8.36	7.94	8.18	0.22	8.61	8.14	8.35	0.24
Cond (mS/m)	250	58.5	15.3	30.13	24.58	66.6	18.3	41.32	24.23	97.9	12.3	51.98	43.36

V.3.1.2 Paramètres chimiques

V.3.1.2.1 Résidu sec

On remarque que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au Nord au lac de Sidi Slimanse.

On remarque que les fortes concentrations coïncident avec les périodes de juin et de septembre, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation.

V.3.1.2.2 La dureté totale (degré hydrométrique totale) DHT

Dans l'ensemble des eaux analysées des lacs étudiés en amont de l'Oued Righ pour les trois périodes d'observations présentent un DHT > 50°f.

V.3.1.2.3 Les éléments majeurs

V.3.1.2.3.1 Le calcium Ca²⁺

Les concentrations oscillent en général entre 17.22 et 1458 mg/l. On remarque que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au nord au lac de Sidi Slimane. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 1458 mg/l sont observées au centre de la région pendant la période de juin alors que les valeurs les plus faibles avec un minimum de 17.22 mg/l sont observées au nord et concernent lac de Sidi Slimane.

On remarque que les fortes concentrations coïncident avec les périodes de juin et de septembre, ce qui nous laisse penser que l'élévation des concentrations est due au phénomène d'évaporation. L'ion de calcium est sensible au phénomène d'échange de bases

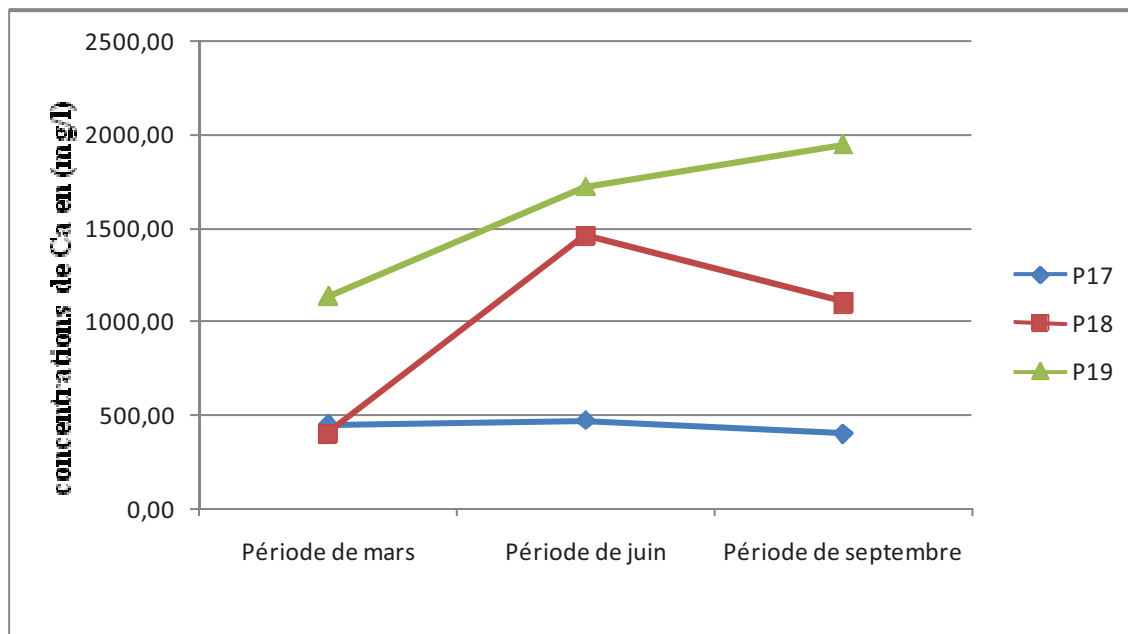


Fig.51 Variations des concentrations du calcium en (mg/l)

V.3.1.2.3.2 Le magnésium Mg^{2+}

Toutes les eaux superficielles contiennent le magnésium, qui résulte à la dissolution des roches constitutives des bassins du cours d'eau, mais leur concentration est toujours inférieure à celle du calcium, le magnésium rassemble au calcium dans leur influences sur l'environnement aquatique. la moyenne enregistrée pendant la période de mars (1532.33mg/l) est inférieure à celle des périodes de juin (2046.67mg/l) et de septembre (2085.90mg/l), ceci montre l'importance de la concentration par rapport à la dilution pour l'acquisition de cet élément. Généralement les concentrations sont relativement faibles à l'amont de la région par rapport à l'aval.

L'évolution du magnésium est très différente par rapport à celle du (Ca^{2+}), car ce dernier possède de très fortes teneurs provenant de deux origines qui sont mentionnées plus haut

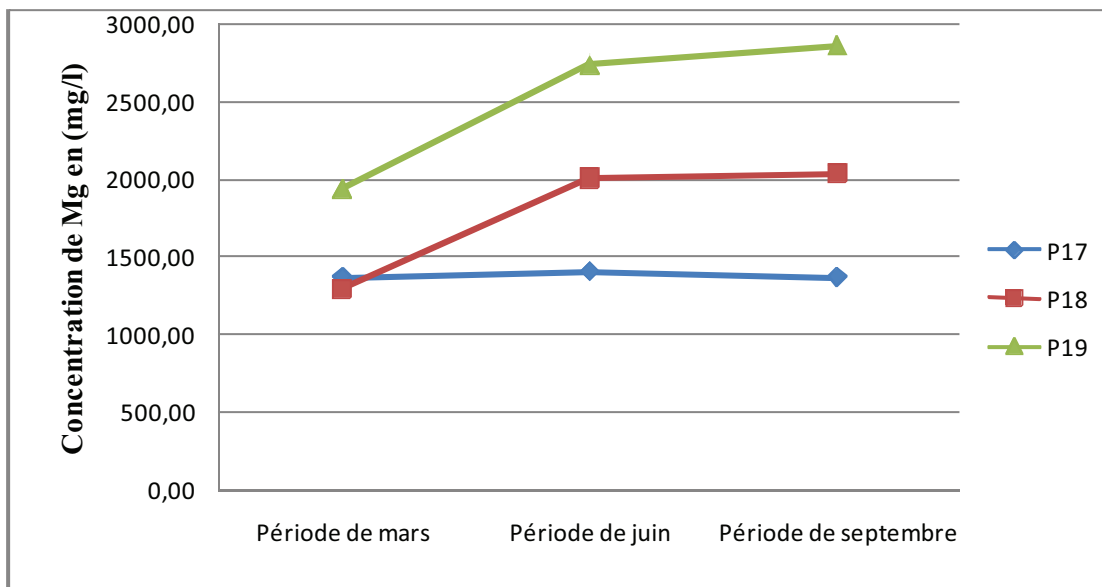


Fig.52 Variations des concentrations du calcium en (mg/l)

V.3.1.2.3.3 Le sodium (Na^+)

Le sodium constitue 2.83% du constituant de la croûte terrestre, il a un degré de dissolution élevé dans l'eau, le sodium constitue un élément principal pour la croissance végétale mais l'augmentation de son proportion dans l'eau d'irrigation conduite à la diminution de la perméabilité du sol, et l'augmentation exponentielle de son PH (ELHAYEK,1989). Les concentrations varient entre 1292 et 2856.3 mg/l. L'observation des concentrations montre que les concentrations sont importantes dans la zone Nord de la vallée pendant la période de juin et la période de septembre, ce qui traduit l'effet de l'évaporation. On signale que les faibles concentrations se localisent en amont de la région.

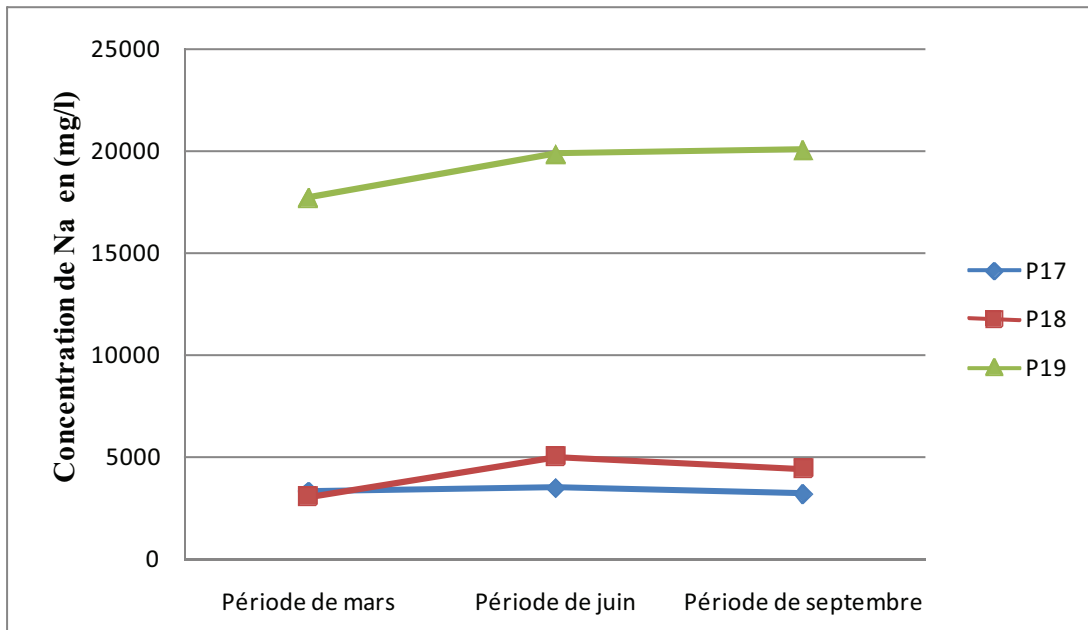


Fig.53 Variations des concentrations du sodium en (mg/l)

V.3.1.2.3.4 le potassium (K^+)

Le potassium existe dans tous les types des eaux Naturelles, parce qu'il entre dans la construction de la croûte terrestre de 2,59 %, leurs composants sont facilement dissociable dans l'eau, mais leur proportion dans les eaux superficielles est inférieures à celle du sodium ça revient au forte absorption solaire (ELHAYEK, 1989).

La présence de cet élément peut être également liée au déversement des eaux usées domestiques dans la région. Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la période de septembre avec un maximum de 502 mg/l sont observées au Nord de la région alors que les valeurs les plus faibles avec un minimum de 101 mg/l sont observées au sud et concernent lac de Temacine.

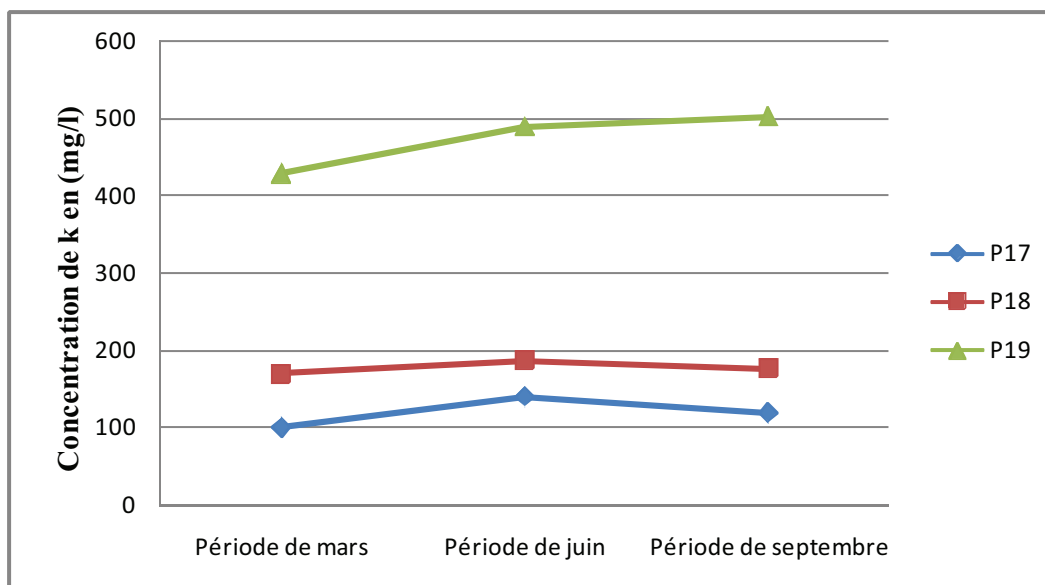


Fig.54 Variations des concentrations du potassium en (mg/l)

V.3.1.2.3.5 Les Chlorures Cl

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles mais à des proportions variables. Ils proviennent essentiellement de la dissolution des sels naturels par le lessivage des terrains salifères; des rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle.

L'observation des courbes de chlorures montre que les teneurs varient entre 5000 et 19745 mg/l. Ces dernières sont importantes au Nord de la région. Les argiles et les évaporites constituent l'origine de ces chlorures. Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant à partir de la saison froide à la saison sèche, c'est-à-dire l'effet d'évaporation. Les activités anthropiques contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures.

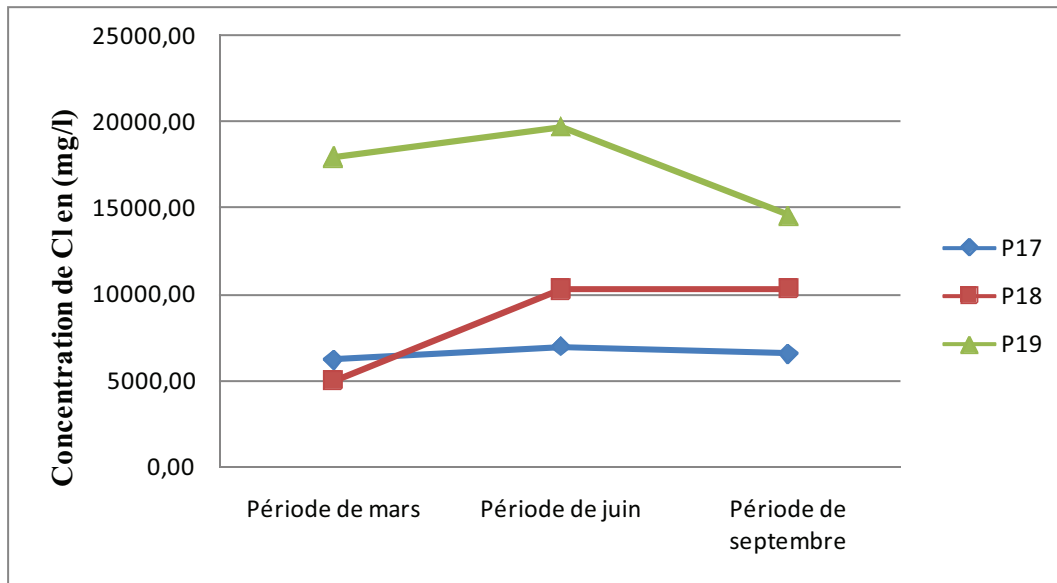


Fig.55 Variations des concentrations des Chlorures en (mg/l)

V.3.1.2.3.6 Les sulfates (SO₄²⁻)

Les ions de soufre existant dans l'eau en relation avec les ions en charge positif comme le K⁺ Ca²⁺ et Na⁺. La principale source naturelle du soufre, c'est la dégradation du gypse (Ca, SO₄, H₂O), et l'oxydation du soufre en sulfates par l'intermédiaire de l'air dans un milieu aquatique mais les sources industrielle aux sulfates sont multiples et déférentes, les concentrations, en général, oscillent entre 4380 et 28457 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées durant la période de juin, au Nord de la région, Elles sont dues au lessivage des dépôts évaporitiques. Des teneurs remarquables ont été observées pendant les périodes de juin et de septembre, sous l'effet de l'évaporation, car la surface piézométrique se trouve en contact avec l'air. Les plus faibles concentrations sont constatées en Amont de la région,

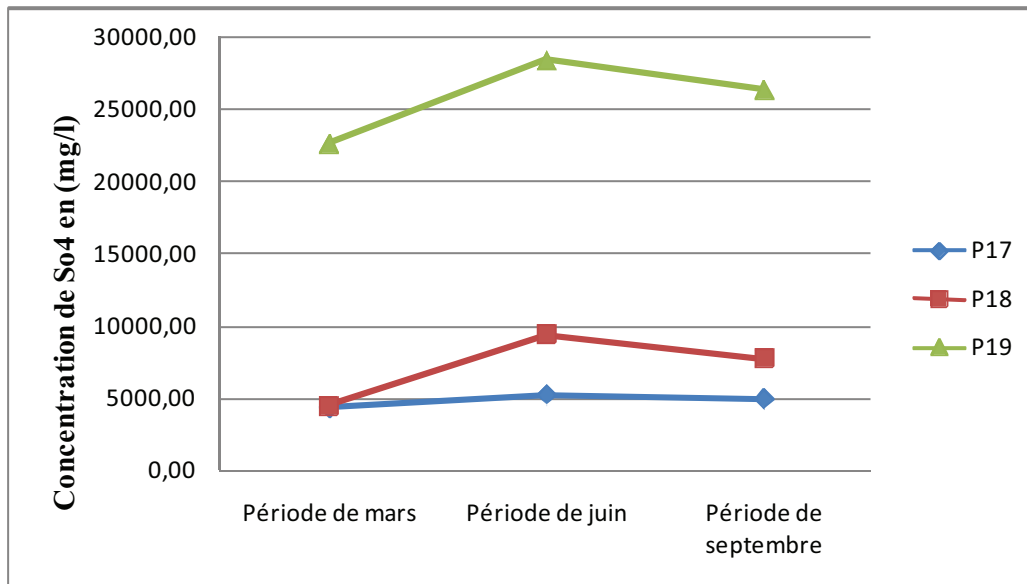


Fig.56 Variations des concentrations des sulfates en (mg/l)

V.3.1.2.3.7 Les bicarbonates HCO_3^-

Les concentrations oscillent entre 170.80 et 533.75 mg/l. au Sud de la région, les concentrations sont relativement faibles, les concentrations sont relativement importantes durant la période de juin, ce qui est dû à la dissolution des calcaires en bicarbonates par les eaux d'irrigation.

On signale que les fortes concentrations sont enregistrées pendant la période de juin par rapport à celle de la période de mars et de septembre.

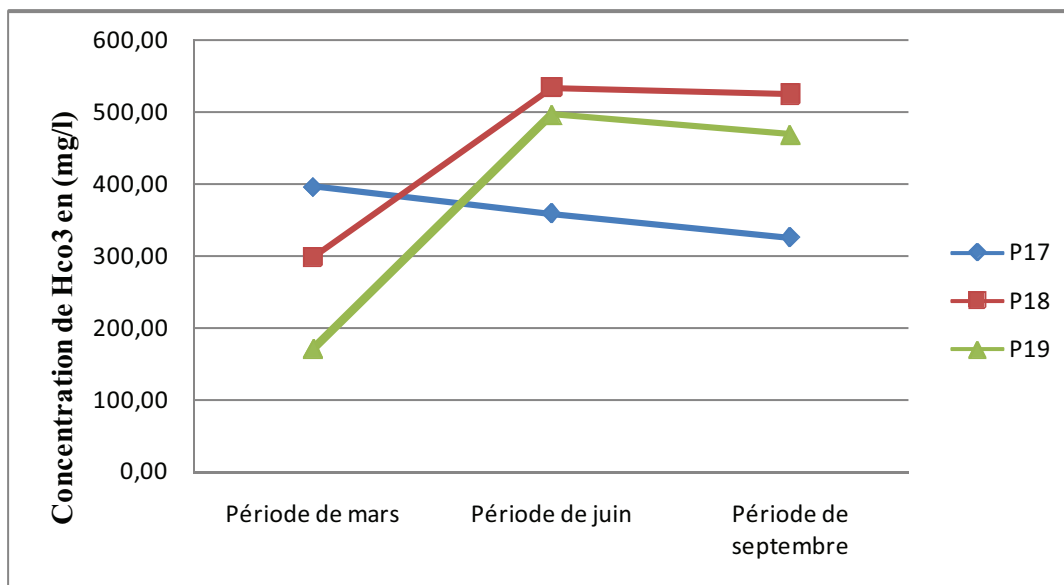


Fig.57 Variations des concentrations des Bicarbonates en (mg/l)

V.3.2 ETUDES DES VALEURS RELATIVES

V.3.2.1 Rapports caractéristiques :

Tous les résultats des calculs sont mentionnés dans les tableaux (10.a, 10.b et 10.c) en annexes.

V.3.2.1.1 Rapports rCa^{2+}/rMg^{2+} : (tab.10)

- durant toutes les périodes d'observations tous les lacs, soit 100%, où $rCa^{2+}/rMg^{2+} < 1$, montrent la prédominance du Mg^{2+} . cela est lié au lessivage des argiles et la présence des formations dolomitiques.

V.3.2.1.2 Rapports rSO_4^{2-}/rCl : (tab.10)

- durant la période de mars on a :

Tous les lacs où $rSO_4^{2-}/rCl < 1$. le Cl prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

- durant la période de juin on a :

Un seul lac (P19) où $rSO_4^{2-}/rCl > 1$. Cela implique la prédominance des Sulfates.

Les deux autres lacs où $rSO_4^{2-}/rCl < 1$. le Cl prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

- durant la période de septembre on a :

Un seul lac (P19) où $rSO_4^{2-}/rCl > 1$. Cela implique la prédominance des Sulfates.

Les deux autres lacs où $rSO_4^{2-}/rCl < 1$. le Cl prédomine. Cela est lié au lessivage des terrains salifères.

Les résultats du calcul montrent la prédominance des Chlorures dans la majorité des lacs de la zone d'étude durant les deux dernières périodes, sauf le point d'eau (P19).

V.3.2.1.3 Rapports $r(Na^+K^+)/rCl$: (tab.10)

- durant la période de Mars on a :

Un seul lac (P19) où $r(Na^+K^+)/rCl > 1$. Le sodium prédomine les Chlorures et son concerne les formations salifères (NaCl).

Les deux autres lacs où $r(Na^+K^+)/rCl < 1$. traduit prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels

- durant la période de Juin on a :

Tous les lacs où $r(Na^+K^+)/rCl < 1$. Traduit prédominance des chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels.

- durant la période de Septembre on a :

Tous les lacs où où $r(Na^+K^+)/rCl < 1$. Traduit prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels.

V.3.2.2 Indice d'échange de base (i e b)

Si $i e b > 0 \Rightarrow$ les eaux échangent des ions de Na^+K^+ contre les ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} du terrain encaissant, c'est le cas de lac de Témacine et lac de Megarine pour les trois campagnes d'observations.

$i e b = 0 \Rightarrow$ il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et l'encaissant.

$i e b < 0 \Rightarrow$ l'encaissant libère les ions de Na^+K^+ et fixe les ions de Ca^{2+} , Mg^{2+} de l'eau, c'est le cas de lac de Sidi Slimane pour les trois campagnes d'observations.

Les résultats sont mentionnés dans les tableaux (10.a, 10.b et 10.c) en annexes.

V.3.4 CLASSIFICATION DES EAUX

V.3.4.1 Classification de Stabler

Le seul faciès hydrodynamique déterminé dans les eaux des lacs de la région d'étude pour les trois périodes d'observation est **Chloruré Sodique**.

V.3.4.2 Représentation graphique des faciès hydrochimiques

V.3.4.2.1 Diagramme de PIPER

L'interprétation des résultats d'analyses hydrochimiques pour toutes les périodes d'observation a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique de la région de l'Oued Righ, et leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles à l'origine de ces faciès.

4.2.1.1 Période de mars (fig.58.a)

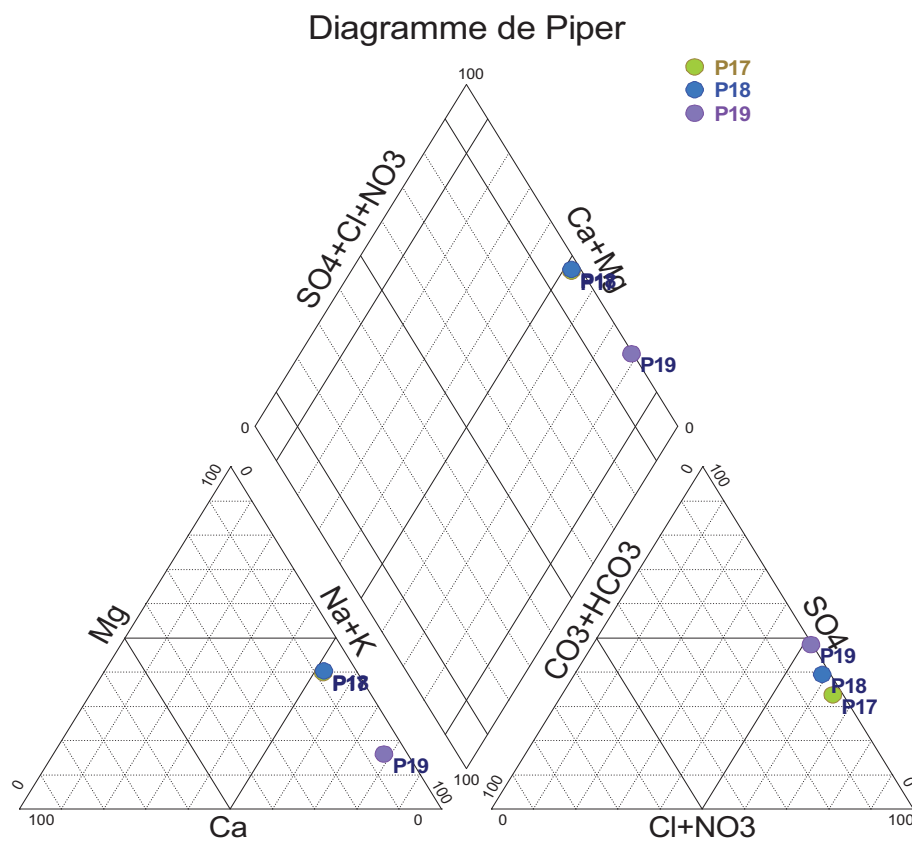


Fig.58.a Diagramme de Piper, campagne de mars.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :

Le faciès chloruré sodique, il est présenté par tous les points.

Les cations ont une tendance vers le pôle sodique.

Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré.

4.2.1.2 Période de juin (fig.58.b)

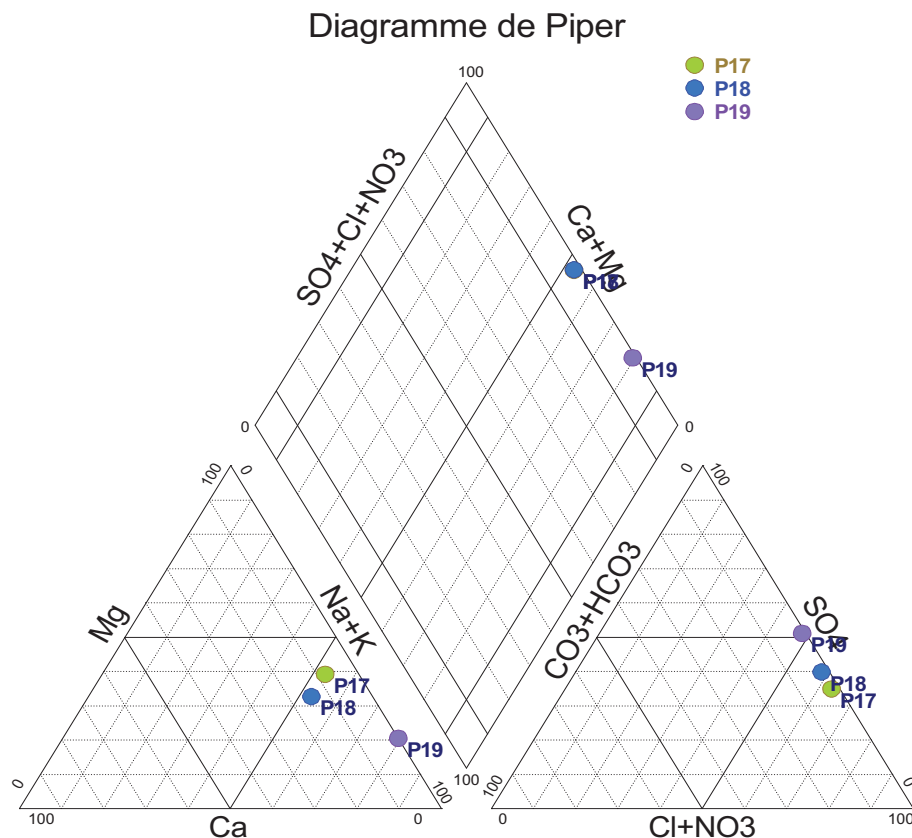


Fig.58.b Diagramme de Piper, campagne de juin.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :

Le faciès chloruré sodique, il est présenté par tous les points.

Les cations ont une tendance vers le pôle sodique.

Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré.

V.3.4 .2.1.3 Période de septembre (fig.58.c)

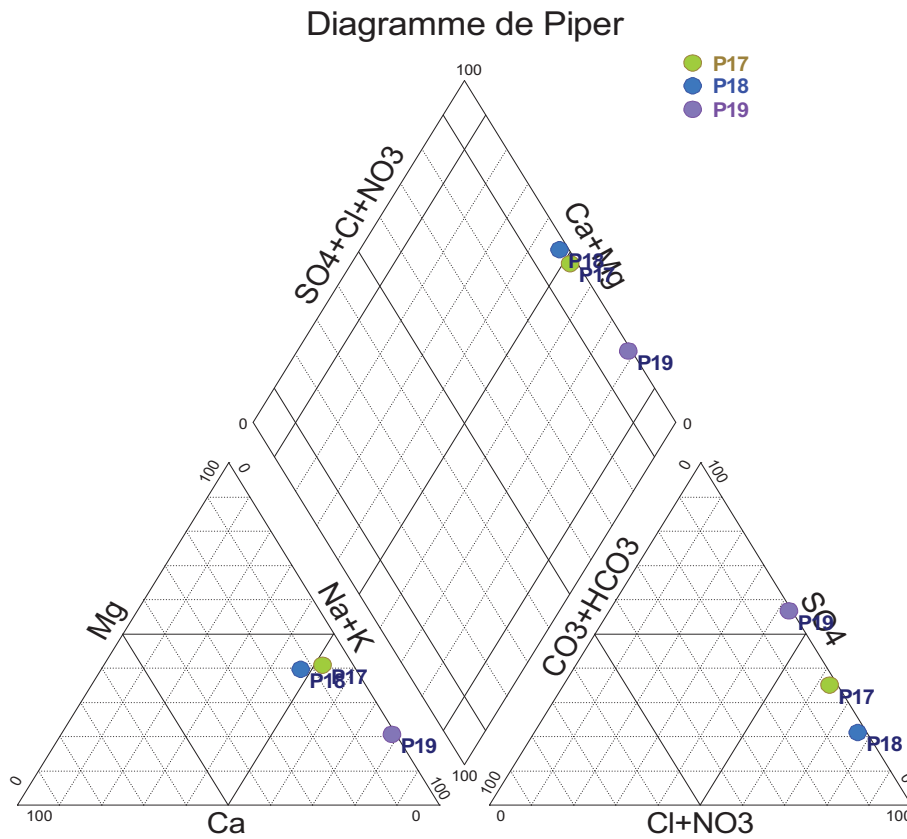


Fig.48.c Diagramme de Piper, campagne de septembre.

Les points sont représentés sur le diagramme de Piper et les faciès obtenus sont :
 Le faciès chloruré sodique, il est présenté par tous les points.
 Les cations ont une tendance vers le pôle sodique.
 Les anions ont une tendance vers le pôle chloruré.

V.3.4 .2.2 Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF

Le diagramme de Shoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d’eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Un groupe d’eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

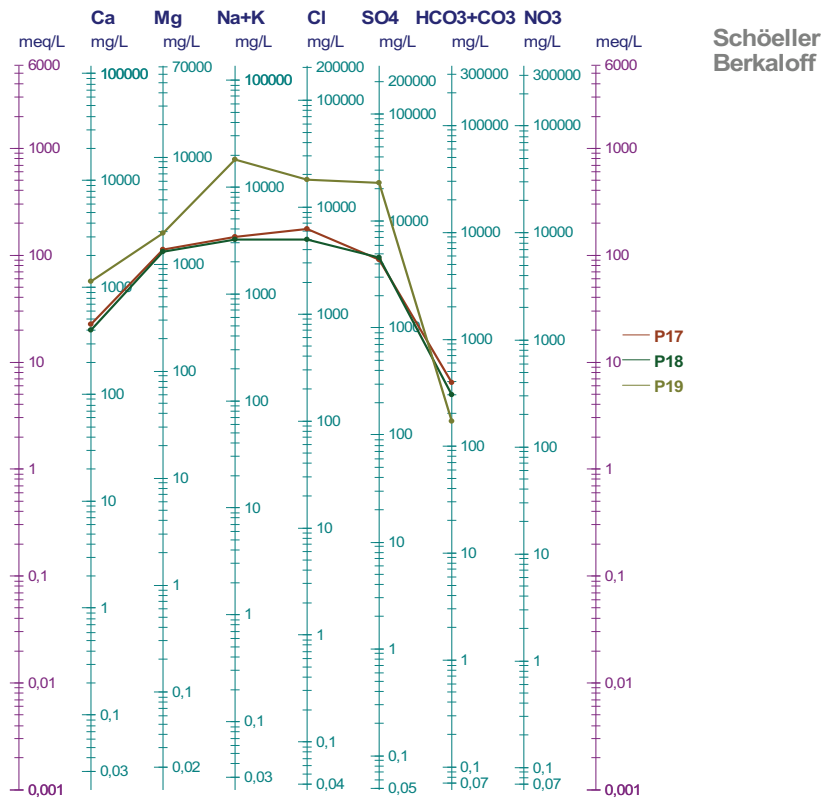


Fig.59.a Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de mars.

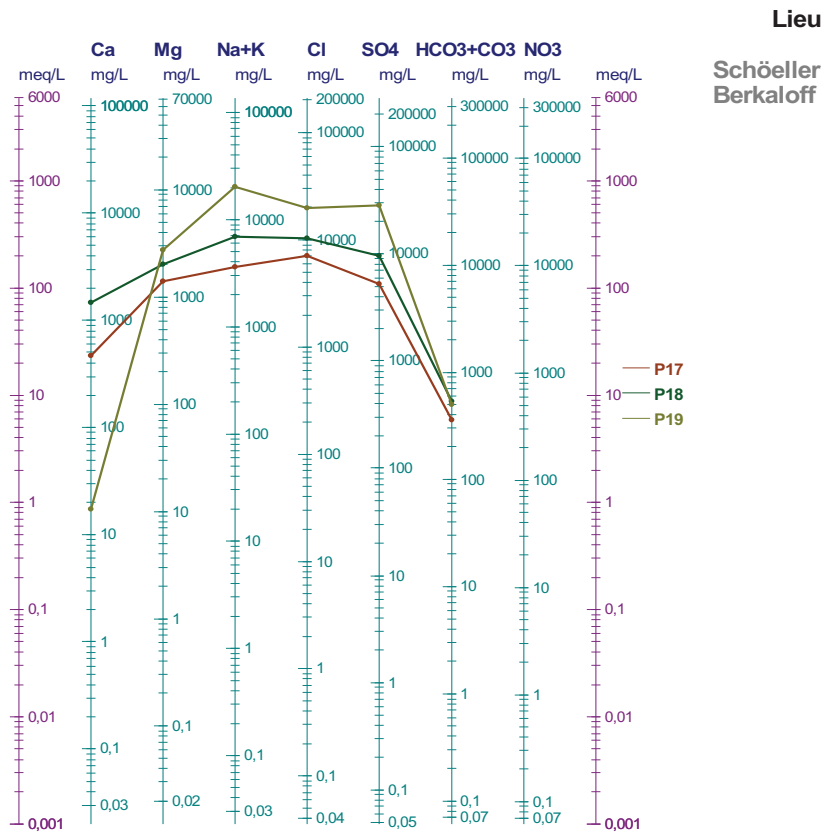


Fig.59.b Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de juin.

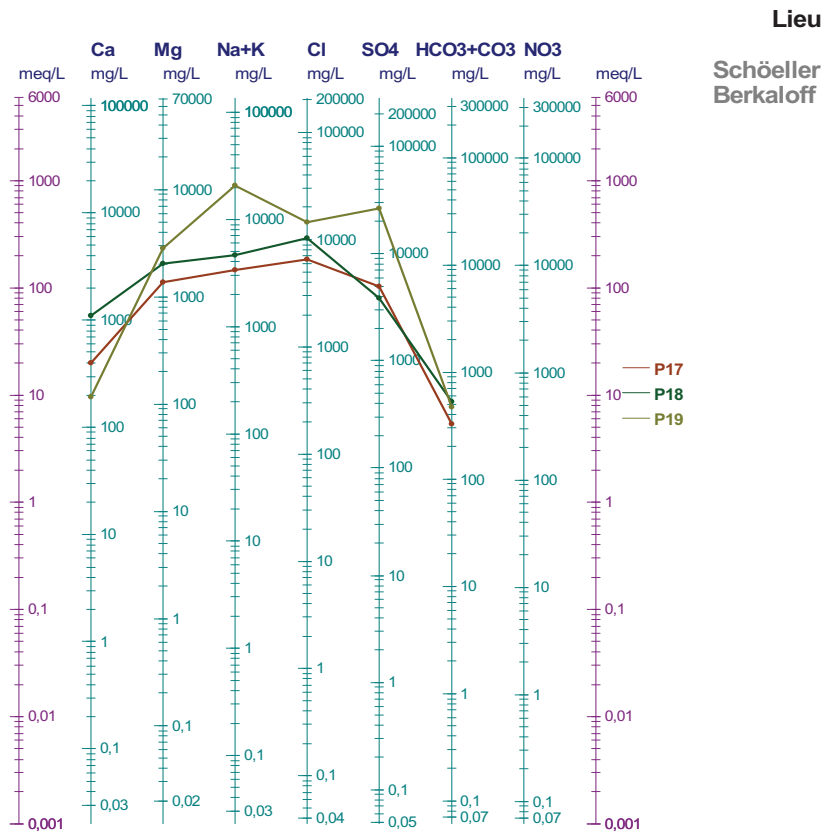


Fig.59.c Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de septembre.

V.3.4 .2.2.1 Période de mars (fig.59.a)

L'examen de la figure 59.a montre que les eaux souterraines ont acquis plusieurs faciès chimiques. On rencontre le chloruré magnésien, le chloruré sodique, le sulfaté sodique et le sulfaté calcique.

A l'amont de la nappe, le faciès sulfaté calcique est très remarquable et disparaît en aval. La minéralisation des eaux souterraines est accentuée au niveau des points d'eaux qui se localisent au centre et à l'aval de la nappe.

On signale que la teneur en bicarbonates est faible par rapport à celle des autres anions, ce qui explique l'absence du faciès bicarbonaté.

V.3.4 .2.2.2 Période de juin (fig.59.b)

La plupart des points d'eaux ont acquis le faciès chloruré sodique, à l'exception des trois points d'eaux (P4, P10, P15) possèdent le faciès sulfaté sodique. Les profondeurs de la surface piézométrique sont faibles, ce qui intensifie l'effet de l'évaporation. De plus, la vitesse d'écoulement est faible, ce qui favorise l'interaction entre les eaux souterraines et les couches aquifères. Cette situation a engendré de fortes concentrations, plus importantes que celles rencontrées à l'amont de la nappe.

Un certain parallélisme entre les lignes représentant la majorité des éléments majeurs a été observé, ce qui s'explique par une même évolution du chimisme

V.3.4.2.2.3 Période de septembre (fig.59.c)

Les fortes concentrations de Cl^- et Na^{2+} ont donné un faciès dominant qui est le chloruré sodique, suivi des faciès sulfaté sodique et chloruré magnésien. Les concentrations sont relativement fortes par rapport aux campagnes précédentes.

Au centre et au Nord de la nappe, les teneurs deviennent plus importantes. Le point d'eau P19 (lac de Sidi Slimane), qui se situe au Nord de la région d'étude, est fortement minéralisé et atteint les concentrations maximales. On pense que l'évaporation a causé l'augmentation de ces teneurs.

V.3.5 POTABILITÉ DES EAUX (NORME ET QUALITÉ)

Les eaux destinées à la consommation humaine doivent être dépourvues de tout agent polluant et d'impureté.

Les eaux superficielles présentent toujours une certaine concentration des déférents éléments chimiques élevée. Ces concentrations ne doivent pas dépasser un certain seuil défini par les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) et les services de la santé publique.

Les valeurs d'analyses physico-chimiques des échantillons pour les périodes d'observation montrent que tous les lacs dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux.

La classification des eaux de la zone d'étude selon leur potabilité a été mentionnée dans le tableau (18).

V.3.6 APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION

V.3.6.2.1. Classification des eaux par la méthode de Richards

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (voir fig.60 a, fig.60b et fig.60 c), selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, on a pu dégager la présence les classes suivantes.

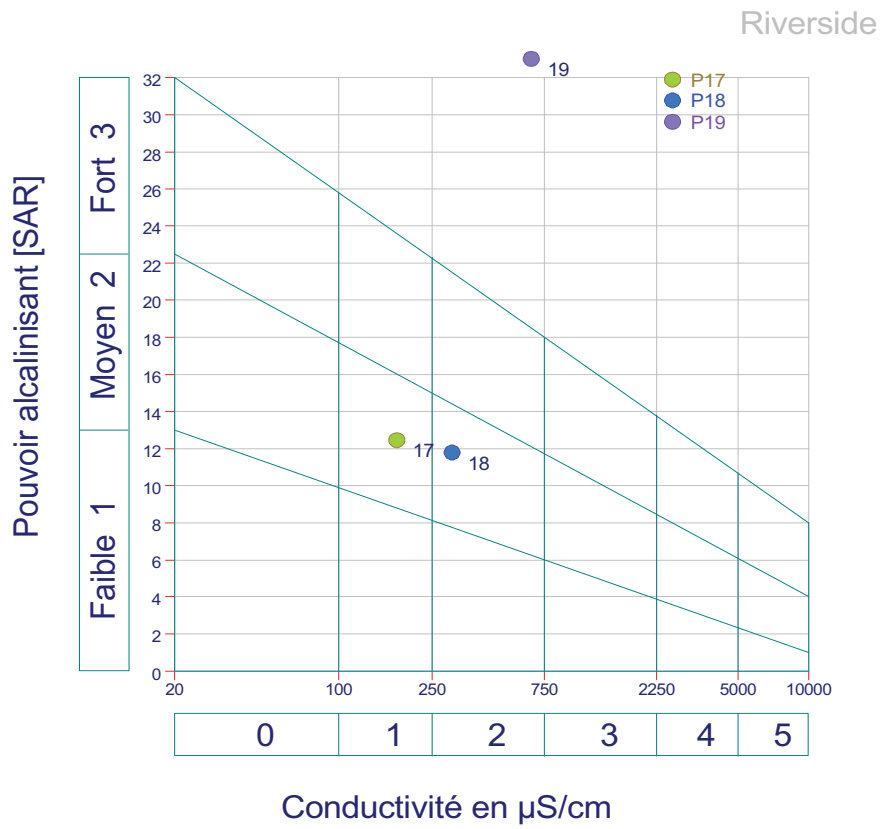


Fig.60.a Diagramme de Richards, campagne de mars

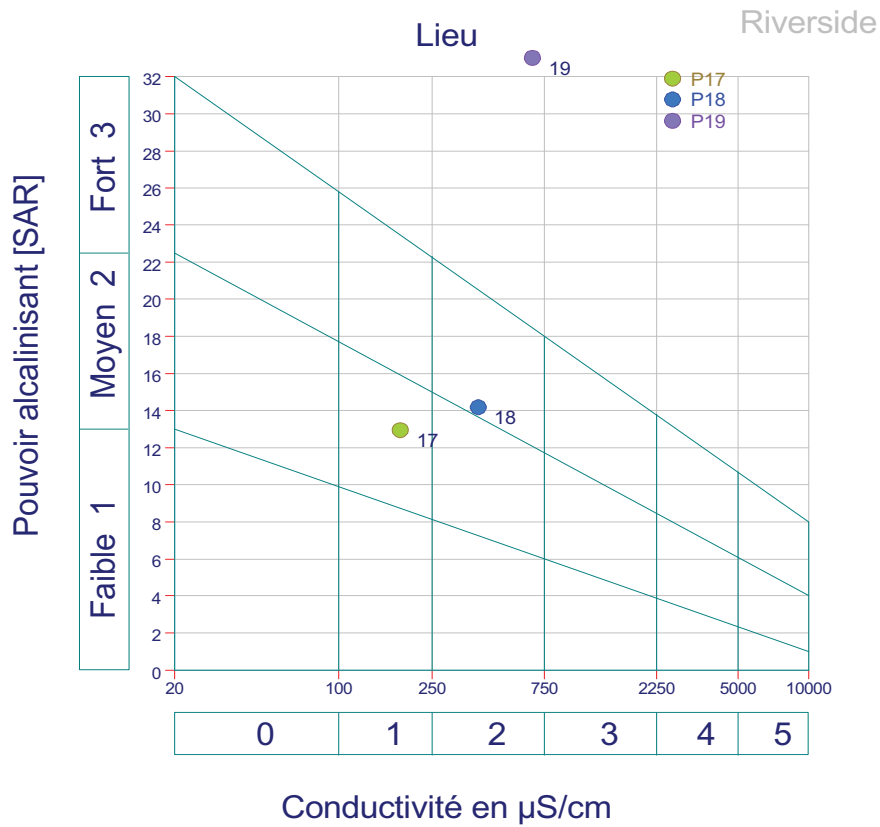


Fig.60.b Diagramme de Richards, campagne de juin

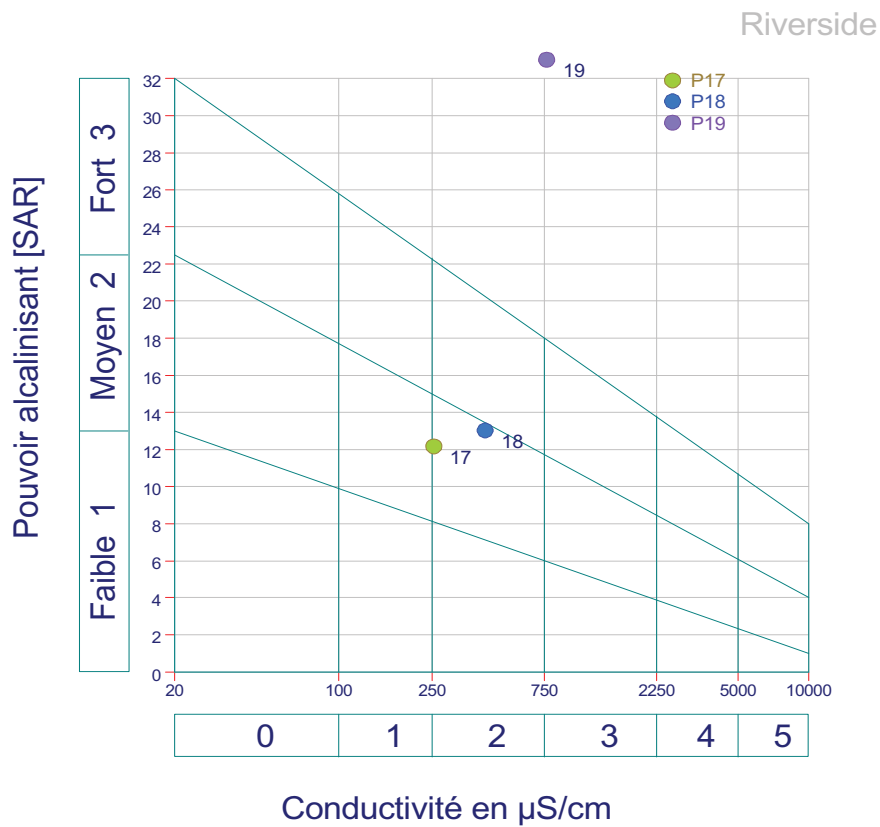


Fig.60.c Diagramme de Richards, campagne de septembre

D'après le diagramme de Richards, les eaux de la nappe phréatique de notre région d'étude présentent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute les périodes d'observation (tab.25) .ces eaux ne convenant pas à l'irrigation, elles ont une salinité exagérée, mais pouvant être utilisées sous certaines conditions : certains cultures (palmiers), sol très perméable.

V.4 ANALYSE STATISTIQUE (APPLICATION DE L'ACP)

V.4.1 Introduction

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques étaient significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du chimisme, la plupart du temps une (ou plusieurs) liaison plus ou moins forte existe entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

V.4.2 Principe

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de réduire le nombre de variables et de détecter une structure dans les relations entre variables, c'est-à-dire les ordonner. Par conséquent, l'ACP est utilisée comme une méthode de synthèse des données (ou « réduction ») et de détection de structure. La réduction des données à l'aide d'une analyse factorielle se base sur la logique de rotation des axes. Dans un espace à deux dimensions, deux variables x et y corrélées décrivent un nuage de points ayant une forme, une structure particulière. L'étude de la structure de ce nuage peut être effectuée, par exemple, par la comparaison de la tendance centrale des deux variables, c'est-à-dire par l'étude de la dispersion des points autour des centres de gravité (comparaison des moyennes). En présence de plus de deux variables l'étude s'effectue alors dans un « espace », de la même manière que deux variables décrivent un plan. Ainsi, avec trois variables, il est possible de tracer un nuage de points tridimensionnel et ajuster un plan à travers les données. Avec plus de trois variables, il devient impossible d'illustrer les points dans un nuage, toutefois, la logique de rotation des axes pour maximiser la variance d'un facteur demeure identique. Après avoir trouvé la droite pour laquelle la variance est maximale (appelée composante principale, axe factoriel ou facteur), il demeure une certaine dispersion autour de ce dernier. Dans l'ACP, dès lors que le premier facteur a été extrait, un second sera cherché afin de maximiser la dispersion restante, et ainsi de suite. Etant donné que chaque facteur consécutif est défini pour maximiser la dispersion qui n'est pas captée par le facteur précédent, les facteurs consécutifs sont indépendants les uns des autres.

L'interprétation des composantes principales extraites comprend deux étapes. La première consiste à examiner l'inertie de chaque composante principale dans le nuage de points. Cette inertie est estimée par les valeurs propres (encore appelée variance expliquée). La deuxième étape consiste à examiner les éléments (variables ou observations) contribuant à la construction et à la définition des composantes principales extraites.

- Les valeurs propres définissent l'inertie de chaque composante principale dans le nuage de points c'est-à-dire l'étendue de ce nuage dans la direction définie par l'axe factoriel. Ainsi, le pourcentage d'inertie définit le pouvoir explicatif de chaque composante.

- Les coordonnées des variables définissent la contribution de chaque variable à l'inertie d'une composante principale, ils fournissent donc une estimation de la participation d'une variable à la formation d'une composante principale. Les coordonnées des variables peuvent donc être interprétées comme des corrélations entre les composantes principales et les variables.

Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique. Les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des trois campagnes analysées au cours d'une année a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel XLSTAT. Notre présente étude porte sur les éléments majeurs, qui influent sur l'évolution de la minéralisation. On a inclus la conductivité électrique, dont l'évolution dépend de cette dernière.

V.4.3L'ACP globale

Une analyse en composantes principales (ACP), a été réalisée sur un tableau de données de sept (07) variables et de 57 individus. Nous avons poussé l'analyse jusqu'à deux facteurs et 83.07 % de la variance ont pu être exprimés.

V.4.3.1 Matrice de corrélation

L'examen du tableau 19 relatif à la matrice de corrélation permet de voir que pratiquement toutes les variables sont corrélées entre elles. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et les sulfates, le sodium, le magnésium, le chlore et les bicarbonates d'autre part.

Tab.18 Matrice de corrélation entre les variables.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ⁻	hco ₃ ⁻	Na ⁺⁺ K ⁺	CE (25°c)
Ca ⁺⁺	1						
Mg ⁺⁺	0,142	1					
Cl ⁻	0,188	0,721	1				
SO ⁻	0,494	0,809	0,718	1			
hco ₃ ⁻	0,230	0,469	0,528	0,563	1		
Na ⁺⁺ K ⁺	-0,011	0,711	0,968	0,681	0,532	1	
CE (25°c)	0,232	0,762	0,923	0,817	0,626	0,904	1

D'autres corrélations moins significatives entre la conductivité électrique d'une part et le calcium permettent de dire que la salinité de l'eau est beaucoup plus due aux formations salifères telles que le gypse, l'halite, le sel de magnésium, la sylvite...

La faible liaison qui existe entre les bicarbonates et le calcium et la forte liaison qui existe entre les sulfates et le calcium confirme cette tendance.

V.4.3.2 Analyse de l'espace des variables (fig.61)

La projection des variables sur le plan factoriel F1-F2 montre que l'axe F1 exprime 67.05% de la variance et il est déterminé par, Cl⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, et Na⁺+K⁺, et la conductivité. Il oppose donc les eaux minéralisées aux eaux faiblement chargées.

Le facteur F2 vertical exprime 16.02 % de la variance. Il n'est déterminé d'une manière positive que par le calcium.

V.4.3.3 Analyse de l'espace des individus (fig.62)

La projection des individus sur le plan F1-F2 a révélé que :

-L'axe F1 montre l'opposition entre les eaux faiblement minéralisées se trouvant à l'amont de l'aquifère d'une coté, et d'autre coté les piézomètres qui se localisent dans les palmeraies (eaux d'irrigation) et les eaux des lacs, alors que les eaux fortement minéralisées se trouvent à l'aval.

- l'axe FII montre également une opposition entre les eaux riches en calcium (groupe B) et les eaux faiblement chargées en cet élément (groupe A). Les premières se situent au centre (P10), et les secondes se localisent en amont et à l'aval de la nappe.

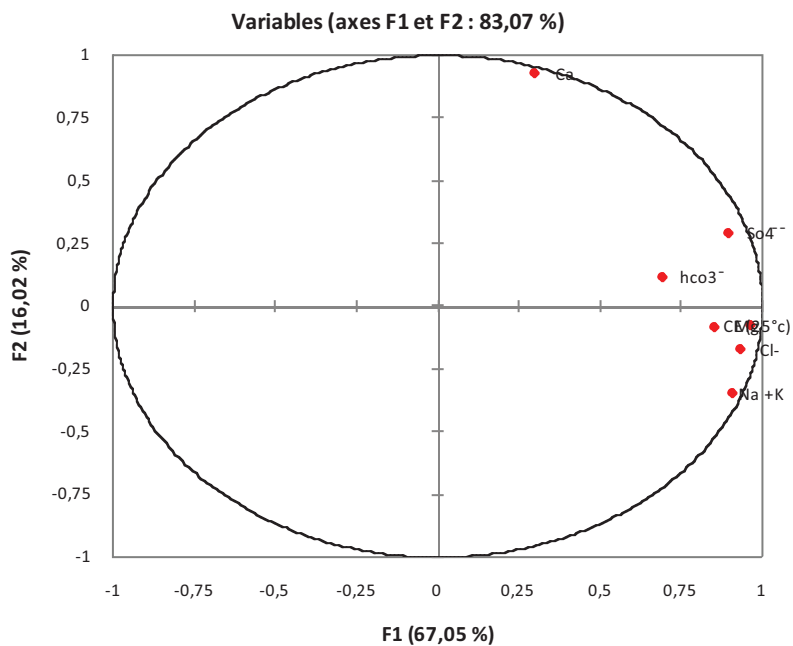


fig.61 Analyse de l'espace des variables:

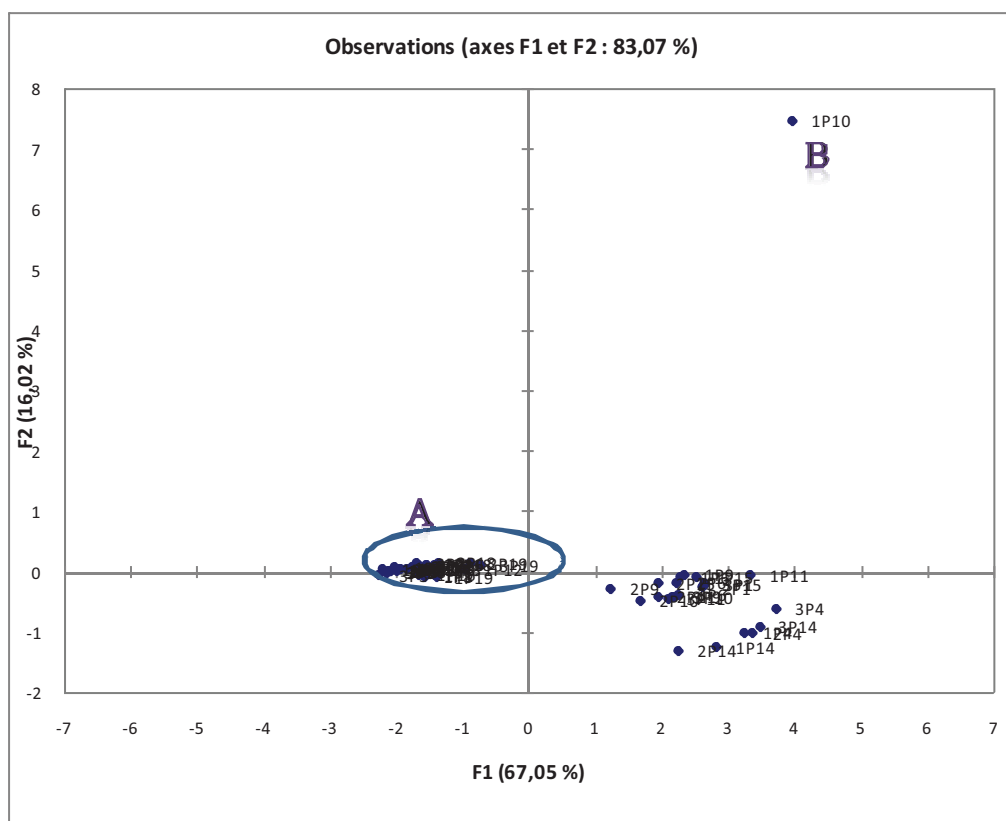


fig.62 Analyse de l'espace des individus

V.5 CONCLUSION

Cette étude hydrochimique nous a permis d'édifier un aperçu sur la qualité chimique de l'eau, dans la région de Touggourt, par une analyse statistique concernant les eaux de surface et les eaux souterraines, Puis une classification des eaux.

- Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de quatre faciès chimiques, qui sont le chloruré magnésien, le chloruré sodique, le sulfaté sodique et le sulfaté calcique.
- La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques ;
- Le suivi de la qualité des eaux dans le temps a montré l'effet des précipitations et de l'évaporation sur la minéralisation des eaux souterraines ;
- L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales du bassin, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité.
- L'analyse en composante principale a confirmé le mode de minéralisation des eaux souterraines, car les points d'eau qui se situent en amont de la nappe se trouvent faiblement minéralisés au contraire de ceux qui se positionnent en aval, qui sont trop minéralisés.
- La classification de Richards et a prouvé la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La région de Touggourt, d'une altitude proche de 70 m, fait partie du Bas Sahara recouvert au sud par le grand Erg oriental et bordé au nord par la zone des chotts. Administrativement, elle appartient à la wilaya de Ouargla. Elle couvre une superficie de 1 334 km² et sa population est de 173 000 habitants.

Elle est caractérisée par un climat hyperaride, marqué par de fortes températures estivales et de faibles précipitations annuelles. Les précipitations sont faibles et irrégulières, de l'ordre de 83.30 mm/an et ne jouent généralement aucun rôle dans la recharge directe des nappes, à l'exception des quelques orages violents qui génèrent des ruissellements.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 1397,14 mm pour la période (1975-2009), l'évapotranspiration réelle est de 87.62 mm pour la même période. Les températures sont élevées, 21,70°C en moyenne annuelle et 33,34°C au mois le plus chaud, ce qui explique la forte évaporation.

La région de Oued Righ (SE Algérien), caractérisé par la présence d'un sol sableux en majorité siliceux et formés de quartz pur donc insoluble. Dans les régions sédimentaires (Oued Righ et Oued Souf) on trouve aussi des sables calcaires (CaCO₃) et gypseux (CaSO₄.2H₂O) et l'existence aussi de deux grands systèmes aquifères, séparés par d'épaisses séries argileuses et évaporitiques, de la base du Crétacé supérieur. Ces deux nappes de Continental Intercalaire et de Complexe Terminal, peu profonde au Sud et profonde au Nord, présente une potentialité en eau importante. Ces nappes sont fortement utilisées pour l'irrigation, l'industrie et l'alimentation en eau potable.

La nappe phréatique est contenue dans les niveaux sableux et argilo-évaporitiques du Quaternaire. Elle est principalement alimentée par les eaux d'irrigation et de distribution urbaine. L'évacuation des eaux industrielles, ménagères et agricoles (drainage) de la région vers le chott Marouane se fait à partir d'un canal de Oued Righ dont la longueur dépasse 130 km et largeur de quelque mètre.

La cartographie piézométrique des différentes campagnes d'observation a montré un écoulement se fait, en général, suivant une direction du Sud Ouest vers le Nord Est. L'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de canal de Oued Righ qui draine les eaux de surface, les eaux de drainage et les eaux usées.

La surface piézométrique présente une fluctuation régulière, caractérisée par une baisse durant la période de juin et de septembre, sous l'effet de l'évaporation, et une remontée pendant la période de mars, suite à la recharge de la nappe à partir des précipitations.

L'étude hydrogéochimique a été réalisée afin de caractériser la qualité des eaux souterraines, donc les facteurs naturels et anthropiques qui influent sur cette qualité. Plusieurs modes et outils d'interprétation ont été utilisés (cartographie, diagrammes, statistiques, informatique, etc.), qui ont montré :

- La présence de quatre faciès chimiques, on peut citer les faciès chloruré et sulfaté résultant des formations évaporitiques.

La répartition spatiale des éléments chimiques a confirmé que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique de la nappe. La dissolution des formations carbonatées et évaporitiques est à l'origine de cette distribution.

Le suivi de la qualité des eaux dans le temps et dans l'espace a montré l'impact des facteurs climatiques (les précipitations et l'évaporation) sur la minéralisation des eaux de la nappe. La comparaison des concentrations des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-) qui caractérisent les formations géologiques principales du bassin, a mis en relief la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et les ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité.

L'analyse statistique a pu montrer que les eaux souterraines se trouvant en amont de la nappe sont faiblement minéralisées et celles qui se trouvent en aval sont fortement minéralisées.

La classification de Richards et a montré la dégradation de la qualité des eaux pour l'irrigation.

RECOMMANDATIONS :

Les recommandations ci-dessous visent à élucider certains problèmes qui ont été observés, à préciser les incertitudes résultant de l'étude actuelle et à proposer des interventions en conséquence :

- Installer un réseau de piézomètres à travers la nappe, pour contrôler la fluctuation de la surface piézométrique, pour prendre les mesures de gestion conservatoires et appropriées de la nappe.

Face à la situation actuelle des lacs, il est nécessaire de préparer un plan d'action urgent de sauvegarde et de reconquête de ces zones humides, contenant un certain nombre de mesures axées surtout sur:

- Assurer une exploitation rationnelle et une gestion durable, dynamique et participative des zones humides (ressources naturelles)
- Renforcer la lutte contre les activités anthropiques destructrices des ressources biologiques.
- Assurer la conservation des écosystèmes et des espèces menacées et/ou d'importance marquée

Références bibliographiques

Elhayek N;(1989) les eaux polluées et leurs épuration. Uni. Constantine, 173p .

Appelo C.A.J., Postma D., (2006) Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edn. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, éd., (2008): Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

Bear J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Ouazar, D. and I., H. (1999) Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods, and Practices. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 625, 51-71 pp.

Benhaddya M^{ed} lamine, (2007) Contribution à l'inventaire des éléments traces dans les sols et dans les eaux souterraines dans la région de l'Oued Righ: leurs origines et leur impact sur l'environnement. Mémoire de magister Centre universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 128 Pages.

Ben Hamida Rahima et Talbi Elmi. (2004) Bilan Hydrique et Chimique de la vallée d'Oued Righ. Mémoire de fin d'étude, diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique Saharienne. Université KASDI MERBAH Ouargla, 89 pages.

Bolke J. K., and Horan M. (2000) Strontium isotope geochemistry of groundwaters and streams affected by agriculture, Locust Grove, MD. Appl. Geochem. 15, 599–609.

Bolke J.K. (2002) Groundwater recharge and agricultural contamination. Hydrogeol. J. 10, 153–179.

Carpenter A. B., Trout M. L., and Pickett E. E. (1974) Preliminary report on the origin and chemical evolution of lead- and zinc-rich brines in central Mississippi. Econ. Geol. 52, 1191–1206.

Chivas A. R., Andrew A. S., Lyons W. B., Bird M. I., and Donnelly T. H. (1991) Isotopic constraints on the origin of salt in the Australian playa: 1. Sulfur. Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol. 84, 309–331. 1991 .

Cook P., Edmunds W. M., and Gaye C. B. (1992) Estimate paleorecharge and paleoclimate from the unsaturated zone profiles. Water Resour. Res. 28, 2721–2731. 1992.

Cosandy C. (2003) les eaux courantes « géographie et environnement ». Belin. pp 34-37

Cortecchi G., Dinelli E., Bencini A., Adorni-Braccesi A., and La Ruffa G. (2002) Natural and anthropogenic SO₄ sources in the Arno river catchment, northern Tuscany, Italy: a chemical and isotopic reconnaissance. Appl. Geochem. 17, 79–92. 2002.

Custodio, E., (2002) Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In: Bocanegra, Martines and Massone (Editors), Groundwater and human development, pp. 1905-1918. 2002.

- Custodio, E., (2004)** Myths about seawater intrusion in coastal aquifers, 18 SWIM proceedings. IGME, Cartagena 2004, pp. 599-608. 2004.
- Custodio, E., (1985)** Saline Intrusion, Hydrogeology in the service of Man, 18th congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge. 1985.
- Custodio, E., (1997)** Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Guidelines for Study, Monitoring and Control, Water report n°11. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, Italie, 152 pp. 1997.
- Davis S. N. (1964)** The chemistry of saline waters by R. A. Krieger: discussion. Ground Water 2, 51.
- De Montety V. (2008)** Salinisation d'un Aquifère Captif Côtier en Contexte Deltaïque - Cas de La Camargue (Delta du Rhône, France), 2008, Thèse, Université d'Avignon. 2008.
- Djemmal Samir. (2009)** : L'effet de la sebkha sur la qualité des eaux souterraines dans la partie Sud-est de Sétif cas de Guijal. Mémoire de Magister En Géologie. Université Mentouri Constantine. 150 pages.
- Edmunds W. M., Carrillo-Rivera J. J., and Cardona A. (2002)** Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. J. Hydrol. 258, 1–24. 2002.
- Gouaidia Layachi. (2008)** Influence de la lithologie et conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est algérien . Thèse de doctorat option hydrogéologie. Université Badji Mokhtar Annaba. 131 pages
- Grisoni C. Decrouk j. (1972)** Cours d'hydrologie superficielle. Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique. Algerie. pp 74-89
- Guettiche Saliha et Benabdasadok Djahida. (2006)** Contribution à l'étude de la possibilité de réutilisation des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation dans la région de l'Oued Righ. 120 pages.
- Hanor J. S. (1987):** Origin and Migration of Subsurface Sedimentary Brines, Short Course 21. (SEPM) Society for Sedimentary Geology, Tulsa, OK. 1987.
- Hellal fayçal et Ourihane dalila. (2004)** Étude hydrogéologique du continentale intercalaire et du complexe terminal de la région du touggourt. Aspect hydrochimique et problèmes techniques posés. 128 pages.
- Hendry M. J., and Schwartz (1988)** An alternative view on the origin of chemical and isotopic patterns in groundwater from the Milk River aquifer, Canada. Water Resour. Res. 24, 1747–1763.
- Herczeg A. L., and Edmunds W. M. (2000)** Inorganic ions as tracers. In Environmental Tracers in Subsurface Hydrology (eds. P. Cook and A. L. Herczeg). Kluwer Academic, Boston.
- Herczeg A. L., Dogramaci S. S., and Leaney W. J. (2001)** Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia. Mar. Freshwater Res. 52, 41–52.

Jones B. F., Vengosh A., Rosenthal E., and Yechieli Y. (1999) Chapter 3: Geochemical investigations. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practises* (eds. J. Bear, A. H. D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera). Kluwer Acad.

Kharaka J., Y. K. and Thordsen J. (1992) Stable isotope geochemistry and origin of water in sedimentary basins. In *Isotope Signatures and Sedimentary Records* (eds. N. Clauer and S. Chaudhuri). Springer, Berlin, pp. 411–466.

Kharaka, Y. K. and J. S. Hanor (2005) "5.16 - Deep Fluids in the Continents: I. Sedimentary Basins " *Treatise on Geochemistry*.

Kharaka Y. K. W., and Carothers W. (1986), Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of deep basin brines. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (eds. P. Fritz and J. C. Fontes). Elsevier, Amsterdam, vol. II, Chap. 2, pp. 305–360. 1986.

Kloppman W., Negel P., Casanova J., Klinge H., Schelkes K., and Guerrot C. (2001) Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 4087–4101. 2001.

Leybourne M. I. and Goodfellow W. D. (2007) Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 2209-2223.

Margat, J. et Castany, G., (1977) *Dictionnaire français d'hydrogéologie*, éditions BRGM.

Maslia M. L., and Prowell D. C. (1990) Effect of faults on fluid flow and chloride contamination in a carbonate aquifer system. *J. Hydrol.* 115, 1–49.

Meybeck M. R., and Helmer. (1989) The quality of rivers: from pristine state to global pollution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. (Global Planet Change Section)*, 75, 283–309.

Nishri A., Stiller M., Rimmer A., Geifman Y., and Krom M. (1999) Lake Kinneret (The Sea of Galilee): the effects of diversion of external salinity sources and the probable chemical composition of the internal salinity sources. *Chem. Geol.* 158, 37–52.

Nriagu, JO, Coker, RD, Barrie, LA (1991) Origin of sulfur in Canadian Arctic haze from isotope measurements. *Nature* 349: 142–145.

Raoult et Foucault, (2005), *Dictionnaire de Géologie*, 6^{ème} édition.

Raymond K. L., and Butterwick. (1992) Perborate. In *Detergents* (ed. N. T. de Qude). Springer, New York, pp. 288–318.

Rhoades J.D., Raats P.A.C. et Prather R.S. (1976) Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-665.

Rodier, J. (1996) *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.* 8^{ème} édition Dunod, Paris, France.

Sayah Lembarek Mohamed. (2008) Étude hydraulique du canal Oued Righ détermination des caractéristiques hydrauliques. 82 pages.

Sheppard S. M. F. (1986) Characterization and isotopic variations in natural waters. In *Stable Isotopes in High-Temperature Geological Processes* (eds. J. W. Valley, H. P. Taylor, Jr., and J. R. O'Neil). *Rev. Mineral.* vol. 16, pp. 165– 83.

Spencer R. J., Eugster H. P., Jones B. F., and Retting S. L. (1985) Geochemistry of Great Salt lake, Utah: I. Hydrochemistry since 1850. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49,727–737.

Taliouine fatima. (2006) la caractérisation physico-chimique de l'eau et écologique du Lac de Témachine, 82 pages.

Liste des tableaux

01	Population et surface de chaque commune de la région de Touggourt.....	01
02	Besoins et ressources de la région de Touggourt.....	18
03	Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de De Martonne...	23
04	Indice d'Aridité de De Martonne.....	23
05	Relation température précipitation, méthode d'Euverte.....	23
06	Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.....	26
07	L'ETP moyenne mensuelle, calculée par la formule de Serra.....	27
08	Calcul de l'ETP d'après Thornthwaite.....	27
09	Calcul de l'ETR d'après Thornthwaite	29
10	Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien, Karpoff, 1952...	36
11	Diamètres de forage recommandés par la norme Afnor FD X 31-614.....	45
12	Coordonnées géographiques des points d'eau.....	47
13	Les campagnes d'échantillonnage effectuées durant l'étude.....	49
14	Répartition de débit d'A.E.P et d'Irrigation à Oued Righ (ANRH, 2004.).....	61
15.a	Variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.....	76
15.b	Variation des paramètres physico-chimiques des eaux de surface.....	76
16	Faciès chimiques des eaux superficielles de la région d'étude :.....	92
17	Évolution des classes d'irrigation selon la méthode de Richards.....	103
18	Matrice de corrélation entre les variables.....	104

Liste des photos

01	Photo satellite de la région de Touggourt (D'après site Google Earth).....	15
02	lac de Témacine.....	17
03	lac de Megarine	65
04	lac de Sidi Slimane.....	68

Listes des figures

01	Le cycle de l'eau et l'acquisition de la minéralisation de l'eau.....	03
02	Gammes de concentrations et terminologie (d'après Kharaka et Hanor, 2005)....	05
03	Précipitations annuelles moyennes à l'échelle globale. (USGS).....	08
04	Gammes des teneurs en chlorures des eaux de pluie en France (Blum et al.,2002).....	08
05	Position de l'interface eau douce-eau salée selon la loi de Ghyben-Herzberg.....	11
06	Position de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg (Custodio, 2002)...	11
07	Situation géographique de la région de Touggourt, d'après Larousse (2004).....	14
09	Carte de découpage administratif de la région de Touggourt.....	16
11	Précipitations moyennes mensuelles période (1975-2009).....	19
12	Humidité moyenne mensuelle période (1975-2009).....	19
13	Les vitesses du vent moyennes mensuelles, période (1975-2009).....	20
14	Durée d'insolation moyenne mensuelle, période (1975-2009).....	20
15	Températures moyennes mensuelles minimales et maximales période (1975-2009).....	21
16	Diagramme ombrothermique de la région d'étude (1975-2009).....	21
17	Climagramme d'Emberger de la région d'étude (1975-2009).....	22
18	L'évaporation moyenne mensuelle, période (1975-2009).....	23
19	L'ETP estimée par différentes méthodes.....	28
20	Coupe géologique synthétique du Sahara oriental, d'après Sonatrach.....	29
21	Carte géologique de la région de Touggourt.....	32
22	Log stratigraphique synthétique de la région de Touggourt, (sans échelle).....	34
23	Coupe géologique du Sahara septentrional d'après UNESCO 1972.....	38
24	Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal).....	39
25	Coupe hydrogéologique transversale montrant le toit et la surface piézométrique du CI.....	40
26	Synthèse hydrogéologique régionale des différents aquifères (sans échelle).....	42
27	Localisation des différents prélèvements d'échantillons d'eau.....	49
28.a	Carte piézométrique de la nappe phréatique, mars 2010.....	55
28.b	Carte piézométrique de la nappe phréatique, juin 2010.....	56
28.c	Carte piézométrique de la nappe phréatique, septembre 2010.....	57
29	Carte de fluctuation de la nappe phréatique en (m) durant l'année 2010.....	58
30	Localisation des lacs en amont de L'Oued Righ	61
31	Evolution de niveau du lac de Temacine (année 2010).....	63
32	Carte isobathe du lac de Témacine (septembre 2010).....	64
33	Forme de la cuvette lacustre de Témacine (septembre 2010).....	64
34	Evolution de niveau du lac de Temacine (année 2010).....	66
35	Carte isobathe du lac de Megarine (septembre 2010).....	67
36	Forme de la cuvette lacustre de Megarine (septembre 2010).....	67
37	Evolution de niveau du lac de Temacine (année 2010).....	69
38	Carte isobathe du lac de Sidi Slimane (septembre 2010).....	70
39	Forme de la cuvette lacustre de Sidi Slimane (septembre 2010).....	70
42.a	Carte du calcium, mars (mg/l).....	79
42.b	Carte du calcium, juin (mg/l).....	79
42.c	Carte du calcium, septembre (mg/l).....	80
43.a	Carte du magnésium, mars (mg/l).....	81
43.b	Carte du magnésium, juin(mg/l).....	81
43.c	Carte du magnésium, septembre (mg/l).....	82

44.a	Carte du sodium, mars (mg/l).....	83
44.b	Carte du sodium, juin(mg/l).....	83
44.c	Carte du sodium, septembre (mg/l).....	84
45.a	Carte du potassium, mars (mg/l).....	85
45.b	Carte du potassium, juin(mg/l).....	85
45.c	Carte du potassium, septembre (mg/l).....	86
45.a	Carte des chlorures, mars (mg/l).....	87
45.b	Carte des chlorures, juin(mg/l).....	87
45.c	Carte des chlorures, septembre (mg/l).....	88
46.a	Carte des sulfates, mars (mg/l).....	89
46.b	Carte des sulfates, juin(mg/l).....	89
46.c	Carte des sulfates, septembre (mg/l).....	90
47.a	Carte des bicarbonates, mars (mg/l).....	91
47.b	Carte des bicarbonates, septembre (mg/l).....	91
47.c	Carte des bicarbonates, septembre (mg/l).....	92
48.a	Diagramme de Piper, campagne de mars.....	92
48.b	Diagramme de Piper, campagne de juin.....	93
48.c	Diagramme de Piper, campagne de septembre.....	94
49.a	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de mars.....	95
49.b	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de juin.....	96
49.c	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de septembre.....	97
50.a	Diagramme de Richards, campagne de mars.....	100
50.b	Diagramme de Richards, campagne de juin.....	100
50.c	Diagramme de Richards, campagne de septembre.....	101
51	Variations des concentrations du calcium en (mg/l).....	105
52	Variations des concentrations du calcium en (mg/l).....	106
53	Variations des concentrations du sodium en (mg/l).....	107
54	Variations des concentrations du potassium en (mg/l).....	108
55	Variations des concentrations des Chlorures en (mg/l).....	109
56	Variations des concentrations des sulfates en (mg/l).....	110
57	Variations des concentrations des Bicarbonates en (mg/l).....	111
58.a	Diagramme de Piper, campagne de mars.....	111
58.b	Diagramme de Piper, campagne de juin.....	112
48.c	Diagramme de Piper, campagne de septembre.....	113
59.a	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de mars.....	114
59.b	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de juin.....	115
59.c	Diagramme de Schoëller- Berkaloff, période de septembre.....	115
60.a	Diagramme de Richards, campagne de mars.....	117
60.b	Diagramme de Richards, campagne de juin.....	118
60.c	Diagramme de Richards, campagne de septembre.....	118
54	Analyse de l'espace des variables.....	121
55	Analyse de l'espace des individus.....	121

Liste des abréviations et des paramètres

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

DHW : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya

DTP : Département de transport et production

NERC: Natural Environment Research Council

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

* * * * *

ACP : Analyse en Composantes Principales

CE : Conductivité électrique ($S \cdot cm^{-1}$)

CI : Continental intercalaire

CT : Complexe terminal

DA : Déficit Agricole (mm)

Da : Densité apparente du sol

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

ETR : Evapotranspiration Réelle (mm)

EX : Excédent en eau du sol (mm)

He : Humidité équivalente du sol (%)

I : Indice d'aridité

Ig: Radiation solaire globale ($cal/cm^2/jour$)

Iga : Radiation maximale théorique

K: Perméabilité (m/s)

P : Précipitations (mm)

Q2 : Quotient pluviométrique

Q : Débit d'écoulement (l/s)

R : Ruissellement (mm)

RFU : Réserve Facilement Utilisable (mm)

S: Coefficient d'emménagement (sans unité)

SAR : Sodium Absorption Ratio

T : Transmissivité (m/s^2)

T : Température ($^{\circ}C$)

ANNEXE I

(Présentation de la région
d'étude)

Tab.27 précipitations moyennes mensuelles, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Total	Moyenne
1975	1,4	0	12,7	1,9	50,2	12,9	0	39	0	0	0	0	118,1	9,84
1976	7	5,3	21,4	1	19,7	16,5	34,5	0	1,6	0	0	0	107	8,92
1977	0,3	0	10,4	0	16	0	11,8	0,6	5,6	0	0	0	44,7	3,73
1978	0	1,5	0	8	12,6	18	0	0	1,8	0	0	3	44,9	3,74
1979	4,8	8	2,3	0	7,9	22,8	1,8	3,5	0,8	0	0	0	51,9	4,33
1980	0	0	50,2	4	10,1	14	64,7	10	0	0	0	0	153	12,75
1981	3,1	0	0	0	0	14,6	0,1	0	2,4	23,2	0	0	43,4	3,62
1982	0	0	12,4	6,6	0	6,4	6	40,4	0,6	0	0	0	72,4	6,03
1983	0	0,2	1,7	18,9	0	2,2	5,4	0,1	2,2	0,9	0	0	31,6	2,63
1984	0	11,7	10	1,1	2,5	0	5	0,6	0	0	0	0	30,9	2,58
1985	2,6	0	0	5,9	9,6	0	0,1	3,6	11,2	0,7	0	0	33,7	2,81
1986	0,6	14	6,6	9	0,6	0,7	37,6	8,1	2,2	0	0	0	79,4	6,62
1987	0,1	17,1	0,1	0,3	8,5	2,5	10,3	0	1	1,8	0	0	41,7	3,48
1988	5,2	6,9	34,9	0,4	0	0	1,7	0	1,3	4,1	0	0	54,5	4,54
1989	1	0	5,2	1,2	1,4	0,2	0	1	0	1,5	0	0	11,5	0,96
1990	0	1	1	19,6	60,2	0	6,8	17	29,4	0	0	13,4	148,4	12,37
1991	0	0	7,2	10,3	34,7	0	23,1	18,8	23,7	0	14,4	0	132,2	11,02
1992	0	0	7,2	10,3	34,7	0	23,1	18,8	23,7	0	14,4	0	132,2	11,02
1993	1,4	6,8	12,2	4,8	0	22,9	5,1	0	1	0	0	1	55,2	4,60
1994	12,6	10	0	0	4,6	3,2	10,8	6,3	0	1,1	0,1	0	48,7	4,06
1995	31,3	0,9	1,9	21,4	2,7	0	0	0	0	0	0	3,2	61,4	5,12
1996	4,9	0,3	0	1,2	42,7	21,2	16,1	0	2,1	0	0	0	88,5	7,38
1997	20,5	0,2	10,4	13,7	0	0	0	17,9	1,5	0	0	0	64,2	5,35
1998	5,1	19,9	2,6	1,7	0	2,9	1,3	5,1	0	7,8	0	0	46,4	3,87
1999	0	0	33,2	2	39,9	5	22	0	10	4	2	0	118,1	9,84
2000	1	17,5	0	7	0	0	2	2	15,1	0	14	0	58,6	4,88
2001	47	0	15	26,2	41	0	11	1	0	0	0	0	141,2	11,77
2002	3,4	6,8	8,4	0	50	0	0	0,1	72	0	0	21	161,7	13,48
2003	0	12,5	3,4	9,1	20,8	4,3	13,9	0,2	0	0	0	5	69,2	5,77
2004	0,2	25,7	25,8	20	0,8	0,7	17,1	11,9	0	0,8	0	10,8	113,8	9,48
2005	6,1	3,2	1,7	0,1	0	4,1	0,8	0,2	10	3,3	0,05	6,2	35,75	2,98
2006	14,5	14,2	2,7	6,6	38,7	1,1	0	3,2	1,1	0	0,2	2,2	84,5	7,04
2007	0,5	0,9	0,1	11,5	0	0,3	0,8	41,5	0,2	0	0	21,3	77,1	6,43
2008	5	29,8	3,4	6,1	89,9	0,3	25,2	10,5	5,7	2,9	0,5	0,1	179,4	14,95
2009	5,3	35,8	4,8	5,3	99,8	0,3	14,9	10,6	3,2	0	0,5	0	180,5	15,04
total	184,9	250,2	308,9	235,2	699,6	177,1	373	271,9	229,4	52,1	46,15	87,2		
Moyenne	5,28	7,15	8,83	6,72	19,99	5,06	10,66	7,77	6,55	1,49	1,32	2,49		

Tab.28 Températures moyennes mensuelles, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mais	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	29,2	20,2	13,1	10,9	9,2	11,7	14,8	18,8	24,6	28,8	32,6	31,5	20,5
1976	27,4	21,1	12,6	11,9	8,9	12,2	13,7	19,6	24,5	28,4	32,6	31,3	20,4
1977	26,9	21,3	15,6	11,4	11,7	15,3	17,5	19,8	24,3	29,4	35	32,2	21,7
1978	26,9	18,3	13,5	12,6	9,5	15	16,1	20,2	24,5	30,6	31,8	31,5	20,9
1979	26,2	23	12,9	10,3	12	13,9	16,5	18,4	24,2	30,6	32,7	32,9	21,1
1980	28,5	19,7	15,8	8,4	9,5	12,3	16	18,6	23,5	28,9	31,2	32,5	20,4
1981	28,1	22,2	13,9	13	8,1	11,2	18,9	21,1	26,1	30,5	32,5	30,7	21,4
1982	28,4	21,7	15,3	9,3	11,2	12,4	15,4	19,2	25	32,1	34,7	33,6	21,5
1983	37,7	21,6	17,2	10,2	7,4	11,4	15,4	19,2	25	32,2	33,4	33,6	22,0
1984	27,4	19,4	15,1	10,4	10,1	11,6	15	21,1	24,4	29,7	31,6	33,1	20,7
1985	27,3	21,5	17,2	11	9,4	15	14,7	21,6	24,6	31,7	33,7	32,3	21,7
1986	28,2	22,9	14,5	10,5	10,1	13,4	15	19,5	26,6	29,9	32,3	33,6	21,4
1987	29,5	23,5	15,1	12,9	9,7	13,1	15,5	21,5	24,7	31,4	33,9	33,7	22,0
1988	26,7	23,6	16,5	9,7	12,5	13	15,6	21,8	28,3	30,4	34,8	33,5	22,2
1989	29,9	22,1	17,3	13,5	9,2	12,4	17,2	20,2	25,1	29,1	32,6	34,6	21,9
1990	31,7	24,3	16,1	9,9	11,2	13,9	16,2	20	24,2	31,4	32,7	30,9	21,9
1991	30	22,2	14,2	9,6	8,9	11,7	17,3	18,7	21,1	29,3	33,5	32,5	20,8
1992	29	22,9	15,9	11,1	8,6	11,3	15,2	19,5	23,9	28,8	31,1	32,9	20,9
1993	28,8	23,1	15,9	10,5	8,7	11,2	14,2	20,5	26,3	32,5	33,8	33,2	21,6
1994	28,9	22,1	16,3	10,5	11,4	12,7	16,9	18,6	27	31,3	33,6	34	21,9
1995	27,1	22,7	15,7	13,7	9,8	14,6	15,9	18,9	26,7	30,5	33,3	33,7	21,9
1996	27,3	20,1	16	13,1	12,9	12,1	13,2	20,4	25,3	28,3	32,5	34,4	21,3
1997	27,9	22,8	16,4	12,5	11,8	13,8	15,4	19,6	26,2	33,3	34,9	33,3	22,3
1998	30,2	20,5	15,1	9,6	10,9	13,3	16,1	21,8	25,3	31,1	33,9	33,7	21,8
1999	31	25,45	15,6	11	11	11,35	16,85	21,95	29,55	33,9	34,25	34,05	23,0
2000	29,1	21,1	16,45	13	8,4	12,45	17,6	22,65	28,3	33,7	30,15	32,5	22,1
2001	29,95	26,8	16,6	10,9	11,5	12,2	20,9	20,6	26,4	31,85	35,45	32,5	23,0
2002	28,9	22,8	17,3	13,25	9,6	13,35	18,45	21,4	25,85	31,4	34,45	33,55	22,5
2003	28,9	25,4	16,1	10,7	11,5	11,5	15,8	22,2	27,1	31,5	35,9	33,3	22,5
2004	27,7	24,5	11,4	11,4	10,8	14,1	17,2	20,7	23,4	30,2	32,8	34,8	21,6
2005	28,4	23,7	16,8	10,1	8,2	10,2	17,7	21,5	27,9	31,4	35,8	33,4	22,1
2006	26,8	24,2	16	12	8,7	12,1	18,3	23,8	28,5	32	34,3	33,5	22,5
2007	30,4	23,5	14,4	10,3	11	14,8	16,1	20,2	26,6	32,8	32,8	33,8	22,2
2008	29,9	22,9	14,8	10,5	11,2	12,4	16,4	19,2	25,7	30,4	35,8	34,1	21,9
2009	27,2	21,6	15,5	13,6	11,2	12,4	16,4	19,2	25,6	31,4	35,2	34,3	22,0
Moyenne	28,78	22,42	15,37	11,24	10,17	12,73	16,27	20,34	25,61	30,88	33,48	33,11	

Tab.29 Températures moyennes mensuelles maximales, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	36,4	27,1	19,7	17,2	59,0	16,9	21,7	24,9	31,4	36,2	40,4	38,8	30,8
1976	33,9	27,4	18,9	18,7	14,9	17,8	18,6	26,1	30,4	34,8	39,6	38,6	26,6
1977	33,1	28,4	22,9	18,4	17,3	22,8	25,2	27,1	30,7	37,0	43,4	39,2	28,8
1978	34,0	24,8	19,9	20,5	15,8	21,9	22,7	27,0	30,8	38,1	39,3	38,9	27,8
1979	31,9	29,3	19,8	18,2	19,7	20,0	23,1	25,0	30,8	37,7	39,9	40,5	28,0
1980	35,3	26,4	21,0	14,3	16,5	18,9	21,8	24,3	29,6	37,3	39,0	39,9	27,0
1981	35,0	29,9	21,5	20,4	14,3	17,4	25,9	28,6	33,1	37,7	38,8	37,9	28,4
1982	35,0	28,3	21,3	15,5	18,3	17,4	25,9	25,1	30,9	39,4	42,4	41,1	28,4
1983	34,5	28,6	24,1	17,4	16,1	18,8	22,7	29,3	32,5	37,1	40,7	41,6	28,6
1984	34,5	25,7	22,1	16,8	16,8	18,7	21,9	27,7	31,4	36,9	39,3	40,1	27,7
1985	34,5	27,8	24,2	17,5	15,7	22,8	21,3	28,8	31,5	39,5	41,2	39,8	28,7
1986	33,4	28,9	20,3	16,6	17,2	20,6	20,5	26,2	33,4	36,6	39,3	41,1	27,8
1987	36,5	30,5	21,9	19,7	16,4	19,7	22,0	29,0	31,1	37,9	41,1	41,3	28,9
1988	33,4	30,2	21,7	15,6	19,1	19,4	23,2	28,6	35,0	36,9	41,8	40,5	28,8
1989	36,9	28,4	24,3	20,3	15,5	19,0	24,6	26,8	32,6	35,6	39,5	41,3	28,7
1990	37,5	31,3	22,3	15,7	16,1	21,4	22,5	26,2	29,8	38,9	39,4	37,5	28,2
1991	36,8	30,4	22,2	16,4	16,2	19,3	15,5	26,9	30,6	37,6	42,2	41,1	27,9
1992	36,2	30,5	22,3	17,6	14,9	18,1	20,7	25,8	30,4	34,6	37,8	40,2	27,4
1993	35,7	30,4	21,3	17,1	16,2	16,3	21,2	27,7	33,3	39,8	40,9	40,6	28,4
1994	35,6	28,2	23,6	18,2	17,9	20,8	23,1	25,4	36,2	38,8	41,2	41,7	29,2
1995	33,4	28,9	22,7	20,1	17,2	22,6	22,6	25,6	33,7	37,4	41,1	40,3	28,8
1996	34,1	27,5	23,0	20,2	18,4	17,9	22,8	27,1	32,4	34,8	39,7	41,8	28,3
1997	33,8	29,4	23,1	18,8	18,7	21,5	22,5	25,4	33,5	40,9	42,7	39,7	29,2
1998	37,0	27,0	22,0	16,7	17,9	20,4	22,3	28,6	31,8	38,0	41,1	40,9	28,6
1999	37,5	32,5	21,3	16,7	16,0	17,8	23,7	29,8	37,7	41,6	41,8	43,6	30,0
2000	36,1	27,2	23,3	19,9	15,6	19,9	25,2	30,1	35,1	41,1	37,2	40,0	29,2
2001	36,3	33,8	23,0	16,7	18,3	20,0	28,7	27,9	33,2	39,4	43,5	40,0	30,1
2002	35,9	30,0	23,7	20,0	16,1	21,2	25,8	28,7	32,9	38,8	41,7	40,4	29,6
2003	35,7	31,6	22,9	17,1	17,5	17,9	22,0	29,1	34,2	38,6	43,5	40,7	29,2
2004	39,2	32,3	90,5	15,2	23,0	19,7	26,2	27,8	29,0	35,0	46,6	45,0	35,8
2005	34,8	30,4	23,7	16,9	15,0	17,2	24,4	28,3	35,4	38,2	43,4	40,6	29,0
2006	33,5	31,8	23,6	17,9	14,9	18,3	26,1	31,1	35,5	39,2	41,0	40,9	29,5
2007	36,9	30,1	22,1	17,2	18,8	21,4	23,1	26,3	33,8	40,5	39,9	41,1	29,3
2008	36,4	28,6	21,2	16,8	17,9	19,8	24,7	30,5	34,1	36,5	43,3	41,3	29,3
2009	33,3	28,7	23,2	20,9	16,5	18,6	23,2	25,9	32,7	38,6	42,8	41,3	28,8
Moyenne	35,3	29,2	24,1	17,8	18,2	19,5	23,1	27,4	32,6	37,9	41,0	40,6	

Tab.30 Températures moyennes mensuelles minimales, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	22,4	13,6	7,4	5,4	3,7	7,1	7,8	12,9	17,8	21,2	24,2	24	14,0
1976	20,5	15	7,1	5,9	3,6	6,9	8,6	12,8	17,8	21,5	24,8	23,9	14,0
1977	20,2	14,4	9,2	5,5	7,2	9	10,2	12,6	17,1	21,1	26,4	24,6	14,8
1978	19,6	12	7,5	6	3,7	8,7	9,4	12,8	17,4	22,8	23,5	23,4	13,9
1979	20,7	17,2	6,9	3,8	7,8	8,2	9,9	11,7	16,7	23,1	24,8	25,1	14,7
1980	21,9	13	11,3	3,5	3,3	6,3	10	12,8	16,8	22	22,8	24,6	14,0
1981	21,6	15,1	7,6	6,8	2,6	5,6	12	14,6	18,6	23,5	25,8	22,7	14,7
1982	22	15,9	9,7	4	5,1	5,8	8,6	13,6	18,6	24,1	26,3	25,8	15,0
1983	20,9	15,2	10,7	4,3	0,4	4,5	8,6	14,4	19,1	22,4	25,7	25,9	14,3
1984	20,8	13,9	9,1	5,3	4,1	5	7,8	13,9	16,7	22,3	23	25,7	14,0
1985	20,1	15,4	11,3	5,2	4,2	8,4	7,8	14,1	17,4	23,8	25,8	24,8	14,9
1986	22	17,4	9,1	5,5	4	6,4	9,6	12,6	19,2	22,5	24,5	25,7	14,9
1987	22,4	16,8	8,7	7,2	3,5	6,7	8,7	13,5	18,1	24,3	26,6	26,6	15,3
1988	19,8	17	11,8	4,7	5,8	6,7	9,2	14,6	20,8	24	27,3	26,2	15,7
1989	23	16,5	10,8	7,6	3,7	6,2	9,7	12,7	16,9	22,1	24,9	27,5	15,1
1990	24,4	17,8	10,6	5	7,7	7,2	10,3	14,3	18,8	24,5	25,7	24,4	15,9
1991	22,6	16,5	8,2	4,6	3,7	5,5	11,2	13,5	15,3	22,4	25,9	24,7	14,5
1992	22	16,7	10,2	5,8	3,6	5,4	10,2	13,1	17,9	22,2	24,5	25,7	14,8
1993	22	17,1	11,2	4,9	2,4	5,8	8,6	13	19	25,2	26	25,5	15,1
1994	23,1	16,7	10,2	3,8	5,7	5,1	10,6	11,6	19,5	23,9	25,6	25	15,1
1995	21,5	17	9,7	8,8	3,1	7,5	9,1	11,9	19,2	23,3	26,6	26,6	15,4
1996	20,7	13,3	9,6	6,7	8,3	7,3	10,6	13,8	18,7	21,7	24,9	26,9	15,2
1997	22,1	16,7	10,7	7,2	5,9	6,8	8,3	12,6	18,8	25,6	27,3	26,6	15,7
1998	23,7	14,4	9,1	3,1	5	6,6	8,8	14,4	18,2	23,5	26,4	26,3	15,0
1999	24,5	18,4	9,9	5,3	6	4,9	10	14,1	21,4	26,2	26,7	24,5	16,0
2000	22,1	15	9,6	6,1	1,2	5	10	15,2	21,5	26,3	23,1	25	15,0
2001	23,6	19,8	10,2	5,1	4,7	4,4	13,1	13,3	19,6	24,3	27,4	25	15,9
2002	21,9	15,6	10,9	6,4	3,1	5,5	11,1	14,1	18,8	24	27,2	26,7	15,4
2003	22,3	19,7	10,3	5,3	6,6	5,8	9,4	15,3	19,6	24	27,7	25,9	16,0
2004	24,7	16,2	9,6	2,6	9	7,4	13,0	15,5	15,5	20,8	21,4	35,2	15,9
2005	22,1	17,5	10,3	4,1	2	3,8	11,4	14	19,9	24,1	35,8	25,9	15,9
2006	20,4	17,9	9,6	7,1	3,3	6,6	10,5	16,3	21,1	24,1	27,1	26,3	15,9
2007	23,8	17,8	7,8	4,4	4,5	8,3	9,5	14,3	18,9	24,7	25,2	26,8	15,5
2008	23,6	17,8	9,4	5,4	5,2	6,2	10,1	15	20,1	22,4	28	26,8	15,8
2009	21,5	15,2	9,2	7,3	6,9	6,7	10,1	12,4	18,3	23,7	27,3	26,9	15,5
Moyenne	22,0	16,2	9,6	5,4	4,6	6,4	9,8	13,6	18,5	23,4	25,9	25,8	

Tab.31 L'évaporation moyenne mensuelle, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	288	236	105	115	74	73	239	243	301	387	481	419	246,75
1976	342	288	117	121	84	126	149	234	338	420	465	515	266,58
1977	261	208	135	187	84	137	177	234	310	336	394	505	247,33
1978	303	121	81	140	121	101	171	252	264	276	363	381	214,50
1979	240	233	105	93	140	115	236	267	310	390	409	381	243,25
1980	288	194	111	115	103	121	212	261	290	410	380	333	234,83
1981	306	200	113	248	144	87	290	233	248	372	374	300	242,92
1982	276	211	130	83	86	78	179	208	332	458	422	479	245,17
1983	333	211	147	115	97	137	252	341	402	428	540	496	291,58
1984	359	197	158	155	127	222	207	292	427	431	376	563	292,83
1985	379	264	155	129	156	248	245	404	477	536	622	494	342,42
1986	270	146	146	120	148	226	217	303	330	364	461	421	262,67
1987	169	137	159	94	162	202	168	302	310	382	384	351	235,00
1988	283	236	157	91	177	164	247	330	449	422	417	388	280,08
1989	364	180	180	110	92	99	319	364	321	372	396	444	270,08
1990	355	257	81	100	68	130	192	227	259	433	439	317	238,17
1991	262	245	165	81	75	131	311	231	314	438	450	370	256,08
1992	358	325	128	108	60	108	186	314	371	458	448	478	278,50
1993	376	285	109	91	101	118	192	339	445	616	569	509	312,50
1994	310	162	126	130	133	194	258	316	463	433	478	422	285,42
1995	284	215	201	154	158	185	256	311	418	453	509	390	294,50
1996	337	230	117	174	118	159	271	340	409	415	496	472	294,83
1997	287	233	161	126	137	143	201	240	417	511	507	400	280,25
1998	415	237	157	121	121	137	264	344	404	443	451	498	299,33
1999	260	87	79	65	81	143	227	253	339	343	361	324	213,50
2000	260	147	99	112	599	100	167	275	383	341	298	295	256,33
2001	189	182	96	56	111	124	202	174	220	274	422	295	195,42
2002	190	139	130	90	66	106	160	208	285	304	298	272	187,33
2003	247	197	111	113	99	95	104	184	225	238	317	285	184,58
2004	134	181	86	64	73	120	160	184	232	318	342	255	179,08
2005	234	146	229	76	64	95	158	178	199	261	305	224	180,75
2006	160,3	158,1	83,8	55,4	48,7	102	176	191,6	200,6	295	318,8	247,9	169,85
2007	220,4	187,3	102	62,5	45,3	84,9	118	100,3	266,6	240,9	207,8	240,2	156,35
2008	160,7	82,1	78,4	52,3	45	66,9	115	202,7	233,7	371,2	332,9	216,7	163,13
2009	118,5	122,3	104,2	90,9	45	112,4	109	123,3	166,3	226,1	202,3	200	135,03
Moyenne	274,8	196,6	126,9	109,7	115,5	131,1	203,9	257,3	324,5	382,7	406,7	376,6	

Tab. 32 Humidité moyenne mensuelle, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	50	54	68	68	70	72	45	54	44	37	32	38	52,67
1976	40	55	73	71	72	65	65	49	51	45	36	32	54,50
1977	46	49	60	64	79	58	46	48	47	39	30	34	50,00
1978	51	72	66	52	62	53	42	41	45	39	35	44	50,17
1979	51	48	59	61	58	54	41	43	37	36	36	35	46,58
1980	47	52	67	69	58	57	49	44	40	32	32	34	48,42
1981	40	45	61	57	60	58	42	44	38	32	32	32	45,08
1982	52	51	65	67	55	52	45	57	37	33	31	39	48,67
1983	33	46	49	57	58	55	47	38	35	34	25	29	42,17
1984	40	56	56	61	56	46	47	42	38	32	32	36	45,17
1985	42	51	50	58	59	50	51	35	37	30	24	30	43,08
1986	51	57	72	69	53	50	53	47	39	39	35	29	49,50
1987	39	50	53	65	63	52	60	48	38	31	30	32	46,75
1988	37	53	68	76	54	49	39	38	39	39	46	32	47,50
1989	48	62	60	70	71	32	46	43	42	38	37	38	48,92
1990	29	45	68	74	77	64	55	50	56	38	35	48	53,25
1991	45	53	57	69	60	52	50	43	40	34	26	26	46,25
1992	36	39	65	67	73	60	59	49	46	33	33	29	49,08
1993	41	46	73	74	65	66	54	43	38	28	28	28	48,67
1994	50	58	67	67	63	52	54	43	36	42	33	38	50,25
1995	49	57	54	74	63	59	50	45	38	36	35	36	49,67
1996	44	51	54	51	69	57	53	46	39	42	34	35	47,92
1997	51	55	58	63	58	47	50	50	44	37	34	36	48,58
1998	49	57	60	63	64	59	43	37	39	32	29	36	47,33
1999	45	46	63	75	72	57	48	34	29	29	53	31	48,50
2000	33	56	56	61	73	55	45	37	45	34	38	33	47,17
2001	48	45	57	70	62	48	42	42	39	32	28	26	44,92
2002	41	48	55	60	67	55	46	41	39	29	33	34	45,67
2003	41	51	60	66	64	56	53	40	37	34	29	32	46,92
2004	45	44	73	78	69	55	51	46	42	35	31	36	50,42
2005	46	55	53	65	69	59	47	39	32	30	29	36	46,67
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
2007	40	47	51	63	64	52	44	55	32	27	31	31	44,75
2008	46	63	67	72	76	52	54	45	38	40	30	36	51,58
2009	54,1	48,6	53,1	56,8	75,5	51,6	54,3	44,8	37,6	32	33	31,5	47,74
Moyenne	42,86	50,45	59,17	63,82	63,19	53,13	47,72	42,88	38,67	33,71	31,86	32,93	

Tab.33 Durée d'insolation moyenne mensuelle, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
1975	267	313	234	205	220	174	291	243	301	372	381	344	278,75
1976	309	270	252	239	217	185	217	312	313	351	375	357	193,92
1977	330	279	264	257	220	266	307	300	329	378	341	347	207,33
1978	327	267	255	242	233	232	307	294	350	339	384	363	208,50
1979	367	239	267	264	202	190	260	309	335	303	381	353	194,42
1980	398	303	215	243	251	228	267	290	344	352	398	362	207,67
1981	386	303	281	248	274	250	271	272	336	311	351	343	200,67
1982	366	233	223	238	259	229	257	263	303	327	359	341	194,83
1983	390	268	226	261	272	240	246	240	251	312	334	394	190,75
1984	276	261	245	207	238	237	278	297	307	326	372	393	204,00
1985	281	273	217	206	219	224	263	247	313	332	362	345	192,08
1986	277	234	229	234	258	232	248	322	344	340	358	327	202,42
1987	302	265	249	201	235	235	283	295	286	259	399	328	193,33
1988	298	236	174	234	234	228	283	286	304	201	325	334	182,92
1989	261	247	245	224	231	212	287	283	339	332	365	374	201,92
1990	283	257	234	236	161	269	242	242	297	326	368	358	188,58
1991	273	233	249	294	228	239	225	284	326	308	345	366	193,42
1992	307	264	235	237	218	243	202	276	294	332	358	355	189,83
1993	283	233	191	244	244	210	283	318	324	310	360	326	197,92
1994	227	245	270	268	220	223	254	319	344	343	368	370	203,42
1995	237	277	249	226	279	268	279	309	334	336	368	315	207,33
1996	261	287	237	249	220	227	272	286	318	354	364	326	197,25
1997	264	281	261	246	233	262	321	263	334	328	355	320	201,33
1998	278	278	265	270	252	264	296	296	344	348	381	360	211,75
1999	269	280	204	227	204	261	300	308	335	328	351	300	198,92
2000	294	240	254	231	276	285	287	293	284	371	372	349	209,75
2001	266	270	223	225	256	263	299	310	221	345	344	349	198,92
2002	279	288	209	245	268	261	294	280	248	353	277	386	197,25
2003	291	207	243	231	207	229	273	274	311	370	355	366	198,75
2004	312	348	217	192	258	232	239	305	348	340	387	330	203,25
2005	272	272	235	239	253	237	229	283	325	313	330	323	191,08
2006	275	285	253	220	228	224	306	274	282	344	370	332	196,64
2007	267	261	275	237	260	210	285	235	340	329	376	313	195,56
2008	254	205	268	228,9	205	239	266	280	283	242	353	337	183,84
2009	267	314	264,2	251,6	205	253	266	321	359	344	362	347	204,71
Moyenne	294	266	240	237	235	236	271	286	314	329	361	347	

Tab.34 Les vitesses du vent moyennes mensuelles, période (1975-2009).

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	moyenne
1975	5	4	4	4	2	4	6	6	5	5	4	4	4,42
1976	4	5	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	4,58
1977	4	3	3	2	4	4	4	5	5	6	5	5	4,17
1978	3	2	2	3	3	4	4	5	6	4	4	5	3,75
1979	3	4	2	2	3	4	3	3	3	3	3	3	3,00
1980	3	2	3	2	3	2	4	4	4	4	3	2	3,00
1981	2	2	2	4	3	2	3	4	3	4	3	2	2,83
1982	2	3	3	2	3	3	3	4	4	3	2	3	2,92
1983	2	2	2	2	1	2	3	3	4	3	3	3	2,50
1984	2	2	2	2	2	3	3	4	5	3	2	3	2,75
1985	3	3	3	3	4	3	3	5	5	4	3	3	3,50
1986	2	3	3	2	3	4	4	4	3	2	2	3	2,92
1987	3	3	4	2	3	2	3	4	5	5	5	4	3,58
1988	4	4	3	3	4	4	4	5	5	6	4	4	4,17
1989	4	3	3	2	3	4	4	5	5	5	4	4	3,83
1990	3	3	2	2	4	2	3	4	5	4	3	3	3,17
1991	3	0	3	1	2	3	4	4	4	4	3	3	2,83
1992	2	3	3	3	1	2	3	4	3	3	3	2	2,67
1993	4,3	3,8	3,7	1,7	1,9	4,3	3,3	4,2	5,4	5	4,8	3,7	3,84
1994	2,1	1,9	1,1	1,4	2,6	2,5	3,5	3,1	2,3	3	5,1	1,9	2,54
1995	2,9	2,4	2,5	2,7	2,7	2,3	3,3	3,3	2,8	3,4	3,1	2,9	2,86
1996	2,4	1,7	1,4	2,4	2,6	3,9	2,3	3,1	3,3	2,8	2,6	2,5	2,58
1997	2,2	1,9	2,6	2,3	1,6	0,8	1,6	3,3	3,4	3,2	3	2,3	2,35
1998	3,2	2,8	2,7	2	2	1,8	2,5	3,3	3,8	3	2,1	2,2	2,62
1999	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	0	3,42
2000	3	3	3	4	2	0	4	5	4	3	3	3	3,08
2001	3	3	3	3	3	3	4	4	5	4	4	3	3,50
2002	3	2	4	3	2	2	3	4	4	4	4	4	3,25
2003	2,2	3,5	2,2	3,3	3,9	3,4	2,5	4,4	4,3	2,2	2,1	1,9	2,99
2004	2,8	1,7	2,7	3,3	3,6	8,4	2,4	5,8	6,5	3,8	3,1	3,2	3,94
2005	3,1	2,5	2,4	2,3	2,3	3,3	4,3	4	3,7	3,4	3,4	3,5	3,18
2006	2,6	2,6	1,5	2,2	2,3	2,9	3,7	3,3	3,6	3,5	2,9	2,9	2,83
2007	3,3	3,4	1,7	2	1,1	2,5	3,7	4,1	3	3,5	3	3,9	2,93
2008	3,0	2,7	2,7	2,6	2,7	3,1	3,5	4,2	4,2	3,8	3,3	3,1	3,23
2009	2,7	1,9	2,4	3,5	3,2	3,1	4,4	4,2	4,1	2,8	2,4	3	3,14
Moyenne	3,0	2,7	2,7	2,6	2,7	3,1	3,5	4,2	4,2	3,8	3,3	3,1	

Tab.35 Durée astronomique du jour H (valeurs moyennes mensuelles en heures/jour)

Latitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
10°	11,62	11,80	12,08	12,35	12,59	12,70	12,64	12,44	12,18	11,90	11,69	11,51
20°	11,09	11,49	12,04	12,60	13,11	13,33	13,24	12,80	12,26	11,70	11,19	10,91
30°	10,45	11,09	12,00	12,90	13,71	14,07	13,85	13,21	12,26	11,45	10,67	10,23
40°	9,71	10,64	11,96	13,26	14,39	14,96	14,68	13,72	12,46	11,15	10,00	9,39

**Tab.36 Valeurs mensuelles de I_{gA} en petites calories/cm² de surface et par jour
(extrait des tables d'Angot)**

Latitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
10°	759	821	873	894	885	873	879	880	872	830	767	735
20°	642	732	834	902	930	934	930	902	843	755	656	610
30°	508	624	764	880	950	972	955	891	788	658	528	469
40°	364	495	673	833	944	985	958	858	710	536	390	323

ANNEXE II
(Matériels et Méthodes)

1. DOSAGE DES CHLORURES

1.1 PRINCIPE :

Les chlorures, en présence du thiocyanate mercurique et de l'alun Ferrique donnent en milieu nitrique acide un complexe coloré orange Susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 nm.

1.2 RÉACTIFS :

- SOLUTION SATURÉE DE THIOCYANATE MERCURIQUE :

Dissoudre 2 g Hg (SCN)₂ dans 2 litres d'eau bidistillée.

- SOLUTION D'ALUN FERRIQUE :

67g d'Alun ferrique Fe₂ (SO₄)₃, NH₄ 24 H₂O

430 ml d'acide nitrique concentré

Eau distillée Q.S.P 1000 ml

- SOLUTION MÈRE CHLORURES A 10 g/l :

Dissoudre 20.984 g de chlorures de potassium pur préalablement desséché 12 heures à l'étuve à 100 °C dans l'eau distillé, ajuster à 1000 ml

- SOLUTION ÉTALONS :

Prendre successivement : 100, 80, 65, 50, 35, 20, 10, et 5 ml de la solution mère de CL compléter chaque prélèvement à 1000 ml exactement par de l'eau distillée. On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement : 1000, 800, 650, 500, 350, 200, 100, et 50 mg/l en chlorures. Les stocker dans des flacons étiquetés.

1.3 MODE OPÉRATOIRE :

On place les PE des (5ml) dans des erlens de 50 ml

Les PE des solutions étalons, le témoin (H₂O) et les échantillons sont alors traités de manière identique à savoir :

On ajoute dans l'ordre 15 ml de la solution de thiocyanate mercurique préalablement diluée au 1/3 puis 15 ml de la solution nitrique d'alun ferrique également diluée au 1/6.

On agite vigoureusement les erlens pour uniformiser la coloration qui apparaît et on laisse au repos pendant 1/2 heure.

On effectue les lectures au colorimètre à la longueur d'onde de 470 nm en réglant le zéro avec le témoin.

1.4 EXPRESSION DES RÉSULTATS :

La courbe d'étalonnage donne directement la longueur en chlorures en mg/l.

2. DOSAGE DES SULFATES

2.1 PRINCIPE :

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu, très fin est stabilisé par la gélatine. On effectue sur le trouble une mesure turbidimétrique à la longueur d'onde de 495 nm.

2.2 RÉACTIFS :

- SOLUTION DE CHLORURE DE BARYUM ET DE GÉLATINE :

40 g de gélatine

200 g de chlorure de baryum (dissoudre à part)

3 g de phénol (pour éviter une décomposition d'origine bactérienne de la gélatine)

Eau distillée Q.S.P 2000 ml

Remarque : dans le cas où la gélatine contient des sulfates apparaît un trouble de BaSO₄ que l'on élimine par centrifugation.

- SOLUTION MÈRE DE SULFATE A 10 g/l :

Dissoudre 13.755 g de (NH₄)₂ SO₄ préalablement desséché à l'étuve à 100 °C puis au dessiccateur sous vide, dans de l'eau distillée, ajuster à 1000 ml.

SOLUTION ÉTALONS

Prendre successivement : 50, 40, 30, 20, 15, 10, et 5 ml de la solution mère de SO_4^- complété chaque prélèvement à 1000 ml exactement par de l'eau distillée. On obtient alors des solutions étalons contenant respectivement :

500, 400, 300, 200, 200, 150, 100, et 50 mg/l en SO_4^-

MODE OPÉRATOIRE :

- On place les PE (5 ml) dans des erlens de 50 ml

Les PE des solutions étalons, le témoin (H_2O) et les échantillons sont alors traités de manière identique a savoir :

- On ajoute à chaque PE, 20 ml de la solution de BaSO_4 et de gélatine préalablement diluée au 1/6

- On agite pour uniformiser le trouble et on laisse au repos pendant 20 minutes jusqu'à la mesure. Une nouvel agitation aurait comme conséquences la formation de bulles d'aire et par conséquent une perturbation de mesures.

- On effectue les lectures au colorimètre d'onde de 495 nm en réglant le zéro avec le témoin

2.3 EXPRESSION DES RÉSULTATS :

La courbe d'étalonnage donne directement la teneur en sulfates exprimés en mg/l.

3. DOSAGE DU CALCIUM/MAGNESIUM ET CALCIUM PAR COMPLEXOMETRIE

3.1 PRINCIPE :

Le sel disodique de l'acide Ethylène diamino tétra acétique cristallisé avec H_2O , appelé aussi complexon ou versénate forme avec un nombre de cation des complexes dont la stabilité dépend essentiellement du pH.

3.2 RÉACTIFS :

- Solution E.D.T.A

40g soude caustique

1g chlorure de magnésium.

Dissoudre 40 g E.D.T.A ajouter les 5 g NaOH puis ajuster avec de l'eau distillée Q.S.P 1000 ml.

Dissoudre à part 1 g de chlorure de magnésium, ajuster avec de l'eau distillée Q.S.P 1000 ml.

Mélanger les 21 ainsi obtenus et y ajouter 8 autres litres d'eau distillée ce qui donne 10 litres d'E.D.T.A.

3.2.1 SOLUTION : tampon pH = 10 (Ca/Mg)

Le tampon pH = 10 est constitué par des mélanges à volume égale des solutions A et B.

Solution A

Peser 67 g de chlorure d'ammonium préalablement séché 12 à l'étuve à 100 °C puis refroidi au dessiccateur.

Ajouter 400 ml d'ammoniaque à 28 % (448 ml à 25 %) compléter à 1000 ml par de l'eau distillée.

Solution B

Dissoudre à 2 litres d'eau distillée 1,5 kg environ de Tartrate double de sodium et de potassium appelé couramment sel de seignette. Chauffer jusqu'à dissolution totale et ajuster à 2 litres.

3.2.2 SOLUTION DE SOUDE N (Ca)

40 g de soude par litre d'eau distillée.

3.3 INDICATION COLORE

1 Dosage du $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$

Mélanger intimement puis broyer au mortier 100 g de chlorure de sodium préalablement séché et une quantité de noir d'Eriochrome T telle qu'on obtient un mélange de coloration mauve. On décèle la fin du virage par le noir Eriochrome T que vire du rose au bleu.

2 Dosage du Ca^{+2}

Mélanger intimement puis broyer au mortier 100 g de chlorure de sodium préalablement séché et une quantité de Patton et Raeder (acide hydroxy-2)

(Hydroxy-2 sulfo- 4 Naphtoiue -3). On observe la fin du virage quand la couleur passe alors au rouge au bleu franc.

3.4 MODE OPÉRATOIRE

3.4.1 TITRE DE L'E.D.T.A

Le dosage de l'E.D.T.A s'impose à chaque fois que le remplissage du flacon doseur est fait.

On prépare une solution de CaCO₃ à 1 g/l (attaque de 1 g de Ca CO₃ par HCL dilué puis ajuster à 1litre par de l'eau distillée. Le CaCO₃ doit avoir été séché à l'étuve puis refroidi au dessiccateur).

On prélève 10 ml qui seront dosés en même temps que les échantillons. Cette solution contient 20 mé/l de Ca⁺²

Les PE ayant été placé dans des béchers de 50 ml on y ajoute systématiquement 2 ml de tampon (Ca/Mg) et 2 ml de NaOH(Ca) et une pincée d'indicateur, la solution prend une teinte rose (Ca/Mg) et rouge (Ca).

La solution étalon de Ca⁺² et les échantillons ainsi préparés sont alors traités de manière identique. L'E.D.T.A étant placé dans la burette, on verse jusqu'au virage du rose au bleu en maintenant une agitation dans le bécher. On notera Soigneusement le volume :

V1 d'E.D.T.A nécessaire pour faire virer la solution étalon de Ca⁺²

V2 d'E.D.T.A nécessaire pour faire virer les échantillons.

3.4.2 Calcule de normalité de l'E.D.T.A

10 ml à 20 mé/l de calcium ont été dosés par V1 d'E.D.T.A

$$N \dots \text{mé/l} = \frac{20 \text{ mé/l} \times 10 \text{ ml}}{V_1}$$

1- Teneur en calcium et magnésium des échantillons

$$X \text{ mé/l Ca} + \text{Mg} = N \dots \text{mé/l} \times \frac{V_2}{V_1}$$

2-Teneur en calcium des échantillons

$$X \text{ mé/l Ca} = N \dots \text{mé/l} \times \frac{V_2}{V_1}$$

3-Teneur en magnésium des échantillons

$$\text{mé/l Mg} = \text{mé/l de Ma} + \text{Mg} - \text{mé/l de Ca}$$

4. DOSAGE DU CALCIUM, SODIUM ET DU POTASSIUM PAR PHOTOMÉTRIE DE FLAMME

4.1 PRINCIPE

Les ions en solution sont portés, au moyen d'une flamme de température convenable à un niveau énergétique supérieur à la normale (on dit que les atomes sont excités par la flamme). libérés de la flamme ,ils restituent l'énergie acquise en émettant une radiation caractéristique de l'élément ,on pulvérise donc au moyen d'un gicleur , la solution à doser dans une flamme de température déterminée par l'élément que l'on recherche .on sélectionne la radiation attendue au moyen d'un filtre .L'intensité de la radiation est proportionnelle à la concentration de l'élément présent dans la solution .on établit donc une gamme étalon pour chaque élément dosé et l'on s'y réfère pour déterminer une concentration inconnue .Le sodium et le potassium sont dosés à partir de la même solution étalon à des sensibilités différentes du photomètre de flamme .le calcium est dosé par sa gamme étalon propre.

4.2 RÉACTIFS

- SOLUTION MÈRE DE SODIUM ET DE POTASSIUM.

Dissoudre dans l'eau distillée 25.434 g de chlorure de sodium préalablement séché à l'étuve à 100°C pendant 12 heures puis refroidi au dessiccateur.

Dissoudre simultanément 3.823 g de chlorure de potassium préalablement séché à l'étuve à 100°C pendant 12 heures puis refroidi au dessiccateur.

Compléter le tout à 1000 ml par de l'eau distillée.

On obtient une solution contenant 10000 g/l en Na et 2000 mg/l en K⁺.

- SOLUTION ÉTALONS EN Na⁺ et K⁺

Mettre successivement dans des fioles jaugées à 1000 ml :50, 40, 30, 20, 15, 10,5 et 2ml de la solution mère en Na⁺ et K⁺ compléter à 1000ml par de l'eau distillée.

On obtient des solutions étalons contenant respectivement :

500, 400, 300, 200, 100,50et20 mg/l de Na.

- SOLUTION MÈRE DE CALCIUM.

Dissoudre dans l'eau distillée 36.663 g de chlorure de calcium préalablement séché à l'étuve à 100°C pendant 12 heures puis refroidi au dessiccateur.

Compléter à 1000 ml par de l'eau distillée.

- SOLUTION ÉTALONS EN Ca

Mettre successivement dans des fioles jaugées à 1000 ml :50, 40, 30, 20, 15, 10,5 et 2ml de la solution mère en Ca compléter à 1000ml par de l'eau distillée.

On obtient des solutions étalons contenant respectivement :

500, 400, 300, 200, 100,50et20 mg/l de Ca.

4.3 APPAREILLAGE

Photomètre à flamme + servotrace

Reglage :

Sensibilité du photomètre ;

Sensibilité du servotrace ;

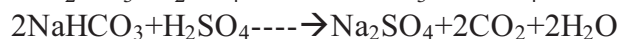
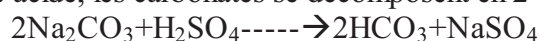
Pression de l'acétylène ;

Pression d'air.

5. Dosage des carbonates et bicarbonates

5.1 Principe du dosage

Les carbonates n'existent qu'à pH >8.3, et les bicarbonates si 4.4 < pH <8.3 il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrique, lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent en 2 étapes



5.2 Réactifs utilisés

- Solution de H₂SO₄ 0.01N.

- Solution tampons pH=4 et pH=8.

ANNEXE III
(Hydrogéologie)

Tab.37 Coordonnées géographiques et les cotes piézométriques des points de mesures :

Points des mesures	Coordonnées géographiques			Z (m)	Profondeurs (m)			Remarques
	x	y			Mars 2010	Jun 2010	Septembre 2010	
1	5°57'45"	32°58'05"		79.09	1.35	1.63	1.82	Puits superficiel
2	6°00'03"	32°59'49"		77.87	0.65	1.05	1.10	Piézo mètre
3	6°01'25"	33°01'05"		78.16	0.72	1.05	0.34	Piézo mètre (dans la palmeraie) Témacine
4	6°03'31"	33°01'44"		73.66	1.65	1.71	1.61	Piézo mètre
5	6°03'32"	33°03'25"		72.87	1.40	1.64	1.50	Piézo mètre
6	6°03'48"	33°04'47"		68.61	2.00	2.07	1.97	Puits superficiel
7	6°05'25"	33°06'09"		65.95	1.33	1.42	1.35	Piézo mètre
8	6°06'14"	33°08'21"		58.58	1.49	1.47	1.41	Piézo mètre
9	6°05'41"	33°09'40"		57.81	1.30	1.53	1.30	Piézo mètre
10	6°04'32"	33°10'52"		56.63	1.60	1.90	1.93	Piézo mètre
11	6°04'58"	33°12'10"		55.75	1.20	1.74	1.43	Puits superficiel
12	6°05'57"	33°12'25"		58.11	0.80	0.65	0.52	Piézo mètre (dans la palmeraie) Megarine
13	6°05'49"	33°13'21"		55.39	1.36	1.50	1.45	Puits superficiel
14	6°06'20"	33°15'01"		52.44	1.50	1.71	1.56	Puits superficiel
15	6°04'56"	33°16'36"		52.09	1.60	1.87	1.61	Puits superficiel
16	6°05'06"	33°17'14"		53.32	2.05	2.20	2.40	Piézo mètre (dans la palmeraie) Sidi Slimane

ANNEXE IV
(Hydrochimie)

Tab.37.a Résultats des analyses physiques des eaux superficielles de la région :(mars 2010)

points de mesures	PH	T (°c)	CE (mS/m)	Eh(mV)	TDS (mg/l)	Res (Ω)	Residu sec (g/l)	DHT (°F)
P1	7,48	20,50	59,14	-28,50	45,48	11,03	66,47	1142,5
P2	7,89	20,30	16,40	-45,40	14,29	34,33	20,94	885
P3	7,44	20,50	16,51	-6,40	13,20	37,46	19,40	831,7
P4	7,38	23,10	119,30	-15,80	106,80	4,63	185,15	4499,6
P5	8,21	23,20	12,34	-44,40	11,19	42,98	12,86	444,2
P6	8,09	24,90	92,11	-50,10	91,14	5,36	179,10	3832,5
P7	8,09	23,70	18,67	-42,80	16,98	29,16	20,55	904,4
P8	7,67	25,10	41,44	-51,20	40,55	12,07	49,43	943,8
P9	7,48	25,10	93,66	-36,60	91,86	5,30	138,33	3754,8
P10	7,28	26,10	106,80	-22,40	102,90	4,60	183,01	2789,9
P11	7,42	21,20	118,00	-38,00	96,85	5,09	183,68	3942,1
P12	7,60	23,30	24,25	-20,90	22,61	21,68	66,85	1148,6
P13	8,14	20,10	28,55	-53,70	22,66	21,76	24,70	957,5
P14	6,64	20,50	127,00	28,20	100,70	4,89	206,54	4098,3
P15	7,65	21,00	105,90	-53,60	85,92	5,82	148,63	4029,2
P16	7,64	21,90	37,57	-24,20	30,31	16,38	37,01	1041,3
P17	7,61	20,10	15,80	-49,10	12,07	41,05	17,72	681,3
P18	8,21	23,10	29,01	-76,50	26,12	18,82	16,20	640,8
P19	8,21	20,60	60,22	-79,60	42,10	10,31	59,88	1091,6

Tab.37.b Résultats des analyses physiques des eaux superficielles de la région :(juin 2010)

points de mesures	PH	T (°c)	CE (mS/m)	Eh(mV)	TDS (mg/l)	Res (Ω)	Residu sec (g/l)	DHT (°F)
P1	7,06	24,90	136,30	-4,10	134,20	3,68	196,33	7558,3
P2	8,18	27,70	24,67	-56,90	25,72	18,66	26,34	977,7
P3	7,75	25,80	14,96	-13,30	15,03	32,87	22,30	946,8
P4	7,14	28,80	190,00	-9,00	207,20	2,39	185,15	4493,3
P5	8,23	27,00	17,94	-46,70	18,36	26,95	20,34	673,8
P6	7,32	27,00	89,16	-12,90	91,52	5,40	196,63	7577,6
P7	8,07	29,20	18,15	-50,20	20,53	23,91	23,68	928,3
P8	8,04	31,60	33,80	-53,50	39,40	12,67	34,72	1060,8
P9	7,53	31,70	87,05	-28,30	108,90	4,58	15,62	3933,3
P10	7,31	26,10	108,70	-12,50	104,70	4,76	188,40	3830,9
P11	7,62	24,80	112,60	-32,80	106,80	4,66	189,89	4006,7
P12	7,66	27,90	26,25	-15,60	29,03	17,07	23,08	969
P13	8,59	24,60	28,32	-84,80	27,93	18,20	30,05	1000,9
P14	6,67	23,30	122,50	26,20	109,60	4,49	200,35	4100
P15	7,85	24,30	101,90	-47,80	95,50	5,19	314,23	3895,8
P16	7,41	26,20	30,08	-27,80	30,70	16,14	30,43	1073
P17	7,94	23,80	17,84	-52,40	16,32	30,32	19,34	7008
P18	8,36	27,30	40,97	-78,20	44,24	11,18	44,68	1199,5
P19	8,24	26,00	68,03	-69,70	69,31	7,15	80,03	1570,5

Tab.37.c Résultats des analyses physiques des eaux superficielles de la région : (Septembre 2010)

points de mesures	PH	T (°c)	CE (mS/m)	Eh(mV)	TDS (mg/l)	Res (Ω)	Residu sec (g/l)	DHT (°F)
P1	5,96	24,00	121,30	31,00	121,50	4,06	142,72	7793
P2	7,90	24,80	17,78	-56,60	17,74	28,08	17,43	867,7
P3	7,06	22,80	19,87	-3,80	17,67	28,07	20,34	907,4
P4	7,16	24,20	118,30	-11,10	114,70	4,31	187,20	4460,5
P5	6,64	25,00	16,79	-8,50	16,13	30,80	20,34	673,3
P6	6,98	25,40	89,21	-10,40	85,21	5,83	114,39	7576,7
P7	7,79	25,40	16,89	-39,30	16,72	29,73	20,20	673
P8	8,06	24,30	28,47	-50,70	27,15	18,26	31,64	941,6
P9	7,70	25,30	126,20	-31,10	126,60	5,50	111,42	7140,2
P10	7,50	25,60	109,10	-16,70	111,90	4,43	171,43	4028,2
P11	7,82	26,20	112,80	-36,90	114,70	4,32	181,33	3974,6
P12	7,49	25,90	25,34	-11,00	25,58	19,29	29,63	966
P13	8,67	25,40	25,24	-84,40	25,28	19,69	28,65	929
P14	6,73	24,80	120,40	30,20	115,10	4,31	198,00	4353,1
P15	7,68	26,20	119,20	-29,60	121,90	4,07	206,65	4083,2
P16	7,85	25,80	31,24	-30,10	31,29	15,80	30,55	1073
P17	8,14	21,70	23,63	-75,50	19,80	25,19	15,67	669,3
P18	8,30	26,30	43,38	-65,20	44,59	11,09	44,27	1122,9
P19	8,61	25,20	77,51	-83,30	70,71	7,01	110,34	1675,4

Tab.38.a Détermination des valeurs relatives des eaux superficielles de la région : (mars 2010)

Points d'eau	Eléments chimiques en (méq/l)						Rapports caractéristiques						ie.b
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁻	hc03 ⁻	r(Na ⁺ +K ⁺)/rCl ⁻	rCa ⁺⁺ / rMg ⁺⁺	rCl ⁻ /rSo ⁻	rCl ⁻ /rhc03 ⁻	rSo ⁻ /rhc03 ⁻		
P1	43,92	182,08	314,86	282,00	296,81	3,15	1,20	0,24	0,95	89,54	94,25	-0,20	
P2	39,92	135,20	160,97	249,63	117,57	5,85	0,72	0,30	2,12	42,68	20,10	0,28	
P3	39,42	125,17	158,17	225,60	118,67	5,60	3,19	0,31	0,19	4,03	21,20	0,24	
P4	141,72	747,97	5057,32	4468,60	978,75	11,05	1,04	0,19	4,57	404,48	88,59	-0,04	
P5	22,95	64,97	61,72	101,55	56,21	5,24	0,66	0,35	1,81	19,36	10,72	0,34	
P6	99,80	657,76	3072,49	2256,93	1253,59	16,55	1,25	0,15	1,80	136,40	75,76	-0,25	
P7	39,97	138,99	158,17	225,66	106,66	5,25	0,70	0,29	2,12	42,99	20,32	0,30	
P8	21,96	164,56	421,65	401,03	234,31	4,80	1,11	0,13	1,71	83,57	48,82	-0,11	
P9	100,75	641,47	2966,05	2290,43	1279,45	17,25	1,25	0,16	1,79	132,81	74,19	-0,25	
P10	4823,48	735,65	593,50	2812,27	3078,34	13,15	0,20	6,56	0,91	213,91	234,14	0,80	
P11	120,51	658,91	3748,21	2775,42	1644,11	19,10	1,32	0,18	1,69	145,34	86,10	-0,32	
P12	62,67	164,73	862,07	530,61	650,81	5,45	1,77	0,38	0,82	97,38	119,44	-0,77	
P13	44,91	144,58	221,65	280,03	143,22	5,70	0,83	0,31	1,96	49,14	25,13	0,17	
P14	145,71	664,83	4854,17	4855,19	371,64	10,30	0,92	0,22	13,06	471,48	36,09	0,08	
P15	107,29	689,17	3112,15	2368,88	1311,76	16,60	1,24	0,16	1,81	142,73	79,04	-0,24	
P16	23,95	181,83	403,09	369,42	224,86	4,90	1,07	0,13	1,64	75,41	45,90	-0,07	
P17	22,46	112,26	146,94	176,25	91,19	6,50	0,81	0,20	1,93	27,12	14,03	0,19	
P18	19,96	106,25	136,96	141,00	94,73	4,90	0,89	0,19	1,49	28,78	19,34	0,11	
P19	56,54	159,55	780,60	507,40	471,95	2,80	1,52	0,35	1,08	181,25	168,59	-0,52	

Tab.38.b Détermination des valeurs relatives des eaux superficielles de la région : (juin 2010)

Points d'eau	Éléments chimiques en (méq/l)							Rapports caractéristiques						
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁻⁻⁻	hco3 ⁻	r(Na ⁺ +K ⁺)/rCl ⁻	rCa ⁺⁺ / rMg ⁺⁺	rCl ⁻ /rSo ⁻⁻⁻	rCl ⁻ /rhcO3 ⁻	rSo ⁻⁻⁻ /rhcO3 ⁻	i.e.b		
P1	94,81	1398,08	2381,93	2256,20	1587,07	8,95	1,05	0,07	1,42	252,14	177,36	-0,05		
P2	43,36	150,09	174,35	260,99	125,29	7,75	0,72	0,29	2,08	33,68	16,17	0,28		
P3	40,27	147,05	151,70	253,12	118,30	4,20	0,66	0,27	2,14	60,28	28,17	0,34		
P4	141,72	748,22	5057,67	4468,60	978,75	11,10	1,04	0,19	4,57	402,66	88,19	-0,04		
P5	22,95	110,28	139,61	163,67	91,34	4,70	0,81	0,21	1,79	34,83	19,44	0,19		
P6	97,16	1399,56	2381,20	2258,74	1609,16	9,35	1,05	0,07	1,40	241,63	172,14	-0,05		
P7	43,91	139,81	162,84	229,04	117,45	8,60	0,73	0,31	1,95	26,64	13,66	0,27		
P8	22,95	186,68	407,09	386,34	226,94	7,70	1,06	0,12	1,70	50,18	29,48	-0,06		
P9	119,76	657,92	3079,38	2276,13	1266,71	7,85	1,25	0,18	1,80	290,01	161,40	-0,25		
P10	100,65	656,60	3578,22	2746,96	1420,24	6,40	1,25	0,15	1,93	429,30	221,96	-0,25		
P11	124,25	667,95	3755,42	2780,83	1656,04	6,35	1,32	0,19	1,68	438,02	260,85	-0,32		
P12	44,96	146,80	172,96	254,00	126,54	7,15	0,72	0,31	2,01	35,53	17,70	0,28		
P13	49,75	148,36	176,48	256,82	127,58	7,40	0,72	0,34	2,01	34,71	17,24	0,28		
P14	145,71	665,16	4863,37	4855,19	358,12	7,40	0,92	0,22	13,56	656,25	48,41	0,08		
P15	100,05	670,01	3089,31	2284,23	1257,88	13,25	1,25	0,15	1,82	172,43	94,95	-0,25		
P16	50,00	162,34	186,24	276,47	133,77	8,40	0,71	0,31	2,07	32,92	15,93	0,29		
P17	23,45	115,14	155,76	197,43	109,26	5,90	0,84	0,20	1,81	33,47	18,52	0,16		
P18	72,75	164,81	266,41	289,28	197,27	8,75	0,91	0,44	1,47	33,07	22,55	0,09		
P19	0,86	225,01	876,50	556,81	592,47	8,15	0,63	0,00	0,94	68,33	72,71	-0,65		

Tab.38.c Détermination des valeurs relatives des eaux superficielles de la région : (Septembre 2010)

Points d'eau	Éléments chimiques en (méq/l)							Rapports caractéristiques						
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁻⁻⁻	hco ₃ ⁻	r(Na ⁺ +K ⁺)/rCl ⁻	rCa ⁺⁺ / rMg ⁺⁺	rCl ⁻ /rSo ⁻⁻⁻	rCl ⁻ /rHco ₃ ⁻	rSo ⁻⁻⁻ /rHco ₃ ⁻	i.e.b		
P1	99,15	1440,10	2384,63	2257,47	1603,14	10,00	1,04	0,07	1,41	225,79	160,35	-0,04		
P2	39,92	135,20	160,97	254,00	104,65	5,30	0,69	0,30	2,43	47,93	19,75	0,31		
P3	39,73	139,81	133,43	243,21	101,12	2,45	0,70	0,31	2,41	99,29	41,28	0,39		
P4	141,82	740,16	5056,48	4468,60	2079,83	9,75	1,25	0,19	2,15	458,41	213,36	-0,25		
P5	22,95	110,20	139,52	163,67	91,36	4,40	0,81	0,21	1,79	37,21	20,77	0,19		
P6	9,68	1399,72	2381,20	2256,00	1603,18	7,75	1,08	0,01	1,41	291,16	206,91	-0,08		
P7	22,95	110,28	139,52	163,67	91,38	4,15	0,81	0,21	1,79	39,45	22,02	0,19		
P8	21,52	164,56	395,92	353,53	214,14	7,40	1,11	0,13	1,65	47,78	28,94	-0,11		
P9	9,68	1399,72	2381,15	2256,00	1582,76	7,10	1,07	0,01	1,43	317,81	222,97	-0,07		
P10	134,93	661,64	3718,51	2779,00	1572,74	7,35	1,29	0,20	1,77	378,17	214,02	-0,29		
P11	119,76	666,06	3530,07	2767,13	1593,63	6,00	1,29	0,18	1,74	461,28	265,66	-0,29		
P12	44,78	146,39	172,40	253,80	125,00	6,95	0,72	0,31	2,03	36,53	17,99	0,28		
P13	44,13	139,72	171,67	256,30	127,47	7,25	0,74	0,32	2,01	35,36	17,59	0,26		
P14	132,64	728,02	5201,56	4660,64	1540,80	9,20	1,14	0,18	3,02	506,70	167,51	-0,14		
P15	109,98	697,16	3112,94	2411,13	1268,21	15,20	1,22	0,16	1,90	158,66	83,45	-0,22		
P16	50,00	162,34	186,24	276,44	133,71	8,55	0,71	0,31	2,07	32,34	15,64	0,29		
P17	19,96	112,37	142,71	185,83	103,63	5,35	0,82	0,18	1,79	34,74	19,37	0,18		
P18	54,89	167,36	198,95	290,22	163,49	8,60	0,75	0,33	1,78	33,75	19,01	0,25		
P19	9,68	234,90	884,49	411,24	549,94	7,70	0,68	0,04	0,75	53,42	71,44	-0,85		

Tab.39.a Classification des eaux superficielles selon Stabler : (compagne de mars)

Points d'eau	Quantités en réaction des éléments majeurs en (%)				Classification de STABLER	Facès chimique	
	r Ca ⁺⁺	r Mg ⁺⁺	r Na ⁺ +K ⁺	r Cl ⁻			r SO ₄ ⁻
P1	8.07	33.45	58.49	48.46	51.00	0.54	r % SO ₄ ⁻ > r % Cl ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ sulfaté Sodique
P2	11.83	40.08	48.09	66.92	31.52	1.57	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P3	12.17	38.64	49.19	64.48	33,92	1,60	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P4	2.37	12.49	85.14	4.32	94.61	1.07	r % SO ₄ ⁻ > r % Cl ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ sulfaté Sodique
P5	15.28	43.25	41.47	62.30	34.49	3.22	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Mg ⁺⁺ > r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Magnésien
P6	2.59	17.07	80.34	63.99	35.54	0.47	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P7	11.82	41.09	47.10	66.85	31.60	1.55	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P8	3.58	26.82	69.60	62.65	36.60	0.75	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P9	2.70	17.19	80.11	63.85	35.67	0.48	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P10	78.35	11.95	9.70	47.64	52.14	0.22	r % SO ₄ ⁻ > r % Cl ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Ca ⁺⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Na ⁺ +K ⁺ sulfaté Calcique
P11	2.64	14.46	82.89	62.53	37.04	0.43	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P12	5.70	14.99	79.30	44.71	54.83	0.46	r % SO ₄ ⁻ > r % Cl ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ sulfaté Sodique
P13	10.88	35.02	54.11	65.28	33.39	1.33	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P14	2,57	11,74	85,69	92,71	7,10	0,20	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P15	2.73	17.51	79.76	64.07	35.48	0.45	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P16	3.90	29.61	66.49	61.65	37.53	0.82	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P17	7.92	39.60	52.48	64.34	33.29	2.37	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P18	7.50	39.91	52.59	58.60	39.37	2.04	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique
P19	5.63	15.89	78.49	51.66	48.05	0.29	r % Cl ⁻ > r % SO ₄ ⁻ > r % HCO ₃ ⁻ r % Na ⁺ +K ⁺ > r % Mg ⁺⁺ > r % Ca ⁺⁺ Chloruré Sodique

Tab.39.b Classification des eaux superficielles selon Stabler :(compagne de juin)

Points d'eau	Quantités en réaction des éléments majeurs en (%)				Classification de STABLER	Facès chimique		
	r Ca ⁺⁺	r Mg ⁺⁺	r Na ⁺ +K ⁺	r Cl ⁻			r SO ₄ ⁻	r HCO ₃ ⁻
P1	2.36	34.78	62.87	58.57	41.20	023	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P2	11.73	40.60	47.68	66.24	31.80	1.97	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P3	11.81	43.13	45.06	67.39	31.49	1.12	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P4	2.37	12.50	85.14	4.32	94.61	1.07	r% SO ₄ ⁻ > r% Cl ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	sulfaté Sodique
P5	8.31	39.94	51.75	63.02	35.17	1.81	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P6	2.42	34.79	62.80	58.26	41.50	0.24	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P7	12.62	40.18	47.20	64.50	33.08	2.42	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P8	3.69	30.01	66.30	62.21	36.55	1.24	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P9	3.09	16.95	79.97	64.10	35.67	0.22	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P10	2.31	15.06	82.63	47.10	52.79	0.11	r% SO ₄ ⁻ > r% Cl ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	sulfaté Sodique
P11	2.72	14.60	82.69	62.59	37.27	0.14	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P12	12.27	40.06	47.67	65.52	32.64	1.84	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P13	13.22	39.42	47.36	65.55	32.56	1.89	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P14	2.55	11.65	85.80	93.00	6.86	0.14	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P15	2.58	17.25	80.18	64.25	35.38	0.37	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P16	12.47	40.48	47.06	66.04	31.95	2.01	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P17	7.90	38.79	53.31	63.16	34.95	1.89	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P18	13.53	30.66	55.80	58.40	39.83	1.77	r% Cl ⁻ > r% SO ₄ ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P19	0,08	20,41	79,51	48,11	51,19	0,70	r% SO ₄ ⁻ > r% Cl ⁻ > r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ > r% Mg ⁺⁺ > r% Ca ⁺⁺	sulfaté Sodique

Tab.39.c Classification des eaux superficielles selon Stabler :(compagne de septembre)

Points d'eau	Quantités en réaction des éléments majeurs en (%)					Classification de STABLER	Facès chimique
	r Ca ⁺⁺	r Mg ⁺⁺	r Na ⁺ +K ⁺	r Cl ⁻	r SO ₄ ⁻		
P1	2,53	36,70	60,77	58,32	41,42	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P2	11,88	40,23	47,89	69,79	28,75	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P3	12,69	44,67	42,63	70,13	29,16	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Mg ⁺⁺ >r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Magnésien
P4	2,39	12,46	85,15	68,14	31,71	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P5	8,42	40,41	51,17	63,09	35,21	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P6	0,26	36,93	62,82	58,34	41,46	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P7	8,42	40,43	51,15	63,15	35,25	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P8	3,70	28,28	68,03	61,48	37,24	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P9	0,26	36,93	62,82	58,66	41,15	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P10	2,99	14,65	82,36	63,75	36,08	r% SO ₄ ⁻ >r% Cl ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P11	2,77	15,43	81,79	63,37	36,49	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P12	12,32	40,26	47,42	65,79	32,40	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P13	12,41	39,30	48,29	65,55	32,60	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P14	2,19	12,01	85,80	75,04	24,81	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P15	2,81	17,78	79,41	65,26	34,33	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P16	12,54	40,73	46,73	66,02	31,93	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P17	7,26	40,86	51,89	63,03	35,15	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P18	13,03	39,73	47,23	62,78	35,36	r% Cl ⁻ >r% SO ₄ ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	Chloruré Sodique
P19	0,86	20,80	78,34	42,44	56,76	r% SO ₄ ⁻ >r% Cl ⁻ >r% HCO ₃ ⁻ r% Na ⁺ +K ⁺ >r% Mg ⁺⁺ >r% Ca ⁺⁺	sulfaté Sodique

Tab.40.a Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation : (mars 2010)

Points d'eau	Eléments chimiques en (méq/l)						Na %	SAR
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁻	hco3 ⁻		
P1	43,92	182,08	314,86	282,00	296,81	3,15	57,28	29,14
P2	39,92	135,20	160,97	249,63	117,57	5,85	47,36	17,01
P3	39,42	125,17	158,17	225,60	118,67	5,60	48,50	17,25
P4	141,72	747,97	5057,32	4468,60	978,75	11,05	84,08	237,07
P5	22,95	64,97	61,72	101,55	56,21	5,24	40,68	9,18
P6	99,80	657,76	3072,49	2256,93	1253,59	16,55	79,35	156,16
P7	39,97	138,99	158,17	225,66	106,66	5,25	46,43	16,55
P8	21,96	164,56	421,65	401,03	234,31	4,80	68,07	42,87
P9	100,75	641,47	2966,05	2290,43	1279,45	17,25	79,09	152,24
P10	4823,48	735,65	593,50	2812,27	3078,34	13,15	9,56	11,16
P11	120,51	658,91	3748,21	2775,42	1644,11	19,10	81,88	187,80
P12	62,67	164,73	862,07	530,61	650,81	5,45	77,91	79,60
P13	44,91	144,58	221,65	280,03	143,22	5,70	53,30	22,51
P14	145,71	664,83	4854,17	4855,19	371,64	10,30	84,82	238,66
P15	107,29	689,17	3112,15	2368,88	1311,76	16,60	78,65	154,04
P16	23,95	181,83	403,09	369,42	224,86	4,90	64,98	39,01
P17	22,46	112,26	146,94	176,25	91,19	6,50	51,25	17,59
P18	19,96	106,25	136,96	141,00	94,73	4,90	50,39	16,69
P19	56,54	159,55	780,60	507,40	471,95	2,80	77,22	74,04

Tab.40.b Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation : (juin 2010)

Points d'eau	Eléments chimiques en (méq/l)						Na %	SAR
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁻	hco3 ⁻		
P1	94,81	1398,08	2381,93	2256,20	1587,07	8,95	56,11	79,58
P2	43,36	150,09	174,35	260,99	125,29	7,75	46,66	17,45
P3	40,27	147,05	151,70	253,12	118,30	4,20	43,93	15,39
P4	141,72	748,22	5057,67	4468,60	978,75	11,10	84,07	237,05
P5	22,95	110,28	139,61	163,67	91,34	4,70	49,43	16,52
P6	97,16	1399,56	2381,20	2258,74	1609,16	9,35	56,06	79,47
P7	43,91	139,81	162,84	229,04	117,45	8,60	46,40	16,78
P8	22,95	186,68	407,09	386,34	226,94	7,70	64,78	39,02
P9	119,76	657,92	3079,38	2276,13	1266,71	7,85	78,92	154,36
P10	100,65	656,60	3578,22	2746,96	1420,24	6,40	81,71	182,05
P11	124,25	667,95	3755,42	2780,83	1656,04	6,35	81,68	186,64
P12	44,96	146,80	172,96	254,00	126,54	7,15	46,76	17,42
P13	49,75	148,36	176,48	256,82	127,58	7,40	46,43	17,47
P14	145,71	665,16	4863,37	4855,19	358,12	7,40	84,83	239,04
P15	100,05	670,01	3089,31	2284,23	1257,88	13,25	79,10	155,58
P16	50,00	162,34	186,24	276,47	133,77	8,40	45,83	17,73
P17	23,45	115,14	155,76	197,43	109,26	5,90	51,70	18,28
P18	72,75	164,81	266,41	289,28	197,27	8,75	43,34	20,04
P19	0,86	225,01	876,50	556,81	592,47	8,15	78,37	81,30

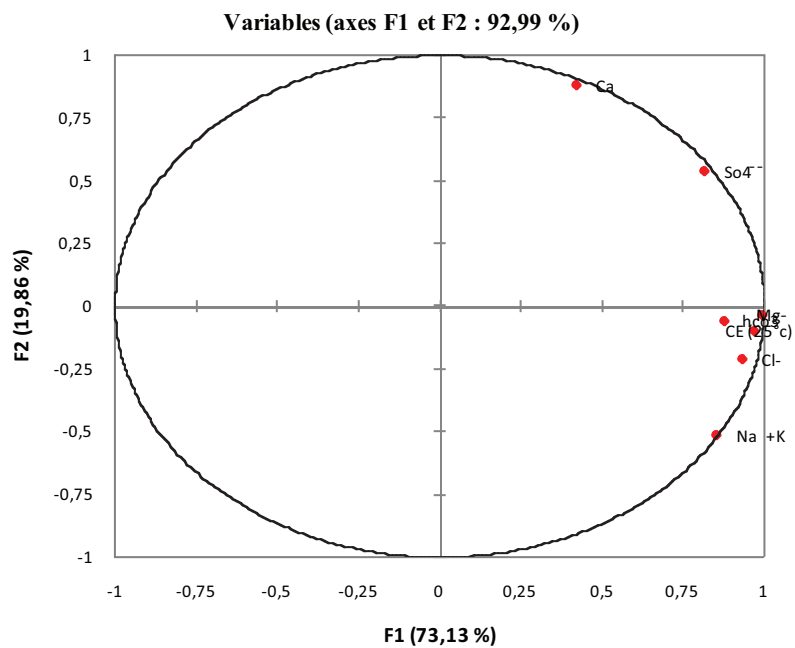
Tab.40.c Estimation des paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation : (Septembre 2010)

Points d'eau	Eléments chimiques en (méq/l)						Na %	SAR
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na ⁺ +K ⁺)	Cl ⁻	So ⁴⁻	hco3 ⁻		
P1	99,15	1440,10	2384,63	2257,47	1603,14	10,00	55,43	78,40
P2	39,92	135,20	160,97	254,00	104,65	5,30	47,36	17,01
P3	39,73	139,81	133,43	243,21	101,12	2,45	41,82	13,81
P4	141,82	740,16	5056,48	4468,60	2079,83	9,75	84,20	238,11
P5	22,95	110,20	139,52	163,67	91,36	4,40	49,43	16,52
P6	9,68	1399,72	2381,20	2256,00	1603,18	7,75	57,35	81,89
P7	22,95	110,28	139,52	163,67	91,38	4,15	49,42	16,51
P8	21,52	164,56	395,92	353,53	214,14	7,40	66,97	40,41
P9	9,68	1399,72	2381,15	2256,00	1582,76	7,10	57,35	81,89
P10	134,93	661,64	3718,51	2779,00	1572,74	7,35	81,45	184,27
P11	119,76	666,06	3530,07	2767,13	1593,63	6,00	80,84	176,02
P12	44,78	146,39	172,40	253,80	125,00	6,95	46,76	17,39
P13	44,13	139,72	171,67	256,30	127,47	7,25	47,64	17,66
P14	132,64	728,02	5201,56	4660,64	1540,80	9,20	84,82	247,87
P15	109,98	697,16	3112,94	2411,13	1268,21	15,20	78,43	153,04
P16	50,00	162,34	186,24	276,44	133,71	8,55	45,83	17,73
P17	19,96	112,37	142,71	185,83	103,63	5,35	50,77	17,17
P18	54,89	167,36	198,95	290,22	163,49	8,60	46,16	18,44
P19	9,68	234,90	884,49	411,24	549,94	7,70	77,20	78,82

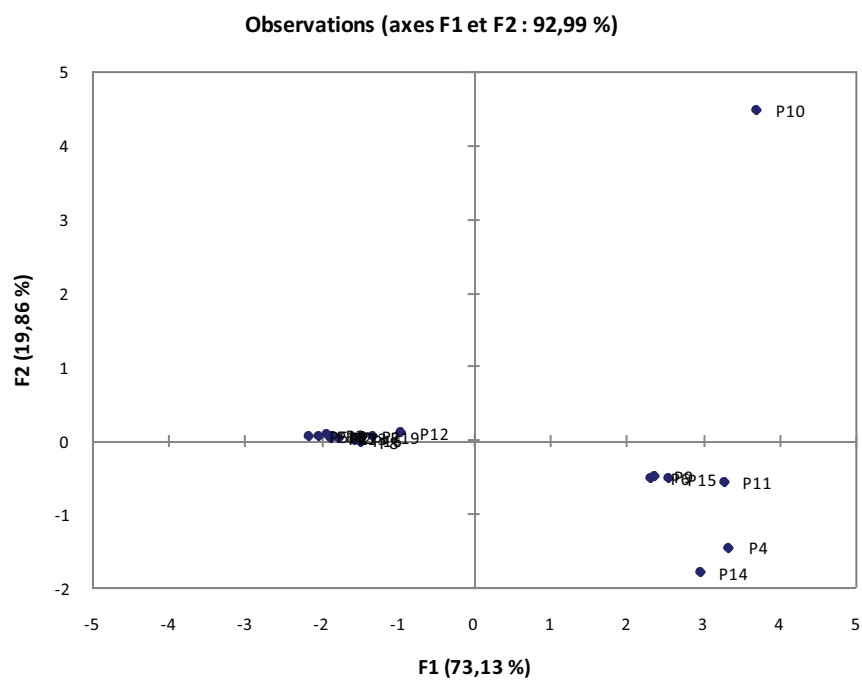
Application de l'ACP sur la campagne de mars 2010 :

Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de mars 2010.

Variables	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	So ⁴⁻	hco3 ⁻	Na ⁺ +K ⁺	CE (25°C)
Ca ⁺⁺	1						
Mg ⁺⁺	0,385	1					
Cl ⁻	0,269	0,922	1				
So ⁴⁻	0,773	0,791	0,586	1			
hco3 ⁻	0,234	0,884	0,704	0,740	1		
Na ⁺ +K ⁺	-0,080	0,856	0,925	0,405	0,730	1	
CE (25°C)	0,336	0,955	0,945	0,734	0,774	0,884	1



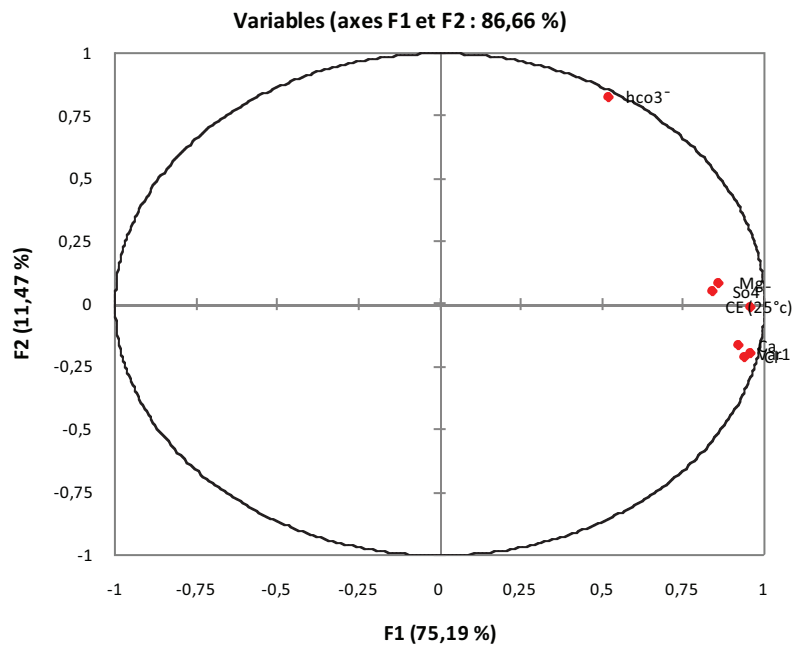
Espace des variables de la campagne de mars 2010.



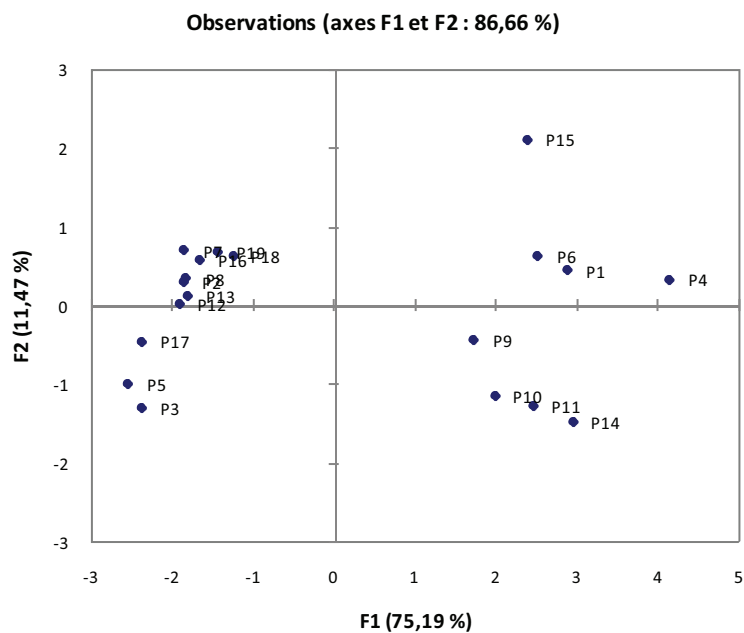
Espace des individus de la campagne de mars 2010.

Application de l'ACP sur la campagne de juin 2010 :
Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de juin 2010.

Variabes	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	So ₄ ⁻	hco ₃ ⁻	Var1	CE (25°C)
Ca ⁺⁺	1						
Mg ⁺⁺	0,689	1					
Cl ⁻	0,913	0,695	1				
So ₄ ⁻	0,671	0,871	0,647	1			
hco ₃ ⁻	0,391	0,416	0,363	0,374	1		
Var1	0,939	0,707	0,985	0,724	0,374	1	
CE (25°C)	0,836	0,776	0,928	0,765	0,495	0,926	1



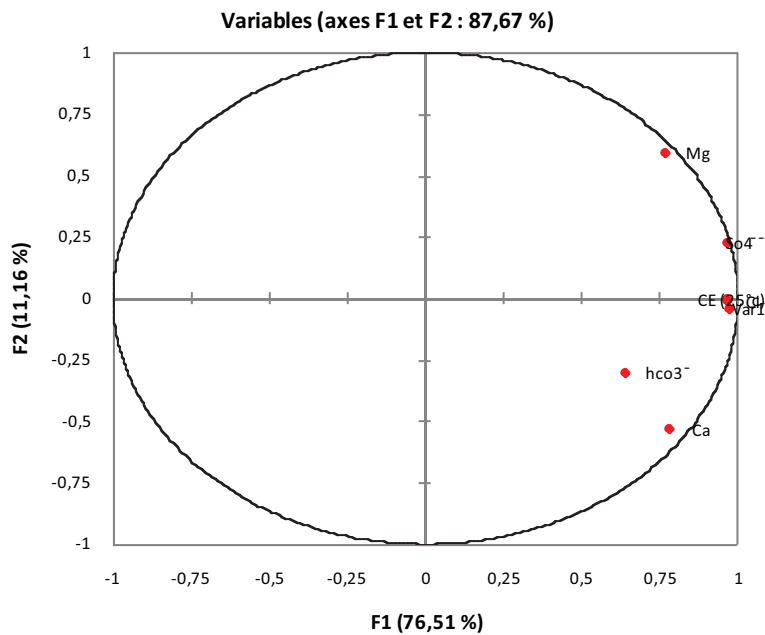
Espace des variables de la campagne de juin 2010.



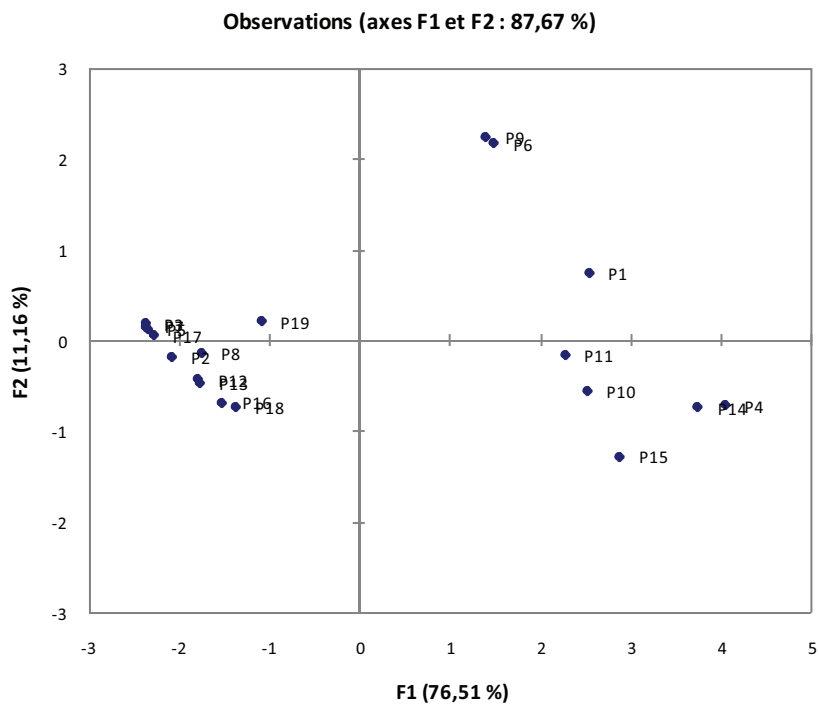
Espace des individus de la campagne de juin 2010.

Application de l'ACP sur la campagne de septembre 2010 :
Matrice de corrélation entre les variables de la campagne de septembre 2010.

Variables	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	So ₄ ⁻	hco ₃ ⁻	Var1	CE (25°C)
Ca ⁺⁺	1						
Mg ⁺⁺	0,287	1					
Cl ⁻	0,777	0,687	1				
So ₄ ⁻	0,648	0,857	0,931	1			
hco ₃ ⁻	0,500	0,425	0,501	0,503	1		
Var1	0,806	0,677	0,994	0,934	0,505	1	
CE (25°C)	0,735	0,718	0,915	0,938	0,636	0,923	1



Espace des variables de la campagne de septembre 2010.



Espace des individus de la campagne de septembre 2010

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : MÉCANISMES DE SALINISATION

I.1.	CYCLE DE L'EAU ET MINÉRALISATION.....	03
I.1.1.	Définition.....	03
I.1.2.	Acquisition de la minéralisation au cours du cycle de l'eau.....	04
I.1.2.1.	L'évaporation.....	04
I.1.2.2.	La condensation et la précipitation.....	04
I.1.2.3.	Le ruissellement et l'infiltration.....	04
I.1.2.4.	L'influence du réservoir géologique.....	05
I.2.	TERMINOLOGIE DES EAUX SALINES.....	05
I.3.	MÉCANISMES DE SALINISATION DES SYSTÈMES HYDROLOGIQUES.....	07
I.3.1.	Sources de salinité dans le cycle de l'eau.....	07
I.3.2.	L'apport des eaux météoriques.....	07
I.3.3.	Salinisation des sols.....	08
I.3.4.	La salinisation des cours d'eau.....	09
I.3.5.	La salinisation des lacs et des zones humides.....	09
I.3.6.	L'intrusion marine.....	10
I.3.7.	Mélanges avec des saumures anciennes.....	11
I.3.8.	La dissolution des formations évaporitiques.....	12
I.3.9.	Les fluides salins hydrothermaux.....	12
I.3.10.	Sources anthropiques de sels.....	13

Deuxième partie : Matériels et méthodes

Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE

II.1.	CADRE PHYSIQUE.....	14
II.1.1.	14
II.1.2.	Situation géographique et administrative de la région de Touggourt.....	16
II.1.3.	Climat et végétation.....	16
II.1.4.	Activité économique.....	17
II.1.5.	Géomorphologie.....	18
II.2.	Estimations des débits.....	18
II.2.1.	ÉTUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....	18
II.2.2.	Les précipitations.....	19
II.2.3.	Humidité relative de l'air.....	19
II.2.4.	Les vents.....	20
II.2.5.	Durée d'insolation.....	20
II.2.6.	La Température.....	20
II.3.	Evaporation.....	21
II.3.1.	CARATÉRISATION DU CLIMAT.....	21
II.3.2.	Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	22
II.3.3.	Le climagramme d'Emberger.....	23
II.3.4.	Indice d'Aridité de De Martonne.....	23

II.4.	Méthode d'Euverte	24
II.4.1.	ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION.....	24
II.4.1.1.	Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	24
II.1.1.2.	Formule de Turc.....	25
II.4.2.	Formule de Coutagne.....	25
II.4.2.1	Estimation de l'évaporation potentielle (ETP)	25
II.4.2.2.	Formule de Turc.....	26
II.4.2.3.	Formule de Serra.....	27
II.4.2.4.	Formule de Thornthwaite.....	28
II.5.	Discussion des résultats.....	28
II.6.	LE BILAN HYDROLOGIQUE.....	29
II.6.1.	GÉOLOGIE.....	29
II.6.2.	Cadre géologique régional du bas Sahara.....	30
II.6.2.1.	Cadre géologique local.....	30
II.6.2.2.	Introduction.....	30
II.6.2.2.1	Le Mésozoïque	30
II.6.2.2.2.	Le Crétacé.....	30
II.6.2.2.3.	Le Néocomien.....	31
II.6.2.2.4.	Le Barrémien.....	31
II.6.2.2.5.	L'Aptien.....	31
II.6.2.2.6.	L'Albien.....	31
II.6. 2.2.7.	Le Vraconien.....	33
II.6. 2.2.8.	Le Cénomanién.....	33
II.6.2.2.9.	Le Turonien.....	33
II.6.3.	Le Sénonien.....	35
II.6.3.1.	Le Cénozoïque.....	35
II.6.3.2.	L'Eocène.....	35
II.6.4.	Le Mio-Pliocène.....	36
II.7.	Le Quaternaire.....	36
II.7.1.	TECTONIQUE GÉNÉRALE.....	37
II.8.		37
II.9.	Néotectonique.....	38
II.9.1.		38
II.9.2.	PALÉOGÉOGRAPHIE.....	39
II.9.2.1.	HYDROGÉOLOGIE.....	39
II.9.2.2.	Introduction.....	41
IV.1.1.		43
IV.1.2.	Hydrogéologie régionale.....	43
IV.1.2.1.	Le Continental Intercalaire (CI)	43
IV.1.2.2.	Le Complexe Terminal (CT)	43
IV.1.2.3.	HYDROGÉOLOGIE LOCALE.....	43
IV.1.3.	La nappe phréatique.....	44
IV.1.1.	Les Nappes du Complexe Terminal.....	44
II.10.	La première nappe des sables	45
	La deuxième nappe du sable	
	La nappe du Sénonien-Eocène.....	
	Nappe du Continental Intercalaire dans le secteur de l'oued Righ Sud	
	CONCLUSION.....	

Chapitre III : MÉTHODOLOGIES

III.1.	L'INSTALLATION DES PIÉZOMÈTRES.....	46
III.1.1.	Méthodologie du travail.....	46
III.1.1.1.	Inventaire des puits existants.....	46
III.1.1.2.	Choix de localisation des piézomètres.....	46
III.1.1.3.	Choix du diamètre de forage.....	47
III.1.1.4.	Installation de l'ouvrage.....	47
III.1.1.4.1.	Tubages.....	47
III.1.1.4.2.	Crépine.....	48
III.1.1.4.3.	Massif filtrant	48
III.1.1.4.4.	Bouchon	48
III.1.1.4.5.	Fiche technique de piézomètre.....	48
III.1.	Mesures après l'installation du piézomètre.....	48
III.1.	L'abandon de piézomètre.....	50
III.1.	Matériel utilisé.....	50
III.1.	Tarière.....	50
III.2.	LA BATHYMÉTRIE	49
III.2.1.	Introduction.....	50
III.2.2.	Préparation de la bathymétrie.....	50
III.2.2.1.	Délimitation du lac.....	50
III.2.2.2.	Division du lac en sections.....	50
III.2.2.3.	Détermination des points de mesure.....	50
III.2.2.4.	Matériels utilisés.....	50
III.2.3.	Réalisation de la bathymétrie.....	50
III.3.	ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSE D'EAU.....	50
III.3.1.	Prélèvement et conservation d'échantillons d'eau.....	50
III.3.2.	Moyens et méthodes d'analyse.....	52
III.3.2.1.	Mesures <i>in situ</i>	52
III.3.2.2.	Analyses aux laboratoires.....	52
III.4.	APPAREILLAGE	53
III.4.1.	PHOTOMÈTRE DE FLAMME modèle 410	53
III.4.2.	SPECTROMÈTRE DR 2000.....	53

Troisième partie : Résultats et discussions

Chapitre IV : DYNAMIQUE DES EAUX DES SYSTEMES LACUSTRES		
IV	SYSTEME LACUSTRE	54
IV.1.	LA NAPPE PHREATIQUE	54
IV.1.2	ÉTUDE PIÉZOMETRIQUE.....	54
IV.1.2.1.	Evolution de la piézométrie.....	54
IV.1.2.1.1	Carte piézométrique mars 2010.....	55
IV.1.2.1.2	Carte piézométrique juin 2010.....	56
IV.1.2.1.3	Carte piézométrique septembre 2010.....	57
IV.1.2.2.	Fluctuations de la nappe	58
IV.2	CANAL OUED RIGH.....	59
IV.2.1.	Introduction.....	59
IV.2.2	Aperçu sur l'historique du canal d'Oued Righ.....	59
IV.2.3	L'impact du canal d'Oued Righ sur la région.....	59
IV.2.4	Evolution du débit du canal au niveau des stations hydrométriques.....	59
IV.3	LES LACS.....	61
IV.3.1	Definition.....	61

IV.3.2	Liste des lacs de la région d'étude	61
IV.3.3	CARACTERISTIQUES DES LACS ETUDIÉS	62
IV.3.3.1	Lac de Temacine (Elbhour)	62
IV.3.3.2	Lac de Megarine.....	65
IV.3.3.3	Lac de Sidi Slimane.....	71
IV.4.	LES CONTRAINTES RENCONTRES QUI MENACENT LA STABILITE DES SYSTEMES LACUSTRES.....	71
IV.4.1.	Les problèmes qui affectent le canal.....	71
IV.4.2.	Les problèmes qui affectent les lacs.....	71
IV.4.2.1.	Le climat.....	71
IV.4.2.2.	Anthropiques.....	71
IV.4.2.3.	L'agriculture.....	71
IV.4.2.4.	La pollution.....	72
IV.4.2.5.	Gestion des déchets.....	72
IV.4.2.6.	Régression la superficie des zones humides.....	73
IV.4.2.7.	Le feu.....	74
IV.5	Relation entre la nappe phréatique et le Canal de l'Oued Righ	75
IV.6	Relation entre la nappe phréatique et les lacs de la région	75
IV.7	CONCLUSION.....	75

Chapitre V : QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DES SYSTEMES LACUSTRES

V.1	INTRODUCTION.....	76
V.2	LES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE	76
V.2.1.	DESCREPTION SOMMAIRE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	76
V.2.1.1.	Paramètres physiques.....	76
V.2.1.1.1	Température (T°).....	78
V.2.1.1.2	Potentiel Hydrogène (pH).....	78
V.2.1.1.3	Conductivité électrique (CE)	78
V.2.1.2	Paramètres chimiques.....	78
V.2.1.2.1	Résidu sec.....	78
V.2.1.2.2	La dureté totale (degré hydrométrique totale) DHT	78
V.2.1.2.3	Les éléments majeurs.....	79
V.2.1.2.3.	Le calcium Ca ²⁺	79
V.2.1.2.3	Le magnésium Mg ²⁺	80
V.2.1.2.3	Le sodium (Na ⁺).....	82
V.2.1.2.3	le potassium (K ⁺)	83
V.2.1.2.3	Les chlorures (Cl ⁻)	85
V.2.1.2.3	Les sulfates (SO ₄ ²⁻).....	86
V.2.1.2.3	Les bicarbonates HCO ₃ ⁻	88
V.2.2	ÉTUDES DES VALEURS RELATIVES.....	89
V.3.1.	Rapports caractéristiques	89
V.3.1.1.	Rapports rCa ²⁺ /rMg ²⁺	89
V.3.1.2.	Rapports rSO ₄ ²⁻ / rCl	89
V.3.1.3.	Rapports r(Na ⁺ +K ⁺)/rCl.....	90
V.2.2.	Indice d'échange de base (i e b).....	90
V.2.3	CLASSIFICATION DES EAUX	91
V.4.1	Classification de Stabler	91
V.4.2	Représentation graphique des faciès hydrochimiques.....	91

V.4.2.1.	Diagramme de PIPER.....	91
V.4.2.1.1	Période de mars.....	92
V.4.2.1.2	Période de juin.....	93
V.4.2.1.3	Période de septembre.....	94
V.4.2.2.	Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	94
V.4.2.2.1	Période de mars.....	98
V.4.2.2.2	Période de juin.....	98
V.4.2.2.3	Période de septembre.....	98
V.2.4	POTABILITÉ DES EAUX (NORME ET QUALITE).....	99
V.2.5	APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION.....	99
V.6.1.	Caractérisation des eaux à l'irrigation.....	99
V.6.2.	Classification des eaux par la méthode de Richards.....	99
V.3	LES EAUX DES LACS ETUDIÉS	
V.3.1.	CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES LES EAUX DES LACS ETUDIÉS.....	103
V.3.1.1	Paramètres physiques.....	103
V.3.1.1.1	Température (T°).....	103
V.3.1.1.2	Potentiel Hydrogène (pH).....	103
V.3.1.1.3	Conductivité électrique (CE)	103
V.3.1.2	Paramètres chimiques.....	105
V.3.1.2.1	Résidu sec.....	105
V.3.1.2.2	La dureté totale (degré hydrométrique totale) DHT	105
V.3.1.2.3	Les éléments majeurs.....	105
V.3.1.2.4	Le calcium Ca ²⁺	105
V.3.1.2.5	Le magnésium Mg ²⁺	106
V.3.1.2.6	Le sodium (Na ⁺).....	106
V.3.1.2.7	le potassium (K ⁺)	107
V.3.1.2.8	Les chlorures (Cl ⁻)	108
V.3.1.2.9	Les sulfates (SO ₄ ²⁻).....	108
V.3.1.2.9	Les bicarbonates HCO ₃ ⁻	109
V.3.3.	ÉTUDES DES VALEURS RELATIVES.....	110
V.3.3.1.	Rapports caractéristiques	100
V.3.3.1.1	Rapports rCa ²⁺ /rMg ²⁺	110
V.3.3.1.2	Rapports rSO ₄ ²⁻ / rCl	110
V.3.3.1.3	Rapports r(Na ⁺ +K ⁺)/rCl.....	110
V.3.3.1.4	Indice d'échange de base (ie b).....	110
V.3.4	CLASSIFICATION DES EAUX	111
V.3.4.1	Classification de Stabler	111
V.3.4.2	Représentation graphique des faciès hydrochimiques.....	111
V.4.2.1	Diagramme de PIPER.....	111
V.4.2.2.1	Période de mars.....	111
V.4.2.2.2	Période de juin.....	112
V.4.2.2.2	Période de septembre.....	111
V.4.2.2	Diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	112
V.4.2.2.1	Période de mars.....	111
V.4.2.2.2	Période de juin.....	111
V.4.2.2.3	Période de septembre.....	116
V.3.5	POTABILITÉ DES EAUX (NORME ET QUALITE).....	116
V.3.6	APTITUDE DES EAUX A L'IRRIGATION.....	111
V.3.6.1	Caractérisation des eaux à l'irrigation.....	116

V.3.6.2	Classification des eaux par la méthode de Richards.....	117
V.4	ANALYSE STATISTIQUE (APPLICATION DE L'ACP).....	119
V.4.1	Introduction.....	119
V.4.2	L'ACP globale.....	120
V.4.2.1	Matrice de corrélation.....	120
V.4.2.2	Analyse de l'espace des variables.....	120
V.4.2.3	Analyse de l'espace des individus.....	120
V.4	CONCLUSION.....	122
	CONCLUSION GENERALE et RECOMMANDATIONS.....	123
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES1	
	ANNEXES	