

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach -Alger
Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de magister en Science Agronomique
Département : Génie rural
Spécialité : Hydraulique agricole

***Contribution à la régionalisation
stochastique des paramètres physico-
chimiques des eaux souterraines dans le
cadre d'un SIG***

-Application à la région de Djelfa-

Présenté par : GHIBECHE Ismail

- Promoteur : M. AZOUZI B.
- Co-promoteur : M. HARTANI T
2010-2011

Devant le Jury: - Président : M. AIDAOUI A. - Examineurs : M. MERABET B. M. SEMAR A.

Table des matières

| | |
|---|----|
| DEDICACE . . | 6 |
| REMERCIEMENTS . . | 7 |
| ص خ لم . . | 8 |
| Résumé: . . | 9 |
| Summary: . . | 10 |
| Liste des abréviations . . | 11 |
| INTRODUCTION GENERALE . . | 12 |
| Chapitre I : Paramètres physico-chimiques des eaux . . | 14 |
| 1. Etude des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau . . | 14 |
| 1.1. Paramètres physiques . . | 14 |
| 1.2. Paramètres chimiques . . | 15 |
| 2. Eaux potables . . | 17 |
| 2.1. Caractéristiques physiques . . | 17 |
| 2.2. Caractéristiques chimiques . . | 18 |
| 2.3. Caractéristique organoleptique . . | 19 |
| 2.4. Normes de la qualité de l'eau de consommation . . | 20 |
| 3. Utilisation d'eau pour l'irrigation . . | 22 |
| 3.1. Qualité des eaux d'irrigation . . | 22 |
| 3.2. Classification des eaux d'irrigations . . | 23 |
| Chapitre II : Système d'Information Géographique . . | 27 |
| 1. Historique du Système d'information géographique (SIG) . . | 27 |
| 2. Définition et finalités . . | 27 |
| 3. Principales fonctionnalités d'un SIG . . | 28 |
| 3.1. Abstraction . . | 28 |
| 3.2. Acquisition . . | 28 |
| 3.3. Archivage . . | 28 |
| 3.4. Analyse . . | 29 |
| 3.5. Affichage . . | 29 |
| 4. Intérêts du SIG . . | 29 |
| 5. Mode de représentation des données géographiques . . | 30 |
| 5.1. Mode raster (Matriciel) . . | 30 |
| 5.2. Mode vecteur . . | 30 |
| 5.3. Complémentarité des formats raster et vecteur . . | 31 |
| 5.4. Avantages et inconvénients pour les deux modèles . . | 32 |
| Chapitre III : Présentation de la zone d'étude . . | 34 |
| 1. Aperçu géographique . . | 34 |
| 1.1. Situation de la wilaya . . | 34 |
| 1.2. Relief . . | 35 |
| 1.3. Végétation . . | 36 |
| 1.4. Sols . . | 36 |

| | |
|--|----|
| 1.5. Géologie . . . | 37 |
| 1.6. Hydrologie . . . | 39 |
| 1.7. Hydrogéologie . . . | 39 |
| 2. Climat . . . | 43 |
| 2.1. Pluviométrie . . . | 43 |
| 2.2. Températures . . . | 43 |
| 2.3. Diagramme ombrothermique . . . | 44 |
| 3. Potentialités en eaux reconnues . . . | 45 |
| 4. Alimentation en eau potable . . . | 45 |
| 5. Besoin en eau d'irrigation . . . | 45 |
| Chapitre IV : Matériels et méthodes . . . | 47 |
| 1. Collecte et mise en forme des données . . . | 47 |
| 2. Structuration et traitement des données . . . | 47 |
| 2.1. Organisation des données dans l'Excel . . . | 47 |
| 2.2. Création d'une banque de données . . . | 48 |
| 3. Présentation et description statistique des données . . . | 48 |
| 3.1. Paramètres physico-chimiques . . . | 48 |
| 4. Discussion . . . | 49 |
| 5. Présentation des logiciels utilisés . . . | 49 |
| 5.1. Présentation du logiciel surfer (7.0) . . . | 49 |
| 5.2. Présentation du logiciel Mapinfo (6.5) . . . | 50 |
| Chapitre V : Approche géostatistique . . . | 51 |
| 1. Interpolation . . . | 51 |
| 2. Géostatistique . . . | 51 |
| 2.1. Principales étapes d'une étude géostatistique . . . | 51 |
| 2.2. Approche stochastique . . . | 52 |
| 2.3. Variable et fonction aléatoire . . . | 52 |
| 2.4. Variable régionalisée . . . | 52 |
| 2.5. Hypothèse de stationnarité . . . | 53 |
| 2.6. Variogramme . . . | 54 |
| 2.7. Krigeage . . . | 60 |
| Chapitre VI : Résultats et interprétations . . . | 63 |
| 1. Variogramme . . . | 63 |
| 1.2. Variogrammes des paramètres physiques . . . | 63 |
| 1.3. Variogrammes des paramètres chimiques . . . | 65 |
| 1.4. Variogramme du SAR . . . | 72 |
| 2. Cartographie . . . | 72 |
| 2.1. Cartographie des paramètres physiques . . . | 73 |
| 2.2. Cartographie des paramètres chimiques . . . | 78 |
| 3. Classification et potabilité des eaux . . . | 87 |
| 3.1. Classification des eaux . . . | 87 |
| 3.2. Potabilité des eaux . . . | 89 |

| | |
|--|------------|
| CONCLUSION GENERALE . . | 92 |
| Références bibliographiques . . | 94 |
| Annexe . . | 101 |

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A ma mère mon père mes sœurs et mes frères

A toutes les familles GHIBECHE et REBIH

A tous mes amis

A toute ma promotion de l'hydraulique agricole

A mes enseignants de ma spécialité de l'hydraulique agricole et tous les enseignants de l'ENSA

A tous ceux que j'aime

Ismail

REMERCIEMENTS

Avant de présenter ce travail, je tiens à remercier dieu le tout puissant dont j'ai ressenti sa présence tout au long de mon travail.

Au terme de ce travail, c'est pour moi un agréable devoir d'exprimer ici ma sincère reconnaissance et ma gratitude à tous ceux qui m'ont aidé et accepté de juger ce travail :

Mon promoteur Monsieur AZOUZI B. qui a bien voulu orienter cette thèse par ses grandes forces et ses conseils.

Mon co-promoteur M.HARTANI T. *pour ses conseils, je lui exprime mon profond respect.*

- Président M. AIDAOUI A.
- Les membres M. MERABET B.

M. SEMAR A.

Tous les enseignants de l'hydraulique agricole de l'INA

Je remercie tous les membres de l'équipe d'A.N.R.H (Djelfa, Alger) qui m'ont apporté leur aide précieuse.

M.KASSI, Directeur régional de l'A.N.R.H, Djelfa.

M. AMAR, bureau d'hydrogéologie de l'A.N.R.H, Djelfa.

M. AYAD, chef de services de l'A.N.R.H, Alger.

M. BOUCHOUL, bureau d'hydrogéologie de l'A.N.R.H, Alger.

M. DERRADJI, chef de services dans le D.P.A.T. Djelfa.

Sans oublier M. BELLAHRACH B. M. BELHOUDJEB F.

Tous mes amis et collègues.

ص خ لم

الهدف من هذه الدراسة هو مدخل إلى الأكلة العشوائية في إطار نظام المعلوماتية الجغرافية بالاعتماد على الجيوإحصاء و استخدام الفارغرافي و الكريجاج كداة استكمال من أجل دراسة البنية الفضائية للعناصر الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية لمنطقة الجلفة التي نعرف بنشاطها الفلحي الرعوي و بلانلي أخذ فكرة عن نوعية هذه المياه. لاحظنا أن معظم المنحنيات ذات بنية أسية مع انبساط من 8,5 إلى 31 كم. بعد الأكلة لاحظنا أن المنطقة الأكثر تفرقا بلزيادة المفردة للعناصر المدروسة تقع في الأجزاء الشمالية الشرقية، الوسطى و الجنوبية الشرقية و كلها منطلق معروفة بالنشاط الفلحي و الأهم بنيتها الجيولوجية الملحية. النتائج المحصل عليها من الدراسة الفيزيوكيميائية أظهرت أن غالبية نقاط المياه المدروسة تنقسم بهيمنة كيميائية للكوريد و كيرينك الكالسيوم والمغنيزيوم. إجمالاً فإن النتائج المحصل عليها من هذه الأكلة أوضحت أن نوعية المياه الوفية في معظم منطقة الدراسة صالحة السقي و أن للمنطقة الشمالية الغربية و بعض الجيوب في الوسط صالحة للشرب.

الكلمات المفتاحية: الأكلة العشوائية, نظام المعلوماتية الجغرافية, الجيوإحصاء, الفارغرافي و الكريجاج

Résumé:

L'objectif de cette étude est initiation à la régionalisation stochastique dans le cadre d'un SIG sur la base de la géostatistique en utilisant la variographie et le krigeage comme outil d'interpolation pour étudier la structure spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Djelfa qui est caractérisée par sa vocation agro-pastorale, afin d'avoir une idée sur la qualité de l'eau. On a remarqué une dominance structurale de la forme exponentielle dans sa majorité avec un palier de 8,5 à 31 km. En définitif, on a constaté que la zone la plus affectée par une elevation excessive de l'ensemble des valeurs des éléments que nous avons étudié sont localisés dans les parties nord-est, le centre et sud-est caractérisées par des activités agricoles et le plus important leurs structures géologiques salines. Les résultats obtenus de l'étude physico-chimique ont permet de mettre en évidence que la quasi-totalité des point d'eaux étudiés sont caractérisés par la prédominance des faciès chimiques chloruré et sulfaté calcique et magnésiennes.

Dans l'ensemble, les résultats escomptés de cette régionalisation ont montré que la qualité des eaux souterraines dans la majorité de la zone d'étude est convenable à l'irrigation et que la zone nord-ouest et quelques poches dans le centre est dans sa majeure partie caractérisée par des eaux potables.

Mots clés: Régionalisation stochastique, SIG, géostatistique, variographie, krigeage.

Summary:

The objective of this study is initiation with stochastic regionalization within the framework of a SIG on the basis of geostatistic by using the variography and the kriging as tool for interpolation to study the space structure of the physicochemical parameters of subsoil waters of the area of Djelfa which is characterized by its agro-agro-pastoral vocation, in order to have an idea on the quality of water. One noticed a structural predominance of the exponential form in his majority with a stage from 8,5 to 31 km. Into final, one noted that the zone most affected by an excessive rise in the whole of the values of the elements which we have to study are localised in the north-eastern parts, the center and south-east characterized by agricultural activities and most significant their geological structures saltworks. L be results obtained of the physicochemical study have allows to highlight that the near total of the water point studied are characterized by the prevalence of the chlorinated and sulphated facies chemical calcic and magnesian.

As a whole, the anticipated results of this regionalization showed that the quality of subsoil waters in the majority of the zone of study is suitable with the irrigation and that the north-western zone and some pockets in the center are in its major part characterized by drinking waters.

Key words: Regionalization, stochastic, SIG, geostatistic, variography, kriging.

Liste des abréviations

- **A.N.A.T** : Agence Nationale de l'Aménagement et du Territoire
- **A.N.R.H** : Agence National des Ressources Hydraulique
- **AEP**: Alimentation en eau potable
- **BV** : Bassin versant
- **C.E** : Conductivité électrique
- **D.P.A.T** : Direction de la planification et de l'aménagement du territoire
- **D.S.A** : Direction des Services Agricoles
- **ds/m** : Décisiemens par mètre
- **E** : Evaporation
- **Ha** : Hectare
- **Km** : Kilomètre
- **m** : Mètre
- **m/s** : Mètre par seconde
- **Max** : Maximum
- **méq/l** : Milliéquivalentparlitre
- **mg/l** : Milligrammeparlitre
- **Min** : Minimum
- **mm** : Millimètre
- **mmhos/cm** : Millimhos par centimètre
- **O.M.S** : Organisationmondialdelasanté
- **O.N.M** : Office national météorologique
- **P** : Précipitation
- **P.D.A.U** : Le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme
- **R.s** : Résidus sec
- **SAR** : Sodium absorption ration
- **SIG** : Système d'information géographique
- **T** : Température
- **TAC** : Titre alcalimétrique complet
- **TH** : Titre hydrotimétrique
- **X Y** : Coordonnées Lambert
- **µmhos/cm** : Micromhos par centimètre
- **°C** : Degrés Celsius
- **°F** : Degré français

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de ces dernières années, de nombreuses questions sont actuellement posées sur l'importance des ressources en eaux souterraines exploitées et sur leur qualité. En effet, la distribution d'une eau pouvant être consommée sans inconvénients et répondant aux exigences de qualité de l'usager moyen nécessite plusieurs analyses physico-chimiques. En Algérie, Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. La connaissance des ressources en eau est la condition nécessaire pour une bonne gestion. Une augmentation significative de la salinité de l'eau risquerait de compromettre l'approvisionnement en eau, que ce soit pour l'alimentation en eau potable ou pour l'activité agricole, voire même l'altération de l'environnement et par conséquent la survie de populations.

L'intensification de l'agriculture, couplée à une utilisation accrue des ressources en eaux de surface et souterraine, est jugée responsable de la pollution diffuse et de la détérioration de la qualité de certains paramètres de qualité des eaux souterraines et des sols. En effet, les phénomènes de salinisation, de sodification, de détérioration de la structure des sols et de la pollution nitrique commencent à prendre un rythme croissant.

Dans les années précédentes la wilaya de Djelfa dont la zone d'étude est localisée entre les latitudes 34.000 m et 36.000 m Nord et les longitudes 6.000 m et 10.000 m Ouest sur une superficie d'environ 14360 km² et touche des parties des bassins versants 1, 6 et 17 a connu des contaminations fréquentes des eaux souterraines qui sont la source principale de l'alimentation en eau potable de cette wilaya. C'est dans ce contexte que vient notre travail dont l'objectif est la régionalisation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Djelfa dans le cadre d'un système d'information géographique (SIG) en étudiant la variabilité spatiale par une approche géostatistique qui considère les paramètres étudiés comme variables aléatoires et consiste à déterminer de nouvelles données. L'autocorrélation de ces variables en fonction de la distance, peut manifester une structure dans l'espace établie sous forme d'une fonction variogramme (Azouzi, 1993). Les systèmes d'information géographique permettent d'effectuer une analyse spatiale dans le but d'avoir des cartes de synthèse afin d'identifier la qualité des eaux souterraines (Abdelbaki et Boukli, 2007)

Pour cerner ces problèmes, déceler les zones à risques et trouver des scénarios adéquats pour la gestion durable des ressources, le suivi et la surveillance de la qualité des sols et des eaux souterraines s'avèrent nécessaire.

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. La géostatistique, une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale d'une propriété quelconque ainsi que son estimation, s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel. L'étude géostatistique comprend deux phases essentielles :

- La première est la caractérisation de la structure spatiale de la variable régionalisée;

- La seconde est l'estimation de cette variable en utilisant un outil d'interpolation spatiale.

Il est à signaler que l'intérêt de notre travail est de présenter un outil de prise de décision qui peut permettre de :

- Détecter les zones de pollutions ou des zones à risque de pollution à travers une répartition spatiale des éléments physico-chimiques après interpolation dans des zones non échantillonnées ;
- Sélectionner les zones favorables à l'implantation des puits ou forages (AEP, irrigation) ;
- Établir des cartes numérisées de la qualité des eaux souterraines.

Le présent document est constitué de six chapitres :

Le premier chapitre de cette étude aborde la présentation des différents paramètres physico-chimiques des eaux, ainsi que les normes des ressources en eau destinées à l'alimentation en eau potable et l'eau d'irrigation.

Le deuxième sur le système d'information géographique (SIG).

Le troisième chapitre traite la description du milieu physique de la région d'étude (relief, végétation, sols, géologie, hydrogéologie et climat).

Le quatrième chapitre, réservé aux matériels et méthodes et l'acquisition des données et leur structuration.

Le cinquième chapitre cerne l'approche géostatistique.

Enfin, le sixième chapitre, résultats et discussion, consiste à mettre au point la régionalisation des analyses physico-chimiques de la région d'étude et l'estimation des nouvelles données par krigeage à des fins de cartographie et leur confrontation avec les recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS), ainsi que leurs interprétation.

Chapitre I : Paramètres physico-chimiques des eaux

Les eaux souterraines constituent en général des réserves naturelles de bonne qualité qui nécessitent peu de traitement par rapport aux eaux de surface. Cette ressource doit être bien gérée car elle est ni inépuisable, ni insensible aux agressions de l'environnement. Il est indispensable d'assumer une gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines, afin de satisfaire la demande par les points de production les mieux adaptés. Une exploitation rationnelle est indispensable, car une exploitation mal maîtrisée des nappes pourrait avoir des conséquences très néfastes et peut être irréversibles sur la qualité de l'eau.

Une eau est polluée lorsque sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à satisfaire la demande d'utilisation ou qu'elle présente un danger pour l'environnement (Castany, 1982).

1. Etude des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau

L'étude ne concerne que les caractéristiques physiques et chimiques qui ont été prises en compte au cours de notre travail.

1.1. Paramètres physiques

1.1.1. Conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure qui permet un contrôle simple et rapide de la minéralisation des solutions. Elle dépend de la force ionique de l'eau et augmente en fonction de la teneur en ions dissous, de la nature des différentes substances dissoutes, à leurs concentrations réelles et relatives et à la température à laquelle elle est mesurée.

L'unité principale de conductivité électrique est le siemens par mètre (S /m). La température influe beaucoup sur la conductivité qui varie d'environ 2% par °C (Jean, 2000).

La CE est proportionnelle à la somme des cations ou des anions (Achour et Guergazi, 2005). Par ailleurs la minéralisation des eaux comme indiquée dans le tableau ci-dessous est considérée comme fonction de la conductivité électrique.

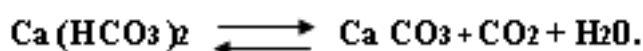
Tableau n° 01: La conductivité et le degré de la minéralisation

| | |
|-------------------|----------------------------|
| Conductivité | Minéralisation |
| 0 – 100 µS/cm | Minéralisation très faible |
| 100 – 200 µS/cm | Minéralisation faible |
| 200 – 333 µS/cm | Minéralisation moyenne |
| 333 – 666 µS/cm | Minéralisation accentuée |
| 666 – 1 000 µS/cm | Minéralisation importante |
| > 1 000 µS/cm | Minéralisation élevée |

(Diallo, 1996)

1.1.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. Dans la plupart des eaux naturelles, le pH dépend de l'équilibre calco-carbonique (Moussa, 2005):



Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique (De Villers et al, 2005).

1.1.3. Température

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, Il est à signaler que la connaissance de ce paramètre peut aider d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau (Guy, 2003).

1.1.4. Turbidité

La turbidité d'une eau est due à la présence des matières en suspension à savoir : Argiles, grains de silice, matières organiques, etc. L'appréciation de l'abondance de ces matières mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace (Rodier, 1978).

Tableau n° 02: Classification des eaux en fonction de la turbidité.

| | | | |
|------------------------|------------|------------------------|-------------|
| Turbidité | NTU < 5 | 5 < NTU < 30 | NTU > 50 |
| Nature de l'eau | Eau claire | Eau légèrement trouble | Eau trouble |

(NTU, nephelometric turbidity unit) (Rodier, 1978)

1.1.5. Résidus secs

Les résidus secs ; exprimés en (mg/l) ; représente la totalité des sels dissous. Il est obtenu par dessiccation de l'eau à 110°C (Rodier, 1978).

1.2. Paramètres chimiques

L'eau, au contact des terrains qu'elle rencontre, se charge en divers éléments qui vont influencer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir (Kane, 2000).

- des matières organiques,
- des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, ...)
- des particules en suspension

1.2.1. Cations

- **Calcium (Ca^{2+})**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Il existe surtout à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorures, etc. Les eaux de pluies, de citernes n'en renferment que des traces. Certaines eaux minérales en contiennent plusieurs centaines de milligrammes par litre. En dehors de certaines manifestations gustatives, les eaux qui dépassent 200 mg/l de calcium présentent de sérieux inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation des chaudières (Rodier, 1996).

- **Magnésium (Mg^{2+})**

Le magnésium est un élément relativement abondant dans l'écorce terrestre et rentre toujours dans la composition des eaux naturelles en contact avec du granite, de la dolomie ou du calcaire (OMS, 1994). Il peut aussi provenir des embruns marins qui se sont infiltrés avec les eaux de pluie. Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes, allant de quelques milligrammes à, quelques fois, plusieurs centaines de milligrammes par litre (Tandia, 2000).

- **Potassium (K^+)**

Bien que dans les roches ignées la teneur en potassium (K^+) soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépassent pas habituellement 10 à 15 mg/l. Le seuil de perception gustative du chlorure de potassium se situe à environ 20 fois cette valeur (Cheikh F., 2008).

- **Sodium (Na^+)**

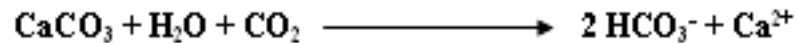
En raison de sa solubilité, le sodium est un élément fréquemment rencontré dans les eaux souterraines. Il présente plusieurs origines indépendamment du lessivage des formations géologique riche en NaCl ; le sodium peut provenir de la décomposition des sels minéraux tels que les silicates, des venues d'eaux salées dans les nappes; des rejets d'eaux usées d'origine industrielle et domestique (Taha, 2002).

1.2.2 Anions

- **Bicarbonates et carbonates**

L'anhydride carbonique libre dans une eau (sous forme de : carbonate et bicarbonate) dépend de l'alcalinité et de la valeur du pH de l'eau. C'est un facteur important en déterminant les propriétés corrosives d'une eau (Don et al, 2009). La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire) par

des eaux chargées en gaz carbonique. Les bicarbonates n'ont pas un rôle prépondérant direct sur la santé humaine (Jacques et al,2002). L'équation de dissolution est donnée comme suite :



Chlorures

Les chlorures provenant essentiellement de la dissolution des sels naturels provoqués par lessivage des formations salifères, ainsi que l'évaporation intense, dans des régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol. La présence des chlorures dans les eaux souterraines peut avoir une origine essentiellement agricole (engrais, pesticides etc.), industrielle et urbaine (eaux usées)(Achour et Guergazi, 2002).

Le chlorure est trouvé dans presque toutes les eaux et vient d'un certain nombre de sources, y compris les dépôts de minéraux normaux. Elle est habituellement combinée avec du sodium et à un moindre degré avec du potassium, le calcium et le magnésium, qui prépare le chlorure un des composants les plus stables dans l'eau (Don et al, 2009).

Nitrates (NO_3^-) et Nitrites (NO_2^-)

Le nitrate est l'étape finale de l'oxydation de l'ammoniaque et de la minéralisation de l'azote de la matière organique. La majeure partie de cette oxydation dans le sol et l'eau est réalisée en nitrifiant des bactéries et peut seulement se produire dans un environnement bien oxygéné

L'utilisation des engrais azotés sur la terre peut également provoquer des concentrations accrues en nitrate en eaux de surface et souterraines (Rieu, 1981)

La nitrite ou azote nitreux, représente une forme moins oxygénée et moins stable, elle résulte de passage entre les nitrates et l'ammonium, c'est une forme toxique (Moussa, 2005).

Sulfates (SO_4^{2-})

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/l) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé.

La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation (Rodier, 1996).

2. Eaux potables

2.1. Caractéristiques physiques

2.1.1. Conductivité électrique

L'eau avec des bas sels dissous est souhaitable pour beaucoup de processus industriels mais peut être inacceptable pour des consommateurs, et peut également être corrosive à la tuyauterie domestique.¶

D'après l'OMS les eaux sont classées selon leur conductivité électrique.

Tableau n° 03: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique

| Qualité de l'eau | Eau de qualité excellente | Eau bonne | Eau moyenne | Mauvaise |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|-------------|----------|
| Conductivité électrique (μ S/cm) | 50 – 400 | 400 – 750 | 750 – 1500 | >1500 |

(O.M.S., 1993)

2.1.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est un indicateur de la qualité de l'eau. Selon Rodier (1978) un pH d'une eau potable doit être compris entre 7 et 8,5.

2.1.3. Température

Pour l'eau potable, la température maximale acceptable est de 15°C, car on admet que l'eau doit être rafraîchissante. Dans les eaux naturelles et au dessus de 15°C, il y a risque de croissance accélérée de micro-organismes, d'algues, entraînant des goûts et des odeurs désagréables ainsi qu'une augmentation de couleur et de la turbidité. Une température élevée peut favoriser des goûts et des odeurs désagréables. De plus elle accélère la plupart des réactions physico-chimiques (Monique Henry, 1991 cité par Alpha, 2005).

2.2. Caractéristiques chimiques

2.2.1. Alcalinité

Dans de sens générale une alcalinité est pris pour signifier l'opposé de l'acidité c'est à dire à mesure que la valeur du pH augmente. Plus exactement, l'alcalinité d'une eau comporte principalement la somme des bicarbonates, des carbonates et des hydroxydes du calcium, du magnésium, du sodium et du potassium. L'alcalinité excessive est habituellement due à la présence du bicarbonate de soude, qui n'affecte pas la dureté de l'eau. Puisque les ions de bicarbonate peuvent exister aux valeurs du pH au-dessous de pH 7.0, une alcalinité mesurable est encore obtenue avec de l'eau aux valeurs du pH de 4.5 (Don et al, 2009).

2.2.2. Dureté

- Dureté totale

la dureté totale d'une eau indique globalement sa teneur en ions alcalino-terreux ; en particulier les ion calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) ; qui résultent principalement de l'infiltration des eaux de surface à travers les formations rocheuses calcaires et dolomitiques.

- Dureté carbonatée (Dureté temporaire)

Correspondant à la quantité d'ions alcalino-terreux qui peuvent être associées aux ions

La différence entre la dureté totale et la dureté temporaire est appelée dureté permanente (Thierun et Steffen, 2001).

hydrogénocarbonates (HCO_3^-), qui précipitent lors de la cuisson sous forme de carbonates alcalino-terreux insolubles, ce qui atténue la dureté de l'eau :

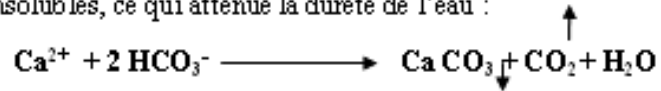


Tableau n° 04 : Classification des eaux selon leur dureté

| | | | | | |
|-----------------|-------|------------------|-------------|---------|-----------|
| TH °F | 0 | 7 à 22 | 22 à 32 | 32 à 54 | > 54 |
| Dureté de l'eau | douce | modérément douce | assez douce | dures | très dure |

(Rodier, 1978)

- Titre hydrotimétrique (dureté de l'eau TH)

La dureté d'une eau est évaluée à l'aide du degré hydrotimétrique (TH) ; qui est définie par la teneur totale du calcium et du magnésium (méq/l), il est exprimé en degré français :

$$\text{TH} = (\text{r Ca} + \text{r Mg}) * 5 \text{ (°F)}$$

r Ca : Concentration en calcium en meq/l.

r Mg : Concentration en magnésium en meq/l.

2.3. Caractéristique organoleptique

2.3.1. Saveur et odeur

Elles constituent les qualités organoleptiques de l'eau. Les principaux corps pouvant donner à l'eau une saveur désagréable sont : le fer et le manganèse, le chlore actif, le phénol. La saveur se développe avec l'augmentation de température. Les odeurs sont dues notamment au plancton aux algues mortes pour les eaux de rivière, et H_2S pour les eaux souterraines.

Les saveurs ne sont décelables qu'à la dégustation. Cette dernière consistera à apprécier l'intensité de la saveur à des températures. A cet effet, il sera effectué des dilutions successives avec de l'eau sans saveur. Le seuil de dégustation sera exprimé par le rapport entre le volume total de la dilution et le volume minimal de l'échantillon d'eau nécessaire pour obtenir une saveur perceptible (Dupont, 1981).

2.3.2. Couleur

La couleur d'une eau est une propriété optique consistant à modifier la composition spectrale de la lumière visible transmise. La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution et elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration (Huntz, 1980).

2.4. Normes de la qualité de l'eau de consommation

L'eau est un élément indispensable à la vie et l'état de santé de la population. Elle est liée à la qualité physico-chimique et bactériologique qu'elles consomment. L'élaboration des normes de potabilité est basée sur les études scientifiques montrant les effets nocifs sur la santé, des éléments physico-chimique à partir d'une certaine concentration maximale à ne pas dépasser. Par sécurité la valeur de la norme sera largement inférieure à cette dose, afin d'éviter le développement de pathologie, malgré le dépassement du seuil (Mireille, 2004).

L'organisation mondiale de la santé (O.M.S.) propose des valeurs guides; qui servent de base à l'élaboration des normes. Ces valeurs guides sont spécifiques pour chaque élément. Les principales normes de potabilités des eaux sont :

- Normes des paramètres organoleptiques
- Normes des paramètres physico-chimiques
- Normes des substances indésirables
- Normes des substances toxiques

2.4.1. Normes des paramètres organoleptiques

Ces paramètres concernent la couleur, la transparence, la saveur et l'odeur de l'eau. Cependant ces critères n'ont pas de valeur sanitaire directe. Une eau peut être trouble, colorée ou avoir une odeur particulière et néanmoins être consommable. L'eau potable doit répondre à certaines caractéristiques organoleptiques (O.M.S, 1993).

2.4.2. Normes des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques permettant de définir les normes de potabilité des eaux de différents pays telles que: le pH, la conductivité électrique, turbidité, concentration en sulfates, chlorures, sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau n° 05 : Normes des paramètres physico-chimiques

| Paramètres | Unités | Normes de l'UE | Normes d'O.M.S | Normes Algérienne | Normes d'U.S.A |
|--------------|--------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | CMA | CMA | CMA | CMA |
| Température | °C | 25 | 25 | - | - |
| pH | | 9,5 | 6,5-9,5 | 6,5-8,5 | 6,5- 8,5 |
| CE à 20°C | µS/cm | - | 2100 | 2800 | - |
| Chlorure | mg/l | 200 | 200 | 200-500 | 250 |
| Sulfates | mg/l | 500 | 250 | 200-400 | 250 |
| Magnésium | mg/l | 50 | 50 | 150 | - |
| Calcium | mg/l | - | 120 | 75-200 | - |
| Sodium | mg/l | 200 | 200 | 200 | - |
| Aluminium | mg/l | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,05 à 0,2 |
| Potassium | mg/l | 10-12 | 12 | 20 | - |
| Résidu sec | mg/l | 1500 | 1500 | 1500-2000 | - |
| Bicarbonates | mg/l | - | 610 | - | - |

(Anonyme 7 ;Office of Water, 2011; Journal officiel, 2000)

CMA : Concentration Maximale Admissible

2.4.3. Normes des substances indésirables

Les substances indésirables (tableau 10) sont des substances dont sa présence est tolérée en faible concentration exigée par une réglementation. Parmi ces substances, on peut trouver des éléments qui ne causent que des désagréments pour l'utilisateur ; mais d'autres peuvent avoir une incidence sur la santé (O.M.S, 1993).

| Normes de | | | | unités | Paramètres |
|-----------|------|------|---------|--------|------------|
| USA | U.E | OMS | Algérie | | |
| CMA | CMA | CMA | CMA | | |
| - | 0.5 | 0.5 | 0,5 | mg/l | Ammonium |
| 0.1 | 0.01 | 0.01 | 0.05 | mg/l | Argent |
| 1.3 | 2 | 2 | 1,5 | mg/l | Cuivre |
| 0.3 | 0,2 | 0,2 | 0.3 | mg/l | Fer |
| - | 1,5 | - | 0.2-2 | mg/l | Fluorures |
| 0.05 | 0.5 | 0.4 | 0,5 | mg/l | Manganèse |
| 45 | 50 | 50 | 50 | mg/l | Nitrates |
| 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0,1 | mg/l | Nitrites |
| 5 | 5 | 3 | 5 | mg/l | Zinc |

Tableau n° 06: Normes des substances indésirables.

(Anonyme 7 ;Office of Water, 2011; Journal officiel, 2000)

2.4.4. Normes des substances toxiques

Les normes fixées sont sensiblement inférieures aux seuils considérés comme acceptables en toxicologie, c'est pourquoi les teneurs tolérées sont extrêmement faibles. Ces paramètres concernent le plomb et le chrome entre autres (O.M.S, 2006).

Tableau n° 07 : Normes des substances toxiques.

| Normes de | | | | unités | Paramètres |
|-----------|-------|-------|---------|--------|--------------|
| USA | UE | OMS | Algérie | | |
| CMA | CMA | CMA | CMA | | |
| 0.01 | 0,01 | 0.01 | 0.05 | mg/l | Arsenic |
| 0.005 | 0,003 | 0.003 | 0.01 | mg/l | Cadmium |
| 0.1 | 0,05 | 0.05 | 0.05 | mg/l | Chrome total |
| 0.2 | 0,07 | 0.05 | 0.05 | mg/l | Cyanures |
| 0.002 | 0,001 | 0.006 | 0.001 | mg/l | Mercurie |
| - | 0,02 | 0.07 | 0.02 | mg/l | Nickel |
| - | 5 | 5 | - | mg/l | Phosphore |
| 0.015 | 0,01 | 0.01 | 0.05 | mg/l | Plomb |

(Anonyme 7 ;Office of Water, 2011; Journal officiel, 2000)

3. Utilisation d'eau pour l'irrigation

L'agriculture est, de loin, l'industrie ayant la plus grande consommation d'eau. L'irrigation des régions agricoles représente 70% de l'eau utilisée dans le monde entier. Dans plusieurs pays en voie de développement, l'irrigation représente jusqu'à 95% de toutes les utilisations d'eau, et joue un rôle important dans la production de nourriture et la sécurité alimentaire. Les futures stratégies de développement agricole de la plupart de ces pays dépendent de la possibilité de maintenir, d'améliorer et d'étendre l'agriculture irriguée (Anonyme 7).

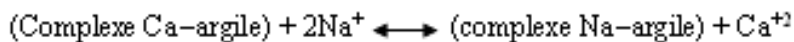
3.1. Qualité des eaux d'irrigation

Toutes les eaux naturelles utilisées pour l'irrigation contiennent des sels minéraux en solution, provenant des roches ou des matières solides à travers lesquelles elles sont filtrées (Bahir et al, 1977). Les matières dissoutes les plus communes sont les chlorures, les sulfates, et les bicarbonates de Ca^{+2} , Mg^{+2} et de Na^{+} , la concentration de ces éléments détermine la possibilité d'utilisation de ces eaux en irrigation, et Couture (2003) ajoute que la teneur totale en sels et la présence d'oligoéléments sont deux caractéristiques chimiques qui déterminent le choix de la qualité des eaux d'irrigation.

3.1.1. Teneur totale en sels

Alcalinité

Lorsque l'eau d'irrigation possède un rapport sodium/calcium élevé, un échange d'ions adsorbés sur les particules argileuses peut avoir lieu:



Les ions sodium étant plus hydratés que les ions calcium, ils prennent plus de place, colmatent les pores et finissent par diminuer la perméabilité du sol (Couture, 2003).

Le risque d'alcalinisation peut être apprécié par le coefficient d'absorption du sodium (CAS, en anglais SAR Sodium absorption ration) défini comme:

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}] + [\text{Mg}]}{2}}}$$

où les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre (méq/l)

Lorsque la concentration de Ca^{+2} et de Mg^{+2} décroît, en comparaison la teneur sodium et l'indice SAR deviennent plus importants. Ceci causera un effet d'alcalisation et augmentera le pH (Rieu, 1981)

Salinité

Parmi les différentes caractéristiques physico-chimiques d'une eau d'irrigation, la salinité constitue l'aspect le plus important. Les principaux sels responsables de la salinité d'eau sont les sels de Ca^{2+} , Cl^{-} , Mg^{2+} , Na^{+} , SO_4^{2-} , et de HCO_3^{-} .

L'irrigation avec les eaux chargées en sels entraîne une accumulation de ces sels dans le sol susceptible de ralentir la croissance des végétaux avec une baisse des rendements pouvant aller jusqu'au dépérissement; parallèlement, un excès de sodium peut engendrer l'alcalinisation et la dégradation de la structure de sol. Le risque de salinité peut être apprécié en se basant sur la teneur totale en sels, exprimée en mg/l ou d'après la conductivité électrique (CE) (Westcot et Ayers, 1988).

3.1.2. Présence d'oligoéléments

Parmi les oligoéléments, le bore est élément essentiel à la croissance des plantes.

Les besoins en bore sont relativement faibles et il devient toxique s'il est présent en quantité excessive. Il faut 0.2 mg/l de bore dans l'eau pour la croissance de certaines cultures alors que

la toxicité peut apparaître à partir de 1 à 2mg/l (Couture, 2003).

3.1.3. Les éléments toxiques dans l'eau d'irrigation

D'après Robert et Dale (1991) les ions toxiques les plus communs dans les eaux d'irrigation sont : - Bore (B) - Chlorure (Cl) - Sodium (Na)

Le sodium et le chlorure sont habituellement absorbés par les racines. La convenance de

concentration de ces ions dépend du type de récolte, de l'état de croissance, de la concentration en ions, du climat et de l'état des sols.

Le bore peut être toxique à très faible concentration. Une concentration en bore inférieure à 1mg/l est essentielle pour le développement des plantes, mais des niveaux plus élevés peuvent poser des problèmes pour les plantes sensibles. La plupart des plantes montrent des problèmes de toxicité quand la concentration du bore excède 2 mg/l.

| Niveaux de toxicité pour des ions spécifiques (mg/l) | | | |
|--|------|--------|--------|
| Elément \ Niveau | Bore | Chlore | Sodium |
| Nul | < 1 | 1 - 3 | > 3 |
| Léger à Modéré | < 3 | 3 - 9 | > 9 |
| Sévère | < 4 | 4 - 10 | > 10 |

Tableau n° 08 : Niveaux de toxicité pour des ions spécifiques

(Robert et Dale, 1991)

3.2. Classification des eaux d'irrigations

Plusieurs classifications existent parmi les quelles on distingue celle qui'est basée sur la salinité de l'eau représentée par la conductivité électrique, et celle basée sur le degré d'alcalinité du sol exprimée par le SAR (sodium absorption ration).

3.2.1. Classification basée sur la conductivité électrique (CE)

Valiron (1983) a conclu la classification selon la CE:

CE 25°C < 250 $\mu\text{mhos/cm}$ eaux non salines

250 < CE 25°C < 750 $\mu\text{mhos/cm}$ eaux à salinité moyenne

750 < CE 25°C < 2250 $\mu\text{mhos/cm}$ eaux à fort salinité

2250 < CE 25°C < 5000 $\mu\text{mhos/cm}$ eaux à très fort salinité

5000 < CE 25°C < 20000 $\mu\text{mhos/cm}$ eaux à salinité excessive

Les eaux dont la CE 25°C dépasse 20 000 $\mu\text{mhos/cm}$ sont inutilisables pour l'irrigation. En effet la qualité d'une eau d'irrigation ne peut être établie qu'en fonction du sol irrigué et la culture à pratiquer (Durand, 1983).

3.2.2. Classification basée sur le SAR

Le taux d'adsorption du sodium est couramment utilisé comme indice des risques liés au sodium dans les eaux et les sols, et comme un substitut du sodium échangeable du sol. Le taux d'adsorption du sodium (SAR) d'une eau donnée définit dans une certaine mesure, la quantité relative de sodium susceptible d'être adsorbée par le sol. L'effet des ions de sodium dans l'eau d'irrigation sur la réduction du taux d'infiltration et de la perméabilité du sol est fonction de la concentration totale en sels (Phocaidès, 2008).

Le SAR est fonction du sodium puisque cet élément est susceptible de réduire la perméabilité des terrains et de provoquer un durcissement du sol (échanges avec Ca^{+2} et Mg^{+2} du sol). En effet, lorsque le SAR est supérieur à 10, le taux de fixation du sodium sur le complexe adsorbant est alors élevé ce qui provoque une dispersion des argiles et le sol devient alors compact, imperméable à l'eau et à l'air: c'est l'alcalisation. Elle peut entraîner, après lessivage des sels, une alcalinisation, c'est à dire une forte augmentation de pH.

C'est une donnée importante dans la définition des propriétés d'aptitude d'une eau, notamment pour l'irrigation. La valeur de ce paramètre est d'autant plus élevée que l'eau est impropre à l'agriculture (Cheikh H., 1995).

L'aptitude des eaux à l'irrigation a été définie selon USSL (1954) en se basant sur un diagramme de classification des eaux (Figure 16) qui permet d'indiquer les zones où les eaux sont utilisables pour l'irrigation selon un critère fondé sur la conductivité et sur le taux d'adsorption du sodium (Sodium Adsorption Ratio).

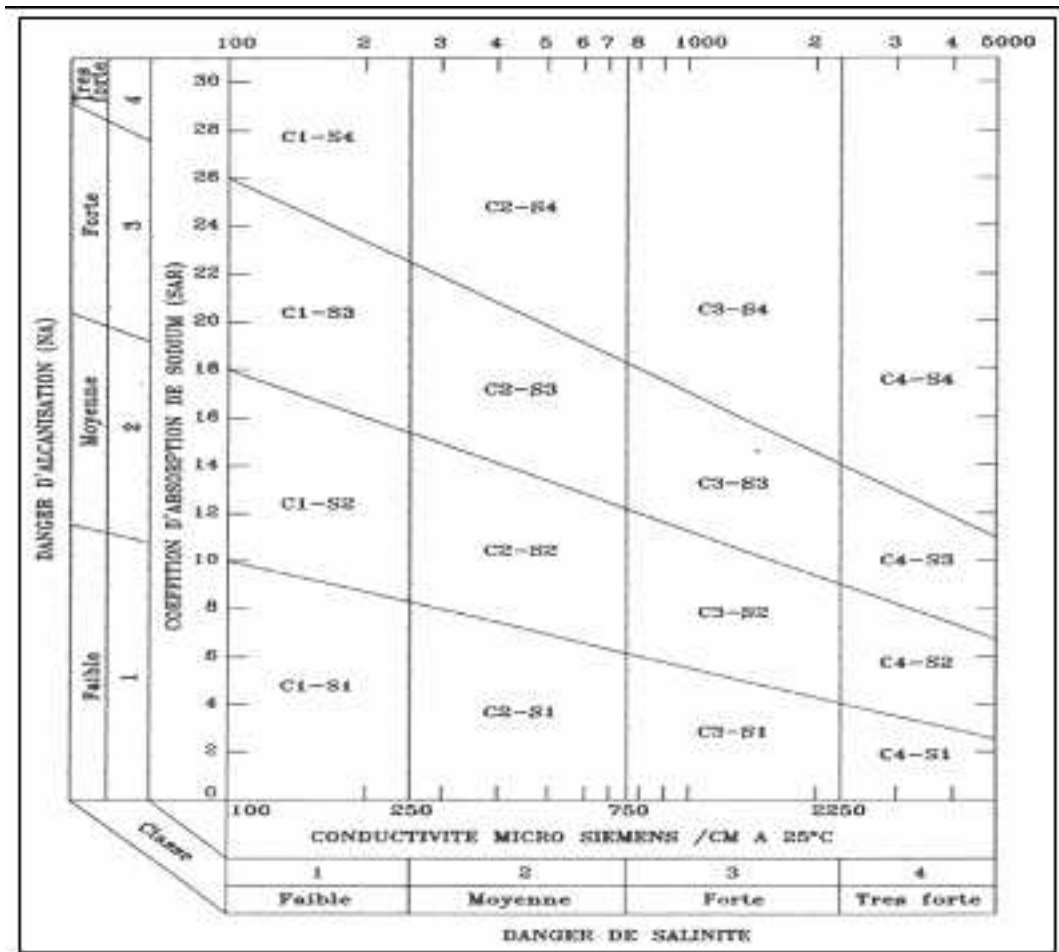


Figure 01 : Diagramme de la classification des eaux d'irrigation (USSL, 1954)

| Degré Qualité Classe | |
|------------------------------|---|
| 1 Excellente C1-S1 | Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols. |
| 2 Bonne C2-S1 C2-S2 | En général eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à fortes capacité d'échange d'ions (sols argileux). |
| 3 Admissible C3-S1 C3-S2 | En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à faibles perméabilité. |
| 4 Médiocre C4-S1 C4-S2 C3-S3 | En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés. |
| 5 Mauvaise C3-S4 C4-S3 C4-S4 | Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : Sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sol. |

Chapitre II : Système d'Information Géographique

1. Historique du Système d'information géographique (SIG)

Le développement de système d'information géographique (SIG) dans la science et l'aménagement du territoire a été permis par l'avancée de la technologie informatique, et encouragé par prise de conscience environnementale et de nouvelles approches scientifiques transdisciplinaires, intégratrices. Depuis les années 1970, notamment depuis le sommet de la terre à Rio de Janeiro en 1992 qui a généré une demande croissante de cartes présentant l'état de l'environnement et utiles pour mesurer les impacts du développement (Anonyme 1).

Maguire et al. (1991) distinguent trois périodes principales dans l'évolution des SIG :

- fin des années 1950 milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques ;
- milieu des années 1970 début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques...)
- depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels, développements des applications sur PC, mise en réseau et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation de solutions embarquées liées au GPS...)

2. Définition et finalités

Les SIG constituent un sous-ensemble des systèmes d'information : le concept de Systèmes d'Information Géographique (SIG) est apparu dans les années 1960-1970 avec un premier essai de définition proposé par Tomlinson, 1967 (cité par Pouliot, 1999). Depuis ce temps, de nombreuses définitions plus ou moins similaires et cohérentes ont fait leur apparition, dont voici un aperçu :

Un ensemble puissant d'outils pour saisir, conserver, extraire, transformer et afficher les données spatiales décrivant le monde réel (Burrough, 1986).

Les SIG comportent trois types de composantes : technologique (matériel et logiciel), informatives (base de données géographiques et associées) et infra-structurelles (personnel, installation, services de support (Dickinson et Calkins, 1988).

Un ensemble de procédures informatisées qui offrent aux professionnels des fonctions adaptées pour le stockage, l'extraction, le traitement et l'affichage des données à référence spatiale (Ozemoy, Smith et Sichertman, 1981 ; cités par Thériault, 1996).

Le système d'information à référence spatiale : est un ensemble organisé globalement comprenant des éléments (données, équipements, procédures, ressources humaines) qui se coordonnent, à partir d'une référence spatiale commune, pour concourir à un résultat (Bedard, 1982).

Une définition largement acceptée est celle fournie par le National Centre of Geographic Information and Analysis (NCGIA) : un SIG est un système de matériels, logiciels et procédures pour faciliter la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, la représentation et l'affichage de données spatialisées pour résoudre des problèmes complexes liées à la planification et la gestion des ressources (NCGIA, 1990) (Anonyme 2).

Quand bien même il existe plusieurs définitions d'un SIG, elles ont néanmoins en commun le fait de reposer sur ses différentes fonctions. Ainsi peut-on définir un SIG comme un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, le traitement, l'analyse, la modélisation et la représentation de données à référence spatiale afin de pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la prise de décision.

Un SIG permet ainsi de répondre à un certain nombre de questions telles qu'où se trouve un objet ou un phénomène mettant ainsi en évidence la répartition spatiale des objets ou phénomènes présents sur un territoire donné. De plus, le SIG permet l'analyse spatiale en élucidant les relations qui existent ou non entre les objets et les phénomènes ainsi que l'analyse temporelle en déterminant leurs évolutions. Finalement, il permet de prédire ce qui se passerait si tel scénario d'évolution se produisait en examinant les conséquences qui affecteraient les objets ou phénomènes concernés du fait de leur localisation (Dimitri et Bakary, 2007).

3. Principales fonctionnalités d'un SIG

Les SIG doivent être à la fois un outil de gestion pour le technicien et un outil d'aide à la décision pour le décideur. Il doit donc offrir les fonctions nécessaires à ces deux objectifs, regroupées sous le terme « **les cinq A** » : (Sana, 2007).

3.1. Abstraction

Elle vise à représenter le monde réel, en organisant les données par composants géométriques et par attributs descriptifs et en établissant des relations entre les objets.

3.2. Acquisition

L'acquisition revient à alimenter le SIG en données par saisie des informations géographiques sous forme numérique : la forme des objets géographiques et leurs attributs et relations.

3.3. Archivage

L'archivage revient à gérer la base de données en transférant les données de l'espace de travail vers l'espace d'archivage.

3.4. Analyse

Elle permet de manipuler et d'interroger des données géographiques afin de répondre aux requêtes des utilisateurs.

3.5. Affichage

Son but est de permettre à l'utilisateur d'appréhender des phénomènes spatiaux dans la mesure où la représentation graphique respecte les règles de la cartographie.

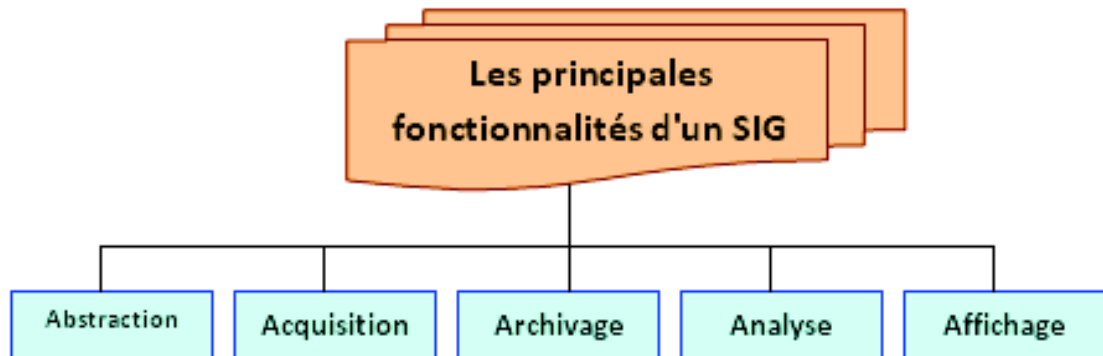


Figure 02 : Les principales fonctionnalités d'un SIG

4. Intérêts du SIG

A travers la vue précédente du SIG on peut énumérer les intérêts suivants (Anonyme 3):

- Les informations sont stockées de façon claire et définitive
- Comprendre les phénomènes, prévoir les risques (simulations)
- Localiser dans l'espace et dans le temps
- Réagir rapidement après des événements ayant un impact sur le territoire
- Abaissement des coûts de production cartographique
- Réalisation de produits nouveaux impossibles à réaliser à la main.
- Partage de l'information en garantissant sa pérennité.
- Une fois le SIG en place : une nouvelle application nécessite un coût modeste, pour un retour sur investissement rapide.
- Calculs utiles à la prise de décision : Calculs simples, superpositions cartographiques, et calculs complexes d'analyse spatiale intégrant un grand nombre de paramètres.

Aussi, contrairement aux méthodes manuelles qui étaient utilisées pour éditer les cartes, les systèmes d'informations géographiques ont un fort pouvoir intégrateur d'informations multi-sources (Nziengui, 2007) et offrent de nombreux autres avantages à savoir :

- La gestion centralisée de l'information géospatialisée;
- La précision géographique (calcul de surfaces);
- La possibilité d'analyser de multiples données;
- L'établissement rapide de carte.



Figure 04 : Le mode vecteur

Le mode vecteur utilise des primitives graphiques pour la représentation des objets simples et complexes (figure 05). Ces primitives sont :

5.2.1. Points

Ils définissent des localisations d'éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces qui n'ont pas de surface réelle comme les points cotés.

5.2.2. Lignes

Les lignes représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces (ex : route ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau.

5.2.3. Polygones (surface)

Ils représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de sols...etc.

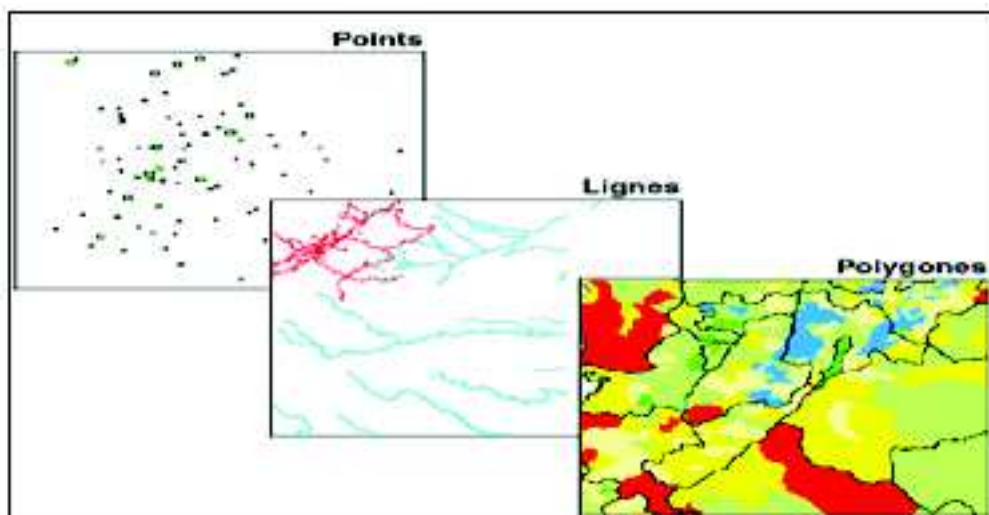
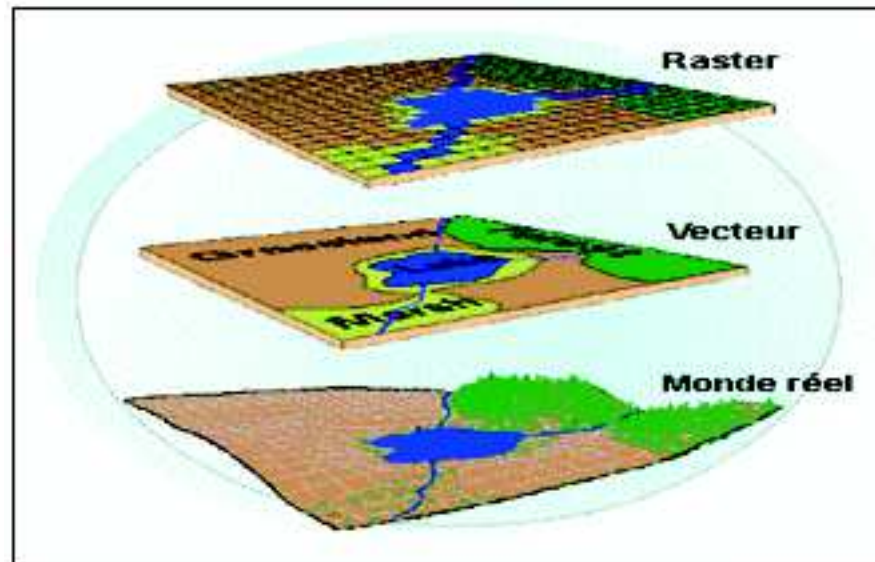


Figure 05 : Exemples des données vectorielles

5.3. Complémentarité des formats raster et vecteur

Chacun de ces deux modèles de données dispose de ses propres avantages, c'est pourquoi comme montré dans la figure 06 un SIG moderne doit exploiter simultanément ces deux types de représentation pour être le plus performant et au plus proche de la réalité (Anonyme 5).



Anonyme 5

Figure 06 : Complémentarité des formats raster et vecteur

5.4. Avantages et inconvénients pour les deux modèles

Chacune des deux structures présente des avantages et des inconvénients, Le tableau suivant site les principaux avantages et inconvénients existants au niveau de ces deux modèles (Didon, 1990).

Tableau n ° 09 :Avantages et inconvénients pour les modes raster, vecteur

| | MODE RASTER | MODE VECTEUR |
|----------------------|--|---|
| AVANTAGES | <p>Le stockage de données sous forme de tableaux. - Acquisition est immédiate. - Croisement des données est très facile à réaliser. - Prête très bien à certains types de traitements numériques: filtres, convolution, classification, analyse de contiguïté et de connectivité. - La nature même des données raster est bien adaptée pour la modélisation mathématique et l'analyse quantitative.</p> | <p>- Donne une représentation plus conforme au monde réel. - La production graphique est proche de la représentation cartographique traditionnelle - L'espace de coordonnées est continu, non discrétisé. - La localisation des objets, leurs dimensions et les distances sont calculés avec précision. - La topologie est adaptée pour l'analyse de réseau et la proximité - Mémoire exige moins d'espace.</p> |
| INCONVENIENTS | <p>Capacité mémoire nécessaire à stocker des données. - Le manque de précision du positionnement et des mesures de distances (l'erreur sera plus ou moins importante selon la résolution. - Il est difficile de représenter convenablement les caractéristiques linéaires selon la résolution de cellules. En conséquence, les liens de réseau sont difficiles à établir. - la qualité médiocre des documents obtenus en sortie.</p> | <p>- Les croisements des couches d'information sont délicats. - Structure des données complexe. - Les algorithmes pour l'analyse spatiale sont complexes. Cela est souvent une limite pour un grand volume de données. - Les données de type continues (par exemple. Altitude etc.), n'est pas efficacement représentées.</p> |

(Didon, 1990)

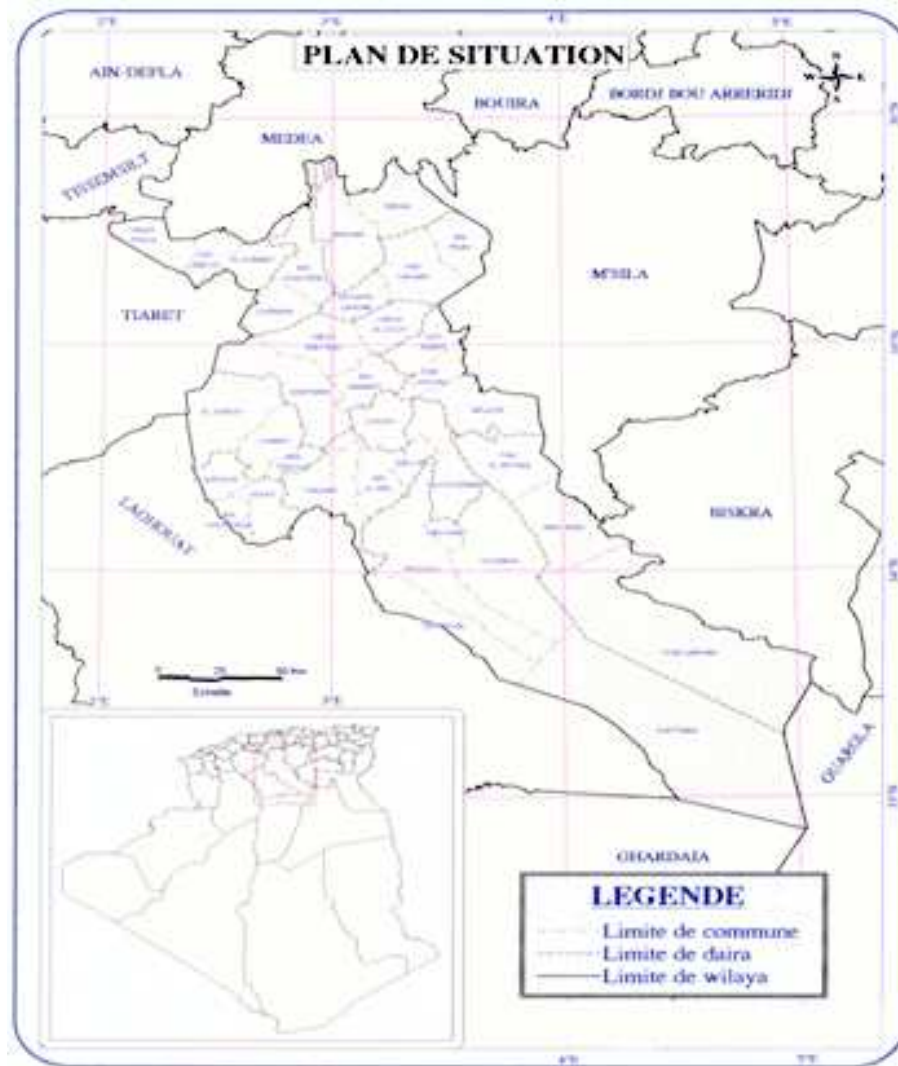
Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

1. Aperçu géographique

1.1. Situation de la wilaya

La Wilaya de Djelfa est située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord au delà des piémonts Sud de l'Atlas Tellien en venant du Nord dont le chef lieu de Wilaya est à 300 kilomètres au Sud de la capitale Elle est comprise entre 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord, avec une superficie totale de 32.256,35 km² représentant 1,36% de la superficie totale du pays se compose actuellement de 36 communes regroupées en 12 Dairate (I.D.O.M., IV.2005). Elle est limitée: - Au Nord par les Wilayate de Médéa et de Tissemsilt

- A l'Est par les Wilayate de M'Sila et Biskra
- A l'Ouest par les Wilayate de Laghouat et de Tiaret
- Au Sud par les Wilayate de Ouargla et de Ghardaïa



(D.P.A.T. 2010)

Figure 07 : Situation de la région étudiée

1.2. Relief

Le relief de la Wilaya de Djelfa est caractérisé par la succession de quatre (04) zones non homogènes du Nord au Sud de son territoire. Les quatre zones non homogènes d'après l'I.D.O.M. IV (2005) sont :

- Zone plaine du Nord: D'une superficie de l'ordre de 500.000 ha, cette zone est aussi appelée "Plaine de Ain Oussera". Elle est comprise entre 650 m et 850 m d'altitude.
- Zone des dépressions des chotts: Cette zone est aussi appelée "la dépression des Sebkhass" Elle se situe à des altitudes allant de 750 m à 850 m.
- Zone de la dépression des monts de Ouled Naïl: Cette zone est formée de petites plaines dont l'altitude varie entre 900 m et 1.600 m. La partie haute de la dépression est constituée de la chaîne montagneuse des Ouled Naïl. Cette chaîne est orientée Sud-Ouest et Nord-Est et formée des principaux monts de la Wilaya qui sont le

"Djebel Senalba", le Djebel "Azreg" et le Djebel "Zerga" dont l'altitude est comprise entre 1.200m et 1.600m.

· Zone du plateau prédésertique: Cette zone est aussi appelée "Plateau Saharien" dans la partie Sud de la Wilaya. Elle plonge dans la dépression formée par l'Oued Djeddi considéré comme la limite naturelle du Sahara. Le point culminant de la Wilaya se trouve à l'Est de l'agglomération de Benyagoub (Daïra de Charef) avec une altitude de 1.613 m et le point le plus bas est à l'extrême Sud de la Wilaya avec une altitude de 150 m (D.P.A.T., 2007).

1.3. Végétation

Les types de végétation se déploient depuis les hauts plateaux du Sud algérois au Sud de la wilaya dominés par les steppes désertiques (Les steppes à Alfa, à Armoise blanche, steppes à Sparte, à psammophytes, à halophytes et les steppes désertiques). (I.D.O.M. VI, 2005).

Les forêts occupent les chaînes de montagnes du Sénalba, du Djebel Azreg et du Djebel Boukahil. Les forêts sont claires et aérées par manque de sous bois conséquent et l'inexistence de maquis. Les principales essences forestières sont le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier du Phénicien (arar). Les pacages et parcours couvrent aussi une superficie très importante de l'ordre de 2.138.100 ha représentant 66,28% de la superficie totale (D.P.A.T., 2007).

La céréaliculture pluviale est constituée essentiellement de blé et d'orge en zone humide. Les cultures irriguées sont le maraîchage, les fruitiers et les céréales. Les cultures par épandage de crues sont très importantes (I.D.O.M. V, 2005).

1.4. Sols

D'une manière générale et d'après le D.P.A.T. (2007) il y a quatre catégories de sols :

1.4.1. Sols squelettiques

Ce sont des sols peu évolués de très faible profondeur et sont soumis à une érosion continue. Ils sont formés soit sur des roches dures (grès et calcaires) soit sur des roches tendres (sables). Les premiers sont rencontrés sur les reliefs montagneux et sur une grande partie des sols du plateau saharien. Les seconds sont représentés par les dunes de sable du cordon d'El Mesrane.

1.4.2. Sols à accumulation calcaires et gypseuses

Ces sols riches en calcaire et en gypse, sous leurs différentes formes (croûte, encroûtement, diffus, etc), s'étendent sur une très grande superficie au Nord de la wilaya et constituent l'essentiel de la couverture pédologique des communes de Ain Ousséra, Hassi Bahbah et Had sahy. La présence de la croûte calcaire peu profonde, affleurant parfois à la surface du sol réduit la profondeur utile de ce dernier. Les autres propriétés physico-chimiques de ces sols sont peu favorables (pH basique, taux de calcaire élevé, insolubilité des éléments nutritifs, etc). La plupart des sols de cette catégorie sont peu aptes à la mise en culture, à l'exception des sols où la croûte est suffisamment profonde et le taux en calcaire est modéré. Cependant ces sols sont plus aptes au développement de la végétation steppique.

1.4.3. Sols sales

Ce type de sols est suffisamment profond et souvent sans contraintes physiques, par contre, leurs propriétés chimiques sont très défavorables en raison de la présence des sels solubles. Les sols salés se localisent au niveau de la région des Zahrez et également observés dans la zone d'El Idrissia.

1.4.4. Sols à vocation agricole

Ce sont des sols suffisamment profonds, sans contraintes physico-chimiques sévères et peu sensibles à l'érosion.

Pouget (1980) note une grande diversité de sols : sols minéraux bruts, sols peu évolués, vertisols, sols calcimagnésiques, sols ischémiques, sols à cesquioxides de fer, sols hydromorphes et sols halomorphes.

1.5. Géologie

Dans le cadre géologique régional, la structure actuelle de l'Algérie du Nord est due aux mouvements orogéniques hercyniens et Alpains. Ces manifestations tectoniques ont permis l'individualisation des grands ensembles géologiques, tel que l'Atlas saharien auquel appartient notre secteur d'étude (Chibane B. & al, 2010).

Le cadre géologique régional de Ain Oussera est caractérisé par la présence des dépôts continentaux du pliocène et quaternaire couvrant la zone de contact entre les deux domaines tellien et saharien. La zone se caractérise par une géologie simple (couches géologiques horizontales pliocène et miocène du terrain) où la présence d'une cailloutis calcaire encroûte surmontant des roches calcaires (marno-calcaire dur) (P.D.A.U., 2003).

Le synclinal de Djelfa qui représente une vaste structure régulière et selon DGF (2003) est constitué par les successions géologiques suivantes:

- Le Crétacé inférieur : épaisses séries, en grande partie continentale, formées par des dépôts calcaires, marno-calcaires, calcaire-marnes, marnes et marno-calcaire-argileux.
- Le Trias est composé d'argile et de gypse; le sel joue un rôle fondamental par son extension et sa forte teneur.
- Le Mio-Pliocène est composé de calcaire marneux, de marne, d'argile bleutée gréseuse et rouge à poudingue.
- Les couches géologiques du Zehrez, appartenant essentiellement au Crétacé, sont recouvertes par:
- Le Tertiaire continental surmonté par des dépôts du quaternaire.
- Le Crétacé est composé par des couches de calcaires, de marnes, d'argiles et de grès massif poreux et perméable.
- Le Tertiaire, entièrement continental, est représenté principalement par un horizon conglomératique à la base et plus argileux au sommet. Les dépôts du Quaternaire sont principalement constitués par d'importants éboulis de pente, de dunes, d'alluvions torrentielles et de croûtes minces de calcaires discontinues.
- Les séries du Crétacé forment le substratum essentiel, alors que les dépôts du Quaternaire sont dominant dans les bassins. L'encadrement géologique est issu pour l'essentiel des plissements du Tertiaire (D.G.F., 2002).
- Les formations géologiques de Ain El Ibel d'après B.E.R.E.G.H. (2001) sont représentées essentiellement par:

- Les terrains gréseux du Néocomien dans lesquels s'intercalent des calcaires à débris, des calcaires et des dolomies.
- Les grès barrémiens à porosité d'interstices et de fractures et de chenaux dans lesquels s'intercalent des niveaux marno- gréseux parfois argileux.
- Le toit du Barrémien est généralement constitué par 50 à 60 m de marnes bariolées à gypse avec des passées gréseuses.
- Une série argilo-gréseuse d'une épaisseur de 30 à 50m à porosité d' interstices , de fractures et de chenaux, appartenant à l'Albien inférieur et constituée de grès fins et d'argiles ,de grès fins à moyens à stratifications obliques et par des intercalations de grès friables et de sables jaunâtres.
- Une formation argilo- carbonatée à porosité de fractures constituée; de dolomies, de calcaires dolomitiques et de minces passées argileux , de calcaires à lamellibranches appartenant à l'Albien supérieur.

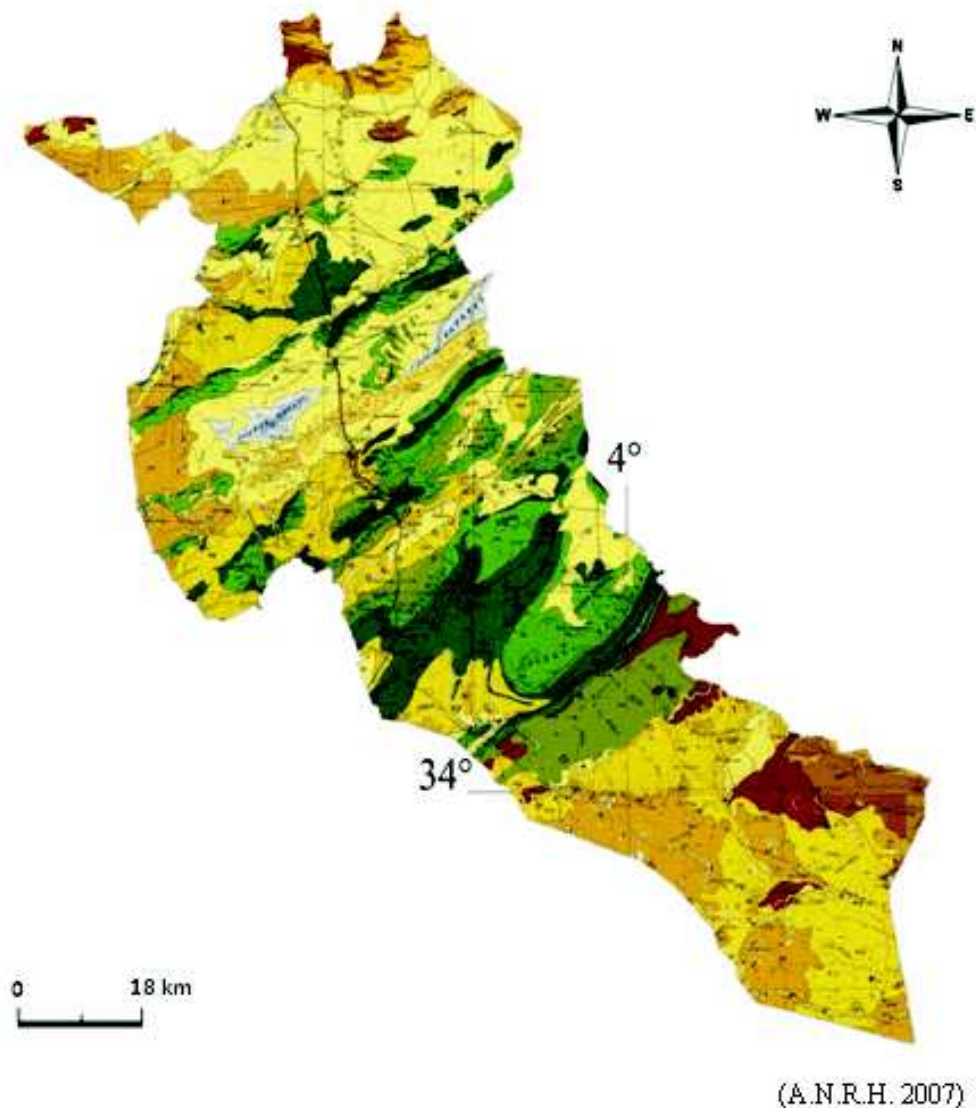
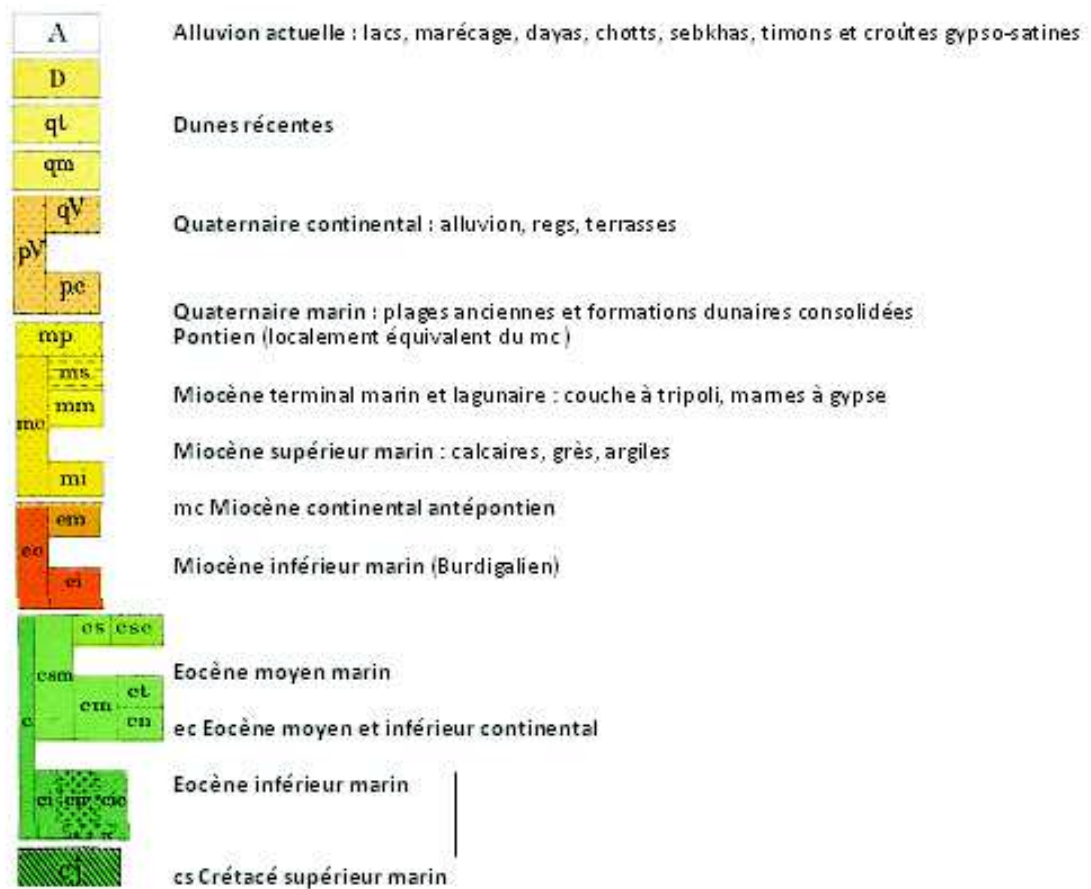


Figure 08 : Carte géologique de la région étudiée



1.6. Hydrologie

Le réseau hydrographique dans cette région est très dense avec des ramifications à travers l'ensemble des reliefs. La direction des principaux oueds est souvent différente de celle des reliefs, elle leur est fréquemment perpendiculaire Nord-Sud à Nord-Ouest-Sud-Est (à l'exemple des Oueds M'zi, Messad, El Djorf, etc..). Il arrive cependant qu'elle soit conforme à ces reliefs comme les vallées affluentes développées à l'intérieur des dépressions résultant de l'inversion des reliefs tels est le cas des combes des Djebels Lazreg et de Tebag au Sud-Ouest de Fernane et des synclinaux perchés de Bou Kahil de Djebel Zerga et de Djelfa.

Par ailleurs, la plupart des oueds dans cette région, aride à sub-aride, ne coulent que lorsqu'il pleut. Exception faite de quelques écoulements pérennes liés à des sources importantes (A.N.A.T., 2003).

1.7. Hydrogéologie

On définit l'aquifère comme un corps (couche, massif) de roches perméable comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable (Castany, 1979).

La wilaya de Djelfa est caractérisée par quatre nappes principales :

La plaine de Ain Oussera, les nappes de Zahrez, le synclinal Nord de Djelfa et le synclinal Sud de Ain El lbel, et chaque nappe a des caractéristiques spéciales.

1.7.1. Plaine de Ain Oussera

- Horizon aquifère du Plio-Quaternaire
- Dont les dépôts sont essentiellement formés par des conglomérats et poudingues bien perméables, très étendus dans la plaine. Son alimentation se fait par son impluvium.
- **Aquifère du Turonien**
- Ces dépôts plongent en profondeur au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le Nord et le Nord-Est.
- Dépôts du Cénomanién
- Servent partout de mur à cet aquifère, dont le rendement est très bas, la profondeur considérable du gisement et la forte minéralisation, font qu'ils n'offrent guère de prospection encourageante pour la région.
- Albien
- Est constitué par des grès continentaux perméables. Il constitue l'aquifère le plus important et le plus intéressant de la région. En effet, cette formation affleure en plusieurs points sur la plaine, tandis qu'ailleurs, le toit de l'aquifère est proche de la surface du sol. En outre, à l'inverse de la formation Aptienne, l'Albien se montre peu cloisonné par les argiles. Plusieurs forages, d'une profondeur de 100 m à 300 m captent ces grès (S.O.G.R.E.A.H., 2007).
- **Formation Barrémienne**
- Présente des caractéristiques hydrogéologiques aussi intéressantes que celles de l'Albien, et constitue de ce fait, un réservoir important.

1.7.2. Nappes de Zahrez

D'après la direction régionale des hautes plaines stéppiques de l'ANRH de Djelfa (1998) les faciès géologiques sont décrits dans une optique hydrodynamique. Le caractère essentiel est la capacité des formations à l'infiltration des eaux ou la perméabilité dans le sens hydrogéologique du terme.

- Barrémien
- Les grès friables à stratifications entrecroisées affleurant sur les bordures Nord et Sud du Zehrez en font un bon aquifère, cependant les intercalations de niveaux argileux réduisent sa perméabilité globale.
- Aptien
- Constitué de calcaire et d'argile avec des intercalations de marnes, il n'est pas aquifère et constitue au contraire un écran imperméable entre les grès de l'Albien et ceux du Barrémien.
- Albien
- De lithologie semblable à celle du Barrémien, constitué d'épais niveaux gréseux avec des intercalations de niveaux argileux, il constitue un bon aquifère dans la région.
- Cénomanién
- La prédominance des faciès argileux sur les calcaires ainsi que la présence de niveaux gypseux en quelques endroits, confèrent à ce niveau le caractère d'écran imperméable et donc très peu aquifère.
- Turonien

- La fissuration des calcaires massifs donne au Turonien les caractéristiques d' un bon aquifère.
- Sénonien
- Ce faciès à dominante argileuse et calcaire argileux, présente un caractère imperméable et donc ne peut être aquifère.
- Tertiaire continental
- Seule la partie basale conglomératique constitue un bon aquifère, cette formation devient argileuse au sommet.
- Quaternaire
- Constitué de sables avec des intercalations d'argiles, des éboulis de pentes, des dunes et des alluvions, il couvre une grande partie du bassin, son épaisseur est très variable selon les endroits, elle atteint une valeur maximale de 200 m dans le remplissage au Sud du bassin

1.7.3. Synclinal Nord de Djelfa

La géologie du synclinal Nord de Djelfa laisse entrevoir plusieurs possibilités d'aquifères intéressants tel que (ANRH, 1993):

- Les grès du barrémien;
- Les grès de l' Albien;
- Les calcaires fissurés du Turonien;
- Le Mio-plio-Quaternaire.

La lithologie de ces formations, leur étendue, la fracturation avancée dans certain cas et la forme en cuvette du synclinal ainsi que les nombreux forages hydrauliques, sont autant d'atouts qui démontrent une richesse en eau souterraine. Il apparaît que certaine formation affleure telle que l'albien

Les formations aquifères composant le synclinal de Djelfa ont la structure qu'on peut approximativement schématiser avec leurs épaisseurs par le dessin suivant :

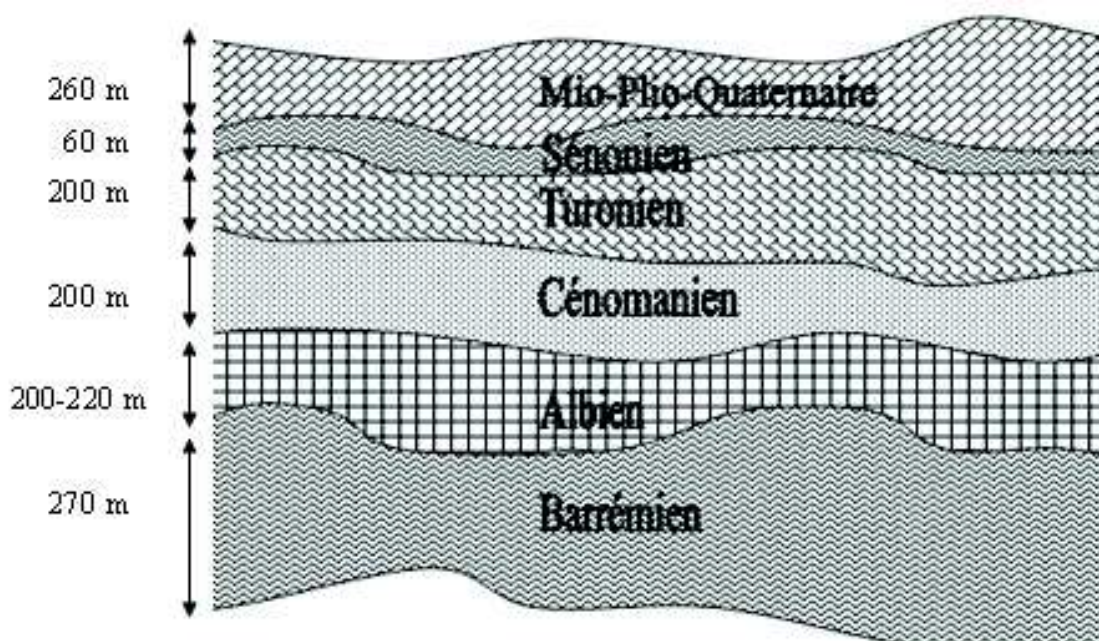


Figure 09 : Formations aquifères du synclinal de Djelfa

- Grès du Barrémien
- Le Barrémien est représenté dans la région par des grès rouges, parfois blanchâtres ou jaunâtres. Les grès en général sont compacts (rares passage de grès friables) de granulométrie fine et homogène. Les diaclases et les fractures sont nombreux, quelques petites failles sont également présentes. Dans la partie supérieure on remarque des passages des grès marneux et des marnes franches jaunes ou vertes.
- Grès de L'Albien
- L'Albien est représenté par des grès rouges compacts passant parfois à des grès quartzeux et quartzites, dans sa partie inférieure les passages marneux sont fréquents. Ces dernières sont à l'origine de sources qui sortent au contact des grès et des marnes imperméables de l'Aptien.
- Calcaire du Turonien
- Il s'agit de calcaires dolomitiques et de dolomies massives, fissurées se présentant en dalles ou se débitant en plaquettes. Les fissures et les diaclases sont probablement élargies en profondeur par dissolution, jouant ainsi un rôle important dans la circulation des eaux et favorisant l'infiltration. Ces calcaires reposent sur les séries marneuses du Cénomaniens et sont surmontées par des séries imperméables marneuses et marno-calcaires du Sénonien inférieur.
- Mio-Plio-Quaternaire
- Au niveau de la partie centrale de ce synclinal affleurent des argiles rouges, par endroit recouverte de galets fluviatiles. La teneur en sable dans les argiles est très faible, les bancs de sables ne sont pas délimités. Les formations du Mio-Plio-Quaternaire reposent sur le sénonien, dont les niveaux marneux assurent la rétention des eaux.

1.7.4. Synclinal Sud de Ain El Ibel

D'après la série stratigraphique, le synclinal Sud est caractérisé par trois principaux aquifères qui sont: le Valenginien barrémien, l'Albien, le tertiaire continental quaternaire.

- Valenginien-Barrémien
- Cet aquifère constitue la principale source d'eau dans la région, et offre le plus grand débit et la meilleure potentialité, il dépasse les 1500 m d'épaisseur. Il est composé d'alternance de grès fin à moyen avec des argiles gréseuses. L'affleurement de cette structure ne s'observe que dans la partie Sud de Ain El Bell, depuis le flanc NW de Djebel Zerga jusqu'au flanc Sud de Djebel Sefra, vers le Nord, cet aquifère est recouvert par des formations plus récentes (Aptien jusqu'au Sénonien). Sa profondeur dans l'axe du synclinal est de l'ordre de 2000 m (B.N.E.D.E.R., 1993).
- Albien
- L'Albien affleure dans la partie occidentale du synclinal sur le flanc Ouest d'une structure anticlinale où il est représenté essentiellement par :
 - Une série argilo-gréseuse d'une épaisseur de 30 à 50m attribuée à l'Albien inférieur et constituée de grès fins et d'argiles, de grès fins à moyens à stratifications obliques et par des intercalations de grès friables et de sables jaunâtres.
 - Une formation argilo-carbonatée constituée de marnes jaunes de dolomies, de calcaires dolomitiques, appartenant à l'Albien supérieur (B.E.R.E.G.H., 2001).
- Tertiaire Continental-Quaternaire

Les dépôts du tertiaire continental et du quaternaire se rencontrent essentiellement dans les vallées et les dépressions. Ils sont hétérogènes, avec une épaisseur totale n'excédant pas les 150 m. Ces dépôts peuvent former par endroits une nappe libre (B.N.E.D.E.R., 1993).

2. Climat

D'une manière générale, la zone d'étude se classe dans l'étage bioclimatique semi-aride caractérisé par l'existence de deux saisons :

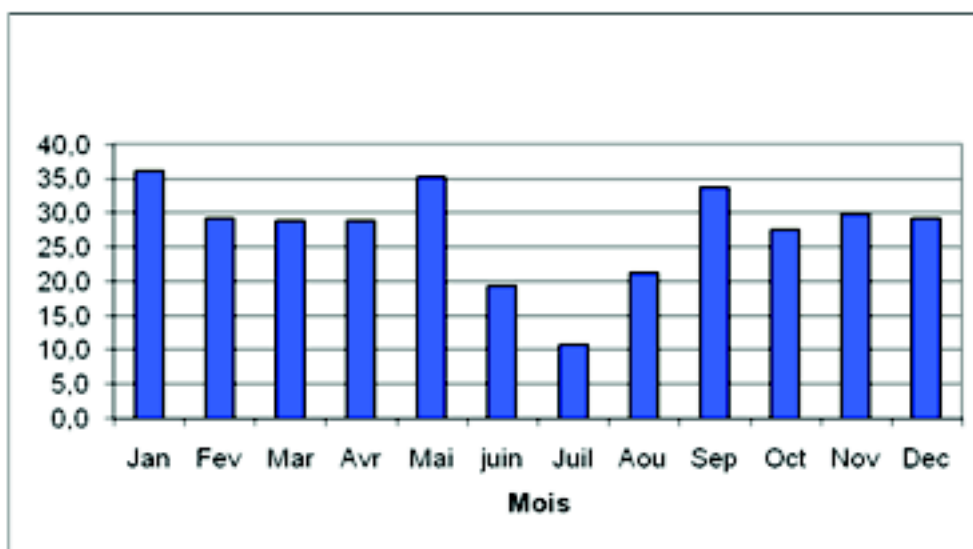
- saison estivale sèche et chaude,
- saison hivernale froide.

Les informations concernant les données climatiques sont recueillies auprès l'office national de la météorologie de la Wilaya de Djelfa allant d'une période de 1975 à 2009.

2.1. Pluviométrie

D'une manière générale, la pluviométrie est marquée par une grande irrégularité d'une année à une autre. Les pluies sont souvent sous forme d'orages.

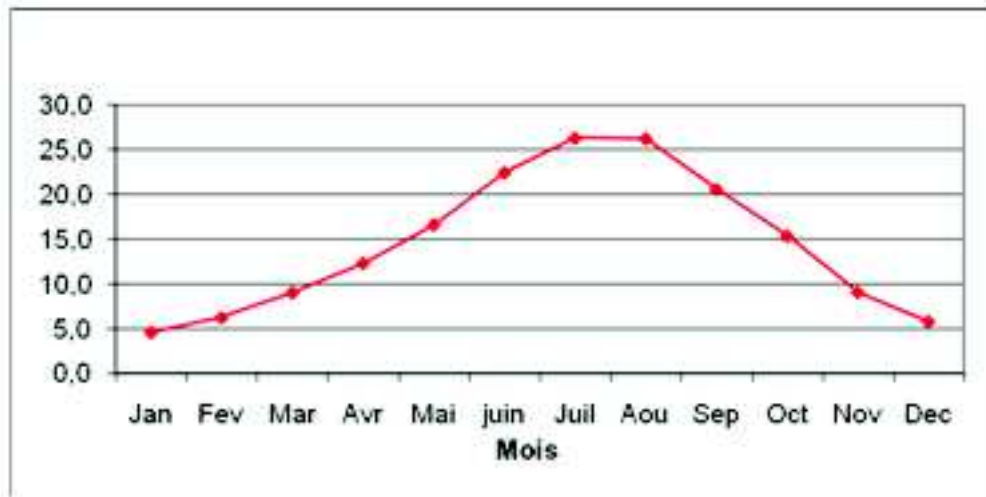
La pluviométrie mensuelle enregistrée est reportée sur la figure ci-dessous, on y observe que les précipitations maximales sont marquées, principalement en janvier, mai et septembre avec un maximum pour le mois de janvier (36 mm), alors que le mois le plus sec est juillet avec 10,9 mm, les autres mois ont des moyennes convergentes sauf le mois de juin et août.



ONM, 2010

Figure 10 : Pluviométries mensuelles moyennes (mm) 1975-2009

2.2. Températures



ONM, 2010

Figure 11 : Températures mensuelles moyennes (°C) 1975-2009

Ce paramètre est un facteur très important dans l'évaluation du déficit d'écoulement, qui entre dans l'estimation du bilan hydrologique. Le climat semi aride se traduit par des étés chauds et des hivers froids. La température moyenne annuelle est de 14,6 °C. La figure 04 donne les températures moyennes mensuelles pour une période de 34 ans (1975-2009).

On note que la période chaude s'étale de mai à octobre, la température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois de juillet (26,3°C), quant à la période froide, elle s'étale sur une durée moyenne de quatre mois à partir de novembre jusqu'à le mois de mars et la température la plus basse est celle du mois de janvier (4,8 °C)

2.3. Diagramme ombrothermique

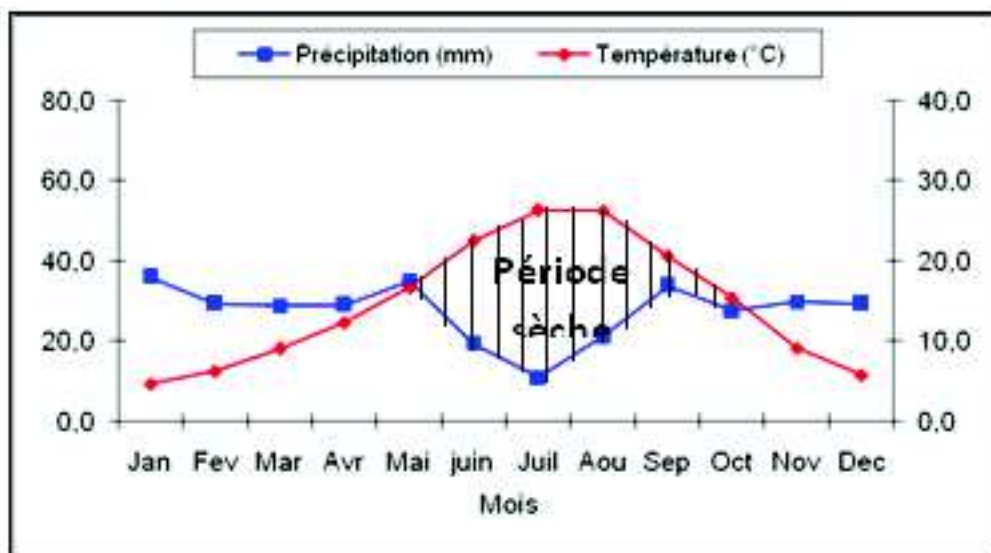


Figure 12 : Diagramme ombrothermique 1975-2009

A partir des valeurs de la température moyenne mensuelle et la précipitation moyenne mensuelle pour la période (1975-2009), le diagramme ombrothermique a été établi.

D'après ce diagramme (Figure 05), on peut distinguer deux saisons, l'une humide s'étend depuis mi-octobre jusqu'à la fin de mai, tandis que l'autre sèche, s'étend de la moitié du mois de mai à la moitié de mois d'octobre.

3. Potentialités en eaux reconnues

Les potentialité en eau totale (superficielles et souterraines) reconnues dans la région de Djelfa sont estimées à 150 Hm³/an (ANAT, 2003).

4. Alimentation en eau potable

En tenant compte de la classification du réseau d'agglomération de la région de Djelfa et des données relatives à l'estimation de la population, les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable ont été évaluées sur la base des dotations en eau suivantes :

Tableau n° 10: Besoins en eau pour l'alimentation en eau potable.

| Réseau d'agglomération | Dotations en eau |
|-----------------------------------|------------------|
| Agglomération chef-lieu de wilaya | 180 l/j/hab |
| Agglomération urbaine | 150 l/j/hab |
| Agglomération semi urbaine | 120 l/j/hab |
| Agglomération rurale | 100 l/j/hab |

(A.N.R.H, 2008)

5. Besoin en eau d'irrigation

La superficie globale en terres irrigables est estimée d'après l'ANRH (2008) à 58.076 hectares. La superficie irriguée totale au niveau de la région est actuellement 10.149 hectares ce qui représente seulement 17 % du potentiel irrigable connu. A cet effet l'ANRH établi les besoins en eau suivantes:

Tableau n° 11: Besoin en eau d'irrigation

| Unité hydrogéologique | Irrigation (Hm ³ / an) | AEP (Hm ³ / an) | Irrigation + AEP (Hm ³ /an) |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|
| Plaine de Ain Oussera | 12 | 35,7 | 47,7 |
| Bassin de Zahrez | 15 | 19,2 | 34,2 |
| Le synclinal Nord de Djelfa | 13,5 | 25,5 | 39 |
| Le synclinal Sud de Ain El Ibel | 10,9 | 11,1 | 22 |
| Total | 51,4 | 91,5 | 142,9 |

(A.N.R.H. 2007)

Chapitre IV : Matériels et méthodes

1. Collecte et mise en forme des données

Les échantillons analysés sont prélevés de forages et de puits dont les données sont collectées de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H) de la wilaya de Djelfa. Les points d'eau analysés correspondent à la campagne 2006 pour les paramètres physico-chimiques et la campagne 2009 pour les niveaux piezométriques, et sont au nombre de 86 puits et forages répartis sur le territoire de la zone d'étude et ce sont les données disponibles, et on a utilisé la carte topographique de Djelfa à l'échelle de 1/200000. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'ANRH (d'Alger) pour chaque point d'eau. La zone d'étude est localisée entre les latitudes 80.000 m et 219.000 m Nord et les longitudes 461.000 m et 564.000 m Ouest sur une superficie d'environ 14360 km² et touche des parties des bassins versants 1, 6 et 17. La carte suivante présente la zone d'étude et la répartition des points d'eau étudiés.

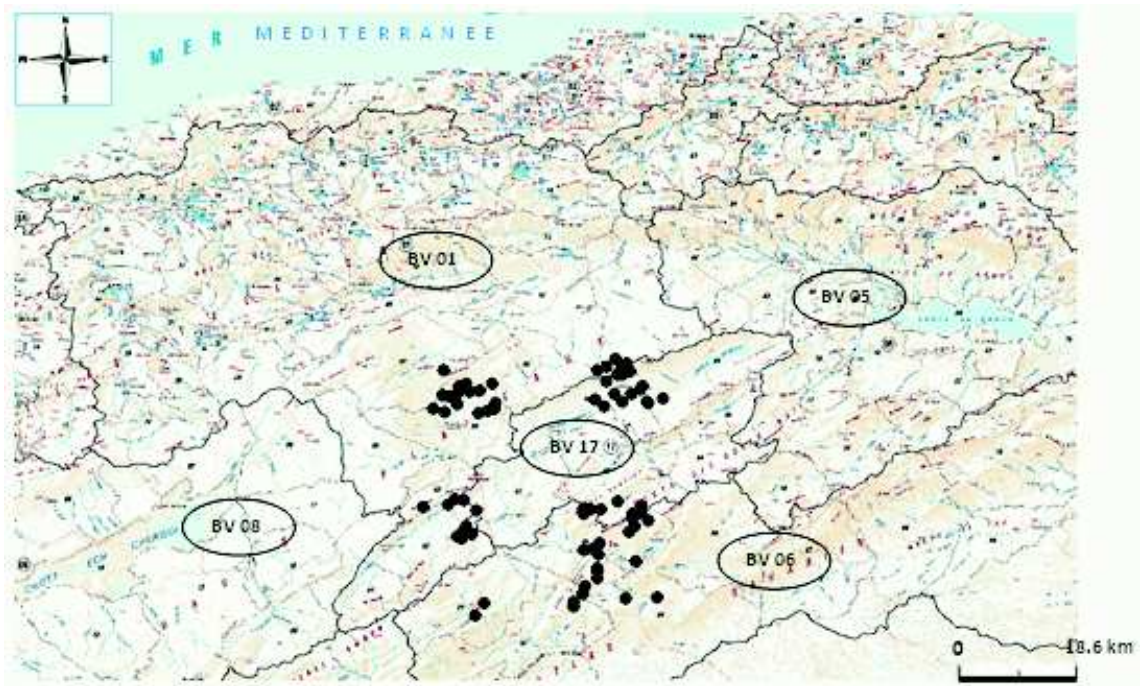


Figure 13: La zone d'étude et la répartition des points d'eau étudiés

2. Structuration et traitement des données

2.1. Organisation des données dans l'Excel

Après l'échantillonnage et l'analyse des points d'eaux, les résultats ont été assemblés dans une feuille de calcul d'Excel de tous les paramètres physico-chimiques avec les coordonnées de ces points d'eau (X, Y).

2.2. Création d'une banque de données

La réalisation de la banque de données consiste à créer un fichier de données disposant respectivement de colonnes représentant les coordonnées (X, Y) et les paramètres étudiés sous forme d'une extension data (.data) à partir du logiciel Surfer, puis la localisation des points sur la carte topographique qui déjà calée par le logiciel Mapinfo. Le Krigeage produit un maillage régulier des valeurs interpolées où on utilise un krigeage par points. Une fois le variogramme est établis, avec le programme Surfer les données krigées sont stockées dans un fichier avec l'extension «.grid». Le logiciel Surfer utilise le fichier «.grid» pour établir la cartographie des paramètres étudiés. Il n'est pas visé à obtenir une carte manifestant exactement le phénomène tel qu'il est, mais on se contente bien d'une carte représentant l'aspect général du phénomène et se rapproche de plus en plus de la réalité observée.

3. Présentation et description statistique des données

Les méthodes d'analyse statistique sont appliquées pour caractériser statistiquement la variable étudiée. On s'intéresse surtout au calcul de certain paramètres statistiques classiques : moyenne, écart type et variance.

3.1. Paramètres physico-chimiques

Statistique élémentaire des grandeurs physiques sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau n° 12 : Statistique élémentaire des éléments physiques.

| | pH | CE (μ S/cm) | RS (mg/l) |
|---------------------|-------|------------------|------------|
| Max | 10,60 | 8190 | 4614,00 |
| Min | 7,57 | 450 | 300,00 |
| Moyenne | 8,43 | 2786,8 | 1636,88 |
| Ecart - type | 0,66 | 1794,46 | 1064,14 |
| Variance | 0,43 | 3220105,84 | 1132386,59 |

Tableau n° 13 : Statistiques élémentaires des éléments chimiques

| | Ca ⁺⁺ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/ l) | CO ₃ ⁻ (mg/l) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/ l) | Na ⁺⁺ (mg/l) | Mg ⁺⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | SO ₄ ⁻⁻ (mg/l) | SAR |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|--|---|--|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---|-------|
| Max | 726,73 | 1712,00 | 60,00 | 554,00 | 93,50 | 933,93 | 407,74 | 60,76 | 2140,00 | 105,7 |
| Min | 20,44 | 40,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 14,71 | 0,95 | 1,67 | 10,00 | 1,03 |
| Moyenne | 201,60 | 416,75 | 5,60 | 99,07 | 38,46 | 191,71 | 86,62 | 11,44 | 549,62 | 16,47 |
| Ecart - type | 156,03 | 372,68 | 10,86 | 86,69 | 28,77 | 212,92 | 66,39 | 9,98 | 515,12 | 17,50 |
| Variance | 24346,83 | 138888,76 | 117,89 | 7515,01 | 827,53 | 45332,86 | 4407,62 | 99,70 | 265343,53 | 306,3 |

4. Discussion

Les résultats destableaux ci-dessus montrent que les données présentent une dispersion importante des paramètres bien marquée avec des valeurs moyennes physico-chimiques dépassent les normes recommandées par l'OMS et on peut différencier 3 groupes sont :

- Groupe 1 : Eléments dépassent beaucoup les normes se sont : Ca⁺⁺, Cl⁻, SO₄⁻⁻, CE ;
- Groupe 2 : Eléments en concordance avec les normes sont : Na⁺⁺, Mg⁺⁺, RS, pH ;
- Groupe 3 : Eléments sont dans les normes: HCO₃⁻, NO₃⁻, K⁺.

Et n'oublie pas que dans le groupe 2 et 3 on a toujours des points où les éléments dépassent les limites de l'OMS, sauf HCO₃⁻ on a trouvé tous les points restent au-dessous des normes.

5. Présentation des logiciels utilisés

La bonne gestion des forages et puits passe par une bonne connaissance de leurs états physico-chimiques (pH, conductivité, Ca, K, Mg, Na, Cl, HCO₃, SO₄). La cartographie informatisée à l'aide de logiciels disponibles (Surfer, MapInfo) est l'outil de travail approprié permettant de tracer les diverses distributions spatiales de ces paramètres. La représentation de cartes thématiques en iso-lignes est une alternative aux cartes conventionnelles. Ces cartes sont obtenues par une méthode d'interpolation désignée sous le nom de Krigeage. On a utilise la méthode d'interpolation par Krigeage du logiciel SURFER (version 7.0) ainsi que le mapinfo par la superposition des cartes.

5.1. Présentation du logiciel surfer (7.0)

Surfer est un logiciel de représentation cartographique en 3D. Ce dernier permet la création de plusieurs types de graphiques. Surfer convertit rapidement les données en cartes et surfaces, et permet de contrôler toutes les options graphiques et d'obtenir exactement le résultat voulu.

* Courbes de niveaux, Surfaces 3D * Affichage de points sur une carte * Importation de fonds de cartes géographiques * Calculs de surfaces et de volumes * Superposition de graphiques sur des fonds de cartes * Analyse spectrale * Feuille de travail et fonctions de type tableur * Fonctions d'importation (Excel) * Fichiers de données de taille illimitée

5.2. Présentation du logiciel Mapinfo (6.5)

Mapinfo est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les objets qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent les SIG offrent toutes les possibilités des bases de données (telles que requêtes et analyses statistiques) et ce, au travers d'une visualisation unique et d'analyse géographique propres aux cartes. Ces capacités spécifiques font du SIG un outil unique, accessible à un public très large et s'adressant à une très grande variété d'applications.

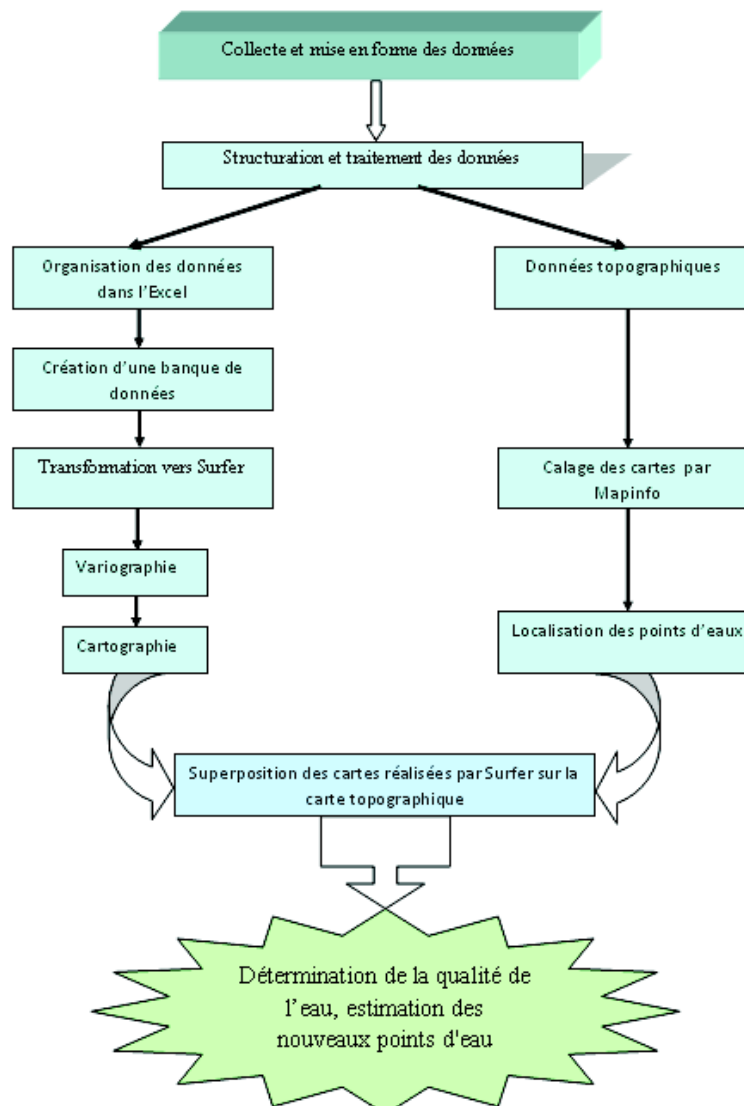


Figure 14 : Organigramme général des étapes du mémoire

Chapitre V : Approche géostatistique

La géostatistique est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale d'une

propriété quelconque ainsi que son estimation s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel.

L'étude géostatistique comprend essentiellement deux phases:

- la première est la caractérisation de la structure spatiale de la variable régionalisée;
- la seconde est l'estimation de cette variable en utilisant un outil d'interpolation.

1. Interpolation

L'interpolation spatiale se définit par la prévision de la valeur d'une variable en un site à partir de valeurs mesurées en des sites voisins. Elle peut s'effectuer par une méthode déterministe ou stochastique. Les polygones de Thiessen, la méthode de l'inverse de la distance et les splines sont des exemples de méthodes déterministes (Arnaud et Emery, 2000).

2. Géostatistique

La géostatistique est une méthode d'interpolation relativement récente pour étudier la variabilité spatiale. Elle est basée sur la théorie des variables régionalisées, développée par Krige (1951), Matheron (1965), Journel et Huijbregts (1978), et Cressie (1993).

La géostatistique est une branche des statistiques appliquées qui mesure la dépendance spatiale et la structure spatiale d'une propriété mesurée (Mulla, 2000). Elle est basée sur la théorie variable régionalisée par laquelle la corrélation spatiale de quelques propriétés peut être traitée (Matheron, 1963). Généralement, l'analyse géostatistique inclut deux phases : le premier est le modèle spatial (variographie) et la deuxième phase est l'interpolation spatiale (krigeage).

2.1. Principales étapes d'une étude géostatistique

Luis, (2003) établit les principales étapes d'une étude géostatistique en cinq phases:

1. L'analyse exploratoire des données. Il s'agit ici d'apprécier la distribution des données dans l'espace, d'appréhender leur degré d'homogénéité, de rechercher et de visualiser les observations "atypiques",

2. L'analyse variographique. Il s'agit tout d'abord de mettre en évidence les caractéristiques des données, puis de les décrire mathématiquement afin de pouvoir mettre en œuvre un estimateur qui les prenne en compte.
3. Modélisation de "la variable régionalisée". La création de ce modèle correspond à une deuxième étape qu'on appelle "modélisation de la régionalisation", c'est-à-dire de la tendance spatiale de la distribution globale des données.
4. Interpolation par krigeage. Dans cette étape, on estime les valeurs à des emplacements non échantillonnés en combinant le résultat de la modélisation de la régionalisation et l'information locale.
5. Evaluation de l'incertitude locale. Une dernière étape consiste à évaluer l'incertitude locale.

2.2. Approche stochastique

Lorsque les informations sont rares, voire absentes, lorsqu'il n'existe pas de description "physico-mathématique" du phénomène étudié, il faut avoir recours à d'autres types de modèles. La seule alternative consiste à utiliser un modèle probabiliste qui décrira le phénomène à l'aide d'un processus aléatoire. Cette procédure permet de quantifier à la fois ce que l'on connaît du phénomène et ce que l'on ignore; on sera alors capable de proposer une estimation des valeurs inconnues, mais également une mesure de précision. Il faut bien voir que le recours à la théorie des probabilités n'est qu'un intermédiaire de calcul, car aucun processus aléatoire n'est réellement à l'origine du phénomène régionalisé (Luis, 2003).

2.3. Variable et fonction aléatoire

Considérons les données disponibles comme les résultats d'un processus aléatoire régi par certains mécanismes probabilistes. Nous avons donc en tout point $s=(x,y)$ de la zone étudiée une variable associée $Z(s)$, dite **Variable aléatoire**, et la mesure effectuée en ce point est une réalisation notée $z(s)$ de la variable. On appelle fonction aléatoire, ou processus aléatoire, la collection des variables aléatoires $\{Z(s), s \in D\}$ (Isaaks et Srivastava, 1989, Cressie, 1993 et Matheron, 1970).

L'approche géostatistique se manifeste donc à travers la théorie des variables régionalisées qui a été développée par G. Matheron qui se fixe comme objectifs de caractériser la structure spatiale des phénomènes naturels sous une forme mathématique appropriée et de résoudre le problème d'estimation à partir d'un échantillonnage donné (Azouzi, 1993).

2.4. Variable régionalisée

La variable régionalisée est une fonction numérique traditionnellement notée $z(s)$, qui prend ses valeurs dans une région bien délimitée de l'espace appelée *champ* ou *domaine*. La notion de variable régionalisée est employée dans de nombreux domaines d'application pour quantifier des grandeurs ou des phénomènes "spatiaux" ainsi, un phénomène est régionalisé s'il se déploie dans un domaine spatial D et montre une certaine structure (auto-corrélation spatiale) (Arnaud et Emery, 2000).

2.4.1. But de la théorie des variables régionalisées

Matheron (1963) a résumé le but de la théorie des variables régionalisées en trois points essentiels :

1. d'établir les bases théoriques permettant de rendre compte des caractéristiques structurales des phénomènes naturels sous une forme mathématique appropriée,
2. elle couvre l'ensemble des possibilités allant des surfaces (ou courbes) les plus lisses jusqu'aux plus accidentées.
3. de fournir les moyens pratiques pour la résolution des divers problèmes de l'estimation qui se posent à partir d'un échantillonnage fragmentaire.

2.5. Hypothèse de stationnarité

Statistiquement parlant, la stationnarité d'un phénomène exprime son homogénéité spatiale qui fait qu'il se répète lui même en quelque sorte dans l'espace. (Azouzi, 1993).

Par cette hypothèse, on a levé l'obstacle de la réalisation unique, mais il faut noter que cette hypothèse est essentiellement réfutable, c'est-à-dire qu'il est parfaitement possible qu'un modèle stationnaire ne soit compatible avec les données : il faut alors s'orienter vers la géostatistique non stationnaire (Chauvet, 1992).

On peut sortir de cette impasse en posant l'hypothèse que toutes les relations entre deux sites voisins (séparés par une distance h) sont identiques et en considérant chaque paire de mesures comme différentes. Ceci revient à supposer que la covariance, entre deux sites séparés par une distance h , ne dépend que de leur localisation relative (Arnaud et Emery, 2000).

Cette hypothèse limitative, traduisant une certaine homogénéité du phénomène dans l'espace, est dite hypothèse de stationnarité d'ordre deux.

2.5.1. Hypothèse de stationnarité du second ordre

Du point de vue mathématique, une fonction aléatoire $Z(s)$ est stationnaire du second ordre si :

a) L'espérance mathématique existe et ne dépend pas du site s .

$$\forall s, E\{Z(s)\} = m \text{ indépendant de } s \quad (1)$$

b) La covariance entre chaque paire $\{Z(s+h), Z(s)\}$ existe et ne dépend que de h .

$$\forall s, s+h, \text{cov}\{Z(s+h), Z(s)\} = C(h) \text{ ne dépend que de } h \quad (2)$$

La stationnarité du second ordre implique l'existence de la variance a priori en tout site s et du variogramme entre toute paire de sites $s+h$. Nous avons respectivement :

$$c) \forall s, \text{var}[Z(s)] = \text{cov}[Z(s), Z(s)] = C(0) \quad (3)$$

$$d) \forall s, s+h, \text{var}[Z(s+h) - Z(s)]/2 = \gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (4)$$

La relation (d) indique que, sous l'hypothèse de stationnarité du second ordre, la covariance et le variogramme sont deux outils équivalents (figure 07) pour quantifier la dépendance qui existe entre les deux mesures $Z(s)$ et $Z(s+h)$, prises en deux sites séparés de h . A l'infini, $C(h)$ tend vers 0, tandis que $\gamma(h)$ tend vers un palier qui est égale à la variance a priori $C(0)$ (figure 07). La portée correspond à la distance à partir de laquelle deux valeurs ne sont plus corrélées (Luis, 2003).

2.5.2. Hypothèse intrinsèque

Elle se traduit par le fait que pour tout vecteur h , l'accroissement $[Z(X+h) - Z(X)]$ possède une espérance mathématique et une variance indépendante du point x . On a :

$$E [Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (5)$$

$$\text{VAR} [Z(x+h) - Z(x)] = 2 \gamma(h) \quad (6)$$

Dans ce cas, la fonction aléatoire correspondante est dite fonction aléatoire intrinsèque F.A.I.

La fonction $\gamma(h)$ s'appelle semi-variogramme mais appelée communément variogramme.

Il faut noter aussi que parfois l'hypothèse intrinsèque n'est pas vérifiée sur tout l'étendu de l'espace du phénomène étudié, alors on se contente uniquement d'une hypothèse quasi-intrinsèque où la stationnarité des accroissements est localement vérifiée pour des distances (h) inférieur à une limite (a) , et on définit ainsi des voisinages glissants à l'intérieur desquels l'espérance et covariance (ou variogramme) peuvent être considérés comme stationnaires et où l'information disponible est suffisante pour en faire l'inférence (Azouzi, 1993).

2.6. Variogramme

Pour estimer la structure de dépendance spatiale, nous pouvons soit utiliser le covariogramme ou le variogramme. Dans le premier cas, le covariogramme permet d'estimer la corrélation en fonction de la distance, tandis que le variogramme permet d'estimer la variation des données en fonction de la distance. Le variogramme étant

plus facile à estimer, nous allons donc seulement calculer le variogramme et non pas le covariogramme. En fait, nous calculerons le semivariogramme, qui est simplement la valeur du variogramme divisé par un facteur 2, ce qui est une approche adoptée par la majorité des études impliquant le krigeage (Baillargeon, 2005).

Le krigeage se réalise en deux étapes principales. Dans un premier temps, on évalue la corrélation spatiale à l'aide du variogramme, qui est une mesure de la variabilité des données en fonction de la distance. Dans un deuxième temps, on interpole les données observées en fonction de ce degré de dépendance, processus qu'on appelle le krigeage proprement dit.

On calcule le semi-variogramme expérimental à l'aide de l'équation suivante:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (7)$$

où h représente une distance donnée, $z(x)$ est la valeur de la variable étudiée et $N(h)$ le nombre de paires possibles pour la distance h . Ainsi, pour chaque distance h retenue, on calcule la valeur de $\gamma(h)$. Cette équation permet d'établir la différence moyenne entre deux points espacés d'une distance h . Généralement, pour des champs continus, la corrélation décroît avec la distance. À l'inverse, la variation augmente avec la distance (Philippe, 2009).

Une fois le variogramme expérimental calculé, on essaie de lui ajuster un modèle qui rend compte des caractéristiques observées. C'est l'inférence du variogramme. Quatre principaux modèles peuvent lui être ajustés : exponentiel, gaussien, sphérique ou linéaire (Hamouni, 2006).

2.6.1. Paramètres du semi-variogramme

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique (figure 15). Ce sont la constante ou l'effet de pépité, le palier et la portée (Smith, 1993).

- L'effet de pépité (nugget effect), c'est la valeur de $\gamma(h)$ quand $h=0$, correspond à la variance propre de l'échantillon. Il englobe l'incertitude due à l'échantillonnage et aux erreurs de mesure. L'effet pépité doit être estimé par extrapolation des premières valeurs du semivariogramme. Plus la classe de distance (Δh) est large, plus on aura un semivariogramme lisse, mais aussi un effet pépité plus grand.
- Le palier (sill) est la valeur de semivariogramme qui correspond à la portée. Prendre uniquement la valeur de la variance de l'échantillon conduit à une estimation biaisée du palier, $\gamma(h)$ devient constant avec l'évolution de h .
- La portée (range) La valeur de h pour laquelle $\gamma(h)$ atteint le palier s'appelle la portée, indique la distance à laquelle le semivariogramme se stabilise autour d'une valeur limite. Cette distance mesure la zone d'influence d'une information $z(s)$. En fait, au-delà de la distance h la variable aléatoire $Z(s+h)$ est sans corrélation avec $Z(s)$. La portée tend à augmenter avec la grandeur du jeu de donnée (Wackernagel, 1993).

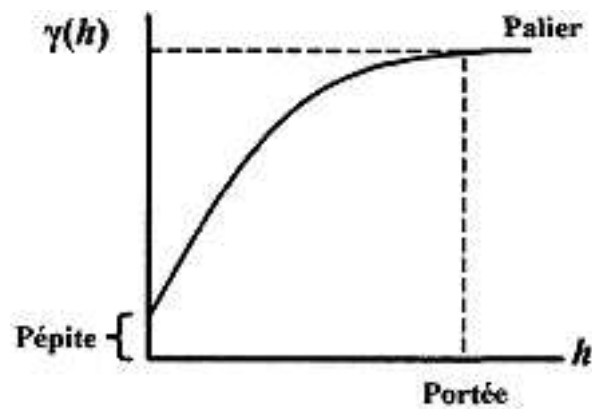


Figure 15 : Paramètres du semi-variogramme

2.6.2. Relation entre covariance et variogramme

Lorsque le variogramme montre un palier, c'est-à-dire si $\lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = C$ où C est une constante, il existe une relation entre la valeur du variogramme pour la distance h et la covariance pour deux observations séparées de la distance h , cette relation est très importante, elle est continuellement utilisée en géostatistique (Scheidt, 2006).

$$\gamma(h) = 1/2 \text{var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (8)$$

$$= 1/2 \text{var}[Z(x)] + \text{var}[Z(x+h)] - 2 \text{cov}[Z(x), Z(x+h)] \quad (9)$$

$$= \sigma^2 - \text{cov}[Z(x), Z(x+h)] \quad (10)$$

Soit enfin, du fait de la stationnarité du processus Z:

$$\gamma(h) = \sigma^2 - \text{cov}(h) \quad (11)$$

$$\gamma(\infty) = \text{cov}(0) = \text{var}[Z(x)] = \sigma^2 \quad (12)$$

Dans le cas où la fonction aléatoire est non seulement intrinsèque, mais aussi stationnaire d'ordre 2, le semi-variogramme est lié à la fonction de covariance par (figure 16):

$$\gamma(h) = \text{cov}(0) - \text{cov}(h) \text{ (Helena, 2002).} \quad (13)$$

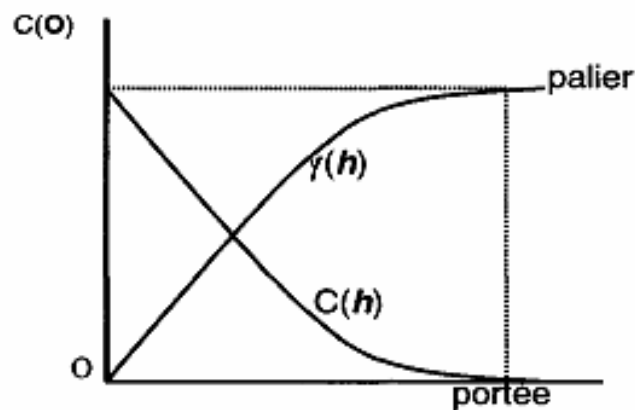


Figure 16 : Covariance et variogramme sous l'hypothèse stationnaire

2.6.3. Phénomène d'isotropie et anisotropie

Le semi-variogramme ne dépend que de h, le vecteur de translation entre les points x et x+h. Ce vecteur contient de l'information sur la distance entre ces deux points, par l'intermédiaire de sa norme (valeur), ainsi que son orientation, on peut dire que si le semi-variogramme ne dépend en fait que de la norme ou la valeur de h, il est dit isotrope. S'il dépend de la direction du vecteur de la translation, il est alors anisotrope (Baillargeon, 2005).

2.6.4. Ajustement à un modèle

Une fois le variogramme expérimental calculé, on essaie de lui ajuster un modèle qui rend compte des caractéristiques observées (figure 08). C'est l'inférence du variogramme (Hamouni, 2006).

L'ajustement des variogrammes expérimentaux aux modèles théoriques (sphérique, exponentiel, gaussien, etc.) est une étape importante dans la détermination et l'interprétation des paramètres de régionalisation (Marc et al., 2008).

2.6.5. Modélisation de variogramme

D'après la figure 17 on peut citer:

- Modèles avec palier

Dans ce cas le semi-variogramme est bornée, la fonction aléatoire associée est donc stationnaire de second ordre (Fig. 17a) :

➤ Modèle pépitique de palier c_0

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , \text{ si } h=a \\ c_0 & , \text{ si } h>a \end{cases} \quad (14)$$

C'est un modèle chaotique où il représente une absence de dépendance spatiale du phénomène étudié. Un krigeage avec ce modèle n'est plus possible et on utilise plutôt une méthode d'estimation analytique telle que la méthode de l'inverse des distance ou tout simplement une régression classique (Marcotte, 1988).

- Modèle sphérique d'effet de pépite c_0 , de palier $c_0 + c$ et de portée a (Fig. 17b) :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \times \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{si } h \leq a \\ c_0 + c, & \text{si } h \geq a \end{cases} \quad (15)$$

• **Portée asymptotique**

- Modèle exponentiel d'effet de pépite c_0 , de palier $c_0 + c$ et de portée pratique égale à $3a$ (Fig. 17c) :

$$\gamma(h) = c_0 + \left(c \times \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \right), \text{ si } h \geq 0 \quad (16)$$

- Modèle Gaussien d'effet de pépite c_0 , de palier $c_0 + c$ et de portée pratique égale à $a\sqrt{3}$ (Fig. 17d) :

$$\gamma(h) = c_0 + c \times \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right], \text{ si } h \geq 0 \quad (17)$$

• **Modèles sans palier :**

Le semi-variogramme n'est pas borné, la fonction aléatoire associée est donc seulement stationnaire intrinsèque (Fig.17e) (Deutsch and Journel, 1998).

- Modèle linéaire sans palier d'effet de pépite c_0 , et de pente m :

$$\gamma(h) = c_0 + mh, \text{ si } h \geq 0 \quad (18)$$

- Modèle de puissance d'effet de pépite c_0 , d'exposant ν et de facteur d'échelle m :

$$\gamma(h) = c_0 + mh^\nu, \text{ si } h \geq 0 \quad (19)$$

où la puissance ν se situe entre 0 et 2 (Arnaud et Emery, 2000).

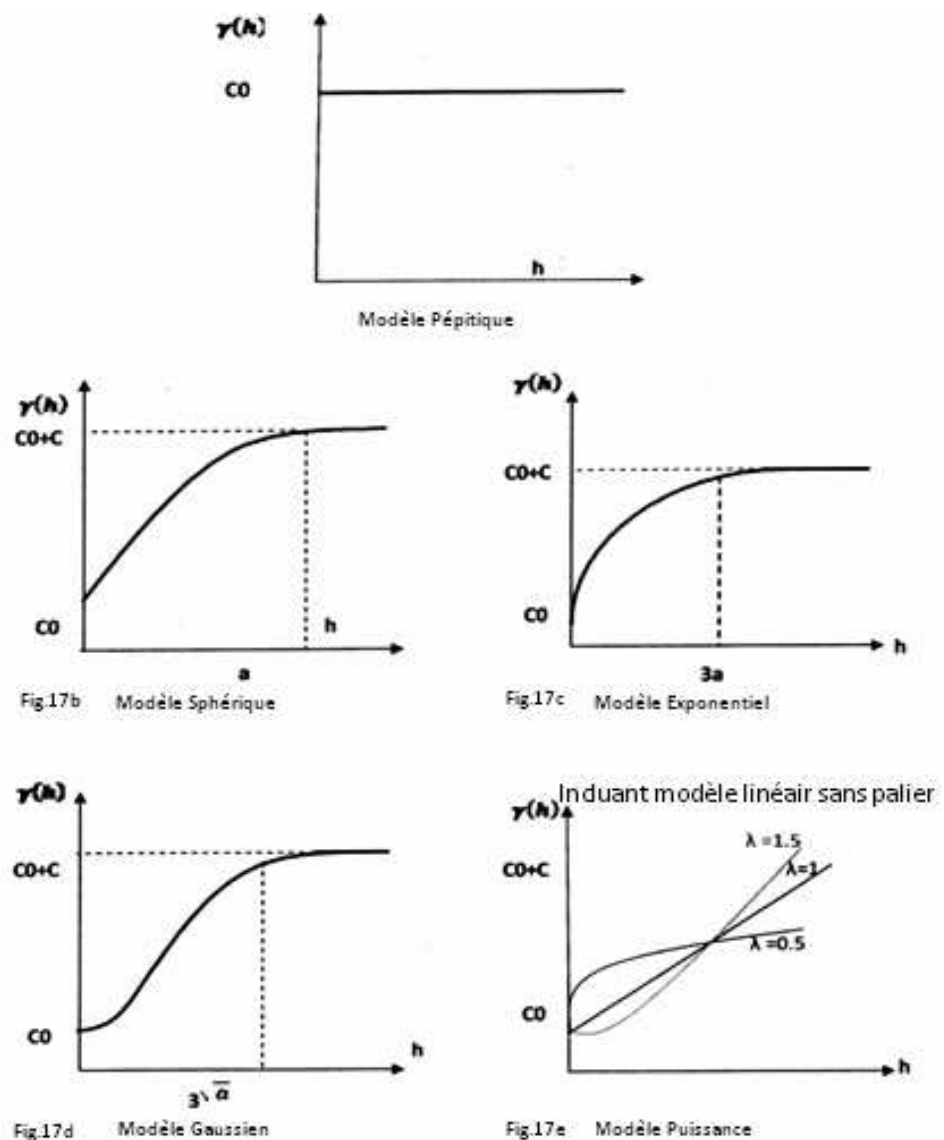


Figure 17 : Les modèles les plus connus du variogramme

2.7. Krigeage

Le Krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Dans les années 50, Krigea développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages. C'est cependant le français Matheron, (1963) qui a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. C'est lui qui a baptisé la méthode " Krigeage ". Il a aussi été le premier a utiliser le terme " géostatistiques " pour désigner la modélisation statistique de données spatiales.

Le krigeage est une méthode d'estimation d'un phénomène connu en un certain nombre de points et a l'avantage parmi d'autres techniques d'interpolation d'utiliser la structure spatiale de la variable pour l'estimation (Delhomme,1978). Ses avantages sont les suivants :

- Le krigeage intègre la connaissance émanant de l'analyse préalable de la structure par le variogramme ;
- Le krigeage est un interpolateur exact. Si un point d'échantillonnage coïncide avec un nœud de grille, la solution du krigeage est égale à la valeur de l'échantillon on dit qu'il est un estimateur BLUE (Best Linear Unbiased Estimator);
- Le krigeage livre une interpolation sur l'erreur d'estimation traduite par la variance de krigeage.

2.7.1. Différents types de krigeage

- Krigeage simple

La théorie du krigeage a d'abord été développée dans un cadre stationnaire de second ordre. Sous cette hypothèse, le krigeage le moins complexe est celui dans lequel la stationnarité postulée est de deuxième ordre et l'espérance de la fonction aléatoire étudiée est supposée connue et constante sur tout le champ. Il s'agit du krigeage simple (Matheron, 1970). Ce krigeage repose sur la modélisation suivante de la fonction aléatoire:

$$Z(h) = m + \delta(h), \quad h \in D \quad (20)$$

avec m constante connue et $\delta(h)$ fonction aléatoire stationnaire de second ordre d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. La stationnarité de second ordre implique que le semi-variogramme de $\delta(h)$ atteint un palier.

- **Krigeage ordinaire**

L'hypothèse du krigeage simple voulant que l'espérance de la fonction aléatoire $Z(h)$ soit connue est rarement vérifiée. Cette méthode a donc été généralisée au cas où l'espérance est inconnue et constante localement, c'est-à-dire sur le voisinage de krigeage. Il s'agit du krigeage ordinaire (Matheron, 1970), la technique de krigeage la plus fréquemment utilisée selon Gratton (2002). Ce type de krigeage ne requiert pas une hypothèse de stationnarité d'ordre deux. Ainsi, il sera développé ici sous l'hypothèse plus générale de stationnarité intrinsèque. Le modèle de base de cette méthode s'énonce comme suit :

$$Z(h) = \mu + \delta(h); \quad h \in D \quad (21)$$

avec μ quasi-constante inconnue et $\delta(\cdot)$ fonction aléatoire stationnaire intrinsèque d'espérance nulle et de structure de dépendance connue.

- Krigeage universel

L'hypothèse de stationnarité sur laquelle repose les deux types de krigeage présentés précédemment peut souvent être mise en doute. En particulier, il semble souvent erroné de postuler que l'espérance de la fonction aléatoire étudiée reste constante ou quasi-constante sur le champ D . En krigeage avec un modèle de tendance, aussi appelé krigeage en présence d'une dérive, l'espérance est une fonction des coordonnées spatiales ou de variables régionalisées auxiliaires connues exhaustivement. La majorité des auteurs en géostatistique parlent alors de krigeage universel (Matheron, 1969 ; Cressie, 1993) et de krigeage avec dérive externe (Goovaerts, 1997; Wackernagel, 2003) respectivement.

Le modèle de base du krigeage universel est :

$$Z(h) = \sum_{j=1}^p f_j(h) \beta_j + \varepsilon(h), \quad h \in D \quad (22)$$

$f_j(h)$ fonctions de la position $S(x,y)$, β_j paramètres inconnus et $\varepsilon(h)$ fonction aléatoire stationnaire intrinsèque d'espérance nulle et de structure de dépendance connue. Les $f_j(h)$ sont déterminés par l'utilisateur.

De la revue présentée dans ce chapitre, le krigeage est une méthode d'interpolation intéressante, de plus, puisqu'il s'agit d'une méthode stochastique, le krigeage permet d'estimer des erreurs de prévisions, et tenir compte de la structure de dépendance spatiale des données. Ainsi, on peut s'attendre à ce que le krigeage génère les prévisions spatiales les plus justes. De plus, l'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par les autres méthodes stochastiques, car les postulats de base du krigeage modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale (Baillargeon, 2005).

Chapitre VI : Résultats et interprétations

1. Variogramme

La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique (Trangmar et al., 1985 in Mathieu, 2009). Ces techniques reposent sur l'analyse numérique de la dépendance des échantillons dans l'espace. En d'autres termes, cela signifie que « plus les échantillons sont rapprochés dans l'espace, plus ils se ressemblent jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils deviennent indépendants les uns des autres » (Nolin, 2000). A cet effet pour estimer la structure de dépendance spatiale, on utilise le variogramme, qui permet d'évaluer la variation des données en fonction de la distance. La représentation graphique obtenue représente ce qu'on appelle le variogramme expérimental qui doit être ajusté par des modèles de variogramme théorique qui approximent le mieux le nuage de points (Mathieu, 2009 et Baillargean, 2005).

1.2. Variogrammes des paramètres physiques

1.2.1. Conductivité électrique

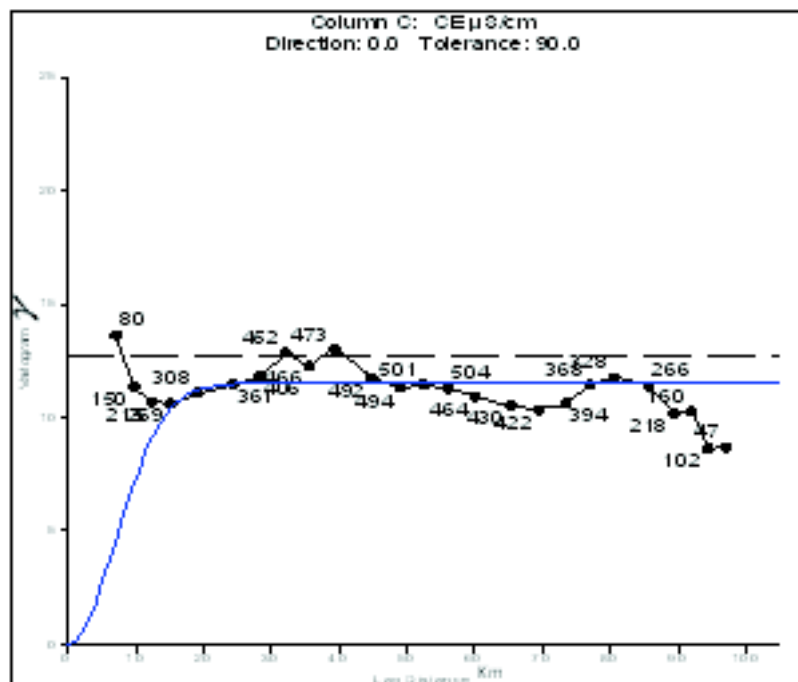


Figure 18 : Le variogramme des valeurs de la conductivité électrique

Le variogramme expérimental des conductivités électriques est ajusté à un modèle gaussien représentant un palier (scale) de 11,5 et portée (length) égale à 10 km avec une anisotropie de ratio 1 et un angle 0° et un effet de pépité nulle, indiquant une absence de

microrégionalité. D'après ce variogramme, on peut dire que cette structure spatiale montre une autocorrélation régionale entre les différents couples des conductivités électrique jusqu'à une distance de 10 km, cette dernière a été prise comme limite pour fixer les dimensions de la maille (maillage) utilisée comme pas d'interpolation par la méthode de krigeage. Le palier indique la variance totale de ce paramètre et sa dispersion résiduelle.

La modélisation de cette structure par variogramme expérimental a été fait avec les caractéristiques spatiales suivantes :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 105

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 17

La valeur verticale (Vertical scale) = 25

1.2.2. pH

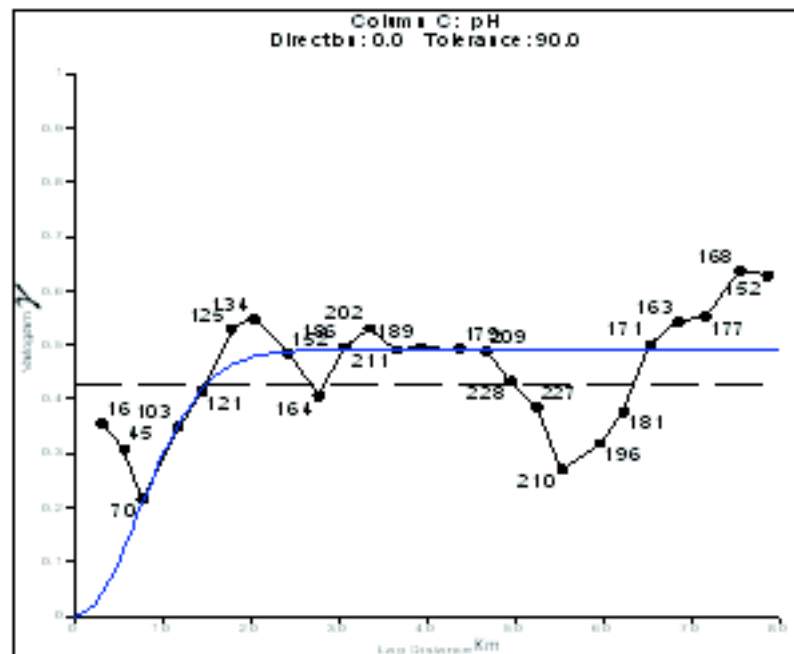


Figure 19 :Le variogramme des valeurs du pH

Le variogramme expérimental des valeurs du pH est ajusté à un model gaussien caractérisé par un palier de 0,49 et une portée égale à 10,5 km avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°.

Les caractéristiques de cette structure sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 80

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 7

La valeur verticale (Vertical scale) = 1

1.2.3. Résidus secs

La figure ci-dessous représente le variogramme expérimental des résidus secs qui est ajusté à un model exponentiel représentant un palier (scale) de 910000 et portée (lenght) égale à 9 km avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0° avec un effet de pépité nulle. D'après ce variogramme, on peut dire que cette structure spatiale montre une autocorrélation régionale entre les différents couples des résidus secs jusqu'à une distance de 9 km, qui a été prise pour la caractérisation du maillage (Griding) dans l'interpolation de ce paramètre par krigeage par de l'option Grid du Surfer.

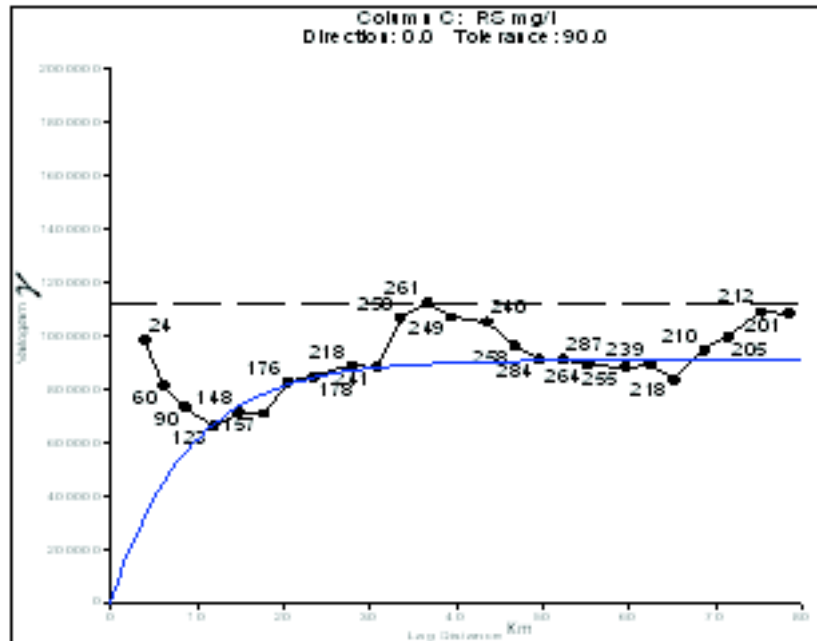


Figure 20 : Le variogramme des valeurs des résidus secs

Le palier indique la variance totale de ce paramètre et sa dispersion résiduelle. Toutes les caractéristiques de ce variogramme ont été introduites comme input dans le krigeage pour l'estimation et par la suite l'établissement de la carte. Ce variogramme présente les paramètres structuraux suivants: La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 80

Nombre de classes (Number of lags) = 25 Largeur de classe (Lag width) = 9

La valeur verticale (Vertical scale) = 200000

1.3. Variogrammes des paramètres chimiques

1.3.1. Cations

Calcium

Le schéma ci-dessous montre un variogramme expérimental des valeurs du calcium dont l'ajustement a été fait par un modèle gaussien ayant un palier de 24600 et portée égale à 29,5 avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°, montrant une auto régionalisation spatiale entre les différents couples du calcium jusqu'à une distance de 29,5 Km. Il faut noter que le palier de 37000 représente la variance totale du calcium.

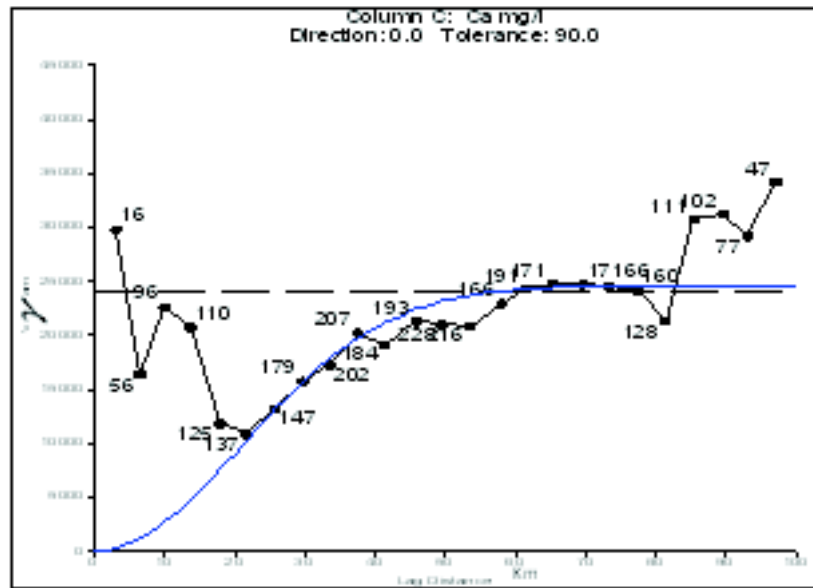


Figure 21 : Le variogramme des valeurs du calcium

Les caractéristiques de cette structure sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 100

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 7

La valeur verticale (Vertical scale) = 45000

· Magnésium

Cette figure représente le variogramme expérimental des valeurs du magnésium, elle est ajustée à un modèle exponentiel représentant un palier de 4300 et portée égale à 20 km avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°, on note que l'autocorrélation existe jusqu'à la distance de

20 km.

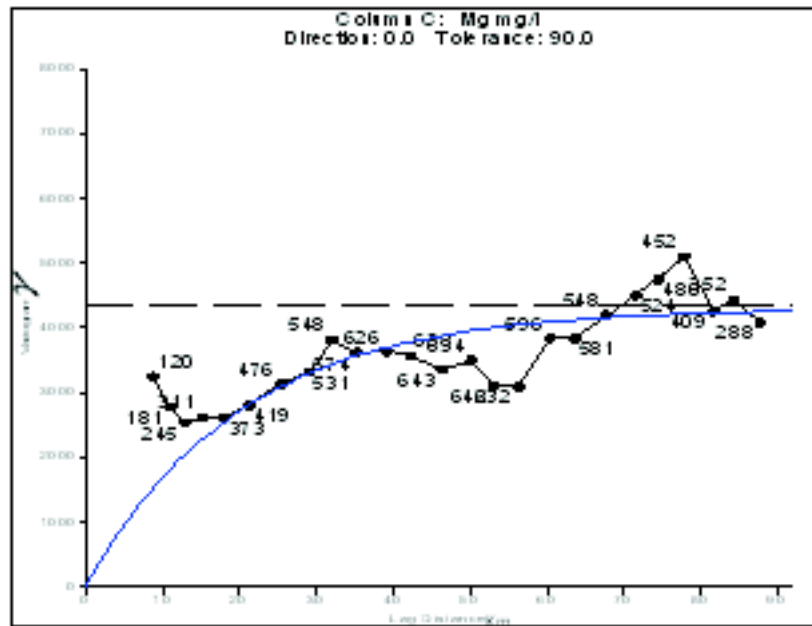


Figure 22 : Le variogramme des valeurs du magnésium

Les caractéristiques de cette structure sont :

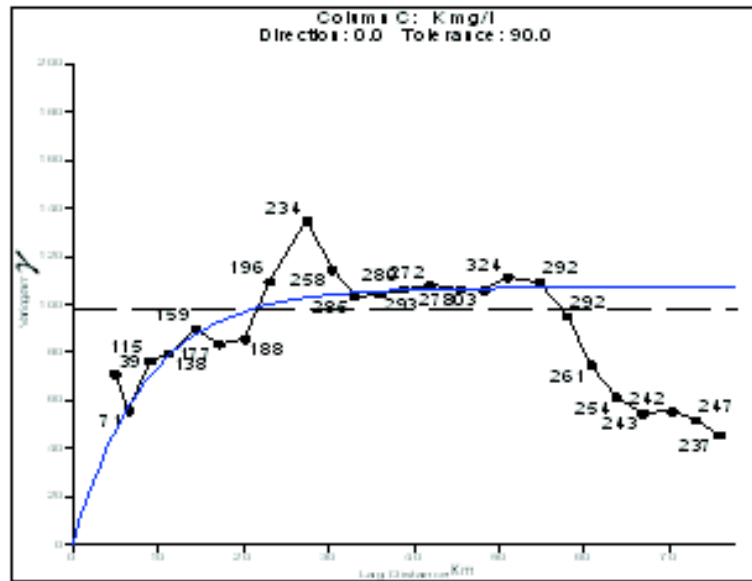
La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 92

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 22

La valeur verticale (Vertical scale) = 8000

Potassium



Le variogramme expérimental des valeurs du potassium est présenté par un modèle d'ajustement exponentiel ayant un palier de 107 et une portée égale à 8,5 km avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0° avec les caractéristiques suivantes :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 78

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 10

La valeur verticale (Vertical scale) = 200

Figure 23 : Le variogramme des valeurs du potassium

Sodium

Le variogramme du sodium est ajusté à un modèle exponentiel ayant les valeurs de 60000 et de 15 de palier et de portée respectivement avec une anisotropie 1 et un angle d'orientation 0° dont les caractéristiques de l'ajustement sont les suivantes :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 80

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 19,5

La valeur verticale (Vertical scale) = 90000

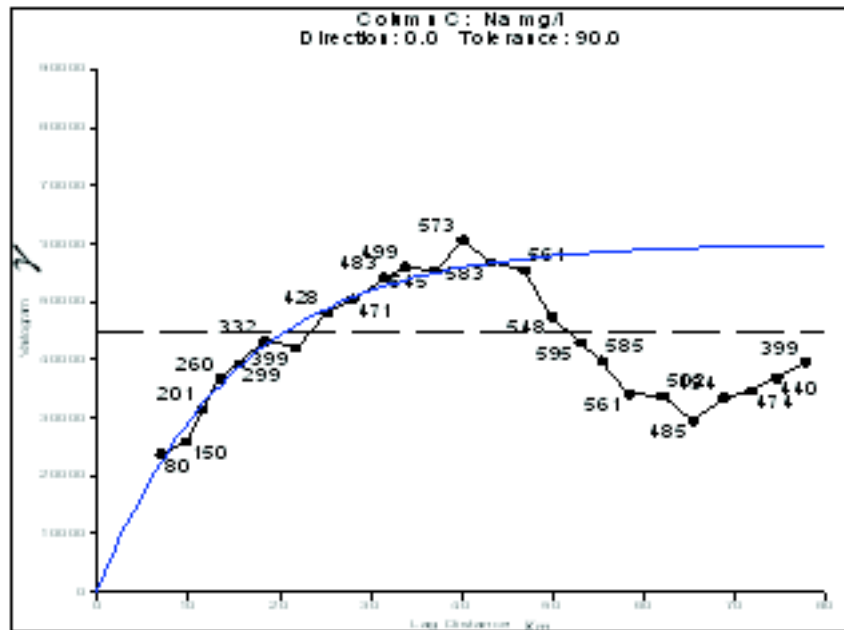


Figure 24 : Le variogramme des valeurs du sodium

1.3.2. Anions

Bicarbonates

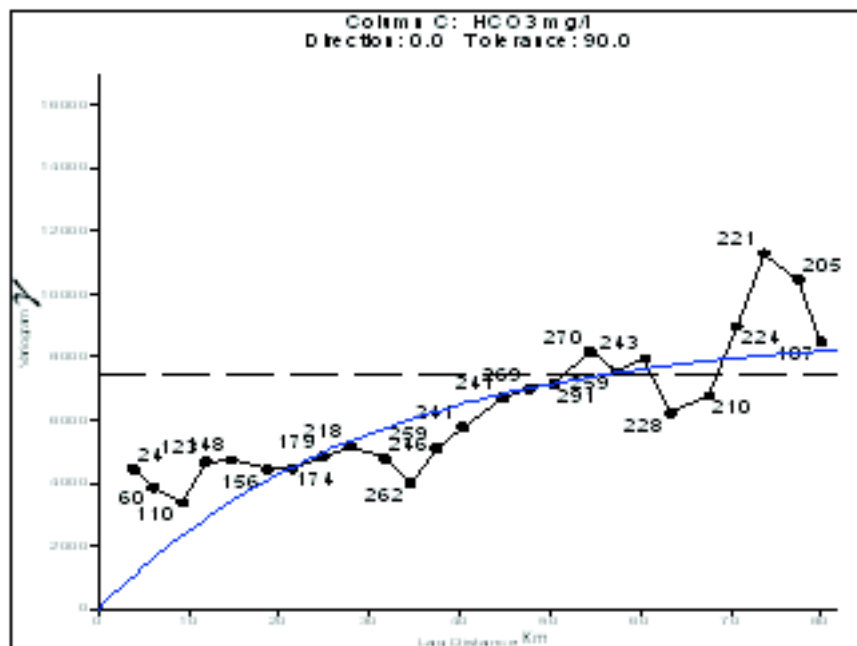


Figure 25 : Le variogramme des valeurs des bicarbonates

Le variogramme des bicarbonates est ajusté à un modèle exponentiel ayant un scale de 8800 et un palier (length) égale à 30 km avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°, l'auto corrélation existe entre les différents couples de sodium jusqu'à une distance de 30 km.

Les caractéristiques de ce modèle sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 82

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 9

La valeur verticale (Vertical scale) = 17000

Chlorures

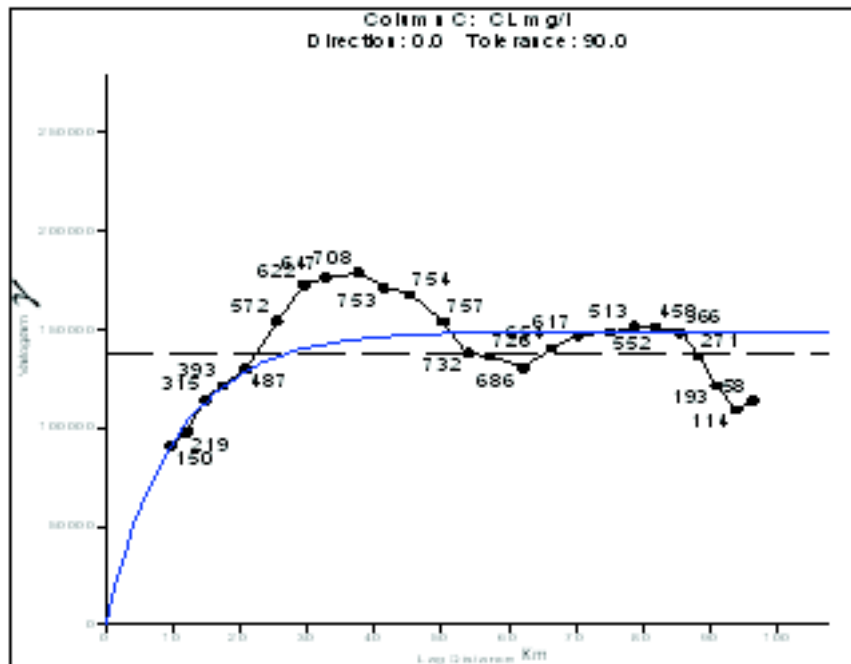


Figure 26 : Le variogramme des valeurs des chlorures

Le schéma ci-dessus montre un variogramme expérimental des valeurs des chlorures dont l'ajustement a été fait par un modèle exponentiel ayant un scale de 149000 et length égale à 10,5 avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°, montrant une auto régionalisation spatiale entre les différents couples des chlorures jusqu'à une distance de 10,5 km.

Les caractéristiques de cette structure sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 0,5

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 0,15

La valeur verticale (Vertical scale) = 300000

Nitrates

La structure spatiale des nitrates est représentée par un variogramme expérimental de type sphérique avec un palier de variance totale de 900 et une portée limite de 23,6 Km à partir de laquelle les couples de ce paramètre sont spatialement corrélés suivant l'anisotropie de ratio 1 et un angle 0°. Les caractéristiques de cette structure sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 100

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 6

La valeur verticale (Vertical scale) = 1500

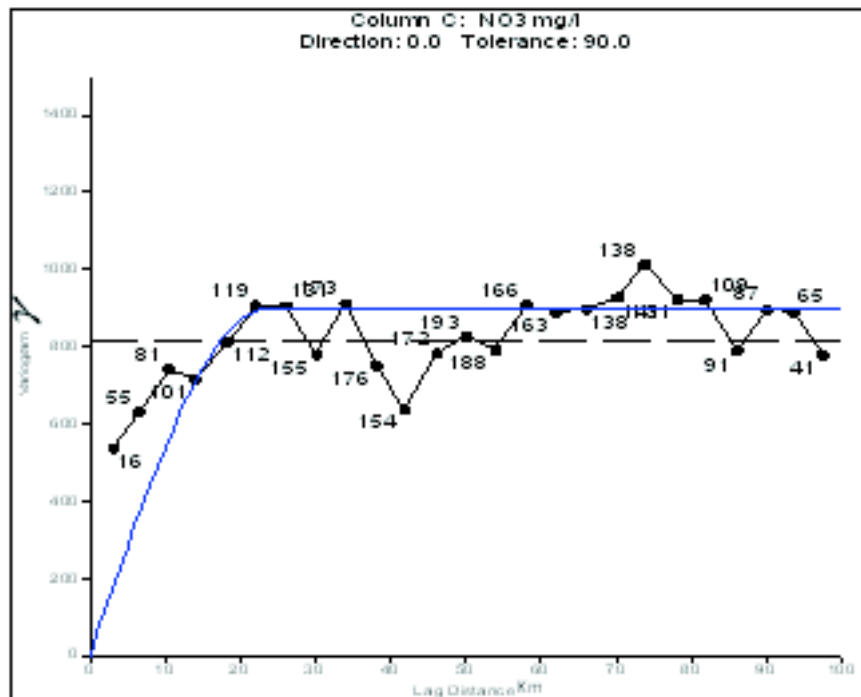


Figure 27 : Le variogramme des valeurs des nitrates

Sulfates

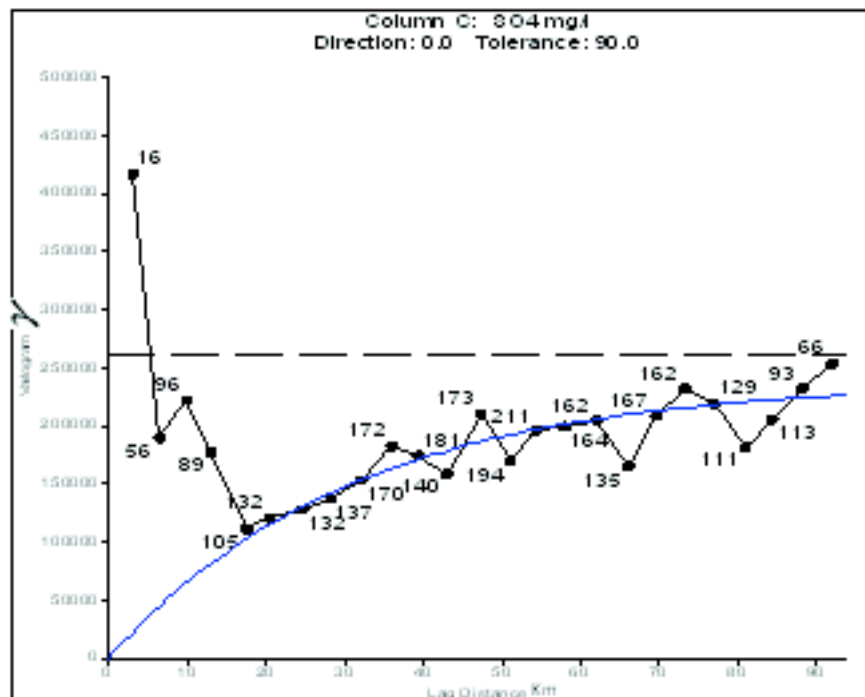


Figure 28 : Le variogramme des valeurs des sulfates

Le variogramme expérimental des valeurs des sulfates est un model exponentiel de palier 238000 et une portée de 31 suivant une anisotropie de ratio 1 et un angle 0°.

Les caractéristiques de cette structure sont :

La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 94

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 6,4

La valeur verticale (Vertical scale) = 500000

1.4. Variogramme du SAR

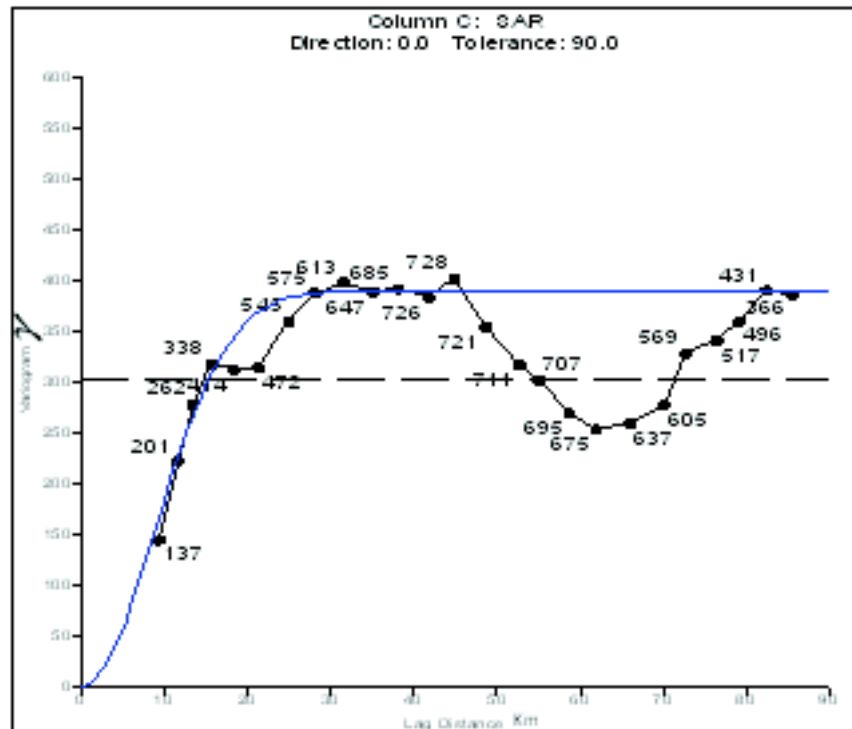


Figure 29 : Le variogramme des valeurs du SAR

La figure ci-dessus représente le variogramme expérimental du SAR qui est ajusté à un modèle Gaussien représentant un palier de 390 et une portée égale à 12,5 avec anisotropie de ratio 1 et un angle 0°, la structure spatiale montre une autocorrélation régionale entre les différents couples du SAR jusqu'à une distance de 12,5 km, les caractéristiques de cette structure sont : La distance maximale des classes (Max lag Distance) = 90

Nombre de classes (Number of lags) = 25

Largeur de classe (Lag width) = 25

La valeur verticale (Vertical scale) = 600

2. Cartographie

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. La géostatistique qui est une approche caractérisant la structure de la variabilité spatiale

d'une propriété quelconque ainsi que son estimation s'avère être très appropriée pour cartographier un phénomène naturel (Rossi et al, 1995). Cette approche a été utilisée dans notre travail comme moyen d'interpolation dans le but de représenter les variations spatiales des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de Djelfa sur les cartes.

2.1. Cartographie des paramètres physiques

2.1.1. Conductivité électrique

La conductivité électrique est un paramètre indiquant la salinité de l'eau, on peut constater que la carte de répartition des conductivités électriques de nos échantillons montre bien que notre région est caractérisée par la présence de valeurs très élevées par rapport à la norme de l'O.M.S (2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), traduisant de fortes teneurs en matière minérale. Donc la qualité de l'eau souterraine de ces zones reste à désirer et moins propre à la consommation humaine.

La conductivité a, la plupart du temps, une origine naturelle due au lessivage des terrains lorsqu'il pleut, ce dernier entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sels minéraux, elle peut également avoir pour origine l'activité humaine causée par les effluents industriels ou domestiques qui contiennent des sels contribuant eux aussi à l'accroissement de la conductivité comme c'est le cas dans notre région où les teneurs les plus élevées se retrouvent dans les zones urbaines telle que la ville de Djelfa et les zones à vocations agricoles telle que la zone de Ain El Ibel.

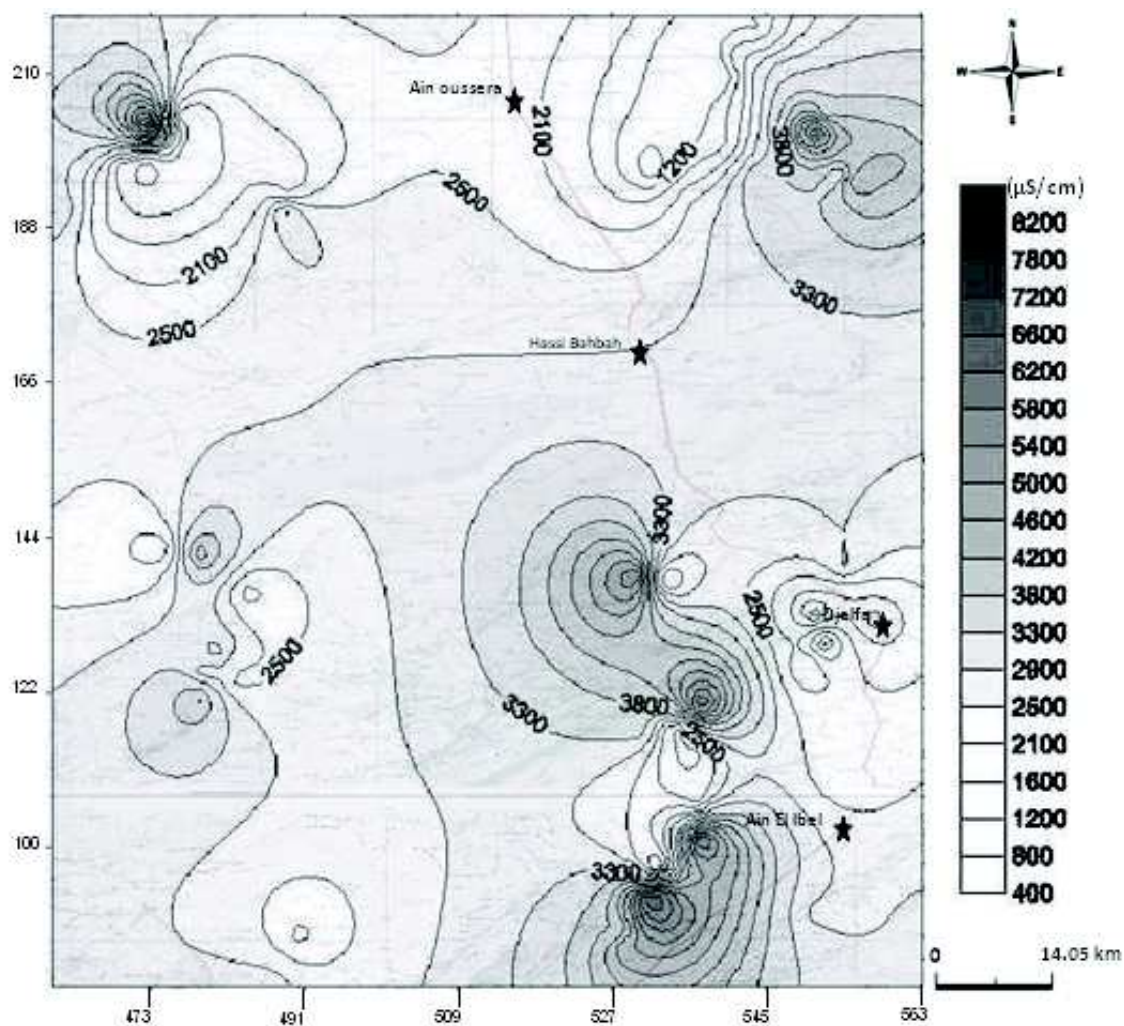


Figure 30 : Carte de répartition des teneurs de la conductivité électrique

En établissant la carte des erreurs (figure 30) on peut juger que l'estimation de ce paramètre est acceptable puisque l'erreur dans ce cas ne dépasse pas 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$ la valeur moyenne estimée de l'interpolation des valeurs de la conductivité électrique, ce qui représente moins de 5 % d'erreur.

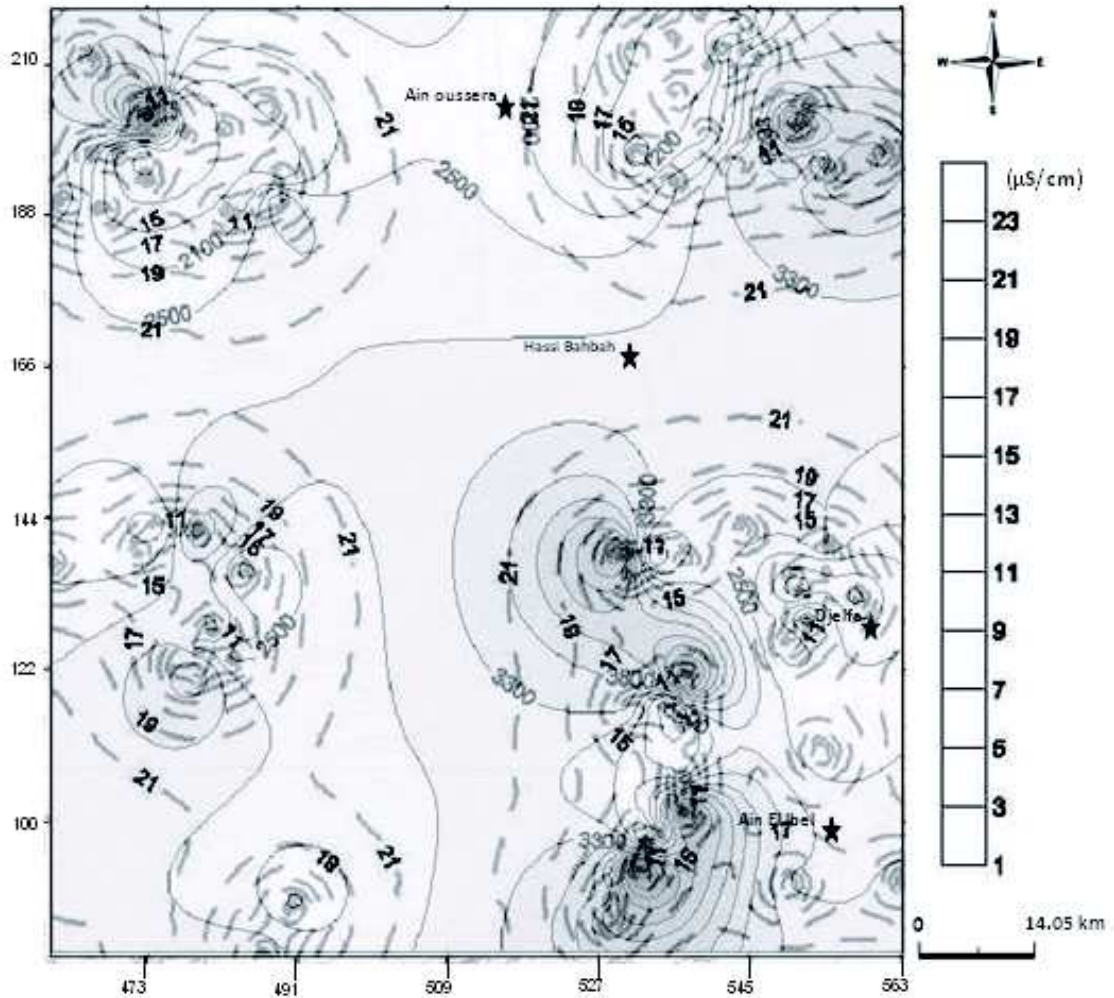


Figure 31 : Carte des erreurs de la conductivité électrique

2.1.2. Potentiel hydrogène

Vu l'homogénéité de la répartition du pH sur l'étendu de la région étudiée ne dépassant guère la valeur de 9, la carte des valeurs krigées du pH indique qu'il n'y a pas de problème d'exploitation que ce soit pour l'alimentation en eau potable (AEP) ou pour l'irrigation sauf des petites poches dans le Nord-Est et le Sud-Ouest dépassent les normes ($\text{pH} > 9$). Ils peuvent s'expliquer par la faible activité de l'hydrolyse des silicates qui a pour effet de libérer des ions alcalins et de porter les pH vers des valeurs au dessus de la neutralité.

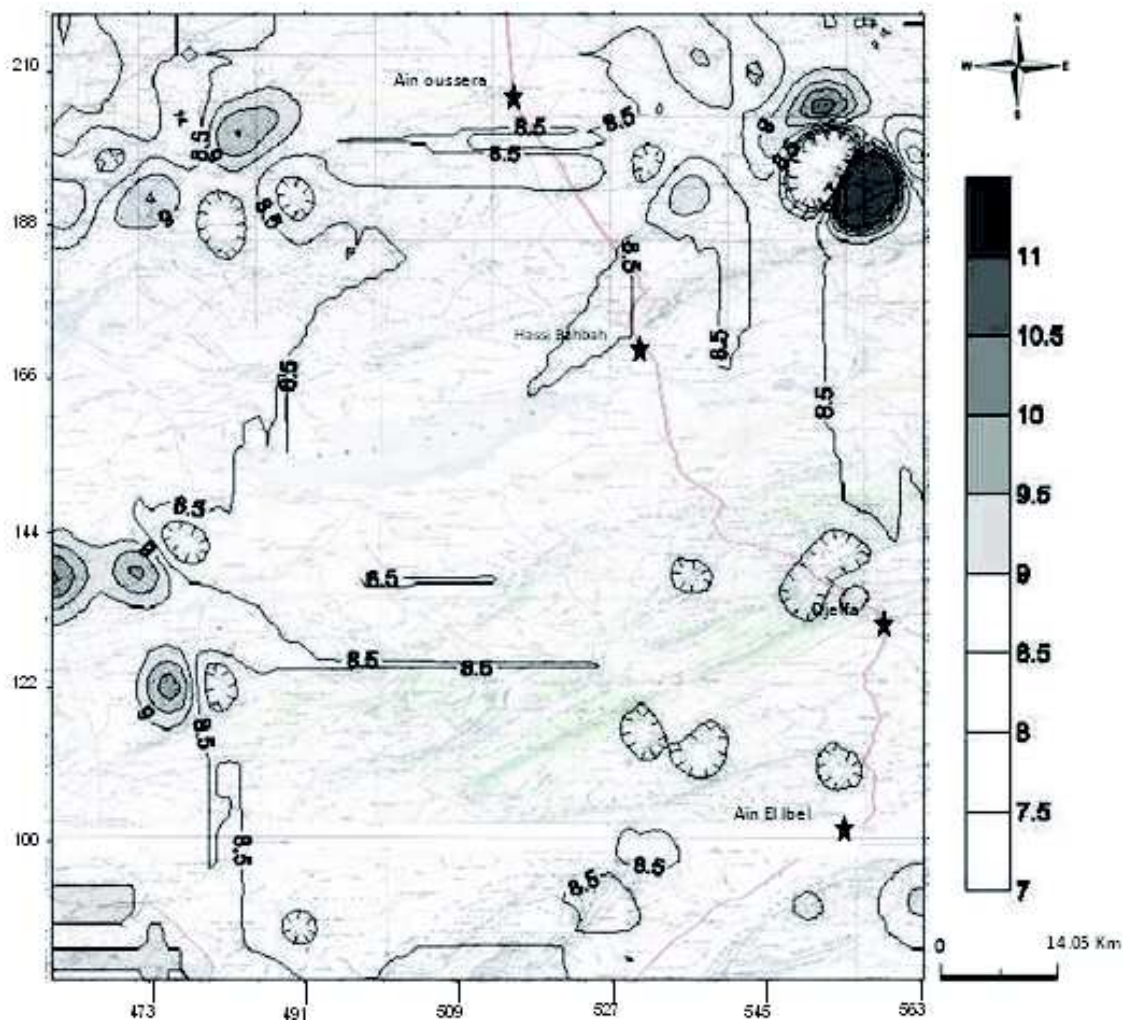


Figure 32 : Carte de répartition des teneurs du pH

Comme c'est indiqué précédemment dans la conductivité électrique, on a établi une carte des erreurs à partir des écart-types du pH pour voir la qualité de la régionalisation qu'on a effectuée par le krigeage. La carte ci-dessous montre une estimation assez précise du pH puisque les écarts -types varient entre 0.1 à 0.6. On s'est contenté uniquement des cartes des erreurs de la CE et du pH pour ne pas alourdir et trop charger notre manuscrit. Pour les autres cartes des erreurs des paramètres non indiqués voir annexe.

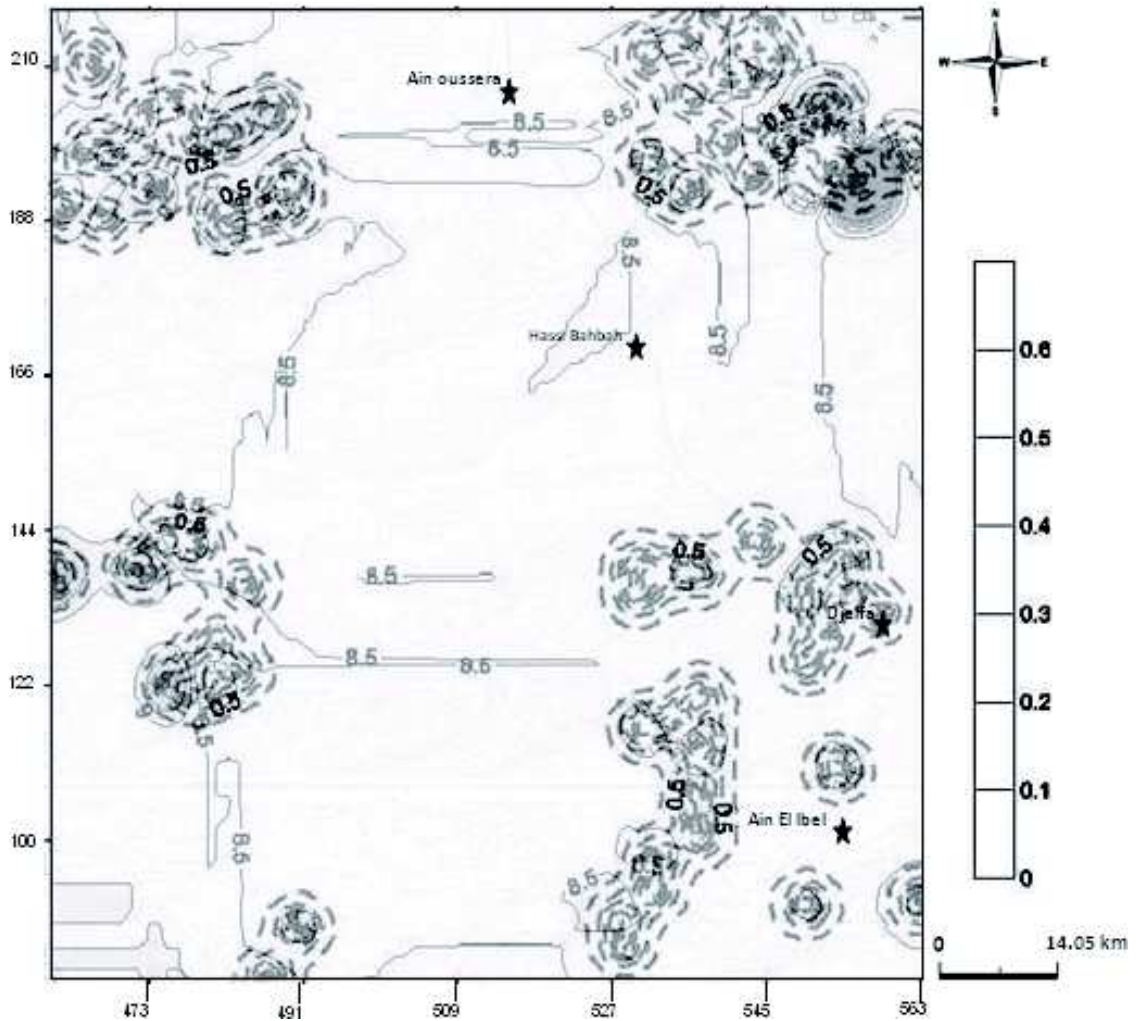


Figure 33 : Carte des erreurs des valeurs du pH

2.1.3. Résidus secs

On remarque dans la carte ci-dessous que les valeurs des résidus secs varient de 300 à 4614 mg/l, la majorité des points d'eau analysés dépassent largement la norme de l'O.M.S (1500 mg/l), à l'exception de quelques points qui se répartissent irrégulièrement dans toute la zone d'étude où les valeurs des résidus secs sont faibles, indiquant une eau touchée par une minéralisation excessive de l'ensemble des éléments chimiques qui ont atteint les eaux souterraines, qui peuvent être expliquées principalement par la nature géologique des terrains sous-jacents et l'activité humaine. Il faut mentionner que ces valeurs des résidus secs s'accordent avec celles de la conductivité électrique.

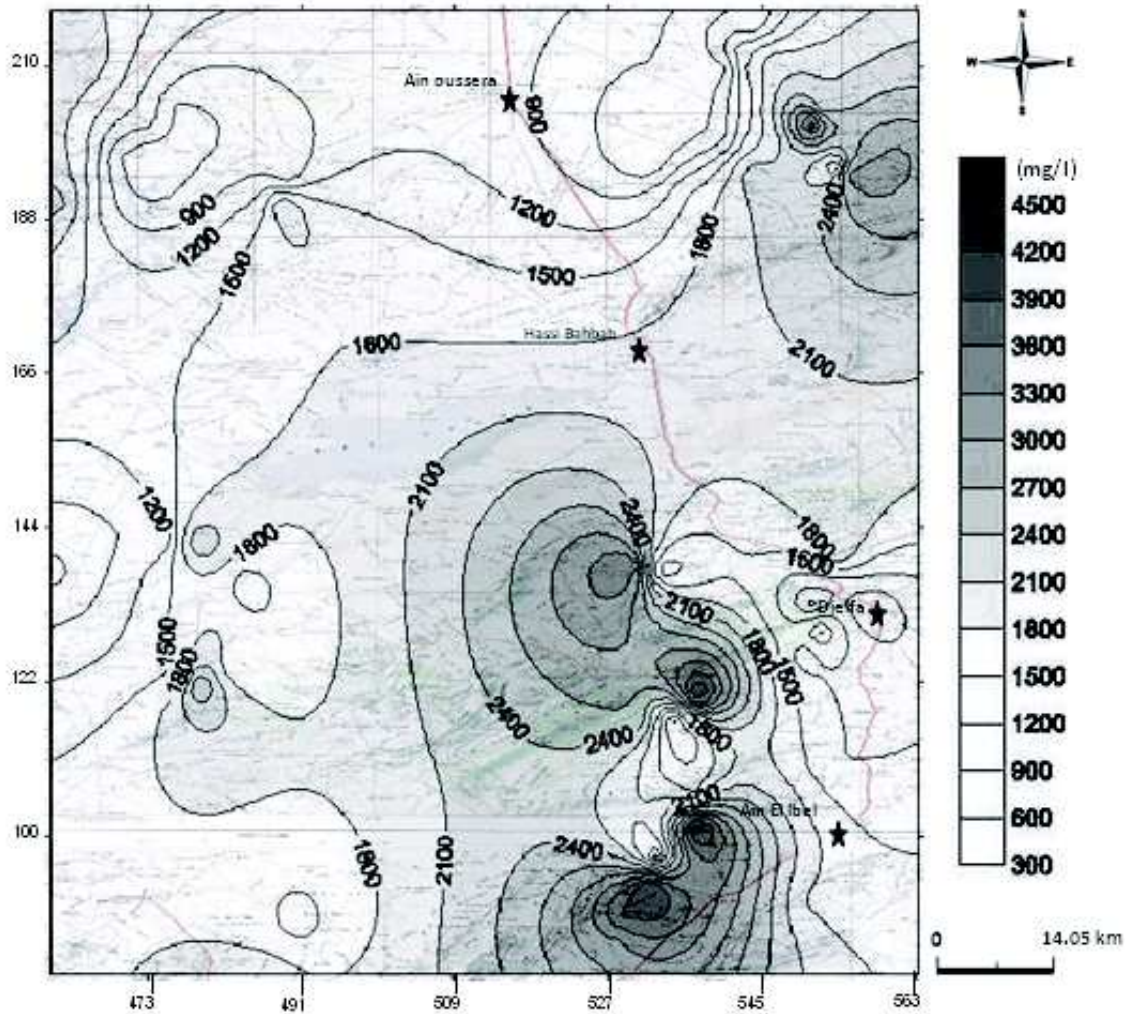


Figure 34 : Carte de répartition des teneurs des résidus secs

2.2. Cartographie des paramètres chimiques

2.2.1. Carte de la répartition des cations

Calcium

Les résultats selon la carte de répartitions montrent une grande variation des teneurs en calcium et par conséquent une non homogénéité des eaux souterraines sur toute la zone d'étude.

Ces résultats sont influencés par le type du sol qui est de nature calcaire (calcimagnésiques), et le calcium provient de l'attaque des roches carbonatées par le gaz carbonique.

Comme c'est indiqué dans la partie bibliographique, l'origine du calcium des eaux souterraines provient, en absence d'autres sources de pollution, principalement de la

minéralisation des sols à base de calcaire (formation gypseuse par exemple) comme dans notre cas où les sols sont calcimagnésiques.

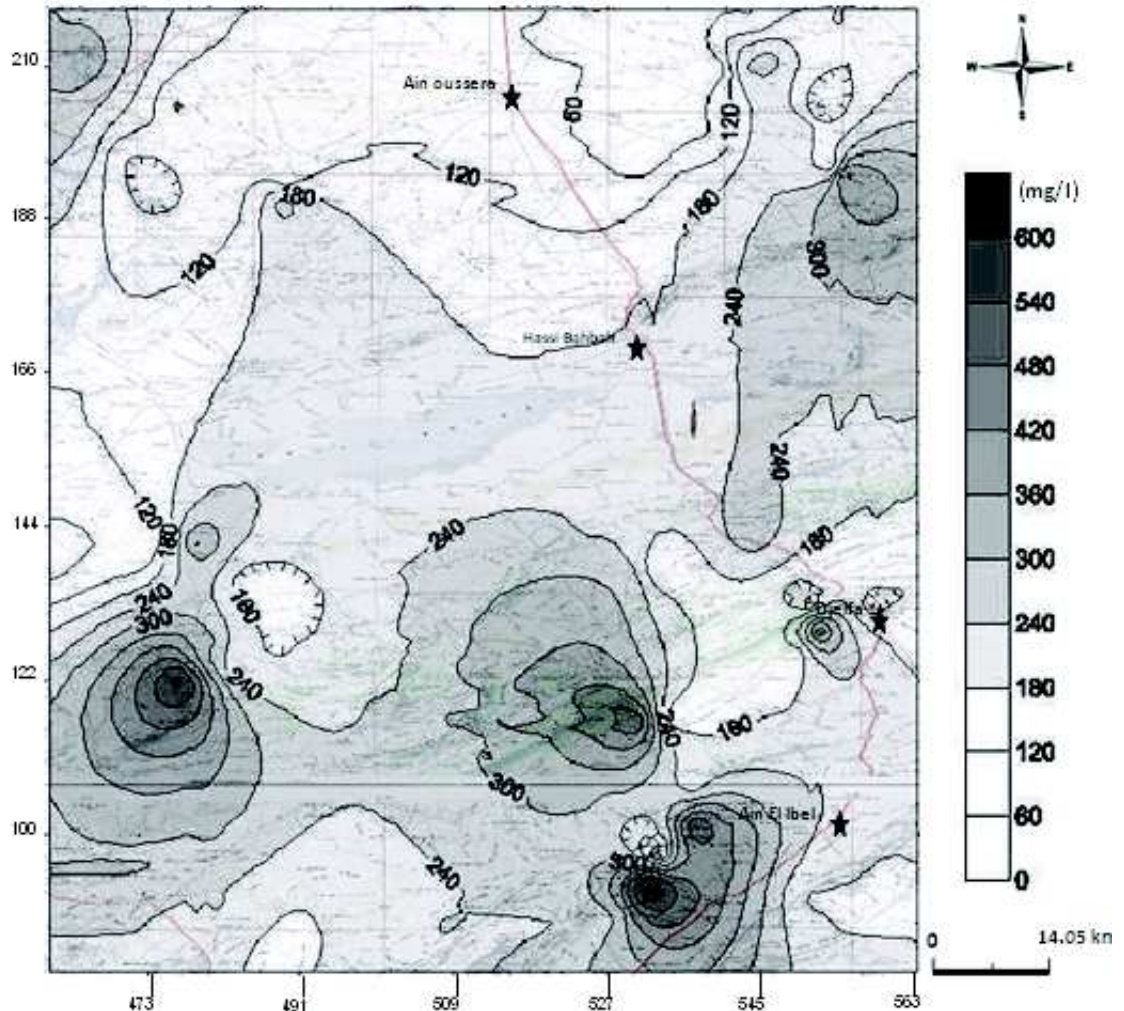


Figure 35 : Carte de répartition des teneurs du calcium

Magnésium

La figure ci-dessous montre une variation des valeurs du magnésium pour l'ensemble des eaux analysées variant entre 1 et 408 mg/l.

On constate toujours que ces teneurs du magnésium sont élevées et se situent en dessus des normes admissibles de l'O.M.S (50 mg/l) presque sur toute la région d'étude sauf dans le Nord-Ouest.

L'origine du magnésium est essentiellement liée à la nature géologique des formations traversées. L'élévation de ces teneurs, comme celle du calcium, est due au type de sol qui est de nature calcimagnésique, le sol le plus répandu dans la région.

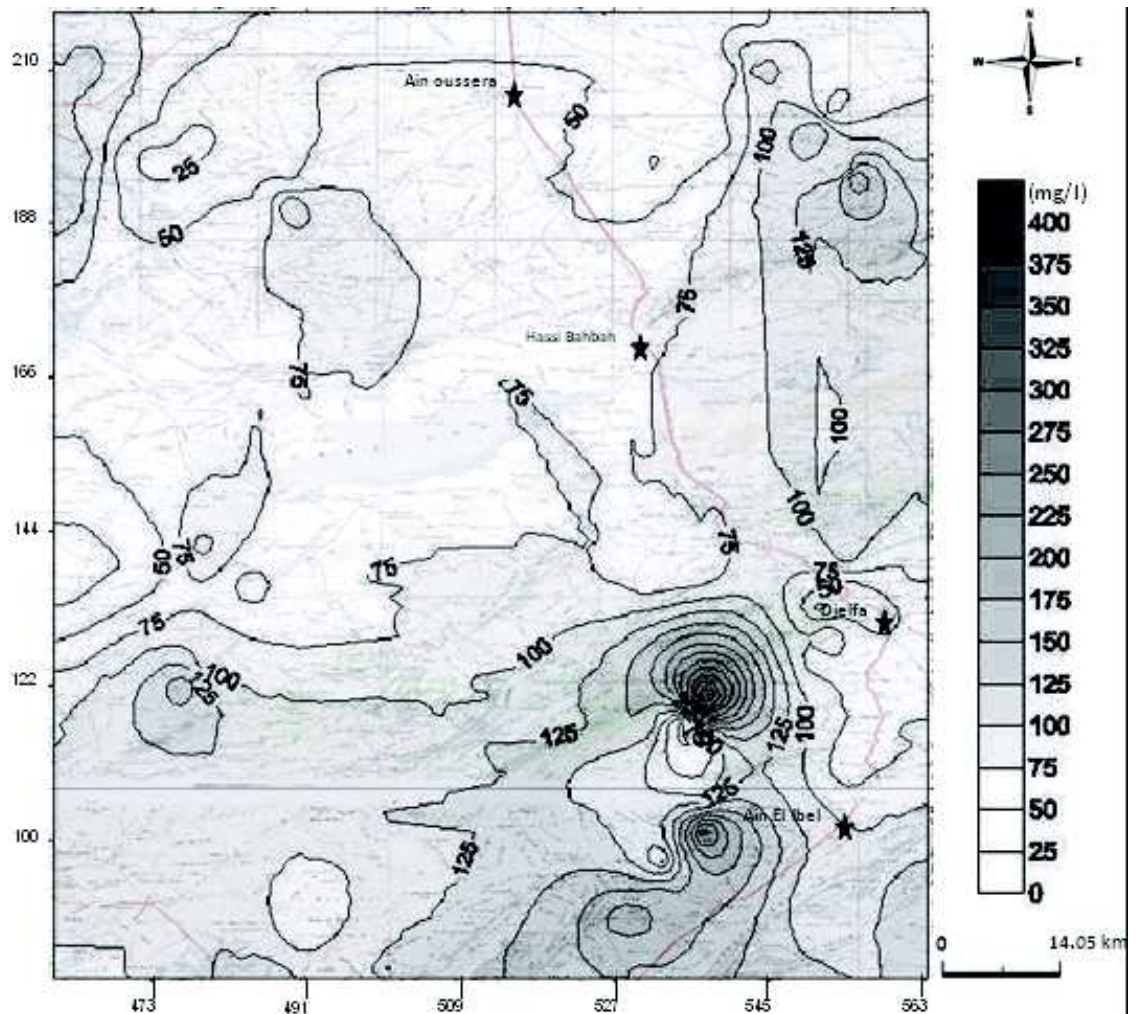


Figure 36 : Carte de répartition des teneurs du magnésium

Le potassium

Les valeurs du potassium se répartissent dans la carte avec des teneurs faibles indiquant qu'il est l'élément chimique le moins abondant du fait de sa forte capacité à être adsorbé par le sol.

En effet, il correspond généralement à l'ion le moins abondant dans les eaux souterraines, certes avec des valeurs inférieurs à la valeur maximale admissible retenue par l'O.M.S (12 mg/l), on remarque petites poches dans le Sud, centre et Nord-Ouest dépassent la norme ce qui est expliqué par l'utilisation non contrôlé des engrais chimiques.

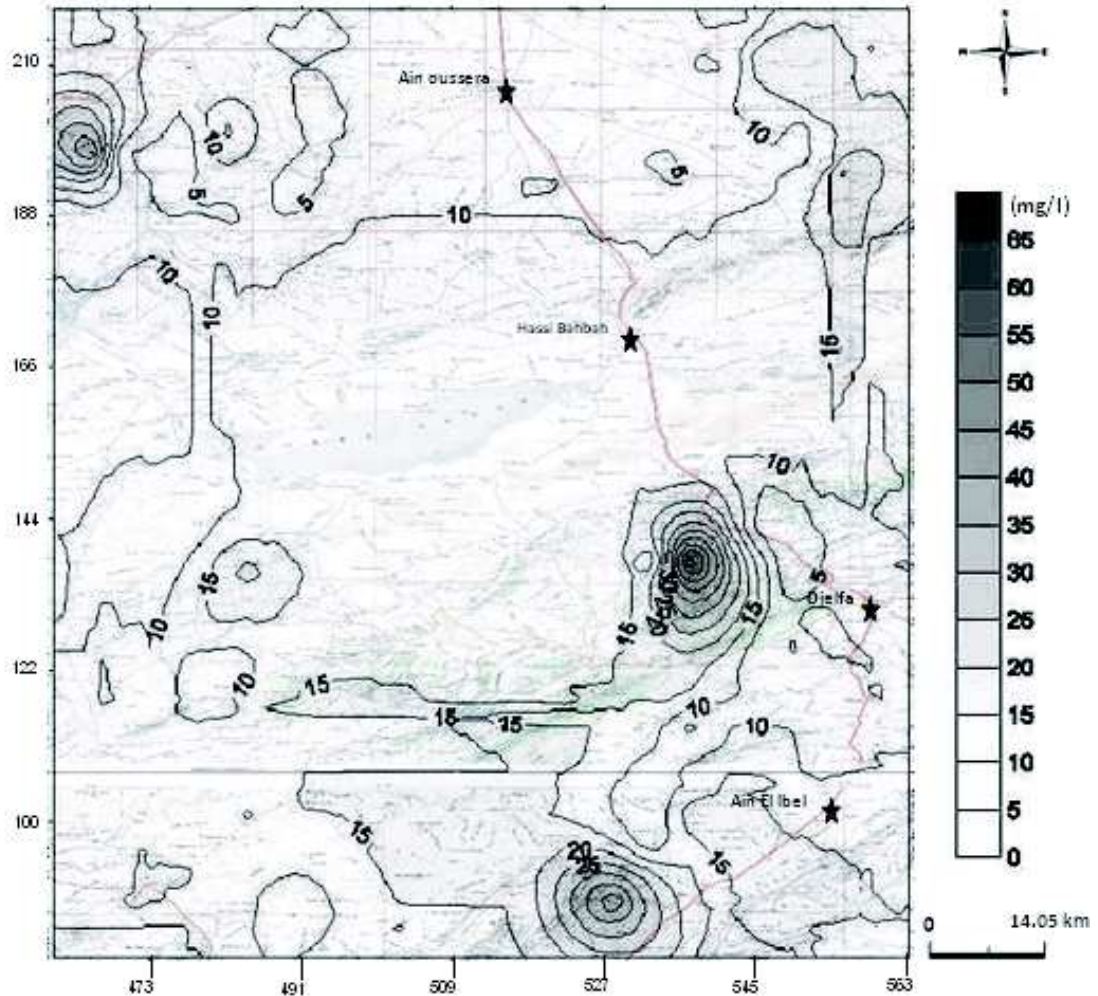


Figure 37 : Carte de répartition des teneurs des potassiums

Sodium

La carte de répartition des valeurs du sodium montre que les parties les plus touchées sont situées au Nord-Est, au centre et au Sud de notre zone d'étude; et permet de constater des teneurs en sodium élevées et supérieures au norme de l'O.M.S (150 mg/l).

La présence des valeurs élevées à ces niveaux traduit l'apport de la décomposition des sels minéraux de surface ou le lessivage des formations géologiques riches en NaCl et les rejets d'eaux usées industrielles ou domestiques. Il faut en plus indiquer la présence des cultures tolérantes en sels telles que *Frankenia thymifolsa* et *Atriplex halimus*, *Atriplex glauca* ce qui est expliqué par l'abondance du sel dans cette région.

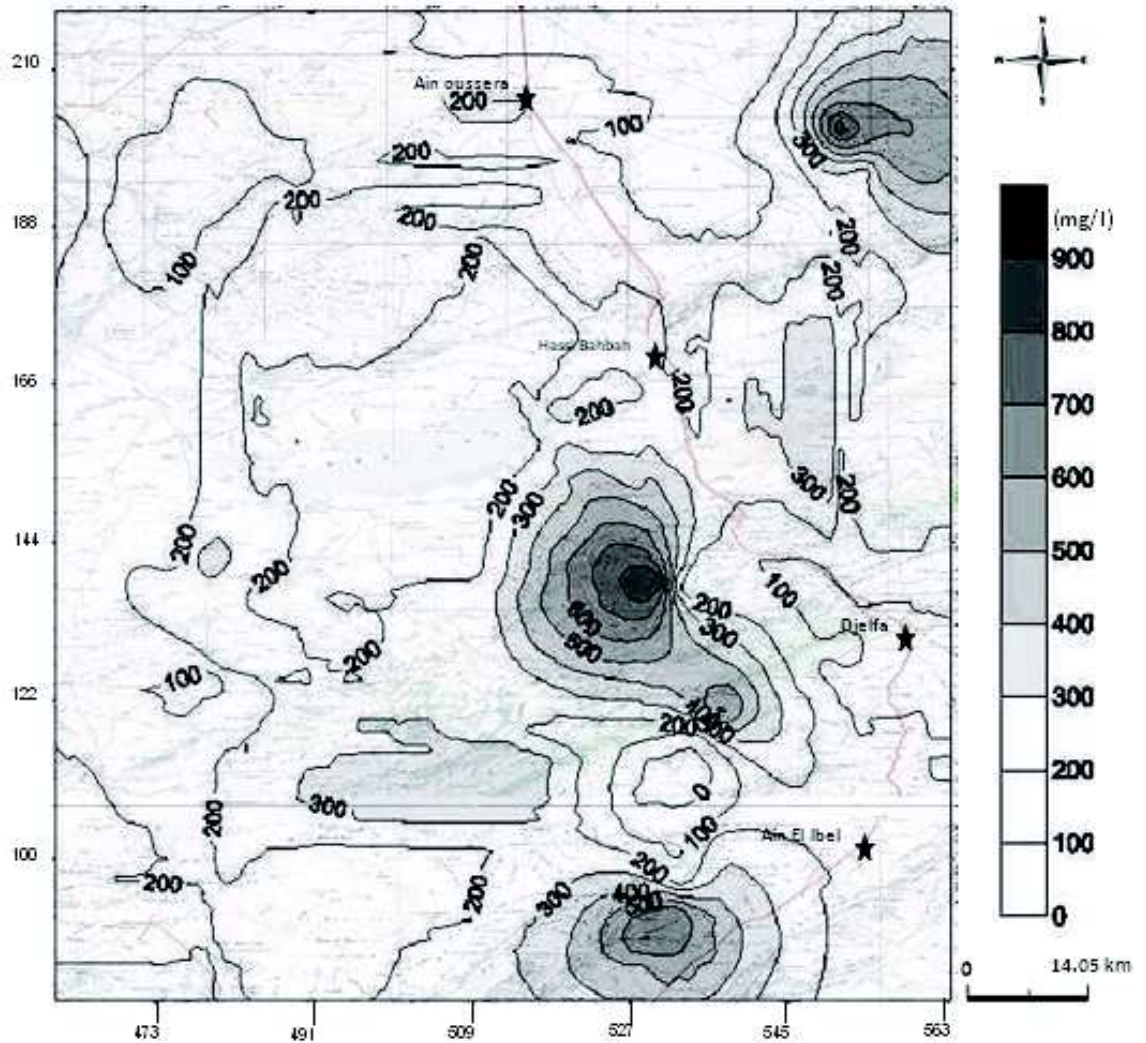


Figure 38 : Carte de répartition des teneurs du sodium

2.2.2. Carte de la répartition des anions

Bicarbonates

La carte de la répartition des ions du bicarbonate montre une répartition qui varie de 0 à 554 mg/l avec une moyenne de 99,07 mg/l qui est une valeur très inférieure à la valeur (610 mg/l) indiquée par l'O.M.S comme limite de potabilité des eaux. Il provient essentiellement de

l'attaque des roches calcaires par le CO_2 agressif.

Par conséquent on peut dire que notre zone d'étude ne présente aucun problème d'exploitation des eaux concernant cet élément.

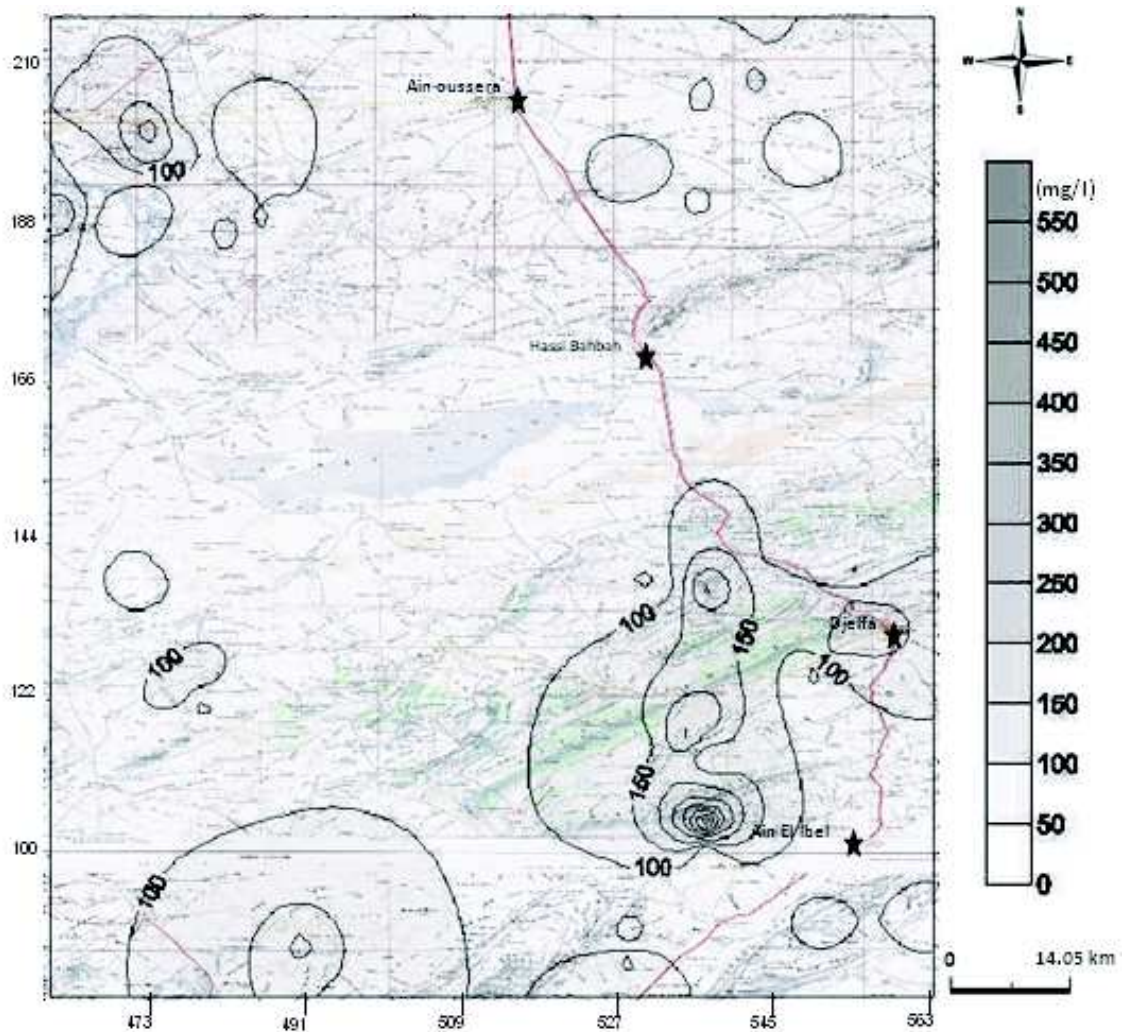


Figure 39 : Carte de répartition des teneurs des bicarbonates

Chlorures

La carte ci-dessous présente des teneurs en chlorures très élevées et supérieures à la valeur guide de l'O.M.S (200 mg/l). On remarque qu'il y a une bonne corrélation entre la répartition des chlorures est celle des autres éléments en particulier celle du sodium, cela est évident puisque l'ensemble forme des sels traditionnellement connus telles le NaCl. Les fortes teneurs en chlorures peuvent être expliquées par la présence d'une activité agricole importante d'où l'utilisation non contrôlée des engrais et des pesticides et le chlore est l'un des principaux composants des effluents domestiques. Dans le Nord-Ouest, la teneur en chlorures n'excède

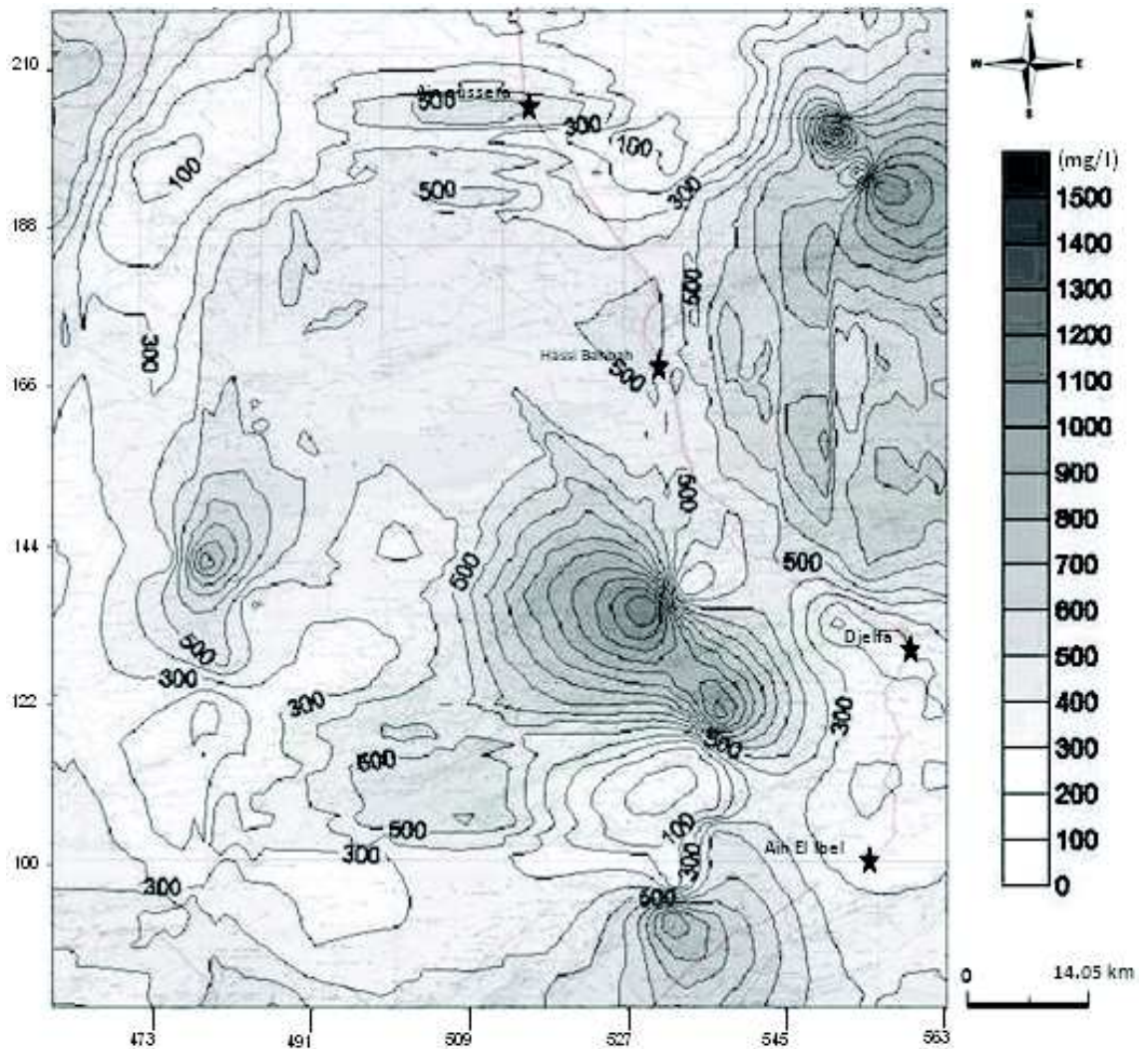


Figure 40 : Carte de répartition des teneurs des chlorures généralement pas les 200 mg/l, là où la qualité de l'eau est jugée bonne.

Nitrates

La figure ci-après présente des taux de nitrates relativement faibles et inférieurs partout à la limite maximale retenue par l'O.M.S (50 mg/l) à l'exception des valeurs élevées qui sont enregistrées au niveau de quelques poches où on retrouve des vergers et des plantations diverses surtout le maraîchage, telle que la région de Ain El Ibel et à l'Ouest de la ville de Djelfa, ce qui nous fait penser que la pollution proviendrait des intrants agricoles ou alors à l'existence d'une végétation fixatrice d'azote. Cette forte concentration des eaux de la nappe en nitrates peut être aussi expliquée par la présence de latrine et d'ordures ménagères mais surtout par l'enfouissement des déchets domestiques.

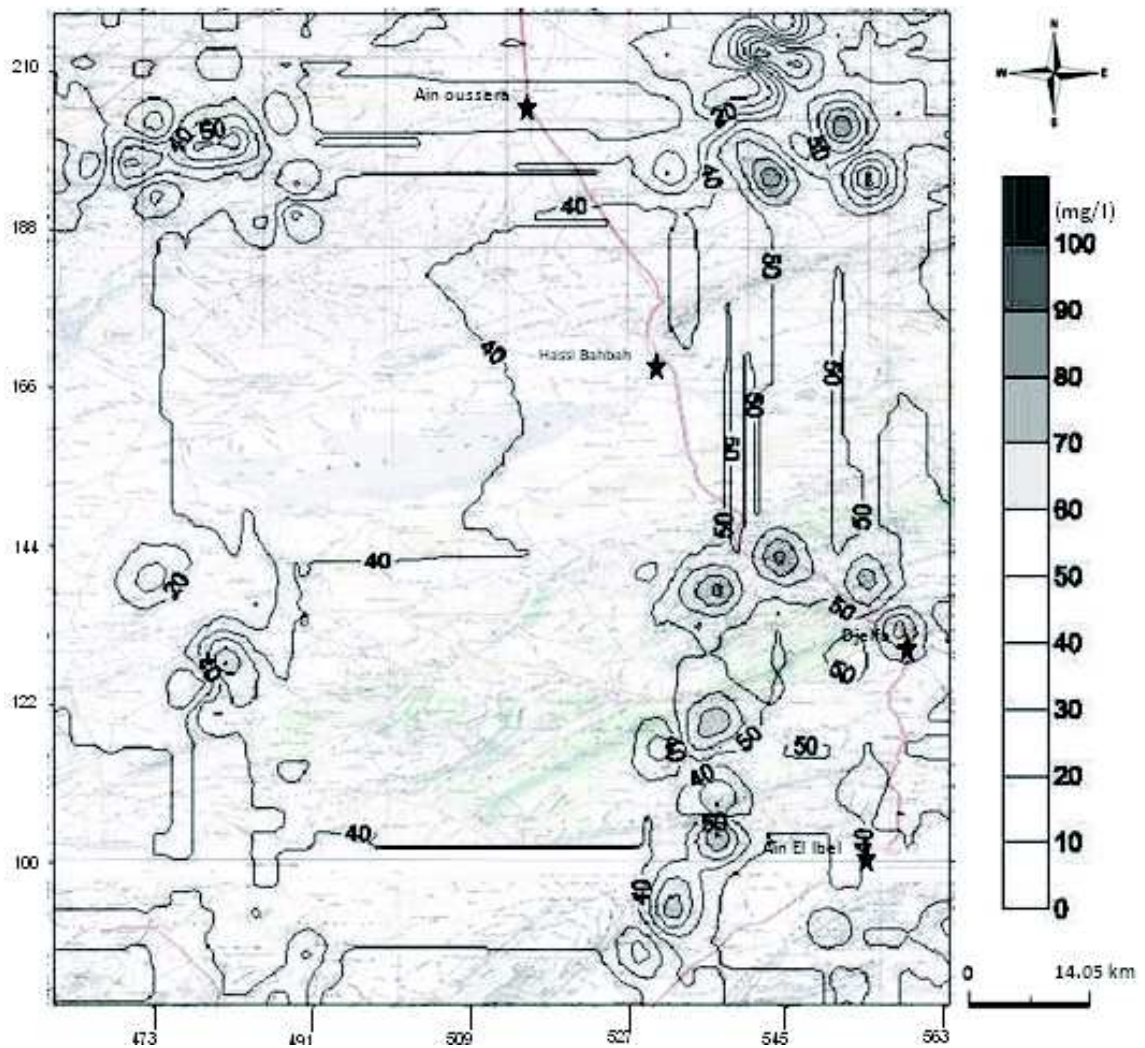


Figure 41 : Carte de répartition des teneurs des nitrates

Sulfates

La carte de la répartition des teneurs en sulfates des eaux analysées montre des variations de 10 jusqu'à 2140 mg/l, on constate qu'elles dépassent beaucoup la valeur limite de l'O.M.S (250 mg/l), les augmentations de concentrations se font vers le Sud. La concentration élevée de l'ion sulfate est essentiellement due à l'oxydation de la pyrite et la dissolution du gypse dans certaines régions (formations gypseuses). Les sulfates peuvent provenir également des engrais, utilisés en agriculture tel que les superphosphates et les sulfures d'ammonium et de potassium. Ils sont facilement entraînés dans les eaux souterraines, dans la ville de Djelfa peut être expliqué par les rejets industriels de la tannerie seule usine dans la région.

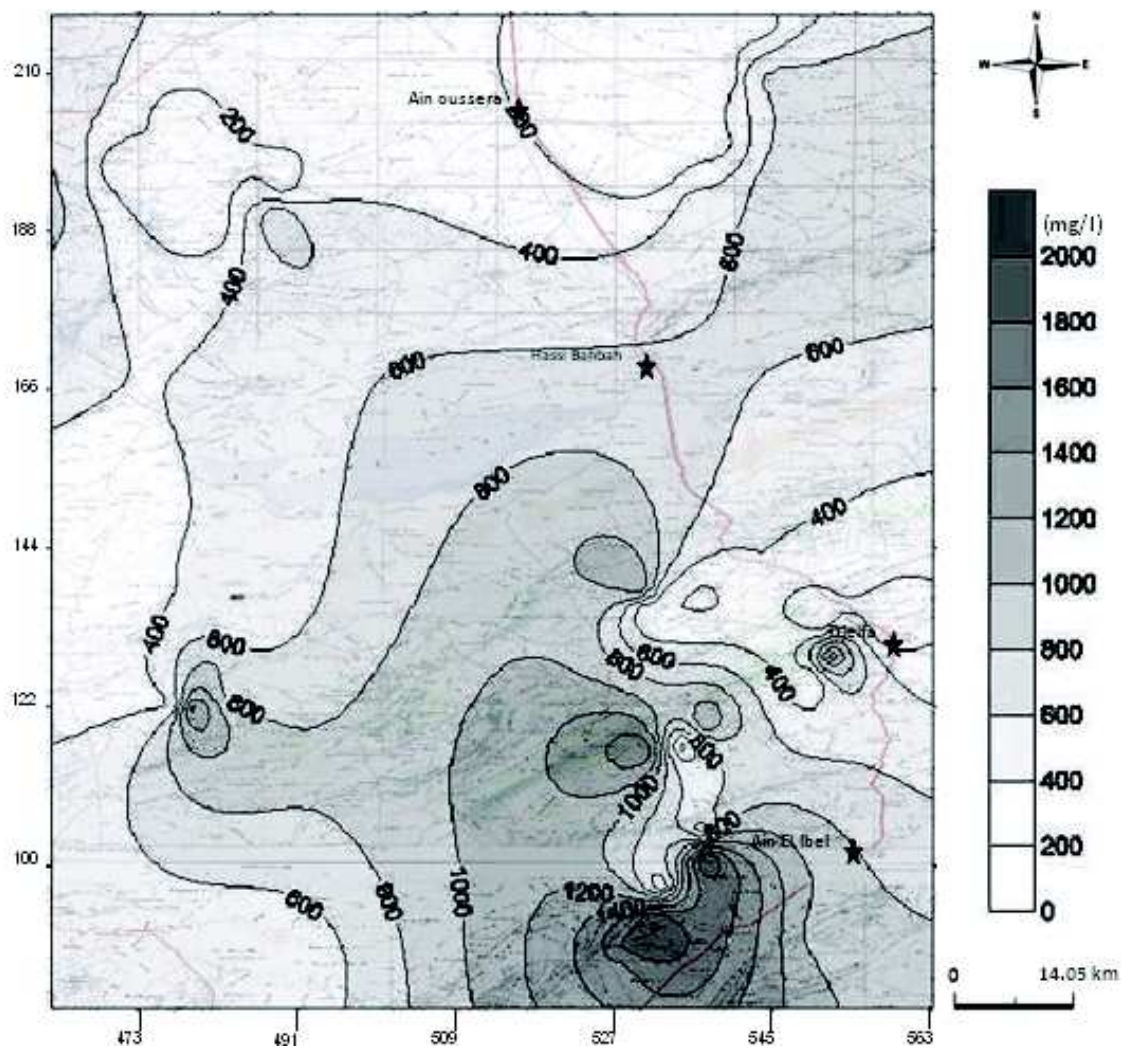


Figure 42 : Carte de répartition des teneurs des sulfates

2.2.3. SAR

Nous avons fait un diagnostic pour l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation en calculant le SAR des eaux et les résultats obtenus indiquent que la plupart des points d'eau sont qualifiés de "admissible", les points d'eau qualifiés de bonne sont répartis dans la partie Nord-Ouest et des poches dans le Sud-Est. Les eaux qualifiées de douteuses ou de danger sont localisées au Nord-Est et au centre de la zone d'étude.

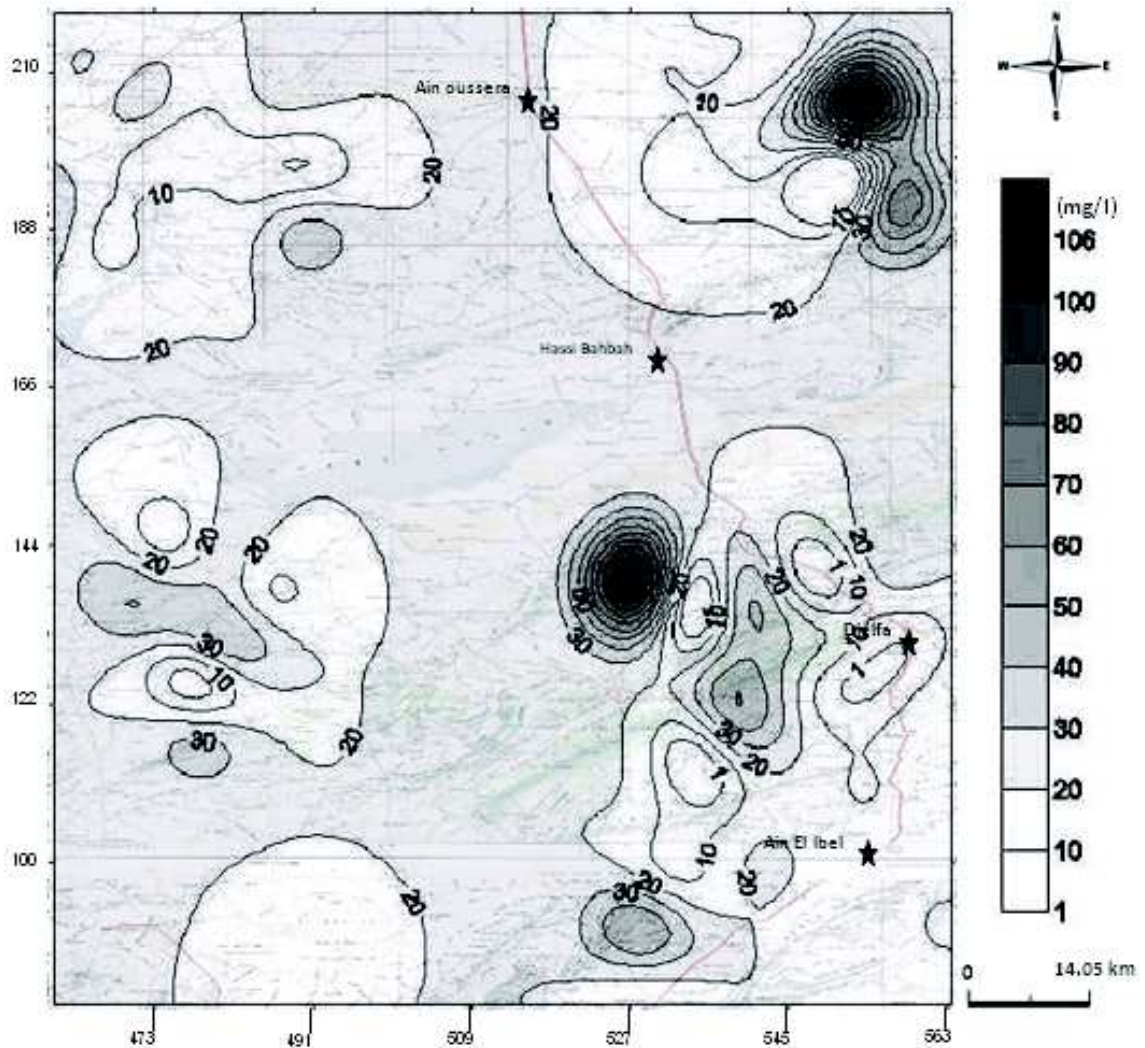


Figure 43 : Carte de répartition des teneurs du SAR

3. Classification et potabilité des eaux

3.1. Classification des eaux

3.1.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper présente un grand intérêt. Il est le plus utilisé dans la classification des eaux. Il est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations, respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs. Ce diagramme permet de catégoriser le faciès chimique d'une eau ou d'un aquifère.

La répartition spatiale des différents faciès chimiques a été représentée sur la figure 38 établie à partir du diagramme de Piper. D'une manière générale nous distinguons deux grandes familles : Famille des eaux Chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes

Famille des eaux sulfatées

Cette augmentation en éléments caractéristiques des pollutions anthropiques (Cl^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} et SO_4^{-2}) est à corrélérer avec l'occupation du sol et la nature calcimagnésiques du sol.

En effet, la pollution augmente avec la proximité des zones urbaines et industrielles. En revanche, les bicarbonates et les nitrates présentent des variations relativement faibles.

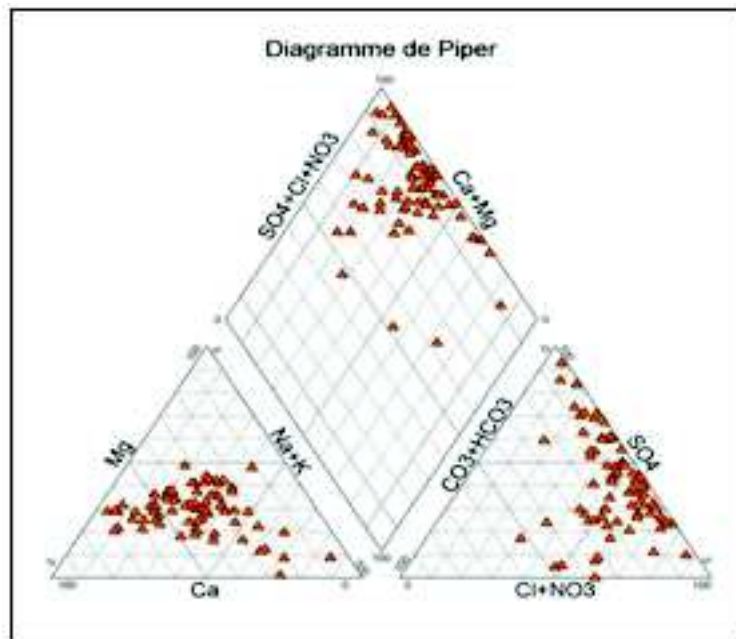


Figure 44 : Diagramme de Piper

3.1.2. Diagramme de Riverside

Ce diagramme est basé sur les valeurs du rapport d'absorption en sodium (SAR) et de la conductivité électrique des ions contenus dans l'eau. L'objectif étant de représenter les échantillons sur le diagramme de Riverside afin de faciliter la caractérisation des eaux profondes sur leur aptitude à l'irrigation.

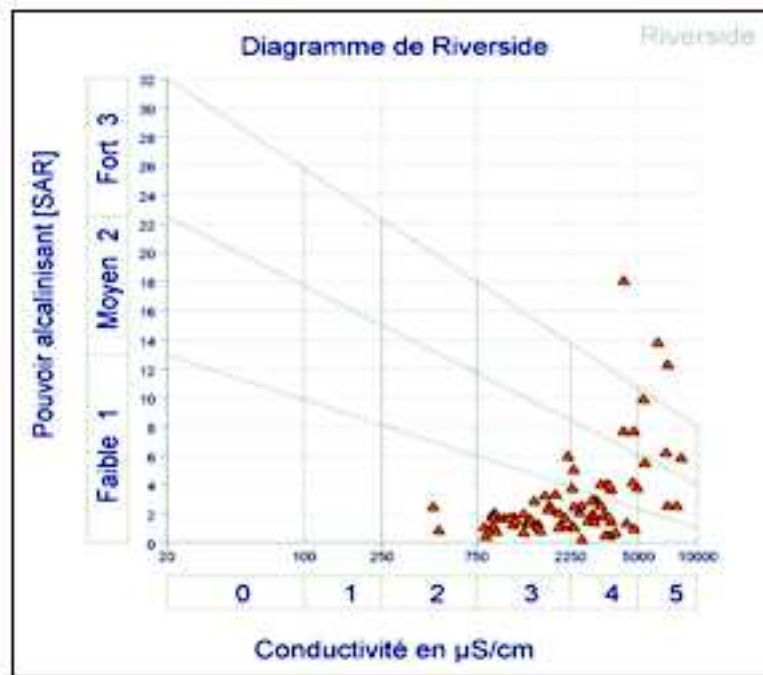


Figure 45 : Diagramme de Riverside

D'après les résultats obtenus par le diagramme de Riverside, nous avons constaté les classes suivantes :

C3-S1 regroupe une classe où les risques de salinisation sont moyens et ceux d'alcalisation sont faibles, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés ;

C4-S1 ce sont des eaux qui présentent un fort danger de salinité et faible risque d'alcalinité.

L'utilisation de cette classe d'eau pour l'irrigation nécessite des plantes tolérantes et des doses de lessivage sur des sols légers et bien drainés ;

C4-S2 cette classe présente un fort danger de salinité et une alcalinité moyenne, c'est une mauvaise qualité d'eau à utiliser avec beaucoup de précautions qu'aux sols légers et bien drainés et des plantes tolérantes à la salinité, le lessivage est très important.

3.2. Potabilité des eaux

L'étude de la potabilité des eaux souterraines de la région de Djelfa est basée sur les normes de l'O.M.S relatives à la qualité des eaux (Tableau 14).

L'examen du tableau 15 permet de mettre en évidence la quasi-totalité des points d'eaux étudiés dépassent les normes de potabilité en certains éléments, notamment en calcium, magnésium, sulfate et la conductivité électrique. Ceci est du à la présence des formations gypseuses (CaSO_4), ainsi que le calcaire dolomitique ($\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$) du Turonien.

Contribution à la régionalisation stochastique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans le cadre d'un SIG

| % des échantillons dépassant la concentration maximale admissible | Norme de l'O.M.S (concentration en mg/l) | Substance |
|---|--|---|
| 14,66 | 6,5 - 9 | pH |
| 64 | 120 | Calcium (Ca ⁺²) |
| 68 | 50 | Magnésium (Mg ⁺²) |
| 62,66 | 250 | Sulfates (SO ₄ ⁻²) |
| 36 | 50 | Nitrates (NO ₃ ⁻) |
| 61,33 | 200 | Chlorure (Cl ⁻) |
| 24 | 200 | Sodium (Na ⁺) |
| 28 | 12 | Potassium (K ⁺) |
| 41,33 | 1500 | Résidus secs |
| 56 | 2100 | Conductivité électrique (μS/cm) |

(O.M.S., 1993)

L'étude de la dureté des eaux souterraines montre que 60,00 % et 22,66 % des échantillons des eaux analysés sont caractérisés respectivement par des eaux modérément douces et assez douces, qualités dominantes dans notre région d'étude, d'autre part 13,33 % des points d'eaux étudiés sont classés comme des eaux dures. Par ailleurs, 4,00 % des échantillons prélevés sont des eaux très dures, ayant le faible pourcentage. Donc la plupart des eaux souterraines ont une qualité acceptable.

L'étude de la potabilité des eaux basée sur les normes de l'O.M.S relatives à la qualité des eaux, destinée à la consommation humaine fait apparaître que la quasi-totalité des points d'eaux étudiés dépassent les normes de portabilité en certains éléments.

En conclusion les analyses physico-chimiques ont permis les observations suivantes :

- Les ions HCO₃⁻ évoluant entre 0 et 554 mg/l, sont le résultat de la transformation du CO₂ atmosphérique dissous dans l'eau. Donc tous les points d'eau analysés sont conformes avec la limite de l'O.M.S (610 mg/l) ;
- La contribution des Cl⁻ et des Na⁺ à la minéralisation est remarquable. Leurs teneurs globalement supérieures à 400 mg/l et 190 mg/l respectivement, auraient probablement une double origine anthropique et la nature géologique des formations traversées ;
- Les NO₃⁻ participent aussi considérablement à l'augmentation de la CE dans certains points d'eau, cette contamination résulte de la minéralisation des déchets organiques rejetés sur le sol où enfouis et l'utilisation non contrôlée des engrais, les concentrations sont comprises entre 0.5 et 93.5 mg/l alors qu'elles ne doivent pas dépasser la norme O.M.S maximale admissible de 50 mg/l dans la plupart des forages ;
- Les ions K⁺ évoluant dans le même sens que les NO₃⁻ se présentent en excès dans 21 points ; ils proviendraient probablement de la même source ;

- Les autres éléments majeurs (SO_4^{2-} , Mg^{2+} et Ca^{2+}) issus certainement du contact des eaux de la nappe avec du calcaire et des apports indirects agricole et domestique, dépassent les normes recommandées par l'O.M.S ;
- Les valeurs de pH varient entre 7.57 et 10.60 et les conductivités sont supérieures à 2100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ montrant une minéralisation excessive et les valeurs de CE sont fortement influencées par les ions Ca^{++} , SO_4^{2-} et Cl^- . En ce qui concerne les teneurs des résidus secs, presque la moitié des points étudiés dépassent les normes de l'O.M.S (1500 mg/l);
- Le diagramme de Piper, a permis de mettre en évidence que la quasi-totalité des points d'eaux étudiés présentent un faciès chimique chloruré et sulfaté calcique et magnésienne, la prédominance de ces faciès est essentiellement due à l'effet du lessivage des formations gypseuses et calcaire dolomitique traversées par les eaux souterraines.

Les principales causes de l'augmentation de ces teneurs sont :

La décomposition des sels minéraux de surface, le lessivage des formations géologiques, en plus les engrais chimiques et des fumiers utilisés pour le développement des élevages et la fertilisation des zones agricoles, les rejets domestiques et industriels participent à l'enrichissement significatif de ces paramètres dans les nappes souterraines.

CONCLUSION GENERALE

L'eau souterraine constitue la principale source de satisfaction de la demande en eau en Algérie, la wilaya de Djelfa comme les zones semi aride, est caractérisée par la rareté de ses ressources en eau et la forte irrégularité aussi bien spatiale que temporelle des précipitations. Cette ressource doit être bien gérée car elle n'est ni inépuisable, ni insensible aux agressions de l'environnement. Il est indispensable d'assurer une gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines. La croissance démographique et l'activité agricole entraînent un grand problème de détérioration de la qualité de cette ressource souterraine.

Le travail présenté dans ce document est une contribution à la régionalisation stochastique des paramètres physico-chimiques dans le cadre d'un SIG par l'utilisation de krigeage et de modèles de variogramme qui sont un ensemble d'outils statistiques largement répandus pour la prévision spatiale et l'interpolation. Ces outils sont les composants fondamentaux d'une classe de méthodes statistiques spatiales connues sous le nom de géostatistique (Calder et Cressie, 2009)

L'utilisation du système d'information géographique (SIG) intégrant des modèles d'analyse géostatistique constitue une nouvelle approche pour l'analyse spatiale de l'information et la mise à jour des travaux de cartographie (Drapeau, 2000 ; Ferrandis et al. 2000 ; Le Corre, 2000).

Comme application de cette étude nous avons choisi les analyses des eaux souterraines de la zone d'étude. Il est vrai que ces données datent d'une période peu ancienne (2006), et que notre but n'était pas exactement l'étude de la qualité des eaux souterraines, mais nous avons mis l'accent sur la mise en oeuvre de l'approche stochastique pour régionaliser les paramètres physico-chimiques qui ont été considérés comme variables obéissant à la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1962) caractérisées par une structure spatiale ajustée par un variogramme.

L'étude variographique montre que les paramètres étudiés ont généralement la même structure spatiale de la forme exponentielle avec une distance moyenne de sa portée égale à 17.6 km qui correspond à la limite de l'auto-corrélation entre les données d'une variable régionalisée. Il nous semble que cela est dû aux réactions entre les différents éléments chimiques qui se font dans le milieu naturel dans les mêmes conditions, et leurs concentrations dépendant généralement de la nature des couches géologiques sous jacentes.

Les cartes obtenues par krigeage de la zone d'étude ont permis de tracer l'évolution spatiale des éléments et leurs zones de localisation.

L'étude physico-chimique nous a permis d'aborder directement les problèmes de la salinité et la pollution des eaux souterraines par certains éléments.

La cartographie des nappes souterraines de la région de Djelfa, nous amène à conclure que les zones les plus affectées par une élévation excessive de l'ensemble des valeurs étudiées des éléments chimiques sont localisées dans le nord, le centre et le sud du côté Est, ainsi que les répartitions des différents éléments dépendent du faciès géologique des formations aquifères qui sont des zones connues par leurs activités agro-pastorales où l'utilisation intensive des engrais sur les sols, favorise la propagation des éléments qui sont

très mobiles à travers les sols vers les eaux. Les eaux usées (domestiques et industrielles) souvent déversées directement dans les oueds, participent fortement au changement de la qualité des eaux souterraines.

Il faut, en outre, signaler l'importance de l'approche stochastique utilisée dans notre régionalisation à savoir le krigeage, qui a la possibilité d'élaborer en plus des cartes des valeurs estimées, des cartes des erreurs donnant une confiance dans telle estimation indiquant la précision et la qualité de la régionalisation utilisée.

Nous avons voulu montrer une technique, considérée actuellement comme outil moderne à base d'informatique, dont l'utilité est la résolution des problèmes de gestion des eaux en qualité et en quantité.

Par ailleurs et d'après le diagramme de Piper il faut noter que et d'une manière générale on a distingué deux grandes familles des eaux souterraines dans notre zone d'étude :

- Famille des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes ;
- Famille des eaux sulfatées.

Enfin, et pour compléter la recherche nous proposons de traiter les points suivants :

1. Proscrire les déversements des résidus industriels et domestiques au dessus de l'aquifère ;
2. Instituer des programmes de sensibilisation pour les agriculteurs afin qu'ils comprennent que les ressources disponibles pourraient être utilisées plus rationnellement par la réduction de la contamination, par la réparation et entretien des réseaux, par la plantation des cultures moins exigeantes en eau ;
3. Faire les analyses des eaux requises pendant toute l'année au niveau de l'ANRH surveillance régulière de la qualité des eaux de la nappe afin d'avoir un suivi de l'évolution de celle-ci pour faciliter et aider les chercheurs dans leurs études en vue de résoudre ces problèmes.

Références bibliographiques

- Abdelbakiet C., Boukli H. F., 2007. Etude du phénomène de dégradation des eaux souterraines du groupement urbain de Tlemcen. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2. pp. 257-263.
- Achour S., Guergazi S., 2002. Incidence de la minéralisation des eaux algériennes sur la réactivité de composés organiques vis-à-vis du chlore, *Rev. Sci. Eau*, 15,3, pp.649-668.
- Achour S., 2005. Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. *Pratique de la chloration*. Thèse de doctorat en pharmacie, Mali. pp. 119-127.
- Alpha S. M., 2005. Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.SA dans la ville de Bamako : évaluation saisonnière. Thèse de doctorat en pharmacie. Université de Bamako. Mali. 71 p.
- A.N.A.T, 2003. Prospective territoriale pour un développement durable et intègre dans la wilaya de Djelfa. 183p.
- A.N.R.H, 1983. Etude hydrogéologique de la plaine de Ain Oussera. 48p.
- A.N.R.H, 1993. Synthèse des études et exploitation des données existantes sur le synclinal de Djelfa. 45p.
- A.N.R.H, 1998. Optimisation physique du réseau piézométrique du bassin endoreïque des Zahrez Gharbi et Chergui, 14p.
- Arnaud M. et Emery X., 2000. Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. *Hermes Science Publications*. Paris, France. 221p.
- Azouzi B., 1993. Contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques, application à la Mitidja. Thèse de Magistère, Ed. INA d'El Harrach, Alger. 163p.
- Bahir M. et Mennani M. et Oliveira D. B., 1977. Drought impact on water resources in semi-arid zone, case study of the Barremien-Aptien aquifer of the coastal zone of Essaouira. Morocco. 51p.
- Baillargeon S. 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Université Laval, 128p.
- Bédard Y., 1982. Recommandations relatives à l'implantation d'un système d'information sur le territoire pour des fins de gestion municipale, Thèse de maîtrise, Université Laval, Québec.
- B.E.R.E.G.H., 2001. Etude géophysique par prospection électrique dans la zone de Ain El Ibil. 17p.
- B.N.E.D.E.R., 1993. Etude des potentialités en eaux pour la mise en valeur en irrigué dans la wilaya de Djelfa. Rapport sur l'existence des ressources hydriques. Phase III. 73p.

-
- Burrough P. A., 1986. Principles of geographical information systems for Land resources assessment, Oxford University Press. New York.
- Calder C.A., Cressie N., 2009. Kriging and variogram models. International encyclopedia of human geography.
- Castany G., 1979. Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas, Paris, 238p.
- Chauvet P., 1992. Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages. rapport technique. Centre de géostatistique, école de mines de Paris. p.43.
- Cheikh H. K., 1995. Contribution a l'étude hydrochimique de la nappe des sables quaternaires du littoral nord du Sénégal entre kayar et saint louis. Thèse de doctorat. Université cheikh Anta Diop de dakar, faculté des sciences et techniques, département de géologie. Sénégal. 119 p.
- Cheikh F., 2008. Etude de la qualité de l'eau de robinet et de celle de la nappe phréatique dans les différentes communes d'Arrondissement du département de Guédiawaye. Université Cheikh Anta Diop Dakar, Sénégal. 75p.
- Chibane B., Boutaleb A., Lacroix M., 2010. Etude hydrochimique et approche isotopique en région semi-aride: cas du synclinal de Djelfa (Algérie). European journal of scientific research. Vol.45 N°.2. pp.270-290.
- Couture L., 2003. Analyse d'eau pour fin d'irrigation. Ed. Agri. Vision. Canada.
- Cressie, N., 1993. Statistics for Spatial Data, New York. 900p.
- Cunnane, C., 1978. Unbiased plotting positions a review. Journal of Hydrology, vol. 37. pp. 205-222.
- D.P.A.T., 2007. Monographie de la wilaya de Djelfa. Vol.1. 211p.
- Devillers Juliette, Squilbin M., Yourassowsky C., 2005. Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général Fiche2
- Delhomme J.P., 1978. Kriging in the hydrosciences. Advances in water resources. Vol.1. N.5. 264p.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G., 1998. Geostatistical software library and User's guide. Oxford University Press, Oxford. 369 p.
- Diallo B., 1996. Analyse et contrôle de la pollution des eaux du fleuve Niger par les rejets liquides urbains et industriels du district de Bamako. Thèse Doctorat de Biologie : ensup Bamako. Mali.
- Dickinson H. J., Calkins H. W., 1988. The economic evaluation of implementing a GIS. International journal of geographic information systems. pp. 307-327.
- Didon, E., 1990. Systèmes d'Information Géographique ; Concepts, Fonctions, Applications. Laboratoire commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF, Montpellier. 44 p.
- Dimitri S., Bakary D., 2007. L'utilisation des systèmes d'information géographiques dans les instituts et les bureaux nationaux de statistique africains. The african statistical journal. Vol. 5. pp.161-181.
- D.G.F., 2002. Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Le Chott de Zehrez Gharbi.16p.
-

- D.G.F., 2003. Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Le Chott de Zehrez Chergui.17p.
- Don D. R., Malcolm J. B., Michael J. K., 2009. Water Supply. Sixth edition. pp. 195-266.
- Drapeau L., 2000. Statistiques et interpolations dans les SIG. Towards the use of geographic information systems as a decision support tool for the management of mediterranean fisheries. Informations et etudes COPEMED.
- Dupont A., 1981. Hydraulique urbain hydrologie captage et traitement des eaux. Ed. Eyrolles. Paris. Tome 1. 262p.
- Durand J. B., 1983. Les sols irrigables étude pédologique., Ed Presse universitaire de france, Paris. France. 339p.
- El-hadi K., 2006. Représentation de données spatiales à différents niveau d'abstraction:Application à l'archéoastronomie. Thèse de doc sciences de l'environnement. Université de Corse-Pasquale Paoli. Sciences et techniques. France.
- Ferrandis E., Hernandez P., Gil D. S. L. and Liris D., 2000. The use of GIS in the research of mediterranean demersal resources. An itinerary from data to maps. Towards the use of geographic information systems as a decision support tool for the management of mediterranean fisheries. Informations et etudes COPEMED.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Ressources Evaluation. Applied Geostatistics series. Oxford University Press, New York.
- Gratton, Y., 2002. Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'institut d'analyse géographique.INRS-Eau-Terre-Environnement. Québec, Canada.
- Guy F., 2003. Irrigation water Quality standards and salinity management strategies.18p.
- Hamouni M., 2006. Contribution à la détermination des unités homogènes du sol par différentes approches de cartographie numérique. Thèse Mag.INA d'Alger. 120p.
- Helena M., 2002. Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs, etude de cas sur des données de la ville de Marseille et de la méthode ISIS de météo-France. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier-Grenoble. 147p.
- Huntz A.M., 1980. Equilibres acido-basiques en solution aqueuse, pH, Editions MASSON, deuxième édition. 295 p.
- I.D.O.M. 2005. Document IV. Etude géologique et édaphologique. gestion intégrée des ressources en eau dans la région des hauts plateaux. p.195.
- I.D.O.M. 2005. Document V. Etude hydrogéologique. Gestion intégrée des ressources en eau dans la région des Hauts Plateaux. p.59.
- I.D.O.M, 2005. document VI. Le secteur agricole des hauts plateaux. Gestion intégrée des ressources en eau dans la région des Hauts Plateaux. p. 60.
- Isaaks E. H., Srivastava R. M., 1989. An introduction to applied Géostatistic. Oxford university Press. New York. p. 561.
- Jacques H, Claire H., Paul J., Michel D., Philippe H., 2002. Eaux de boisson et lithiase calcique urinaire idiopathique, quelle eaux de boisson et quelle cure de diurèse. Progrès en urologie. Vol.12. pp.692-699.

-
- Jean Jacques collin, 2004. Les eaux souterraines connaissance et gestion. Brgm édition. France. 169p.
- Jean P. Y. F., 2000. Caractérisation de la nappe phréatique de Mboro par rapport aux normes conventionnelles pour l'eau potable : Physico-chimie et chimie. université cheikh anta diop de dakar. département de géographie. 46p.
- Journal officiel de la République Algérienne Démocratique Populaire N° 51, 2000.
- Journel A.G., Huigbregts C. J., 1978. Mining géostatistics. Academic Press. New York. 600p.
- Kane B., 2000. Evaluation saisonnière de quelques paramètres du contrôle de la qualité de l'eau du réseau d'adduction de la ville de Bamako, Thèse de doctorat en pharmacie, Bamako.
- Krige D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. J. of the Chem., Metallurgical and Mining Soc. of South Afri, 52, pp.119-139.
- Le Corre G., 2000. outil d'analyse par krigeage. Towards the use of geographic information systems as a decision support tool for the management of mediterranean fisheries. Informations et études COPEMED.
- Luis B. B., 2003. Apport des systèmes d'information géographique (SIG) pour la surveillance et l'évaluation de la qualité des eaux côtières. Une contribution à la gestion intégrée de la zone côtière colombienne. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Thèse de docteur ès sciences techniques. Colombie. 230p.
- Maguire D. J., Goodchild M.F., Rhind D.W., 1991. Geographical Information Systems, Longman, London. Vol 2.
- Marc Y. T. et Théophile L., Jean P. J., Koffi F. K., Moumtaz R., 2008. Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire LANDSAT-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de bondoukou (nord-est de la cote d'ivoire) Revue télédétection. Vol. 8, N° 2, pp.119-135.
- Marcotte D., 1988. Trend surface analysis as a special case of kriging. Mathematical geology. pp.821-824.
- Matheron G., 1963. Traité de géostatistique appliquée, Tome II : Le Krigeage. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. No.24, Ed. B.R.G.M, Paris. 171p.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. Economie Geology. Vol. 58, pp. 1246-1266.
- Matheron G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris. 305p.
- Matheron, G., 1969. Le krigeage universel. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 1. Ecole de Mines de Paris, Fontainebleau.
- Matheron G., 1970. The theory of regionalized variables and its applications. Les cahiers du centre de Morphologie 5. Centre de Géostatistiques de Fontainebleau. 211p.
-

- Mathieu Q., 2009. Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies. Philosophiae Doctor. Université du Québec. Institut National de la Recherche scientifique - Centre Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE).161p.
- Mireille W., 2004. Qualité des eaux de distribution publique dans le Nord de Calais. France. 6.
- Monique H., 1991. Les eaux naturelles et les eaux de consommation Saint Laurent. Canada.
- Moussa M. D. H., 2005. Les eaux résiduaires des tanneries et des teintureries, Caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et impact sur les eaux de surface et les eaux souterraines. Thèse de doctorat en pharmacie.Mali. 109p.
- Mulla, D.J., Bratney M., 2000. Soil spatial variability. Edition handbook of soil science. CRC Press, Boca Raton, pp. 321–352.
- Nolin, M.C. 2000. Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. Pages 143-169 dans craaq. 1er Colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada). pp. 23-24.
- Nziengui M., 2007. Système d'information géographique et applications, Cap-Estérias, photocopié IC2, 84 p.
- Office of Water, 2011. United States environmental protection agency washington, edition of the drinking water standards and health advisories. 12p.
- O.M.S., 1993. Directives de la qualité pour l'eau de boisson, 2^{ème} Ed. vol.1. Recommandations. Genève.
- P.D.A.U., 2003. Révision du plan directeur d'aménagement et d'urbanisme de Ain Oussera.
- Philippe R., 2009. Analyse et validation des extrêmes et de la variabilité des températures et de la précipitation du modèle régional canadien du climat. Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'atmosphère. Université du Québec à Montréal. 79p.
- Phocaidés A., 2008. Manuel des techniques d'irrigation sous pression. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Seconde édition. Rome. 305p.
- Pouget M., 1980. Les relations sol - végétation dans les steppes Sud-Algéroises. Trav. Doc. ORSTOM, N° 116. 555p.
- Pouliot J., 1999. Définition d'un cadre géo sémantique pour le couplage des modèles prévisionnels de comportement et des SIG. Application pour les écosystèmes forestiers. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Département de génie rural. Lausanne. 171 p.
- Rieu M., 1981. Sodium absorption ration et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux. ORSTOM. Montpellier. Vol. 13. N° 2. pp. 123-128,
- Robert M., Dale D., 1991. Sampling and interpretation of landscape irrigation water. University of Nevada. U.S.A.

- Rodier J., 1978. L'analyse de eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 7ème édition, dunod, France. pp.925-953.
- Rodier J., 1996. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, huitième édition, dunod, Paris. 1384 p.
- Sana K., 2007. Elaboration d'un site web de cartographie dynamique pour l'aide à la gestion de la région de Matam. Thèse doc.
- Scheidt C., 2006. Analyse statistiques d'expériences simulés, modélisation adaptative de réponses non-régulières par krigeage et plans d' expériences, application à la quantification des incertitudes en ingénierie des réservoirs pétroliers. Thèse de doctorat, Univ. Luis pasteur strasbourg I. 184p.
- Smith, J.F., Halvorson, J.J., Robert, I.P., 1993. Using multiple variable indicator kriging for evaluating soil quality. Soil Sci. Soc. Am. Vol. 57. pp.743-749.
- S.O.G.R.E.A.H., 2007. Etude de modélisation de quatre systèmes aquifères "plaine de la Mitidja, plateau de Mostaganem, plaine de Ain Oussera, plaine de Maghnia."
- Taha H.D. 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité. azote et métaux lourd) sous l'effet de la pollution saline agricole et industrielle. Thèse de Doctorat. Ed. Franche-Comté. 199p.
- Tandia A. A. 2000. Origine, évaluation et migration des formes de l'azote minéral dans les aquifères situés sous environnement périurbain non assaini : cas de la nappe des sables quaternaires de la région de Dakar (Sénégal). Thèse de doctorat d'Etat ès sciences naturelles, ucad. USA. 202 p.
- Thériault M. 1996. Systèmes d'information géographique. Concepts fondamentaux. Université de Laval. Québec. 165 p.
- Thierun J. P.S., 2001. Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. 91 p.
- Trangmar B.B., Yost R.S., Uehara G., 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy. Vol.38. pp.45-94.
- USSL, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alcali soils. Agriculture handbook n° 60, richards ed., US dep. Of agriculture.
- Valiron F. 1983. La réutilisation des eaux usées. Ed. Du BRGM. et doc. lavoisier. Paris. 207p.
- Wackernagel H. 1993. Cours de géostatistique multivariable. Rapport technique. Centre de géostatistique, Ecole de mines de Paris. p.43.
- Wackernagel H., 2003. Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications. springer-Verlag, Third completely revised edition. Berlin.
- Westcot D. W., Ayers R. S., 1988. La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO. 184p.
- WEBOGRAPHIE
- Anonyme 1: www.wikipédia.com
- Anonyme 2: ncgia.ucsb.edu/giscc
- Anonyme 3: www.géoconcept.com

Anonyme 4: www.coastlearn.org

Anonyme 5: www.esrifrance.fr

Anonyme 6: www.oieau.org

Anonyme 7: www.lenntech.fr

Annexe



Synthèse des caractéristiques climatiques pendant la période 1975-2009