



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama Khemis-Miliana

Faculté : Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre

Département : Sciences de la terre

Spécialité : Hydrogéologie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème

**Estimation de la réserve d'eau souterraine de l'aquifère
alluvial de Khemis Miliana à l'aide les techniques de
géomodélisation**

Préparé par :

- *Mir Amina*
- *Retima Khaoula*

Devant le jury :

Mr: Bouderbala. A

Président

UKM

Mr: Gharbi. B

Encadreur

UKM

Mr: Hennia. K

Examineur

UKM

Année universitaire : 2019/2020

Dédicace

Du profond de mon cœur je dédie ce travail de fin d'étude :

*À la mémoire de ma grand mère Mme Kemora Fatma Zohra,
dans nos pensées tu resteras dans nos cœurs tu vivras.*

*À ma très chère mère qui ma accompagne par ses prières sa
douceur qui ma entourée d'amour d'affection et qui fait tout
pour ma réussite puisse Allah lui prêter longue vie et beaucoup
de santé.*

*À mon très cher père aucune dédicace ne saurait exprimer mes
respects ma reconnaissance et mon profond amour à toi mon
père, source de joie et de bonheur celui qui s'est toujours sacrifié
pour voir ma réussite.*

*C'est un moment de plaisir de dédier ce travail à toute la famille
Mir.*

*Et finalement à toutes mes amies avec qui je partage des
moments de ma vie au fil du temps Zineb, Hamida, Zola,
Soumia, Ghozlan et Fatima.*

Amina.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma chère mère qui m'a soutenu et encouragée.

Au long de mes études Dieu la protège et prenne soin d'elle.

À mon cher père (Allah yarhamou) qui m'a soutenu dans mon éducation.

À mes chères sœurs Sabah et Sarah merci beaucoup.

À mon encadreur Mr Gharbi.

À mon binôme Amina.

À ma famille et mes proches merci tous.

Khaoula.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH de nous avoir donné le courage la volonté et la force afin d'accomplir notre modeste travail.

Ce travail a été effectué a fin d'obtention du diplôme de master d'ériger par Mr Gharbi Benyoucef (Maitre de Conférence), nous exprimons notre profonde gratitude pour ses conseils judicieux et ses orientations tout au long de notre travail et pour l'honneur qu'il nous a fait en nous encadrant.

Tous nos compliments vont aux membres de jury :

Mr Bouderbala et Mr Hennia pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également aux professeurs pour leur contribution à toute notre formation et leurs utiles conseils pendant notre chemin d'étude aussi nous tenant a remercié tout le corps administratif de la Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre de l'université de

Djilali Bounaama Khemis-Miliana.

Au final, nos remerciements vont à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

ملخص

تعتبر المياه الجوفية في سهل خميس مليانة عنصرا هاما وحاسما في التموين بمياه الشرب، الأنشطة الزراعية والصناعية. هذه الدراسة مخصصة لتقدير احتياطات المياه الجوفية باستخدام نموذج هيدروجيولوجي ثلاثي الأبعاد، كأداة لدعم القرار، اعتمد تصميم النموذج الهيدروجيولوجي ثلاثي الأبعاد على الإستعانة بنقاط المسوحات الكهربية العمودية التي أجريت في المنطقة، سمحت لنا تطبيق تقنية الارتباط الثلاثي الأبعاد لهذه النقاط بتصميم الوحدات الهيدروجيولوجية على شكل شبكي من معرفة توزعها المكاني وتحديد أسماؤها وأشكالها الهندسية. المساحات الشبكية البيزومترية للمياه الجوفية لفترة 2008-2016 تم إدخالها إلى النموذج 3D-Grid، أظهرت الحسابات الحجمية أن الإحتياطي المرن للحامل المائي يقدر ب 28.69 مليون متر مكعب/سنة، كما قدرت الموارد الطبيعية والموارد القابلة للاستغلال ب 10.96 مليون متر مكعب/سنة و39.65 متر مكعب/سنة على التوالي. تتركز موارد المياه الجوفية العذبة وضعيفة الملوحة في جهة المصب من المنطقة المدروسة مع درجة ملوحة أقل من حتى 1.5 غ/ل، ويقدر احتياطها المرن ب 8.39 مليون متر مكعب/سنة. بالنسبة للمياه الجوفية التي لا تزيد درجة تمعدنها 1 غ/ل يقدر احتياطها المرن ب 0.29 مليون متر مكعب/سنة، والموارد القابلة للاستغلال ب 1.05 مليون متر مكعب/سنة.

أثبتت تقنيات النمذجة عن طريق التصميم الثلاثي الأبعاد أنه أداة فعالة لصنع القرار في إدارة موارد المياه.

الكلمات المفتاحية: خميس مليانة، النمذجة الجيولوجية، تقنية الارتباط الثلاثي، الاحتياطي المرن،

الموارد الطبيعية، الموارد القابلة للاستغلال.

Abstract

Groundwater in the Khemis-Miliana plain is considered to be an important and crucial element for the supply of drinking water, agricultural and industrial activities. This study is dedicated to the estimation of groundwater reserves using three-dimensional (3D) hydrogeological geomodeling, as a decision support tool. The design of the 3D hydrogeological model is based on the correlation of vertical electrical surveys carried out in the region. The GRID interpolation technique allowed us to visualize a aquifer system of the region in 3D, to know the spatial distribution of hydrogeological units, their thicknesses and their geometries . The models in Grid-3D form of the piezometric surfaces for the period 2008-2016 have been integrated, the volumetric calculations showed us, that the elastic reserve is estimated at 28.69 M.m³ / year, The natural resources and the exploitable resources are estimated at 10.96 M.m³/ year, 39.65 M.m³ / year respectively. Fresh and weakly mineralized groundwater resources up to C <1.5 g / l are concentrated in the downstream part of the study area, thier elastic reserve is estimated at 8.39 M.m³ / year; natural resources at 3.21 M.m³ / year and exploitable resources at 11.6 M.m³ / year. For groundwater in C <1 g/l mineralization, the regulatory reserve is estimated at 0.76 M.m³ / year, natural resources at 0.29 M.m³ / year and exploitable resource at 1.05 M.m³ / year. Geomodeling has proven to be a very effective tool for decision making in resource management.

Key words: Khemis-Miliana, geomodeling, GRID technique, elastic reserve, natural resources, exploitable resources.

Résumé

Les eaux souterraines dans la plaine de Khemis-Miliana sont considérées comme élément important et crucial pour l'approvisionnement en eau potable, activités agricoles et industrielles. Cette étude est consacrée pour l'estimation des réserves d'eau souterraines à l'aide de la géomodélisation hydrogéologique tridimensionnel (3D), en tant qu'outil d'aide à la décision. La conception du modèle hydrogéologique 3D est fondée sur la corrélation des sondages électriques verticaux, réalisés dans la région. La technique GRID interpolation nous a permis de visualiser en 3D le système aquifère de la région, de connaître la distribution spatiale des unités hydrogéologiques, leurs épaisseurs et leurs géométries. Les modèles sous forme Grid-3D (Grille-3D) des surfaces piézométriques pour la période s'étalant de 2008-2016 ont été intégrés, les calculs volumétriques nous ont montré, que la réserve régulatrice est estimée à 28.69 M.m³/an, La ressource naturelle et les ressources exploitables sont estimées à 10.96 M.m³/an, 39.65 millions.m³/an respectivement. Les ressources en eau souterraines douces et faiblement minéralisées jusqu'à C < 1,5 g/l sont concentrées dans la partie aval de la zone d'étude dont la réserve régulatrice est estimée à 8.39 M.m³/an ; les ressources naturelles à 3.21 M.m³/an et les ressources exploitables à 11.6 M.m³/an. Pour les eaux souterraines dans la minéralisation C < 1 g/l, la réserve régulatrice est estimée à 0.76 M.m³/an, ressources naturelles à 0.29 M.m³/an et ressources exploitables à 1.05 M.m³/an. Le Geomodeling est avéré un outil très efficace, pour la prise de décision dans ce qui concerne la gestion des ressources en eaux, il permet l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines.

Mots clés : Khemis-Miliana, géomodélisation, technique Grid, réserve régulatrice, ressources naturelles, ressources exploitables.

Table des Matières

Dédicace	
Remerciements	
ملخص	
Abstract	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et abréviations	
Introduction générale	1

Chapitre I Synthèse Bibliographique

Introduction	3
I.1 La Réserve en eaux souterraines	3
I.1.1 Définition	3
I.1.2 Catégories de réserve en eau souterraines.....	4
I.2 Le système d'information géographique	4
I.2.1 La science de l'information géographique.....	4
I.2.2 Le terme «SIG».....	5
I.2.3 L'expression « données géographiques ».....	5
I.2.4 Les applications des SIG 2D.....	6
I.3 La géomodélisation	7
I.3.1 Terminologie et définition	7
I.3.1.1 La géomodélisation.....	7
I.3.1.2 Un modèle.....	7

I.3.1.3	Le géomodelle (3D).....	8
I.4	Définition de la modélisation	8
I.4.1	Impacts de la géomodélisation.....	9
I.4.2	Les méthodes de modélisation géologique (3D).....	9
I.4.3	Avantages de cartes et modèles géologiques (3D)	9
I.4.4	Les techniques de reconstruction tridimensionnelle 3D	10
I.5	Définition d'un modèle hydrogéologique	10
I.5.1	Les étapes de conception d'un model hydrogéologique	10
I.6	Comparaison des méthodes d'interpolation	12
I.7	Problématique et Objectif.....	13

Chapitre II Milieux physique, géologique et hydrogéologique

II.1	Situation géographique de la plaine de Khemis Miliana	14
II.1.1	Contexte régional	14
II.1.2	Contexte Local	14
II.2	Urbanisation et démographie	15
II.3	Contexte géomorphologique	15
II.3.1	Étude des reliefs	15
II.4	Contexte hydro-climatologique	17
II.4.1	Réseau hydrographique	17
II.4.2	Précipitations	18
II.4.3	Réseau pluviométrique de la zone d'étude	19
II.4.4	Précipitations moyennes annuelles	20
II.4.5	Détermination de la lame d'eau précipitée par la méthode de Thiessen	21
II.4.6	Température	22
II.5	Contexte géologique	23
II.5.1	Cadre géologique	23
II.5.2	Litho-stratigraphie de la plaine de Khemis-Miliana	26
II.6	Contexte hydrogéologique	29

II.6.1	Les principaux aquifères de la région d'étude	29
--------	---	----

Chapitre III Matériels, méthodes, résultats et discussion

III.1	Partie de Géophysique	33
III.1.1	L'échelle des résistivités	33
III.1.2	Analyse des coupes transversales	36
III.1.2.1.1	Recouvrement alluvionnaire	39
III.1.2.2	Formations miocène du Moi-pliocène	39
III.1.2.3	Substratum résistant	39
III.2	Conception d'un-modèle 3D hydrogéologique géo-spatial	40
III.3	Représentation 2D-3D des sondages dans la plaine de Khemis Miliana	42
III.3.1	Diagramme lithologique des forages en 3D	42
III.4	Intégration des surfaces piézométriques -3D GRID au sein du model géologique ..	48
III.4.1	Intégration des surfaces piézométriques dans le modèle géologique	51
III.5	L'utilisation de la technologie 3D-Modeling pour évaluer les réserves d'eau souterraine dans la plaine de Khemis-Miliana	51
	Conclusion générale.....	56
	Références Bibliographiques.....	58

Liste des figures

Figure 01. Exemple d'un modèle géologique 3D	8
Figure 02. Carte de la situation géographique de la région d'étude.	14
Figure 03. Représentation topographique de la zone d'étude sous forme numérique	16
Figure 04. Réseau hydrographique de la région d'étude.	17
Figure 05. Répartition spatiale du réseau pluviométrique de la plaine alluviale de Khemis Miliana	19
Figure 06. Variation temporelle des précipitations moyennes annuelles.	20
Figure 07. Carte de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles par polygones de Thiessen	21
Figure 08. Carte géologique schématisée vectorisée de la région d'étude.....	24
Figure 09. Coupe géologique A'-A de la plaine du Haut Cheliff.	25
Figure 10. Log litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine alluviale de Khemis-Miliana	31
Figure 11. Positionnement des sondages électriques verticaux réalisés dans la plaine de Khemis Miliana.	35
Figure 12. Coupes transversales réalisées dans la plaine alluviale de Khemis Miliana.....	37
Figure 13. Suite-Coupes transversales réalisées dans la plaine alluviale de Khemis Miliana	38
Figure 14. La Table litho-hydrogéologique des principaux faciès lithologiques rencontrés dans la plaine de Khemis Miliana	41
Figure 15. Représentation des profils de sondages géoélectriques réalisés par le logiciel RockWorks.....	42
Figure 16. Géo-visualisation des sondages géoélectriques en 2D.....	43
Figure 17. Vue tridimensionnelle d'un sondage à l'aide du logiciel 3D RockWorks.	44
Figure 18. Répartition tridimensionnelle des sondages dans la région d'étude.....	46
Figure 19. Représentation des unités géologiques avec des volumes géologiques.....	47
Figure 20. Diagramme en panneaux diagonaux, montrant la variation spatiale des unités hydrogéologiques dans le Haut Cheliff (Plaine de Khemis Miliana).....	48
Figure 21. Les formes d'organisation d'un Grid de surface piézométrique moyenne	50
Figure 22. Superposition des 3D-Grid piézométriques	51
Figure 23. Schéma représentatif de la conceptualisation du model de calcul des réserves/ressources d'eau souterraine de l'aquifère alluviale de Khemis Miliana.....	53
Figure 24. Interface de calcul volumétrique par Voxel dans la plateforme RockWorks.	54

Liste des tableaux

Tableau 01. Paramètres physiographiques du bassin versant	15
Tableau 02. Réseau hydrographique	18
Tableau 03. Caractéristiques des stations pluviométriques, d'après A.N.R.H Rériode (1981-2013).....	19
Tableau 04. Variation des températures moyennes annuelles de la station de Barrage Harreza et Khemis Miliana (1987-2014).	22
Tableau 05. Echelle de résistivités des formations de la région de la plaine de Khemis Miliana	34
Tableau 06. Besoin en eau souterraine dans la plaine de Khemis Miliana (2007-2008)	52

Notations et abréviations

2D : Deuxième Dimensions.

3D : Troisième Dimensions.

4D : Quatrième Dimensions.

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

C.G.G : la Compagne Générale de la Géophysique de France.

D.H.W : Direction Hydraulique de la wilaya.

D.R.E.W : Direction des Ressources en Eau de la Wilaya.

GRD : Grid.

MNT : Model Numérique de Terrain.

SEV : Sondages Electriques Verticaux.

SGBD : Système de Gestion de Base de Données.

SIG : Système d'information Géographique.

C, M : Minéralisation.

F : Superficie de l'extension de la nappe d'eau souterraine.

hct : Lamme d'écoulement souterrain.

Kc : L'indice de compacité de Gravillus.

Qe : Ressources naturelles de l'horizon aquifère.

QW : Débit de l'écoulement souterrain.

Q₃ : Ressources exploitables.

RT : Résistance transversal.

S : Rabattement.

t : Période de prévision de l'exploitation de la ressource.

V : Volume régulateur.

W : Réserves régulatrices.

WEX : Volume d'eau maximale.

WM : Réserve totale moyenne.

WP : Réserve permanente.

WR : Volume d'eau gravitaire.

WT : Quantité d'eau gravitaire.

μ : Coefficient d'emménagement.

ΔW : Différence de réserve.

Introduction générale

L'eau souterraine constitue la plus grande réserve en eau douce liquide de la planète, 8 à 10 millions de km³, soit entre 98 et 99 % du total. Son volume annuellement renouvelable par l'infiltration des précipitations est estimé à plus de 10.000 km³ (Margat, 2008). En Algérie, l'eau est une ressource de plus en plus précieuse. La concurrence que se livrent l'agriculture, l'industrie et l'A.E.P pour avoir accès à des disponibilités limitées en eau grève d'ores et déjà les efforts de développement de nombreux pays (Remini, 2010).

L'accroissement rapide de la population, en particulier dans les pays sous développés et en voie de développement où l'extension de la culture irriguée et le développement industriel, influençant fortement la quantité et la qualité de l'eau dans la nature. (Ahmed Rahmani, 2018), donc les ressources en eau font l'objet d'une attention accrue de la part de la communauté internationale qui souligne, à juste titre, le caractère stratégique et emblématique d'une gestion durable de ces ressources (Petit, 2004).

Aujourd'hui, une prise de conscience croissante des eaux souterraines en tant que ressource mène à quelques questions de base telles que: Combien avons-nous de m³ d'eaux souterraines? Sommes-nous en train de les manquer? Où sont les ressources les plus disponibles pour les besoins futurs? Quel est l'efficace gestion qui doit être mise en œuvre pour maintenir un équilibre entre la disponibilité et la demande des eaux souterraines? La première connaissance requise pour répondre à ces questions est la quantité de volumes d'eau stockés dans l'aquifère.

En réalité, la géologie souterraine a un impact majeur sur la variabilité des niveaux des eaux souterraines, L'hétérogénéité géométrique des aquifères et la présence de couches lithologiques variées entrave la compréhension du processus hydrodynamique et la prédiction de la réponse de ces systèmes aux forces extérieures et aussi le calcul de son stockage. Dont La modélisation géologique 3D est de plus en plus un outil utilisé comme moyen de traiter toutes les données disponibles, conduisant à une meilleure compréhension et manipulation plus fiable d'un sans équivoque contexte géologique systèmes aquifères (Hamdi et al., 2018).

La compréhension et la gestion des ressources en eaux souterraines nécessitent l'intégration d'une grande quantité de données de haute qualité provenant de diverses sources (Chesnaux et al., 2011) ; Ces dernières années, l'utilisation du système d'information géographique (SIG) a connu une croissance rapide dans la gestion et la recherche des eaux

Introduction générale

souterraines (Gogu et al., 2001). Les outils des systèmes d'information (SIG-3D) ont prouvé leur utilité en hydrogéologie au fil des années, ce qui permet la gestion, la synthèse et l'analyse d'une grande variété de données souterraines. Le SIG-3D est devenu un outil utile pour la conceptualisation hydrogéologique à des fins de gestion des eaux souterraines (Trabelsi et al., 2013).

Plusieurs chercheurs ont montré que le model (3D) établi à l'aide des techniques de 3D donne une meilleure compréhension des paramètres complexe du sous-sol, le modèle (3D) est un outil précieux pour l'évaluation de l'aquifère et la variation du stockage de l'eau aussi, qu'il représente un outil clé pour estimer les ressources naturelles (Conde et al., 2014) ;

En outre (Gharbi, 2013) a montré que la technique SIG-3D s'avère d'être un outil puissant pour formuler des solutions aux problèmes de gestion des ressources en eau souterraine.

Dans cette étude, l'estimation de la réserve d'eaux souterraines dans l'aquifère alluviale de Khemis-Miliana est le principal objectif, les techniques de cartographie et de « Géomodélisation » vont être utilisées afin d'atteindre l'objectif de notre étude qui s'articulera sur :

- Un développement d'un modèle hydrogéologique tridimensionnel (3D), basé sur le système d'information géographique SIG et les techniques de géomodelling.
- La Généralisation et la visualisation et calculs géométriques de l'aquifère alluvial de Khemis-Miliana en tant qu'outil d'aide à la décision pour l'estimation de la réserve d'eau souterraine.

Synthèse
Bibliographique

Introduction

Les techniques de reconstruction tridimensionnelle (3D) pour l'étude et l'analyse hydrogéologique sont couramment utilisées dans l'exploration et la recherche hydrogéologique (Perrin et al., 2005), la reconstruction de surfaces géologiques (Fernandez et al., 2004), l'exploration minière, le risque environnemental ou la modélisation hydrogéologique pour la gestion des ressources en eau souterraine. En effet, avec une reconstruction 3D, il peut être obtenu un modèle cohérent qui décrit une succession détaillée de différentes couches avec leurs relations géométriques et leur distribution spatiale, permettant l'estimation du volume de chaque couche. De plus, la représentation 3D vraie permet une meilleure compréhension des paramètres complexes du sous-sol de différentes unités (Nury et al., 2009).

L'évaluation et la gestion des ressources en eaux souterraines nécessitent une représentation spatiale adéquate des informations géologiques et hydrogéologiques, y compris les couches géologiques et la spatialisation des niveaux d'eau souterraine, afin d'obtenir des cartes piézométriques, des coupes verticales, des solutions géométriques de la surface piézométrique des aquifères, des estimations des volumes et des données des réserves d'eau souterraine de l'aquifère concerné.

L'eau est le patrimoine essentiel de l'espèce humaine. A ce titre on pourrait croire que l'Homme la gère, l'économise, la préserve. (Baba Hamed, 2007). Le chapitre suivant représente une synthèse bibliographique sur le terme « réserve en eau souterraine » et les techniques de géomodélisation qui vont nous aider à estimer la réserve en eaux souterraine de l'aquifère alluviale de Khemis-Miliana.

I.1 La Réserve en eaux souterraines

I.1.1 Définition

La réserve est la quantité ou le volume d'eau gravitaire contenue à une date donnée ou stockée au cours d'une période moyenne annuelle dans un système hydrogéologique. Elle est associée au concept des ressources en eaux non renouvelables, elle résulte de la fonction capacitive du réservoir des aquifères. Évaluée en unités de volumes, elle est exprimée en hectomètres cube million de m^3 ou en km^3 .

I.1.2 Catégories de réserve en eaux souterraines

La catégorie de réserve en eau souterraine est définie par le volume d'eau gravitaire stocké, à une date donnée ou de préférence au cours d'une durée moyenne, dans une tranche d'aquifère délimité.

Quatre catégories sont définies :

- + Reserve totale de l'aquifère : c'est la quantité d'eau gravitaire WT, contenue dans le volume d'aquifère délimité dans tous les cas a base par le substratum. La limite supérieure est le toit imperméable pour l'aquifère a nappe captive et la surface piézométrique maximale moyenne pour celui a nappe libre.

La réserve totale moyenne WM, parfois utilisée est limitée au sommet par la surface piézométrique moyenne annuelle.

- + Reserve régulatrice des aquifère a nappe libre : c'est le volume d'eau gravitaire WR, contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique d'un aquifère a nappe libre. Elle est calculée par référence à une période définie (hauteur de fluctuation annuelle ou moyenne annuelle) elle peut être comparée mais ne doit pas être assimilée au débit de l'écoulement souterraines QW, pour la même période de référence, elle ne doit pas être confondue avec la différence de réserve ΔW .
- + Reserve permanente des aquifères : c'est la part, WP, de la réserve totale non renouvelée. Pour l'aquifère à nappe libre elle est limitée au sommet par la surface piézométrique minimale moyenne. Pratiquement dans les aquifères à nappe captive, réserve totale et réserve permanente ont des valeurs identiques.
- + Réserve en eau souterraine exploitable : c'est la quantité ou le volume d'eau maximal, WEX, qu'il est possible en pratique d'extraire de la réserve totale d'un aquifère temporairement ou définitivement, dans des conditions économiques acceptables. Elle est exprimée en m » ou en m^3/km^2 (Castany, 1982).

I.2 Le système d'information géographique

I.2.1 La science de l'information géographique

La science de l'information géographique est une science de l'information axée sur la collecte, la modélisation, la gestion, l'affichage et l'interprétation des données géographiques. Il s'agit d'un domaine d'intégration, combinant des concepts, des théories et des techniques d'un large

éventail de disciplines, permettant de nouvelles perspectives et des synergies innovantes pour une meilleure compréhension de notre monde (Kemp, 2008).

I.2.2 Le terme «SIG»

Système d'information géographique est en soi difficile à définir car il représente l'intégration de nombreux domaines. Bien que la croissance rapide, la diversité et l'orientation commerciale du SIG aient donné lieu à ses multiples définitions, il n'existe aucune définition convenue de façon absolue.

Cependant, les trois définitions largement utilisées du SIG sont les suivantes:

- Le SIG est un système de matériels, de logiciels et de procédures conçu pour prendre en charge la capture, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données référencées spatialement pour résoudre une planification et une gestion de complexes problèmes.
- Le SIG est un système informatique capable d'assembler, de stocker, de manipuler et d'afficher des informations géographiquement référencées.
- Le SIG est un ensemble de systèmes informatiques pour capturer, stocker, interroger, analyser et afficher des données géographiques et utiliser ces données pour résoudre une variété de problèmes spatiaux (Laughton, 2011).

I.2.3 L'expression « données géographiques »

Elle désigne des données spatiales ayant la référence à l'espace géographique et la représentation à une échelle géographique. Essentiellement, le SIG est un système d'analyse de données spatiales qui repose sur l'intégration de trois domaines de la technologie informatique qui sont :

- a) Un système de gestion de bases de données relationnelles pour stocker des données graphiques et non graphiques.
- b) Des capacités cartographiques pour représenter graphiquement et tracer des informations géographiques.
- c) Les capacités d'analyse spatiale pour faciliter la manipulation et l'analyse spatiale.

De plus, au niveau de l'application, le SIG est généralement appelé par des noms différents ; Par exemple, les praticiens de l'arpentage, de l'administration des terres et de l'état réel utilisent fréquemment le terme «systèmes d'information foncière» pour désigner les systèmes d'information utilisés à l'appui des activités de gestion des terres. La gestion des terres

comprend la prise de décisions associée au transfert, à l'évaluation et à l'aménagement des propriétés; la gestion des terres et des ressources en eau, ainsi que la formulation de lois foncières et de politiques d'utilisation des terres.

D'autres noms qui sont souvent utilisés pour désigner des SIG remplissant des fonctions spécifiques ou couvrant des zones géographiques particulières comprennent «base de données topographiques numériques», «système d'information national / régional», «système d'information sur les ressources naturelles», «inventaire des ressources forestières», «système d'information sur les sols», «Système d'information géologique», «système d'information sur l'environnement», «système de gestion de l'information sur la pêche», «système de gestion de l'information sur la faune», «système d'information sur le recensement», «système de gestion des installations», «système de gestion du trafic», «géographie des affaires», ou «système d'analyse de marché» (Laughton, 2011).

Les systèmes d'information géographiques bidimensionnels sont très utilisés dans le domaine des sciences de la Terre pour la création et l'exploitation de cartes. Cependant, les (GIS 2D) ne permettent pas la représentation tridimensionnelle du sous-sol géologique.

Les cartes bidimensionnelles (2D) sont les principales moyennes de communication entre les géoscientifiques depuis l'origine des géosciences. En géologie, les systèmes d'information géoscientifiques (2D) consistant un environnement d'application utilisateur et un système de gestion de base de données (SGBD) qui sont largement utilisés pour créer, gérer, interroger et analyser des cartes géoréférencées.

I.2.4 Les applications des SIG 2D

- A. La gestion des données se fait selon une base de données selon un model de données spatialement référencier.
- B. La visualisation des données, les SIG facilitent la création de model de carte de vue de donnée (2D) et l'inspection visuelle des modèles spatiaux.
- C. La possibilité de combiner l'interrogation spatiale et non spatiale, car les liens entre les entités spatiaux et les attributs d'entités non spatiaux qui sont associer sont conserves dans une base de données.
- D. L'analyse des données est réalisée en combinant différentes couches de cartes et en les examinant simultanément pour découvrir leurs relations.
- E. Le soutient de la prédiction et la prise de décision basée sur des multiples informations de facteurs spatiaux.

Les extensions spatiales communs de SIG (2D) ne sont pas applicables pour les applications géologiques (3D), car elles ne sont pas capables de représenter des relations et des propriétés géologiques spatiales en 3 dimensions avec une variation spatiale (3D); les SIG (2D) représentent les valeurs d'altitude (z) des géo-objets en fonction continue des coordonnées de situation géographique. De cette façon, ils ne peuvent pas modéliser des objets géologiques (3D) qui ont plusieurs valeurs de (z) pour une seule valeur de (x et y).

D'autre part le logiciel de géomodélisme (3D) fournit des modèles de données et des fonctionnalités pour représenter les situations géographiques spatiales en 3 dimensions comme géomodels (Apel, 2004).

I.3 La géomodélisation

I.3.1 Terminologie et définition

I.3.1.1 La géomodélisation

Est aujourd'hui une discipline quasiment incontournable dans l'exploration et la production des ressources géologiques. Elle présente un moyen pour la représentation et la visualisation tridimensionnelle de diverses structures géologiques; Avant d'aborder le sujet de la modélisation il faut d'abord introduire un aperçu terminologique des différents termes fréquemment utilisés dans cette discipline.

I.3.1.2 Un modèle

Le modèle est une abstraction de quelque chose de réel qui permet de la comprendre et de la modéliser. Le modèle est plus facile à manipuler que l'entité originale.

Les experts en géoscience utilisent de plus souvent les modèles pour faciliter la communication de leurs résultats.

Le concept du modèle géologique est difficilement définissable car il dépend de la spécialité du géologue. De ce fait, on distingue plusieurs types de modèles géologiques; cartes géologiques, coupes géologiques, modèles sédimentologiques, modèles paléogéographiques....etc.

Cependant, les modèles géologiques sont concentrés dans le but d'aider à la compréhension et l'interprétation géologique.

La carte géologique et la coupe géologique sont des modèles bidimensionnels de la réalité, car elles sont des représentations d'environnement géologique naturellement tridimensionnel sur un média ayant (2D).

I.3.1.3 Le géomodelle (3D)

Est une représentation digitale abstrait d'une partie de la terre. Il est amené à évoluer au cours de son existence pour intégrer de nouvelles données et prendre en compte les différentes interprétations des géologues (Mahdjoub, 2013).

- Voici un exemple de modélisation géologique tridimensionnelle :

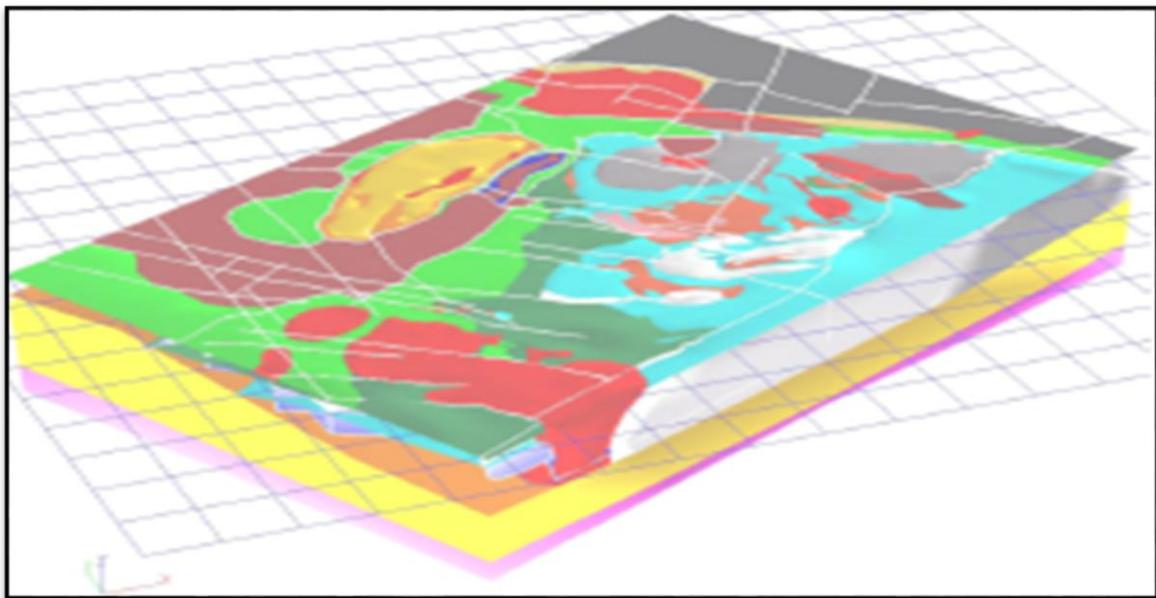


Figure 01. Exemple d'un modèle géologique 3D (Mahdjoub, 2013).

I.4 Définition de la modélisation

Dans le monde informatique elle représente la description en un langage compréhensible par l'ordinateur de la forme, du mouvement et des caractéristiques d'un objet ou ensemble d'objets qui créent un modèle.

La géomodélisation en géologie correspond à l'ensemble des méthodes mathématiques qui permettent de modéliser d'une façon unifiée la topologie, la géométrie et les propriétés physiques des objets géologiques, tout en considérant les données de toutes sortes rattachées à ces objets. Elle permet de fournir un modèle géo-intégré qui explicite la géométrie, l'agencement spatiale et les propriétés physico-chimiques d'un objet géologique.

I.4.1 Impacts de la géomodélisation

Ses impacts sont nombreux on peut distinguer :

- L'intégration d'un grand nombre de données de nature et de qualité diverse.
- La synthèse des données et leur visualisation.
- Compréhension des structures géologiques complexes et de l'estimation des ressources naturelles.
- Voir la simulation de production ([Mahdjoub, 2013](#)).

I.4.2 Les méthodes de modélisation géologique (3D)

Il existe de nombreux types de méthodes de modélisation géologique 3D et, selon la source de données de modélisation, ces méthodes peuvent être divisées en celles basées sur des sections, forages, données géologiques de champ de surface, données géophysiques, données multi-sources, etc.... ; Quel que soit le type de méthode de modélisation utilisée, il est nécessaire de construire des interfaces, établir les relations topologiques spatiales entre les interfaces géologiques, et forment le modèle de réseau des corps géologiques pour réaliser la simulation informatique 3D ([Wu et al., 2019](#)).

I.4.3 Avantages de cartes et modèles géologiques (3D)

Les avantages de la cartographie géologique traditionnelle l'emportent sur ses coûts plusieurs fois et ces avantages sont particulièrement réalisés pour les applications des eaux souterraines ; les cartes géologiques traditionnelles montrent la distribution bidimensionnelle (2D) des gisements à la surface de la terre qui est basée sur des interprétations des formes de terrain, champ examen des matériaux exposés et des informations d'excavations ou de forages peu profonds.

Contrairement aux cartes géologiques (2D) traditionnelles ;

- a) Les cartes et modèles géologiques tridimensionnels (3D) peuvent fournir des données géologiques les plus sophistiquées et d'informations détaillées et donc les plus grands avantages potentiels pour les utilisateurs.
- b) La cartographie tridimensionnelle montre la complexité de la géologie souterraine cartographiée de la surface du sol à profondeurs désignées.
- c) Les dépôts sont différenciés en comparant leurs propriétés physiques, leurs séquences verticales et les modèles de distribution latérale avec des modèles modernes de dépôt de sédiments.

Donc, la visualisation 3D est également et régulièrement utilisée comme outil d'analyse et de communication (Artimo et al., 2003).

I.4.4 Les techniques de reconstruction tridimensionnelle 3D

Les techniques de reconstruction tridimensionnelle (3D) pour l'étude et l'analyse de corps géologiques complexes sont couramment utilisées dans l'exploration et la production d'hydrocarbures, l'analyse de la géologie, la reconstruction de surfaces géologiques, l'exploration minière, le risque environnemental. Ou la modélisation hydrogéologique pour la gestion des ressources en eaux souterraines.

En effet, avec une construction (3D) un modèle cohérent qui décrit un détail de succession de différentes couches avec leurs relations géométriques et leurs distribution spatial, qui permettant d'estimer le volume de chaque couches. De plus, la représentation vraie (3D) permettre une meilleure compréhension des paramètres complexes du sous-sol de différentes unités (Conde et al., 2014).

I.5 Définition d'un modèle hydrogéologique

Les modèles hydrogéologiques sont des représentations théoriques simplifiées d'un système aquifère. Ils comportent la définition d'une structure (le sous-sol), la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les entrées du système (par ex ; des mesures de débits) à ses sorties (par ex ; diagrammes des flux des eaux souterraines), et la définition des paramètres (constantes ou variables pouvant prendre des valeurs numériques comme les coefficients de perméabilité des roches) entrant dans ces relation.

Ils cherchent à représenter l'écoulement de l'eau dans le sous-sol. Ce sont donc des modèles à quatre dimensions (4D) incluant les trois dimensions de l'espace et le temps. Toutefois, on s'intéressera plus particulièrement à l'aspect 3D de ces modèles mais tout en gardant à l'esprit qu'il doit s'intégrer dans un modèle 4D (Janssens-Coron, 2007).

I.5.1 Les étapes de conception d'un model hydrogéologique

la modélisation hydrogéologique est un processus qui nécessite beaucoup d'expertises dans plusieurs domaines (Janssens-Coron, 2007), qui sont incluent dans les étapes suivantes :

- a) La définition de l'objectif du model : L'hydrogéologue identifie la (les) question(s) aux quelles le modèle doit permettre de répondre. Par exemple, s'agit-il de visualiser la situation de l'aquifère en temps réel, d'effectuer des prédictions à long terme, etc... ?

- b) La caractérisation hydrogéologique : C'est une étape particulièrement complexe car elle a pour objectif d'analyser et de compiler les données et les informations nécessaires au modèle conceptuel hydrogéologique. Ces informations sont issues de l'intégration et de l'analyse des données hydrogéologiques (perméabilité des roches, piézométrie, etc.) et géologiques (stratigraphie, minéralogie, etc.) acquises selon différentes techniques (cartographie, forages, sismologie, piézométrie, etc.).
- c) L'analyse des données géologiques : Cette étape a pour but d'extraire les informations sur la structure spatiale et les propriétés physiques des objets géologiques. Ces objets étant issus de successions de phénomènes géologiques naturels tels que les processus de sédimentation océanique ou la tectonique des plaques, leurs formes et structures spatiales sont généralement complexes. Elles ont une grande influence sur l'hydrogéologie. Ainsi une structure où une couche de grès qui repose et est entourée par une couche d'argile imperméable constitue par exemple un excellent aquifère à la différence d'un grès reposant sur un calcaire fortement fissuré.
- d) Le modèle conceptuel géologique : Est une représentation mentale tridimensionnelle de la structure géologique du sous-sol issue de l'étape précédente. Le géologue l'obtient en déterminant la chronologie relative des objets géologiques, leur type de roche, leur âge, leurs relations spatiales, etc. Il doit ensuite intégrer toutes ces informations de façon logique et cohérente dans un même modèle ce qui est une difficulté majeure de la modélisation géologique 3D.
- e) Le modèle géométrique 3D : Est construit à partir du modèle conceptuel à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D. Il représente les objets géologiques sous forme de volumes et leurs relations géométriques et topologiques. À cette étape le géologue collabore étroitement avec le géomaticien qui maîtrise les différentes méthodes de construction des modèles géométriques.
- f) Le modèle géologique 3D : Enfin c'est le modèle géométrique 3D avec ses objets géométriques auquel sont attachées des informations descriptives identifiées dans les étapes précédentes comme l'âge et type de roche, etc., le tout formant les objets géologiques qui seront nécessaires au modèle hydrogéologique pour identifier les conditions aux limites des objets et les propriétés physiques indispensables. On peut constater que ce processus de modélisation géologique conduit à un modèle géologique uniquement 3D.
- g) Le modèle conceptuel hydrogéologique : Est l'étape où l'hydrogéologue exploite l'analyse des données hydrogéologiques effectuée dans l'étape de caractérisation et les

intègre au modèle géologique 3D avec l'aide du géologue et du géomaticien. C'est donc à cette étape que l'hydrogéologue associe la composante dynamique au modèle géologique statique à l'aide en particulier des lois d'écoulement. Il émet alors des hypothèses de modélisation et identifie les paramètres qui seront nécessaires à leur évaluation (Janssens-Coron, 2007).

I.6 Comparaison des méthodes d'interpolation

L'interpolation prédit les valeurs des cellules dans un raster à partir d'un nombre limité de points d'échantillonnage. Elle permet de prédire les valeurs inconnues pour n'importe quel type de données de points géographiques, comme l'altitude, les précipitations, les concentrations chimiques, les niveaux de nuisance sonore, etc. Les méthodes d'interpolation disponibles sont répertoriées ci-dessous.

- **IDW** : L'outil Pondération par l'inverse de la distance (IDW) utilise une méthode d'interpolation qui évalue les valeurs des cellules en calculant la moyenne des valeurs des points d'échantillonnage dans le voisinage de chaque cellule de traitement. Plus un point est proche du centre de la cellule en cours d'analyse, plus il a d'influence (ou poids) sur la procédure de calcul de la moyenne.
- **Krigeage** : Le krigeage est une procédure géostatistique avancée qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs Z. Plus que les autres méthodes d'interpolation, une investigation approfondie du comportement spatial du phénomène représenté par les valeurs Z doit être effectuée avant de sélectionner la meilleure méthode d'estimation pour la génération de la surface en sortie.
- **Par voisins naturels** : La méthode d'interpolation par voisins naturels recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler une valeur (Sibson, 1981). Cette méthode est également connue sous le nom d'interpolation de Sibson.
- **Spline** : L'outil Spline utilise une méthode d'interpolation selon laquelle les valeurs sont déterminées à l'aide d'une fonction mathématique qui réduit la courbure globale des surfaces et restitue une surface lisse passant exactement par les points en entrée.
- **Spline avec interruptions** : L'outil Spline avec interruptions utilise une méthode semblable à la technique utilisée dans l'outil Spline, à la principale différence que cet

outil respecte les discontinuités codées à la fois dans les interruptions en entrée et les données de point en entrée.

I.7 Problématique et Objectif

Ce mémoire montre à travers une approche géospatiale la problématique de l'identification, la caractérisation et la détermination du système aquifère alluvionnaire, à travers une approche hybride entre les données de géophysique et les techniques de modélisation 3D.

Il est évident que la reconstruction des différents champs hydrogéologiques 3D est un objectif majeur dans cette démarche. En effet, la reconnaissance des systèmes aquifères n'est possible, pour des raisons de coûts et de temps que par endroits, soit directement par forages et puits ou indirectement, par prospection géophysique ou par prélèvements des eaux souterraines, à des fins d'analyses hydro-chimiques.

On essaiera entre autre de reconstituer un modèle hydrogéologique du site étudié, de retracer sa spatialisation, et d'émettre des calculs sur les ressources en eau souterraine.

La méthodologie retenue devait permettre :

- De décrire la géologie du site étudié et l'approcher par les récentes méthodes de modélisation;
- De définir les différentes unités hydrogéologiques et leurs propriétés hydrodynamiques ;
- D'étudier la fluctuation piézométrique et ses variations dans l'espace et dans le temps ;
- D'approcher la modélisation hydrodynamique 3D, de l'aquifère ;
- D'évaluer la ressource en eau souterraine.

*Milieux physique,
géologique et
hydrogéologique*

II.1 Situation géographique de la plaine de Khemis-Miliana

II.1.1 Contexte régional

La région d'étude correspond à la haute vallée du Cheliff, (indexée par le code 1 par l'A.N.R.H), elle est située à 120 Km au Sud-Ouest d'Alger, elle apparait sous la forme d'une dépression intra-montagneuse dans la partie Nord de l'Algérie qui couvre dix communes qui sont entre autre : Arib, Ben Allal, Sidi Lakhdar, Khemis Miliana, Ain Soltane, Djendel, Ain Lechiakh, Bir Ould Khelifa, Djelida et Ain Defla.

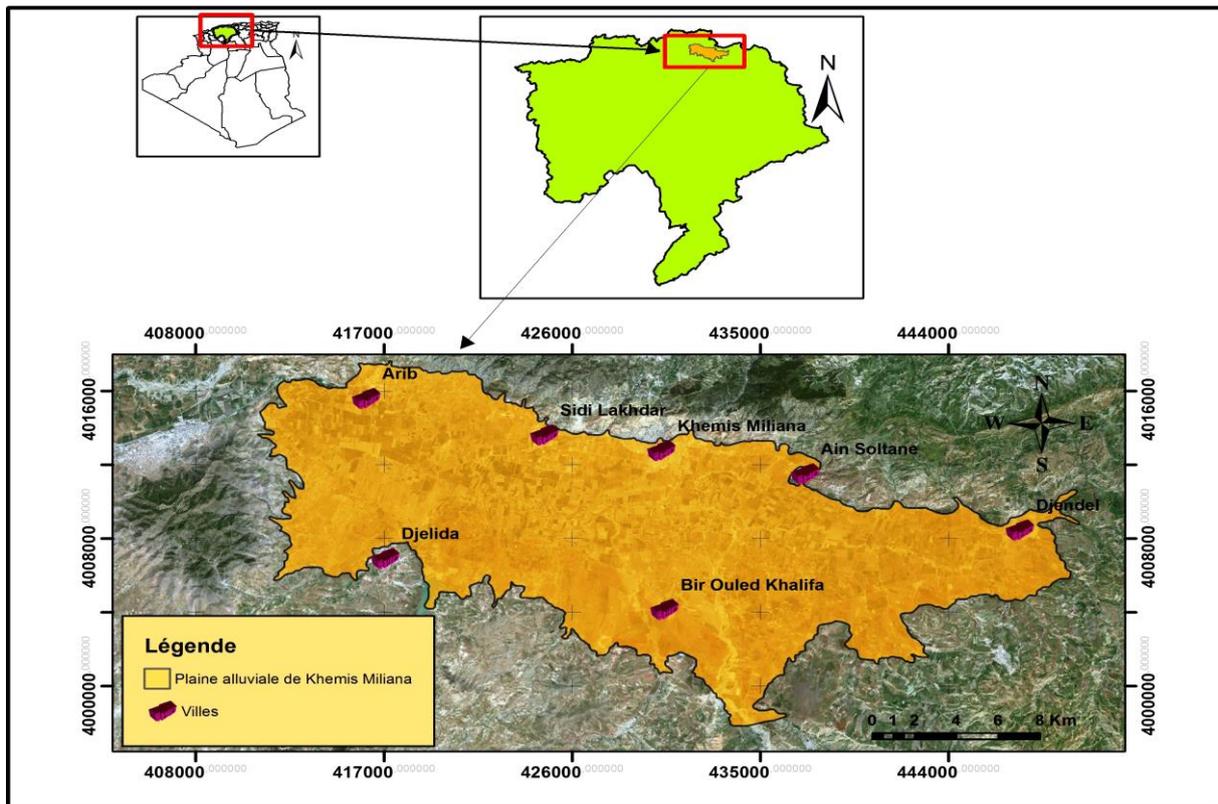


Figure 02. Carte de la situation géographique de la région d'étude.

II.1.2 Contexte Local

La région étudiée est dite « plaine alluviale de Khemis-Miliana », elle fait partie des sous bassins du Cheliff N°: 01-15, 16 et 17, avec une superficie de 359 Km² et un périmètre de 159 Km, caractérisée par une altitude moyenne de 270 m. Elle forme l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine de la région, géographiquement comprise entre les latitudes (36°18'-36°6') N et les longitudes (2°-2°27') E, limitée au Nord par le massif du Zaccar

(1576 m), et au Sud par les premiers reliefs du l'Ouarsenis, on y pénètre l'Est par le seuil de Djendel, et on en sort l'Ouest par le seuil de Doui.

II.2 Urbanisation et démographie

La population dans la plaine à la fin de l'année 2011 est estimée de 248178 habitants avec un taux d'accroissement de 1.3%. En 2015 la population a passé au 278485 habitas avec un taux d'accroissement de (8 %), elle sera environ 381 628 habitants en 2020 dont (82,55%) sont concentrés agglomérée et 17.45% uniquement en zones rurales. Cette population est concentrée surtout dans les agglomérations qui sont située au Nord de la plaine.

Les plus importantes sont respectivement d'Est en Ouest : Djendel, Ain Sultan, Khemis-Miliana, Sidi Lakhdar et Arib, tandis qu'au Sud de la plaine la densité des agglomérations est minime et moins dense, les plus importantes agglomérations sont Djelida et Bir Oueld Khelifa (Touaibia & Harkat, 2019).

II.3 Contexte géomorphologique

L'unité hydrogéologique des alluvions du Quaternaire a été délimitée par vectorisation afin de définir les paramètres géométriques (superficie et périmètre). La plaine du Haut Chélif est d'une superficie de 359.5 km² et périmètre de 159.3 km. Le tableau suivant résume les principaux paramètres physiographiques :

Tableau 01. Paramètres physiographiques du bassin versant (Bong & Meziani, 2013).

Paramètres de formes				
Code	Nom de Sous bassins	Kc	Rectangle équivalent (ROCHE)	
			Longueur Lr (Km)	Largeur Lr(Km)
0115	O.Chélif Harbil	1.66	71.60	11.18
0116	Deurdeur	1.72	78.92	10.75
0117	O.Chélif Harrezza	1.45	58.13	13.18
Paramètres géométriques Plaine de Khemis Miliana				
Surface de la plaine(Km ²)			Périmètre de la plaine (Km)	
359,5			159,3	

II.3.1 Étude des reliefs

La représentation de l'espace hypsométrique ou relief a été longtemps matérialisée en deux dimensions par des cartes papiers. L'arrivé et les progrès puissants de l'informatique ont

Chapitre II Milieux physique, géologique et hydrogéologique

permis d'évoluer vers une description en 3 dimensions. Ce document cartographique informatisé appelé modèle numérique de terrain (MNT) prend actuellement une place stratégique dans la cartographie numérique et dans les études hydrogéologiques et hydrologiques. Il s'agit d'une représentation numérique du relief de la région d'étude, sous forme de fichiers informatiques contenant des altitudes.

Dans la plaine de Khemis Miliana, la topographie sera donc représentée par un modèle numérique de terrain MNT. A fin d'analyser les caractéristiques morphologiques de la zone d'étude, nous avons construit un modèle numérique de terrain MNT, en se basant sur l'acquisition des données altimétriques par numérisation des courbes de niveau et points cotés, ce MNT a été généré par numérisation et identification des courbes de niveau issues des cartes topographiques géoréférencées à l'échelle 1/25 000. Les calculs morpho-métrique, y compris le calcul de la pente, ainsi que la classification des altitudes ont été extraits avec les modules d'ArcGis en passant par l'analyse spatiale Raster (Figure 03).

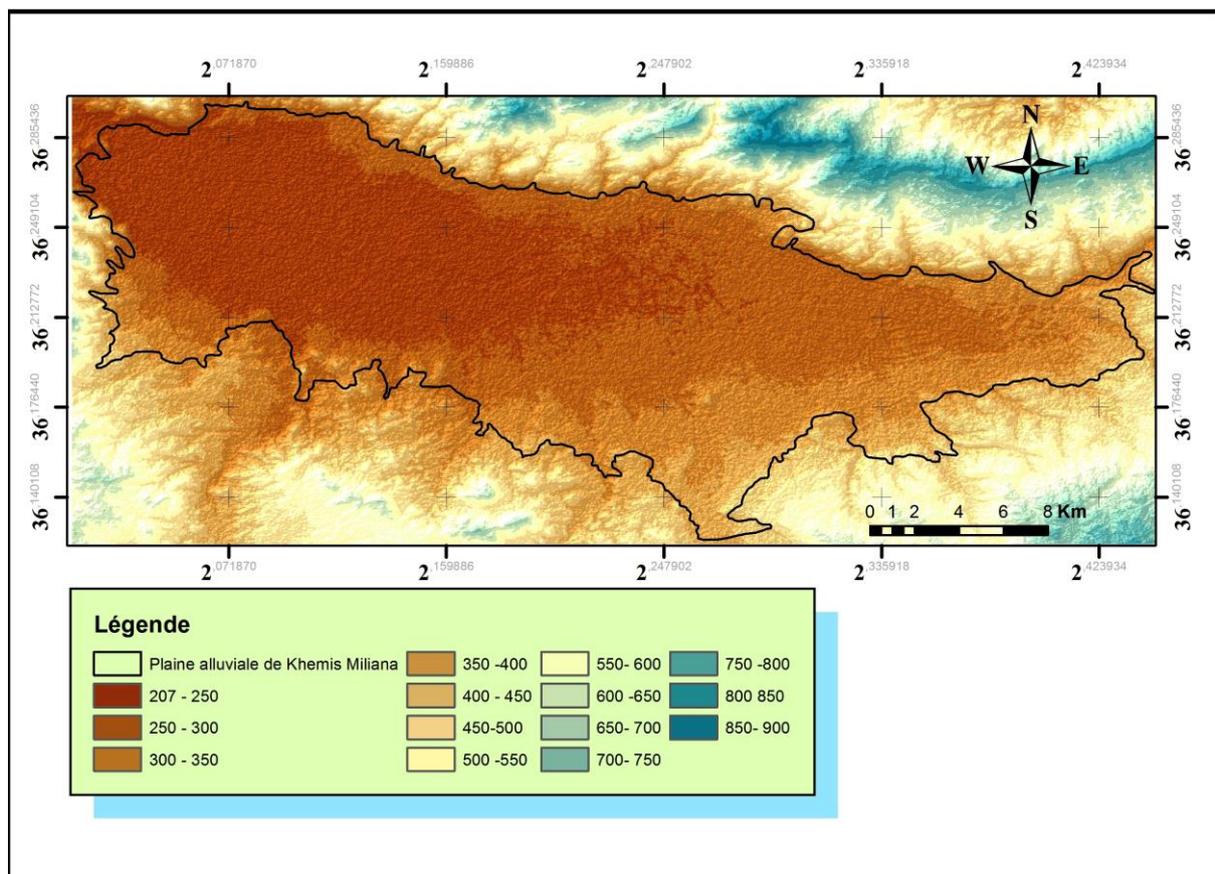


Figure 03. Représentation topographique de la zone d'étude sous forme numérique.

II.4 Contexte hydro-climatologique

La plaine de Khemis-Miliana est caractérisée par un climat semi aride de type Méditerranée avec un caractères de continentalité marqué par un hivers humide et froids et d'été secs et chauds, le printemps et l'automne sont des saison très brèves (Mohamed & Abdessalam, 2011).

II.4.1 Réseau hydrographique

La plaine du Haut Cheliff est traversée d'Est en Ouest par Oued Cheliff et ses principaux affluents qui sont Oued Souffay, Millet et Boutane au Nord, Deurdeur, Massine et Harreza au Sud (Figure 04).

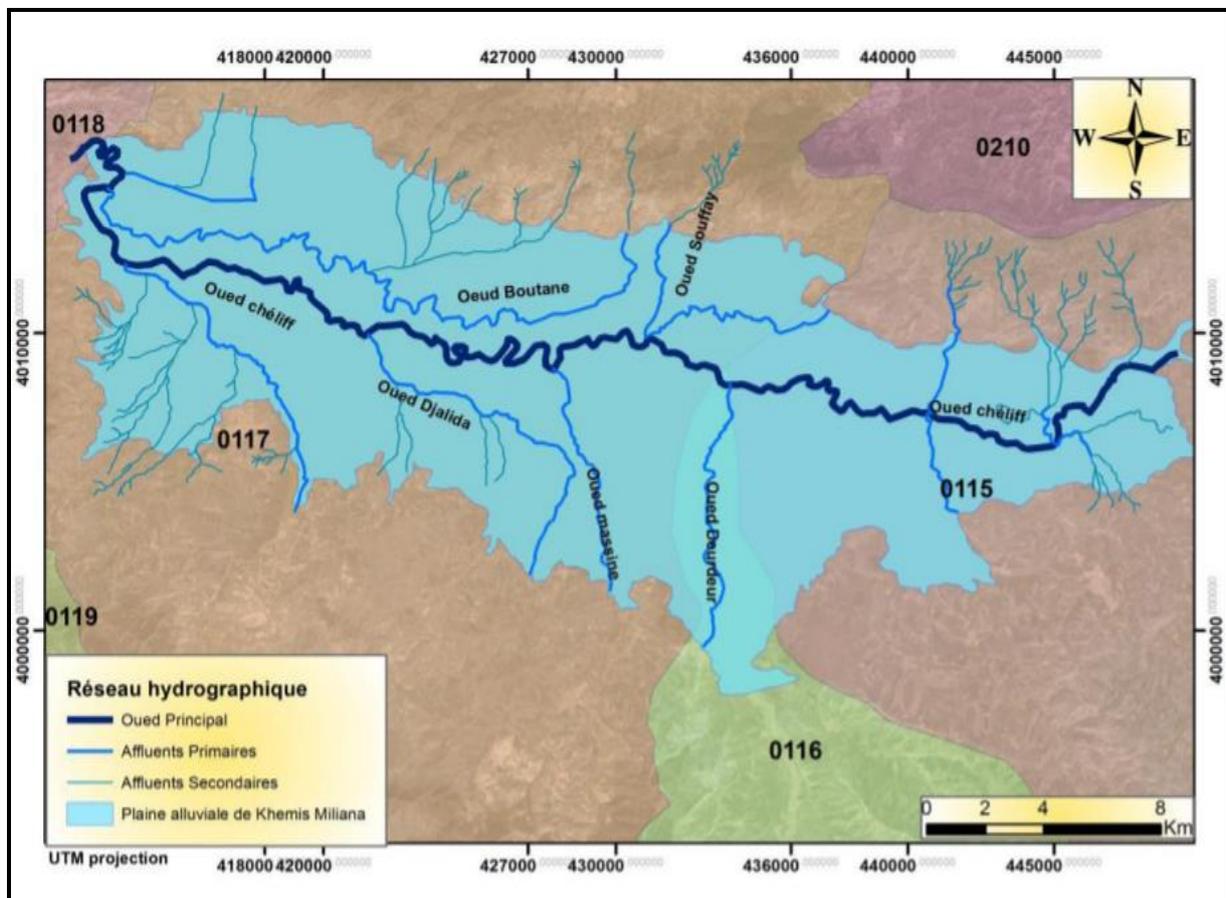


Figure 04. Réseau hydrographique de la région d'étude (Touaibia & Harkat, 2019).

Les deux caractéristiques telles que la longueur et direction du réseau hydrographique représenté sur le tableau ci-après :

Tableau 02. Réseau hydrographique (Bong & Meziani, 2013).

Cours d'eau	Longueur en (m)	Direction d'écoulement
Cheliff	59275.67	E-W
Souffay	4305.85	N _{NE} -S _{SO}
Millet et Boutane	30897	E-W
Deurdeur	5171	S _{SO} -N _{NE}
Massine	6424	S _{SE} -N _{NO}
Harreza	10273	S _E -N _O
Djelida	5665	E _{SE} -O _{NO}

Toutes les eaux issues des principaux affluents représentés par les Oueds de : Souffay et Boutane au Nord, Oued Deurdeur et Harreza au Sud sont collectés en direction du centre de la plaine du Cheliff vers le principal Oued en question, ce dernier draine toutes les eaux du bassin versant du Cheliff vers l'exutoire.

II.4.2 Précipitations

L'étude de la précipitation de la région du Haut Cheliff est basée sur des stations faits partir du réseau pluviométrique géré par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (ANRH), et une appartient à l'Institut National des Grandes Cultures.

Les données disponibles relatives à ces différents stations nous ont permis de caractériser notre région du point de vue apport en eau météoriques et particulièrement pour la période (1980-2014).

Tableau 03. Caractéristiques des stations pluviométriques, d'après A.N.R.H période (1981-2013) (Boudjenane & Maarouf, 2015).

Stations	Code	X(m)	Y(m)	Z(m)	Pm (mm)
Ababssa	01-17-15	414166,16	4002034,5	317	354,9
Arib Chellif	01-17-02	412561,16	4016440,25	230	410,5
Khemis Miliana	01-17-17	431848,16	4012029,25	285	418
Barrage de Harraza	01-17-18	428376,88	4005240,25	315	373,1
Ain Sultane	01-15-12	437142,94	4010312,5	295	412,1
Sidi Lakhdar	01-17-11	425052,56	4013500,5	250	384,9
Ain Defla	01-18-04	407652,56	4013805	270	424,8
Sidi Mokri	01-16-06	436173,91	3988065,25	540	375,3
Bordj Emir Khaled	01-17-03	428853,28	3997638,5	500	335,7
Gherib Chellif	01-14-07	460267,69	4002141,5	460	459,6

II.4.3 Réseau pluviométrique de la zone d'étude

La région d'étude est abritée de 10 stations pluviométriques dont leurs gestion est simultanément assurer par le service de Office National de Météorologie et l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, la répartition de ces pluviomètres dans notre zone d'étude est homogène et les postes pluviométriques matérialisent de façon plus ou moins efficace à la plaine, cette répartition couvre toute sa superficie.

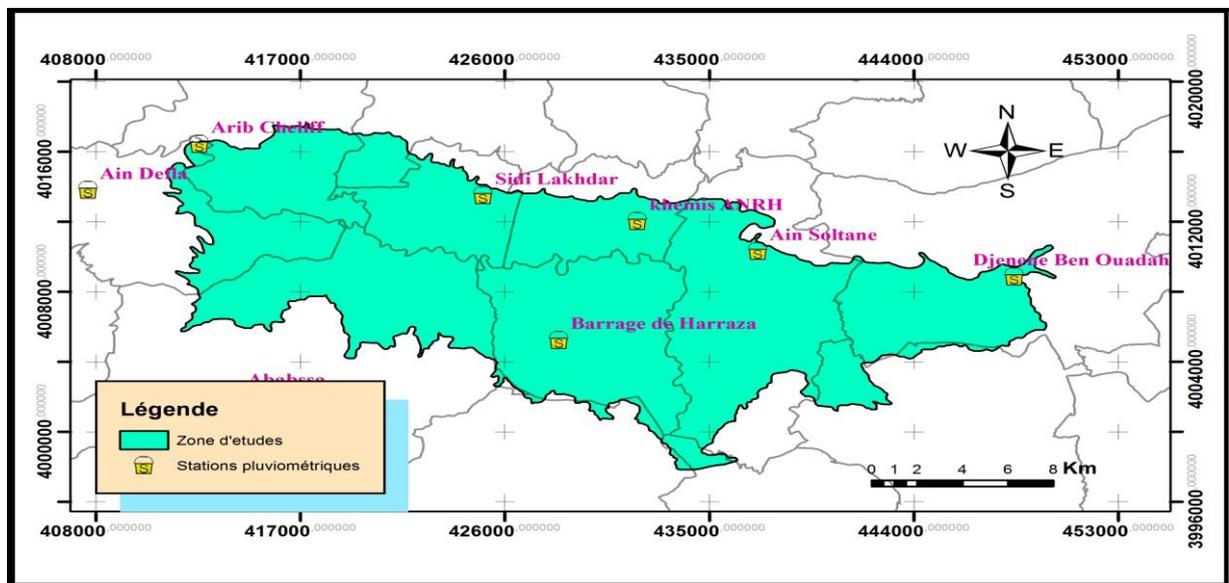


Figure 05. Répartition spatiale du réseau pluviométrique de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

II.4.4 Précipitations moyennes annuelles

L'analyse temporelle des précipitations des stations pluviométriques d'Ain Sultane, nous montre que l'année 1994 est l'année la plus sèche, tandis que celle de 1995 est la plus humide avec une précipitation annuelle de 684.5 mm pour une période qui s'étale de 1980-2013. Celle de la station de Khemis-Miliana, l'année 1994 est considérée comme la plus sèche pour la même station, les années 1996 et 2009 sont plus humides avec des précipitations annuelles de 590.5 mm et 612.9 mm respectivement. La station des Aribis Chélif nous révélait aussi que l'année 1993 est la plus sèche, celles de 1995 et 2010 sont les plus humides avec des précipitations de 602.5 mm et 612.9 mm. Et enfin la station d'El Ababsa, l'année 2000 est considérée la plus sèche, par contre, et pour la même station, les années 1987 et 1996 ont été identifiées comme humides avec des précipitations annuelles de 484.6 mm, 459.3 mm, respectivement (Figure 06).

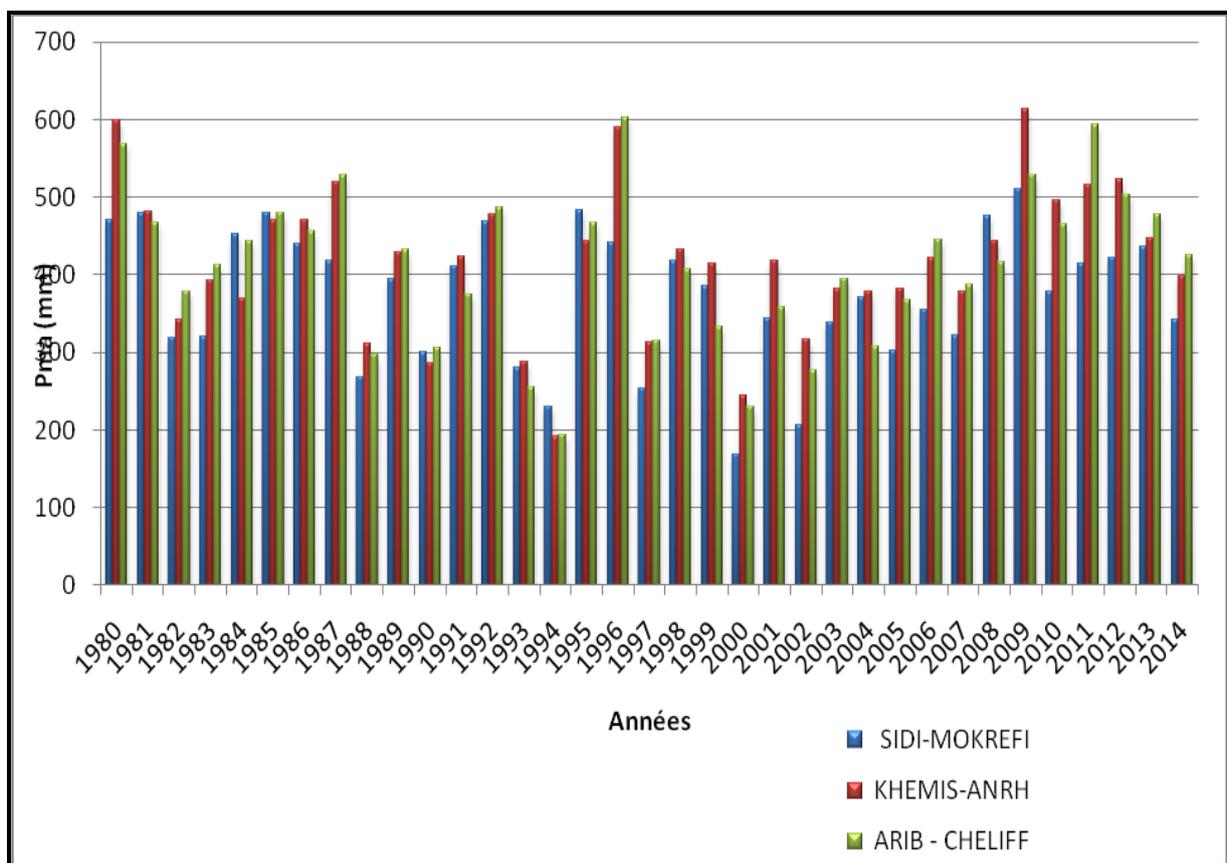


Figure 06. Variation temporelle des précipitations moyennes annuelles.

II.4.5 Détermination de la lame d'eau précipitée par la méthode de Thiessen

La méthode de Thiessen est généralement utilisée, son application donne en général des résultats fiables.

Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (Distribution spatiale irrégulière des pluviomètres).

Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire exprimée en %, représente les facteurs de pondération de la valeur locale.

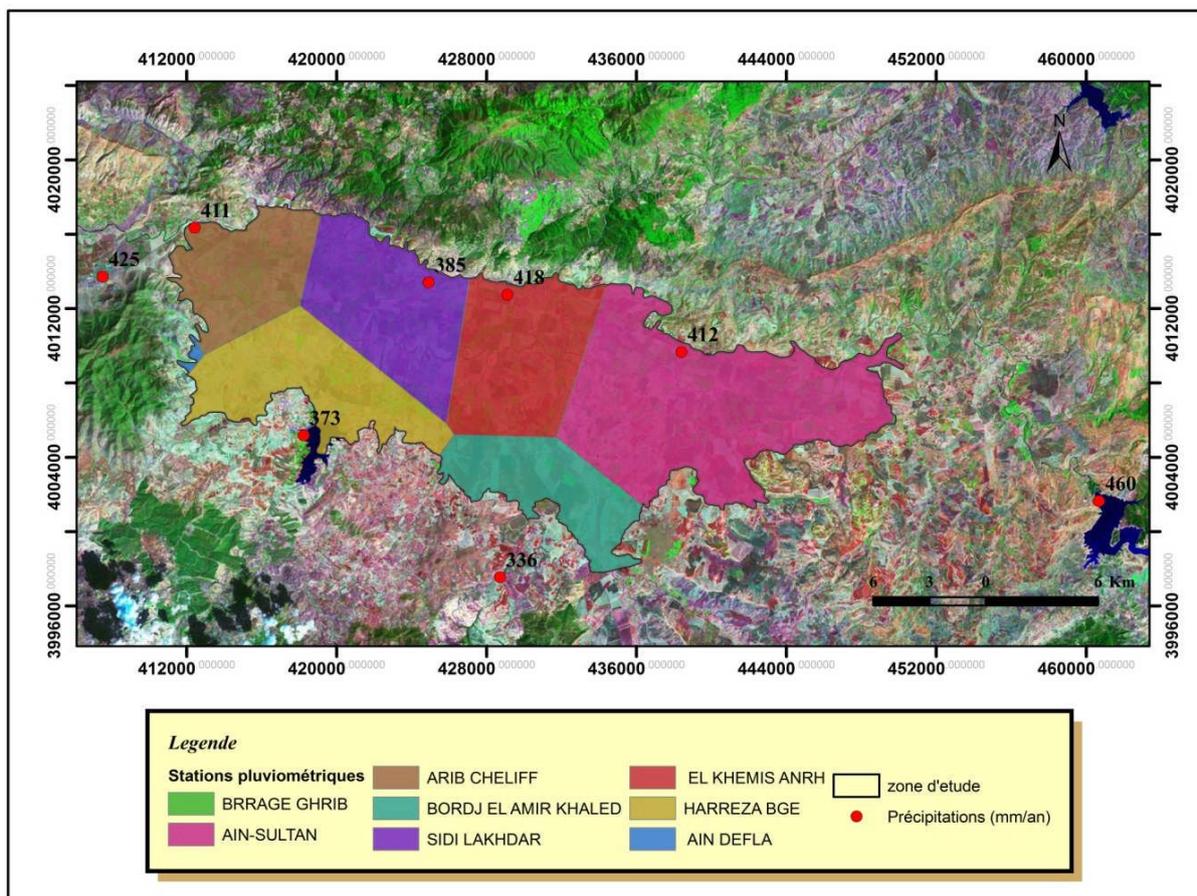


Figure 07. Carte de la répartition spatiale des précipitations moyennes annuelles par polygones de Thiessen.

II.4.6 Température

Le régime de la température moyenne de la région d'étude est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver frais et pluvieux. la température est l'un des paramètres les plus importants qui nous permettra de définir le régime climatique d'une région d'où leur mesure s'effectue sous abri normalisé à 1.50 m au dessus de la surface du sol, les températures sont saisonnières et leurs variations sont régulières pendant le temps.

Dans cette partie on va traités les températures moyennes mensuelles pour les stations du Barrage Harreza et Khemis Miliana.

Tableau 04. Variation des températures moyennes annuelles de la station de Barrage Harreza et Khemis Miliana (1987-2014).

		Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
BRG harraza	T(C°) max	29,5	26,8	17,7	13,9	12,5	13,6	15,8	18,4	23	30	34,3	33,8
	T(C°) min	18,2	17,7	10,8	8,6	6,6	6,3	10,9	12,5	16,5	21	21,2	24,4
	T(C°) moy	23,9	22,3	14,3	11,3	9,55	9,93	13,4	15,5	19,8	25	27,8	29,1
khemis Miliana	T(C°) max	29,5	27,2	17,3	14,6	13	14,4	16	19,1	23	30,1	33	34
	T(C°) min	19,9	10,3	12,1	8,32	7,1	7,3	12	13,1	17	21,8	27	27,9
	T(C°) moy	24,7	18,8	14,7	11,5	10	10,9	14	16,1	20	26	30	31

Les seules données qu'on a pu avoir sont celles de la station pluviométrique du barrage Herraza et celles de Khemis Miliana. Les températures moyennes mensuelles et annuelles de la période qui s'échelonne entre 1987-2014 sont analysées :

Les mesures des températures s'effectues sous abri normalisé à 1.50 m au dessus du sol, les températures sont saisonnières et leurs variations sont régulières pendant le temps, les seules données qu'on a pu avoir sont celles du barrage Herraza et du poste pluviométrique de Khemis Miliana.

D'après les analyses des températures moyennes mensuelles et annuelles de la période qui S'échelonne entre 2003-2012 (Bong & Meziani, 2013), nous pouvons aisément, Distinguer quatre saisons de l'année :

- Un automne, s'étalant du mois de septembre au mois de novembre, avec une température moyenne saisonnière de 23,16 C° ;
- Un hiver, qui s'échelonne du mois de décembre au mois de février, avec une température moyenne mensuelle de 12,41 C° ;
- Un printemps, qui se développe du mois de mars au mois de mai, avec une température moyenne mensuelle de 19,12 C° ;
- Et enfin un été chaud, réparti du mois de juin au mois d'août, avec une température moyenne mensuelle qui atteint 30,91 C° ;

Nous pouvons conclure que, le secteur d'étude correspond à une zone semi aride ou la température moyenne annuelle varie à la proximité de 21,42°C.

II.5 Contexte géologique

II.5.1 Cadre géologique

La zone d'étude située dans le Haut Cheliff (plaine de Khemis-Miliana) correspond à une dépression subsidient constituée essentiellement par des alluvions Quaternaires représentant les terrasses de l'oued Cheliff, entourée au Nord et au Sud par les massifs Primaires et Jurassiques du Zaccar et du Doui oriental.

Le Haut Cheliff, situé au Nord de l'Ouarsenis, est allongé grossièrement d'Est en Ouest, sur plus de 60 Km de long et une moyenne de 25 Km de large (Benmeridja, 2004).

La plaine alluviale de Khemis-Miliana, s'inscrit dans l'ensemble des terrains de l'Atlas Tellien, elle correspond à un synclinorium Néogène reposant sur le substratum Crétacé du sillon subsidient Tellien, entre le massif de Boumaad et les contreforts du Ouarsenis (Voir Figure 07....). Cet ensemble est dû à la superposition de plusieurs phases de plissements et de déformations d'âge Primaire, Secondaire et Tertiaire.

Les terrains qui forment le cœur de synclinal sont du Miocène supérieur, ils constituent une couche gréseuse au sommet et passent vers le bas à des terrains plus argileux. Les principaux affleurements du Miocène, sont au niveau du Djebel Gantas et à l'Est d'Ain Sultan.

Les terrains Quaternaires qui occupent le centre de la plaine, sont essentiellement représentés par des dépôts alluvionnaires de l'Oued Cheliff, dont la partie supérieure est

représentée par des limons très argileux d'une quinzaine de mètres d'épaisseur. Ces alluvions s'étendent sur des superficies de 241.2 km² dans la plaine du Haut Cheliff (Bouziane Errahmani, 2005).

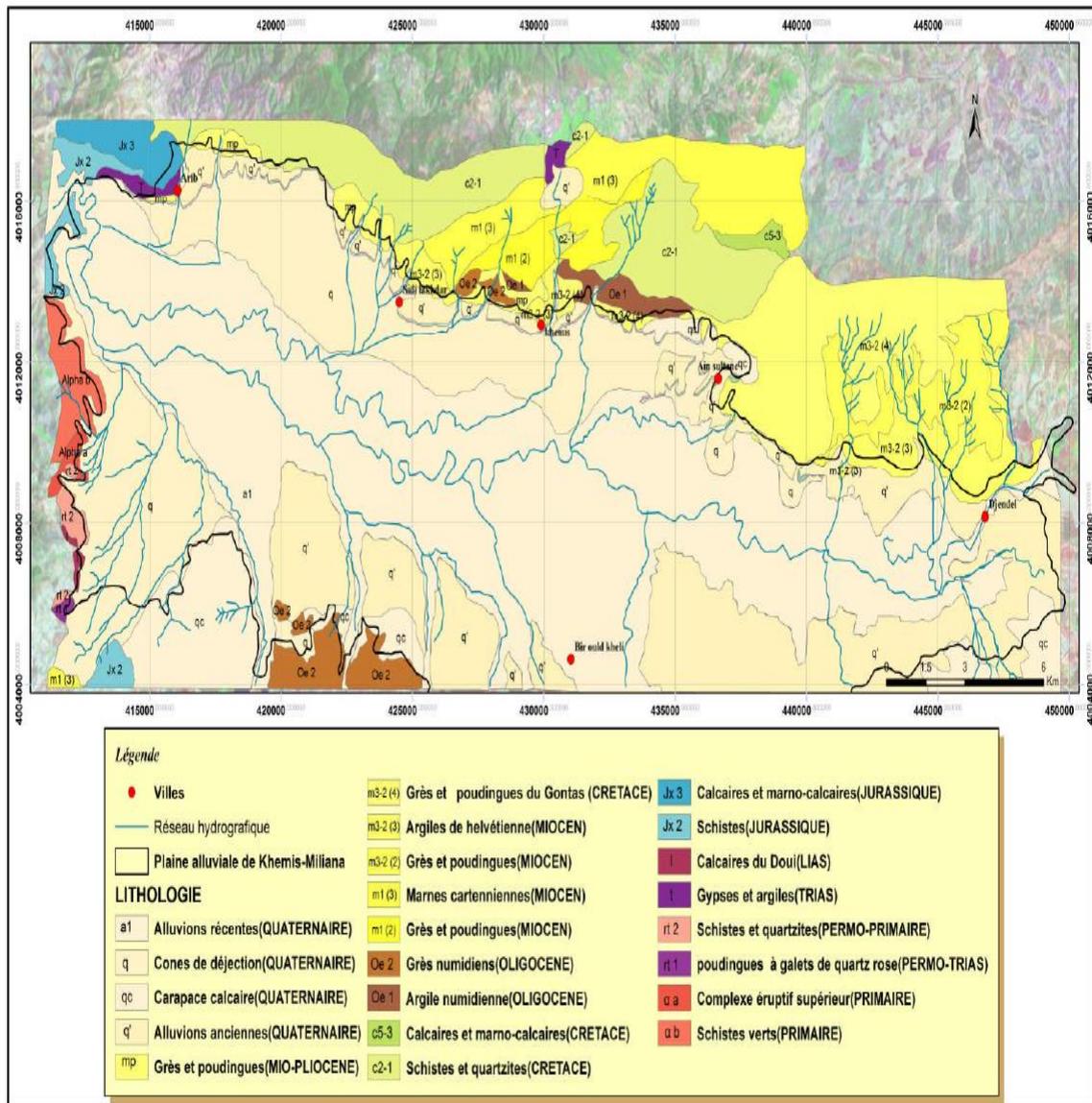


Figure 08. Carte géologique schématisée vectorisée de la région d'étude.

La plaine du Haut Cheliff correspond à une zone déprimée à sédimentation récente moi plio-quaternaire. Elle est traversée d'Est en Ouest par l'Oued Cheliff qui entre dans la plaine par le seuil de Djendel et en sort par celui du Doui. La partie Nord de la plaine est dominée par

une ligne de reliefs que forment le Djebel Gontas (871 m), le massif du Zaccar (1579 et 1532 m) et des Aribis (Littré). Elle appartient au tell septentrional ; la partie Sud est limitée par les premiers contreforts de l'Ouersenis. Elle appartient au tell méridional.

Les pointements Jurassico primaires des zaccars, Doui et Aribis constituent l'autochtone épimétamorphique à schistosité anté-nappe sur lequel repose l'allochtone caractérisé par des nappes de charriage à matériel Crétacé .ces nappes venant du Nord se sont mises en place au Miocène inférieur.

Le bassin du Haut Cheliff correspond à un sillon intramontagneux subsident dans lequel l'érosion des reliefs environnants et les transgressions successives ont permis le dépôts de fortes épaisseurs de sédiments Néogènes et Quaternaire.

Cet ensemble est dû à la superposition de plusieurs phases de plissements et de déformations d'âge Primaire, Secondaire et Tertiaire.

Les terrains qui forment le cœur de synclinal sont du Miocène supérieur, ils constituent une couche gréseuse au sommet et passent vers le bas à des terrains plus argileux. Les principaux affleurements du Miocène, sont au niveau du Djebel Gantas et à l'Est d'Ain Sultan.

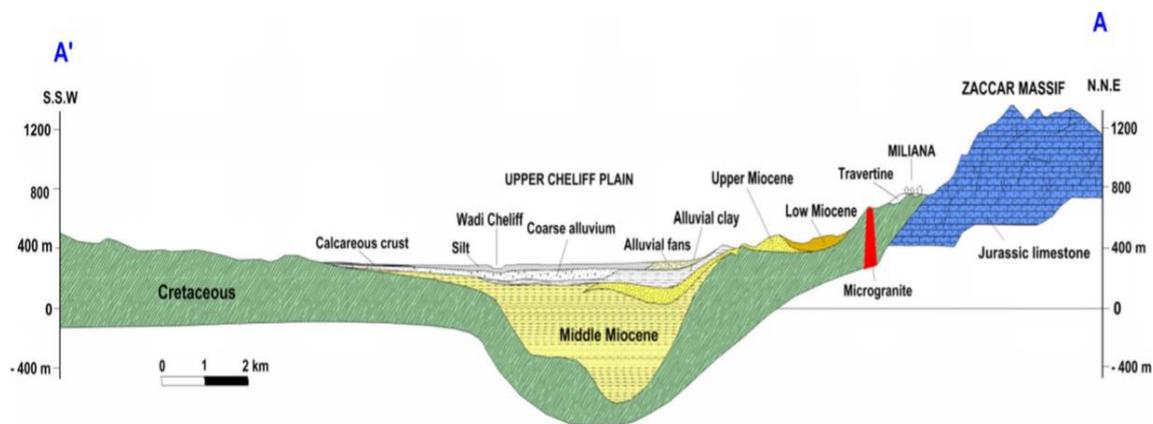


Figure 09. Coupe géologique A'-A de la plaine du Haut Cheliff, modifié (Bouderbala & Gharbi, 2017).

Les terrains quaternaires qui occupent le centre de la plaine, sont essentiellement représentés par des dépôts alluvionnaires de l'Oued Cheliff, dont la partie supérieure est

représentée par des limons très argileux d'une quinzaine de mètres d'épaisseur. Ces alluvions s'étendent sur des superficies de 241.2 km² dans la plaine du Haut Cheliff (Bouziane Errahmani, 2005).

La plaine alluviale de Khemis-Miliana correspond à un sillon intra-montagneux subsidient, dans lequel l'érosion des reliefs environnants et les transgressions successives ont permis les dépôts de fortes épaisseurs de sédiments Néogènes et Quaternaire.

Les terrains Primaires et Secondaires suite à leurs rigidités, ont été déformés et surélevés par les mouvements verticaux en donnant les amygdales Intra Telliennes (Zaccar et Doui). Par contre les terrains du Crétacé et suite à leurs souplesses et plasticité ont été pliés en donnant le sillon subsidient.

II.5.2 Litho-stratigraphie de la plaine de Khemis-Miliana

Les coupes lithologiques transversales effectuées dans la plaine de Khemis-Miliana fait apparaître la dépression subsidient et l'allure en synclinal des différentes formations constituants le sous-sol ; on peut observer de bas en haut :

- Le Crétacé inférieur, imperméable et s'étalant sur toute la largeur de la plaine ; il a servi de fond étanche lors de la réalisation du barrage de Ghrib ;
- Surmonté par un Miocène, mais n'affleurant pas ou très peu en surface ;
- Les dépôts alluvionnaires du Oued Cheliff ; en premier lieu, étant en contact avec la formation argileuse du Miocène, forment une couche d'alluvions argileuses, d'une épaisseur moyenne de 32 mètres ;
- Les dépôts alluvionnaires grossiers du Cheliff proprement dit, formant le plus important aquifère de la région ; leurs épaisseurs peuvent dépasser les 70 mètres ;
- Aux bordures de l'Oued Cheliff, le contact argile du Miocène et dépôts alluvionnaire, forment des lentilles d'alluvions argileuses ;
- Finalement, un recouvrement limoneux, surmonte le tout ; observé essentiellement au centre de la plaine, il rend l'aquifère captive dans quelques endroits (Bong & Meziani, 2013).

L'étude géophysique établis par la compagnie générale de géophysique (C.G.G), et les forages effectués ont mis en évidence au voisinage du cours d'eau actuel du Cheliff un chenal à remplissage grossier (gros galets et graviers) qui constitue le principal réservoir aquifère de la plaine, son épaisseur varie entre 5 à 150 m. Le reste du remplissage est constitué

d'alluvions sablo argileuses, dont l'épaisseur diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche des bordures. L'ensemble est recouvert par des limons grisâtres de 10 à 20 m ou il rend l'aquifère semi-captif localement dans quelques endroits (Benmeridja, 2004).

Les séries stratigraphiques de la plaine du Haut Cheliff s'étalent du Primaire jusqu'au l'âge du Quaternaire.

- **Le Primaire** : est constitué d'une alternance des schistes noirs graphiteux et des bancs de quartzites et d'argiles.
- **Le Trias** : est généralement constitué des dolomies et des calcaires dolomitiques, il affleure dans le massif de Doui et de Zaccar.
- **Le Jurassique** : il est constitué dans le massif du Zaccar par des calcaires massifs, compactés, fracturés et karstiques, surmontés par des schistes gréseux et des marno-calcaires. L'ensemble de la série atteint une épaisseur de 700 m environ.

Dans le Djebel Doui, le Jurassique est représenté essentiellement par des niveaux de calcaires dolomitiques d'épaisseur avoisinant à 80 m.

- **Le Crétacé** : le Crétacé affleure sur les bordures latérales de la plaine, il est représenté de la base au sommet par des argiles schisteuses du Néocomien, d'une épaisseur de 800 m environ au Nord et à l'Ouest du Zaccar.

Des faciès flysch de l'Albien qui se développent dans le massif de Boumaad.

Des marnes avec des intercalations des bancs de calcaire d'âge Sénonien.

- **Le Miocène** : Le Miocène peut atteindre 300 m d'épaisseur, il est constitué de la base au sommet par :
- **Le Miocène inférieur (Burdigalien)** : repose sur des terrains plus anciens Eocène et Crétacé, qui débutent par une formation conglomératique d'épaisseur environ 220 m. Cette formation est constituée essentiellement par des conglomérats polygéniques à des éléments de taille très variables, mal triés, avec des niveaux sableux ou gréseux mal stratifiés parfois gypsifères.

Au sommet, les niveaux conglomératiques deviennent plus fins et passent progressivement à des marnes gréseuses rouge à brune verdâtre.

- **Le Miocène supérieur (Vindobonien)** : est une série qui représente de base au sommet : des niveaux conglomératiques épais de 1 à 2 m, à ciment sablo-marneux,

surmontés par un niveau marneux de couleur bleu, d'une épaisseur d'environ 50 m ; des marnes blanches alternant avec quelques bancs siliceux couronnés par un dépôt de grés et de sable, d'une épaisseur de 100 m environ.

Une formation marneuse de couleur bleue, présentant un faciès argileux, parfois gypseux d'environ 90 m d'épaisseur.

- **Le Mio-Pliocène :** le Mio-Pliocène est constituée par des galets quartzeux, des conglomérats, des grés et des argiles détritiques, ainsi que le travertin ancien déposé au niveau des sources du Zaccar.
- **Le Pliocène :** on distingue un Pliocène continental et un Pliocène marin :
- **Le Pliocène inférieur (Pliocène marin) :** est représenté par une série Marneuse qui débute par des niveaux détritiques gréseux ou sableux et parfois conglomératiques, ensuite on a un passage progressif dans la partie supérieur à des marnes sableuses et sables argileux, formant tous les termes de passage aux grés Astien. Les grés, avec une épaisseur d'une centaine de mètres, constituent une bande continue depuis l'Ouest d'Abaddia vers le versant Sud du Dahra.
- **L'Astien :** est représenté par une série marine finement sableuse ou gréseuse de couleur jaune fauve. Les grés sont souvent à ciment calcaire, localement passer à des calcaires gréseux.
- **Le Pliocène supérieur (Villafranchien) :** le Pliocène continental est formé de conglomérats à éléments gréseux à grésocalcaires et des sables, non consolidés.

Les dépôts sableux rouges à stratifications entre croisées qui succèdent aux conglomérats précédents appartiennent au Villafranchien. Ces dépôts reposent le plus souvent sur des limons grés. Parfois les conglomérats du Pliocène supérieur n'existent pas, et les formations rouges du Villafranchien se trouvent alors en contact avec des grés Astiens ; d'ailleurs, au Sud de Cheliff sur la bordure de l'Ouarsenis, le Pliocène disparaît complètement. A ce niveau, le Quaternaire recouvre directement les grés du Miocène.

- **Le Quaternaire :** les dépôts Quaternaires sont continentaux ; on distingue un Quaternaire ancien et un récent.

- **Le Quaternaire ancien** : est représenté essentiellement par des alluvions conglomératiques : galets, graviers et sables. Les alluvions du Quaternaire ancien sont observées au pied du massif du Zaccar, et en particulier à l'Est de Sidi- Lakhdar ; elles forment les vastes collines en bordure Sud de la plaine du Haut Cheliff.
- **Le Quaternaire récent** : le Quaternaire récent est formé essentiellement de limon, dont l'épaisseur varie de 25 à 200 m, on y distingue de haut en bas :

* Des limons bruns à rouges, les niveaux les plus anciens sont discordants sur le Quaternaire ancien. Ces limons recouvrent la presque totalité de la dépression sous forme d'alternance sablo-gréseuse.

* Des grés, visibles surtout sur les berges des oueds, forment des accumulations des niveaux très fins dont les épaisseurs peuvent atteindre les cinq mètres, ce sont d'anciens vases asséchés. Ces formations proviennent de l'érosion des reliefs avoisinants.

* Des alluvions actuelles formées par des limons, des sables, des galets et des cailloutis au fond des talwegs et dans les zones de confluences des oueds et des méandres abandonnées.

II.6 Contexte hydrogéologique

II.6.1 Les principaux aquifères de la région d'étude

D'après l'étude de la série stratigraphique et ses caractères lithologiques et structuraux, on distingue les niveaux aquifères suivants :

- ◆ **Les calcaires Jurassiques** : constituent un important réservoir qui se particularise par la présence des fissures qui favorisent la circulation et le stockage de l'eau. la densité et la répartition mal connues de ses fissures posent d'énormes problèmes pour l'implantation des puits et des forages.
- ◆ **Les aquifères du Miocène** : se représentent sous-forme de conglomérats plus ou moins argileux et sableux. Les calcaires du Miocène affleurent le long de la limite Sud de la vallée, avec la présence d'espaces vides et des fissures internes ouvertes, dû à la dissolution des carbonates sous l'influence de l'infiltration de l'eau de pluie, particulièrement le long des surfaces de contact.
- ◆ **Les aquifères du Pliocène** : le Pliocène se présente sous forme des grés de l'Astien jaunâtres passant à leur sommet à des sables dunaires à hélix, avec une épaisseur moyenne de 100 m.

- ◆ **Aquifère alluvionnaire du Quaternaire objet de notre étude:** les formations alluvionnaires du Quaternaire constituent l'aquifère le plus important et le plus exploité dans la plaine alluviale de Khemis Miliana. Les descriptions lithologiques des forages montrent que plus de 20% des matériaux traversés sont des sables, graviers ou et une gamme de profondeur des forages qui varie de 5 à 150 m (Bong & Meziani, 2013).

C'est un aquifère localement confiné, car il est recouvert de limon et d'argile en surface, avec une épaisseur de 5 à 20 m au centre de la plaine.

L'aquifère alluvial est recouvert par la formation du Mio-Pliocène, où le grès apparaît dans le Nord-est à djebel Gontas, et dans le Sud-est de la ville de Djendel. Dans les deux zones, plusieurs puits sont forés et ils ont une bonne qualité des eaux souterraines, et ils peuvent atteindre 200 m d'épaisseur (Bouderbala & Gharbi, 2017).

En effet, L'écoulement des eaux souterraines de cet aquifère alluvial se fait du Nord et au Sud de la plaine vers le centre où l'axe de drainage principal est situé qui coïncide avec l'oued Cheliff, et l'écoulement principal d'Est en Ouest.

La profondeur de la nappe phréatique varie de 5 m dans la zone ouest (près de la ville Djendel) à 30 m dans la zone Est (près de la ville d'Arib et de Djelida), la profondeur moyenne est de 10 m dans la partie centrale de la plaine (Bouderbala, 2017).

Epaisseur (m)	Log	Lithologie	Age		Comportement Hydrogéologique
10 à 20		Limons et argiles	Quaternaire récent		Semi - perméable
100		Alluvions grossières (grès et poudingues)			Quaternaire ancien
		Alluvions argileuses (sables, graviers, argiles)			
100		Argiles	Pliocène		Imperméable
		Grès et conglomérats			Perméable
100		Grès et poudingues			Perméable
200		Argiles	Miocène supérieur (Vindobonien)		Imperméable
		Grès et poudingues			Perméable
?		Calcaires			Perméable
300		Marnes	Miocène inférieur (Burdigalien)		Imperméable
1000		Grès et poudingues			Perméable
20		Calcaires			Perméable
?		Grès et quartzitiques	Eocène		Perméable
		Argiles et schistes			Imperméable
?		Marnes et calcaires marneux	Sénonien		Imperméable
20 à 60		Calcaires et marbres calcaire	Cénomaniens		Imperméable
1000		Schistes et bancs de quartzites	Crétacé		Imperméable
800 à 1000		Argiles schisteuses			Néocomien
1000		Calcaires	Jurassique		Perméable
?		Gypse et argiles	Trias		Semi-perméable
500		Schistes et quartzites	Permo-Trias		Imperméable

Figure 10. Log litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine alluviale de Khemis-Miliana (Mattauer 1958, Perrodon 1967).

D'après l'étude de la série stratigraphique de la région d'étude et de ses caractéristiques lithologiques, nous avons distingué la présence d'un aquifère alluvial à double caractère localement une nappe libre avec des passages lithologiques et une présence d'un recouvrement limoneux-argileux, ce qui rend la nappe des alluvions grossières semi-captive localement. Un autre aquifère s'avérait intéressant attribué au Miocène et l'aquifère des calcaires de Zaccar. Nous allons focaliser notre étude seulement pour les alluvions grossières du Quaternaire. Cet aquifère renferme une nappe très exploitée dans la plaine. Son substratum imperméable et représenté par les marnes et argiles du Miocène.

*Matériels,
méthodes,
résultats et
discussion*

III.1 Partie de Géophysique

Le problème posé à la prospection électrique était principalement d'étudier les caractéristiques du recouvrement alluvial et l'allure du substratum imperméable dans le but de dégager de nouvelles ressources en eau dans la plaine de Khemis Miliana, ainsi, la localisation et la reconnaissance des aquifères éventuels en profondeur. Cette étude a été réalisée par la Compagnie Générale de la Géophysique de France (CGG).

Plusieurs objectifs sont assignés à cette étude et qui consistent essentiellement, en premier plan, à utiliser ces données géophysiques disponibles dans la région pour la conception un model géologique 3D de l'ensemble des terrains susceptibles d'être de bons aquifères rencontrés sous la plaine. En deuxième plan :

- Faire un inventaire des données géophysiques dans la région d'étude.
- La détermination des propriétés électriques des différents horizons dans le but de définir les formations susceptibles d'être aquifère.
- La connaissance de la géométrie des formations aquifères.
- Construire une Geodatabase de profils électriques.
- Convertir l'ensemble des données sous un format digital préalablement défini par un système d'information géographique.

Les sondages électriques verticaux (SEV) sont répartis grosso modo suivant les profils distants de 2 km orientés Nord-Sud, les Sondages électriques verticaux étant eux même espacés de 1km environ, voir plan de position (Figure11).

III.1.1 L'échelle des résistivités

D'une manière générale, L'échelle des résistivités dans le cadre de l'étude de la plaine de Khemis Miliana par la CGG, à partir de l'étalonnage à l'aide des forages et sondages déjà existés est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 05. Echelle de résistivités des formations de la région de la plaine de Khemis Miliana.

Terrain		Résistivités	
Quaternaire	Alluvions récentes limoneuses	5-10 ohm.m	
	Alluvions récentes graveleuses	10-30 ohm.m	
	Alluvions récentes grossières (galets – graviers)	70-150 ohm.m	
	Alluvions anciennes du cône de déjection	Grossières	40-100 ohm.m
		Argileuses	10-20 ohm.m
MioplIOCène	Argiles+grés+poudingues	10-20 ohm.m	
	Poudingues ou grés seul	100 ohm.m	
MIOCène	Grés et poudingues	100-200 ohm.m	
	Grés –marnes	30-70 ohm.m	
	Marnes	5-10 ohm.m	
Crétacé	Flysch albien	10-20 ohm.m	
Substratum résistant		≤100 ohm.m	

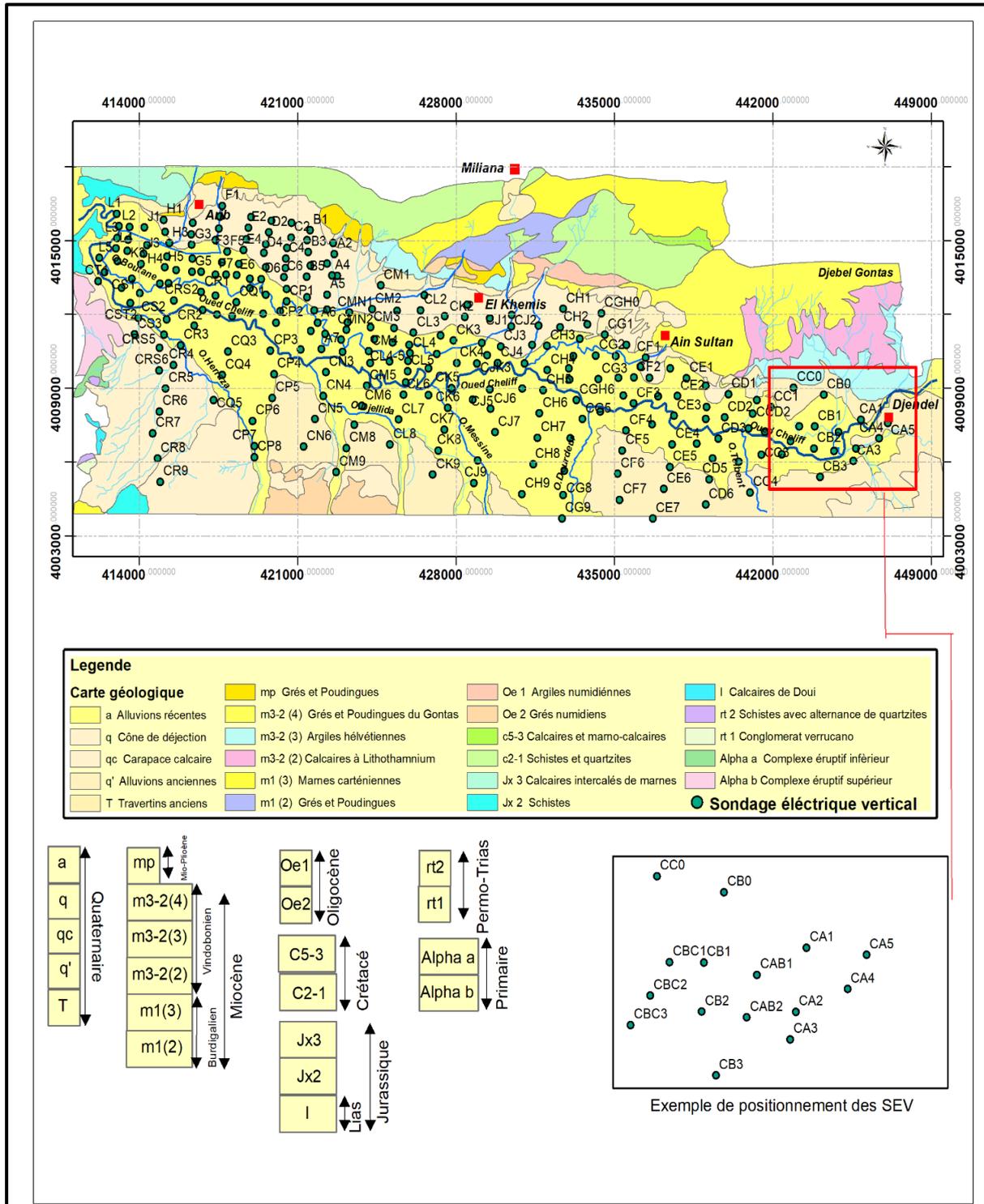


Figure 11. Positionnement des sondages électriques verticaux réalisés dans la plaine de Khemis Miliana.

III.1.2 Analyse des coupes transversales

Les coupes sont représentées à l'échelle horizontale du 1/20 000° et à l'échelle verticale du 1/5000° ; en raison de l'échelle verticale choisie, il n'a pas été possible de représenter le substratum résistant Crétacé qui plonge du Sud vers le Nord, et atteint rapidement des profondeurs supérieures à 500 m, et même à 1 000 m sur quelques kilomètres.

Hormis les coupes des extrémités Est et Ouest de la plaine, la plupart des coupes présentent la même allure :

- Synclinal miocène marneux très épais (1000 à 1500 m d'épaisseur), dont l'axe est déporté au Nord de la plaine.
- La base des grés miocènes marque bien la dissymétrie du synclinal. Dans l'axe du synclinal, la cote du mur des grés et généralement comprise entre 0 et + 100.
- Les grés s'amenuisent vers l'Ouest (Voir profil CP à CS) ou, comme nous l'avons vu, ils peuvent être relayés par d'autres formations grossières grés mio-pliocène.
- L'allure synclinale est respectée par le remplissage alluvial, au moins dans la partie Est de la plaine.

C'est dans cette zone (profil CB à CJ) que les alluvions et les grés se confondent pratiquement.

L'intercalation argileuse que nous avons admise entre les deux niveaux (20 à 50 m) est souvent peu visible sur les diagrammes et il est possible par ailleurs qu'elle ne corresponde pas exactement au passage des alluvions aux grés.

- Dans les coupes CJ à A-CN, les deux niveaux sont mieux dissociés, notamment dans la partie Nord, dans l'axe du synclinal, où un épais remplissage argileux à 10 – 12 ohm.m surmonte les grés. la confusion entre les deux niveaux se retrouve néanmoins au centre de la plaine, les grés remontant au contact des alluvions (le forage CL4 se retrouverait dans cette zone, d'où difficulté de distinguer les alluvions des niveaux grossiers sous jacents).
- Davantage à l'Ouest, en s'approchant du massif du Doui, le bassin crétacé se ferme rapidement, et les formations grossières (grés miopliocène), et même les alluvions diminuent d'importance.

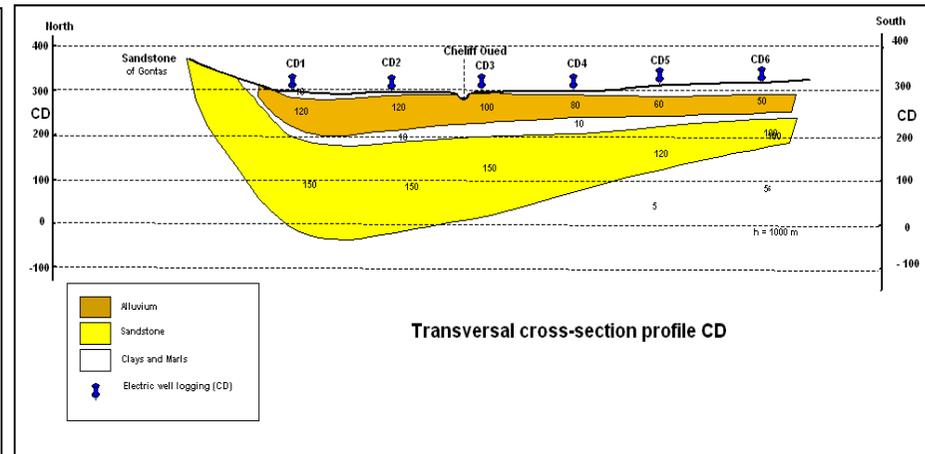
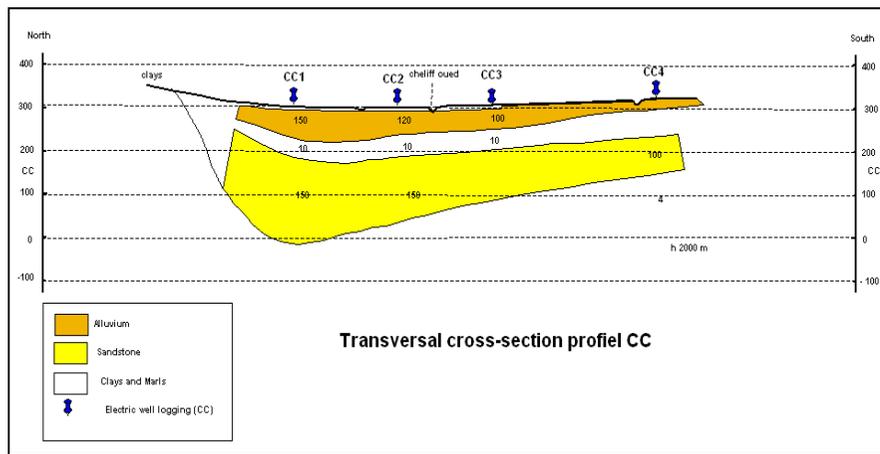
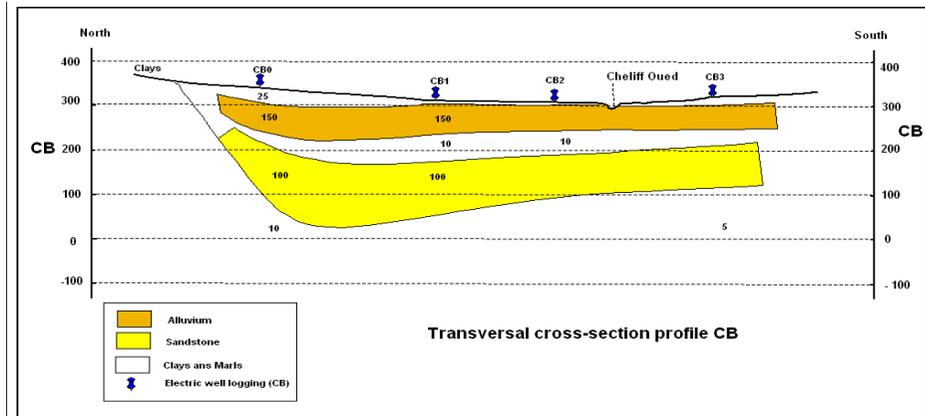
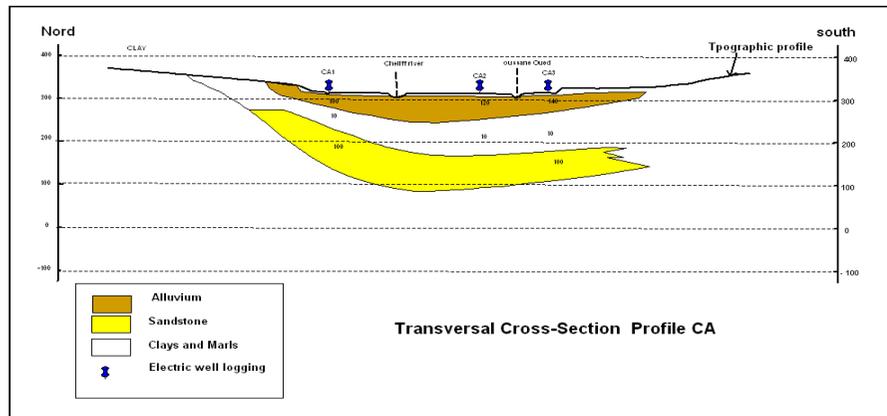


Figure 12. Coupes transversales réalisées dans la plaine alluviale de Khemis Miliana.

L'analyse et l'examen des coupes transversales ont montré :

III.1.2.1.1 Recouvrement alluvionnaire

Sous l'épais recouvrement limoneux (parfois plus de 10m), il existe dans la plaine un niveau grossier d'un volume important, très épais dans la partie orientale de la plaine, (de l'ordre de 80 -100 m), en face du massif du Gountas, il diminue d'épaisseur vers l'Ouest, ou devient progressivement plus argileux, mais garde toujours une épaisseur utile équivalente au moins à 30 m à 100 Ohm.m, dans l'axe du lit fossile. Transversalement, la résistivité va également en diminuant progressivement vers le Sud, par le fait d'invasion argileuse. Et au Nord la limite des alluvions grossières est mieux marquée et moins progressive qu'au Sud.

La zone la plus favorable reste bien entendu la zone de RT supérieures à 10000 ohm.m² située dans la partie orientale de la plaine : S.E ; CBC 1, CE 2, CEF 2, CF ½, CFGO, CG 1, CGH 3, CH 4. Des forages effectués sur l'un ou plusieurs de ces points permettront de vérifier l'épaisseur et la perméabilité des alluvions.

III.1.2.2 Formations miocène du Moi-pliocène

Pour ces formations, c'est également la carte des résistances qui constituera le document de base dans le cas où l'on cherchera à exploiter les grès et poudingues. Les zones d'intérêt se situent au Nord de la plaine, dans l'axe du synclinal, et plus particulièrement dans la partie orientale. On retiendra les plages à plus de 15000 ohm.m², qui représentent, avec une valeur moyenne de 150 ohm.m des épaisseurs de plus de 100 mètres ; il est probable que les grès et poudingues du Gountas proprement dits se limitent au centre de la plaine vers les profils CJ ou CK, là où nous avons noté une remontée transversale du Crétacé. Au-delà de cette limite, vers l'Ouest, le niveau grossier inférieur pourrait représenter de grès Miopliocène ou des alluvions plus anciennes.

III.1.2.3 Substratum résistant

Nous avons vu qu'il y avait une remontée des formations probablement Crétacées, au centre de la plaine, divisant la plaine en deux parties où le Miocène marneux est très épais (plus de 500 m) En bordure Sud de la plaine la plateforme Crétacé (avec ou sans couverture éocène) est visible sur la plupart des profils, de CE à CS, à une profondeur relativement faible. Ces formations comportent des niveaux argileux à 10-20 ohm.m. il est à noter que le substratum dans la plaine en majorité schistes crétacé.

III.2 Conception d'un-modèle 3D hydrogéologique géo-spatial

La première étape de notre mémoire est la procédure de conception de modèle 3D-hydrogéologique de la plaine de Khemis Miliana, tout en décrivant formellement les données géologiques et géophysiques utilisées. La construction de ces modèles repose sur la connaissance de la lithologie et la structure des différents matériaux constituant le sous-sol. En se basant sur les forages et les études géophysiques réalisées dans la région. Différents modèles peuvent être réalisés; on en cite les plus intéressants du point de vue géologique et hydrogéologique (lithologie et nature des terrains) ; le même travail concernant la stratigraphie (nature stratigraphique et hydrogéologie des terrains aquifères), sera exposé, la construction de ces modèles se fait à partir des données collectées des forages et sondages géoélectriques présentes dans notre région, plus de 150 forages ont été introduits avec leurs lithologies pour la construction des modèles 3D. Les forages sont distribués spatialement sous forme de profils, situés à une distance de 2 km les uns par rapport aux autres et qui sont orientés dans le sens subméridien. La distance entre les forages est d'environ 1000 m, Des informations de base sont stockées dans une Géodatabase sous le logiciel Rockworks. Le cylindre multicolore est créé et montre les formations géologiques rencontrées le long de chaque sondage. Il peut être obtenu à partir du "**Borehole manager**" et peut être visualisé dans la fenêtre Rockplot-3D du logiciel. Chaque forage ou sondage géoélectrique aura sa propre information lithologique et stratigraphique; les données peuvent être visualisées sous forme de : - Cartes d'égale hauteur lithologique, où chaque niveau représentera un faciès déterminé ; - Carte d'égale hauteur stratigraphique ; où chaque couche représentera une surface hydrogéologique définie ; - Modèles 3D de réservoir ; - Ou des logs de puits en 3D, surmontés par une carte topographique ou géologique, permettant d'illustrer les anomalies recherchées.

La construction de ces modèles repose sur la connaissance de la lithologie et la structure des différents matériaux constituant le sous-sol ; ces informations peuvent être recueillies à partir de l'observation des affleurements des formations géologiques ou par l'analyse des cuttings, lors de l'opération de foration, ils seront ensuite introduites dans le logiciel pour servir à la création d'une table lithologique (lithology table), qui va être utilisée dans le modèle, et d'en ressortir avec les différents diagrammes et modèles lithologiques (modèles 3D, logs de forages 3D, profils... etc), (voir figure 15,16,17,18).

Row#	Name	Pattern	Percent	Density	G-Value
1	Aquitard 1		100	0.2	1
2	Aquifer-1		100	0.3	2
3	Aquitard 2		100	0.1	3
4	Aquifer 2		100	0.3	4
5	Aquitard 3		100	0.2	5
6	Substratum		100	0.3	6
7					

Figure 14. La Table litho-hydrogéologique des principaux faciès lithologiques rencontrés dans la plaine de Khemis Miliana.

La pile stratigraphique est le concept fondamental qui permet d'interpréter les données et de construire le modèle. Elle décrit à la fois l'ordre chronologique de dépôt des formations à modéliser, et les relations entre formations successives qui peuvent être de deux types : soit dépôt d'une formation sur la précédente, soit existence d'une surface d'érosion entre deux formations successives. Ces relations sont utilisées pour caractériser les interfaces entre formations. D'après l'étude géologique du secteur, on a choisi de modéliser les surfaces présentées dans la « pile » stratigraphique. (Voir la pile litho-hydrogéologique ci-dessous) :

<i>Aquitard 1</i>	<i>Limons et Alluvions argileuses</i>	
<i>Aquifer 1</i>	<i>Alluvions grossières</i>	
<i>Aquitard 2</i>	<i>Alluvions argileuses</i>	
<i>Aquifer 2</i>	<i>Grés</i>	
<i>Aquitard 3</i>	<i>Marnes</i>	
<i>Substratum</i>	<i>Substratum Schisteux</i>	

La construction de la base de données est élaborée sous le module « borehole data manager », pour chaque sondage nous avons introduit les formations géologiques rencontrées avec leurs limites « Depth to top et Depth to base ».

III.3 Représentation 2D-3D des sondages dans la plaine de Khemis Miliana

L'ensemble des sondages existant sur la plaine sont représentés selon des profils en ligne comme le montre la figure (15). Le géomodelleur Rockworks nous a permis de faire des séquences en profils :

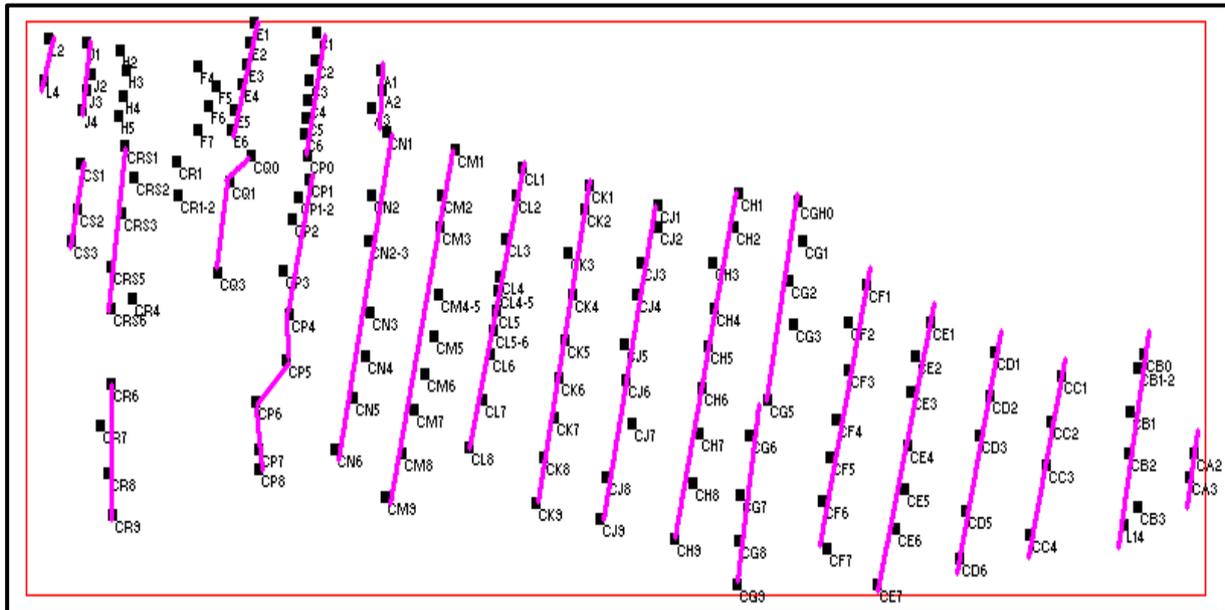


Figure 15. Représentation des profils de sondages géoélectriques réalisés par le logiciel RockWorks.

Pour la visualisation 3D des forages, la construction de la base de données est réalisée sous le module « borehole data manager », pour chaque sondage on introduit l'ensemble des formations géologiques rencontrées avec leurs limites.

Le Géomodeleur Rockworks nous a fourni un moyen avantageux pour l'exécution de la modélisation tridimensionnelle, Le Géomodeleur RockWorks a longtemps été appliqué dans le domaine du pétrole, industries, géotechniques, l'exploitation et l'environnement hydrogéologique, dans notre mémoire, il est appliqué pour la visualisation des données du sous-sol en raison de ses outils efficaces tels que l'établissement et la création des cartes à différentes échelles, des rapports en sortie, des coupes, des fences diagrams, des modèles solides et volumétriques 2D-3D.

III.3.1 Diagramme lithologique des forages en 3D

Il est souvent nécessaire de représenter les sondages individuellement car ils fournissent des données directes et fiables des formations géologiques souterraines qui ne sont pas accessibles autrement et qui sont utilisées pour interpréter la géologie; les 150 forages

introduits dans notre étude peuvent atteindre de centaines de mètres de profondeur. Ces sondages sont représentés par un point au niveau du sol. Des informations de base sont stockés dans une data base. La Figure (17) montre le cylindre multicolore qui montre les formations géologiques rencontrées le long de chaque sondage. Il peut être obtenu à partir du « Borehole manager » et peut être visualisé dans la fenêtre Rockplot 3D du programme.

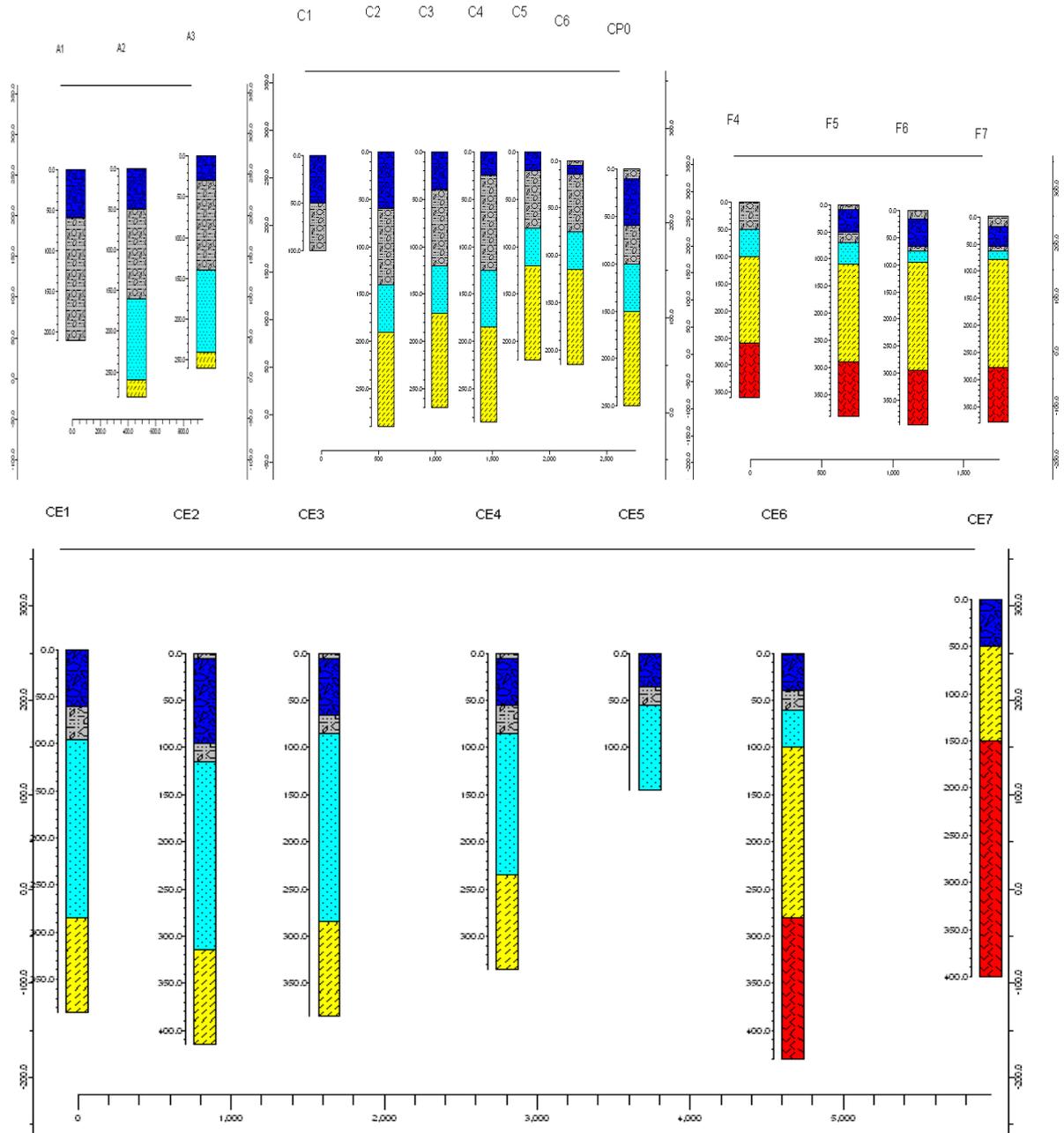
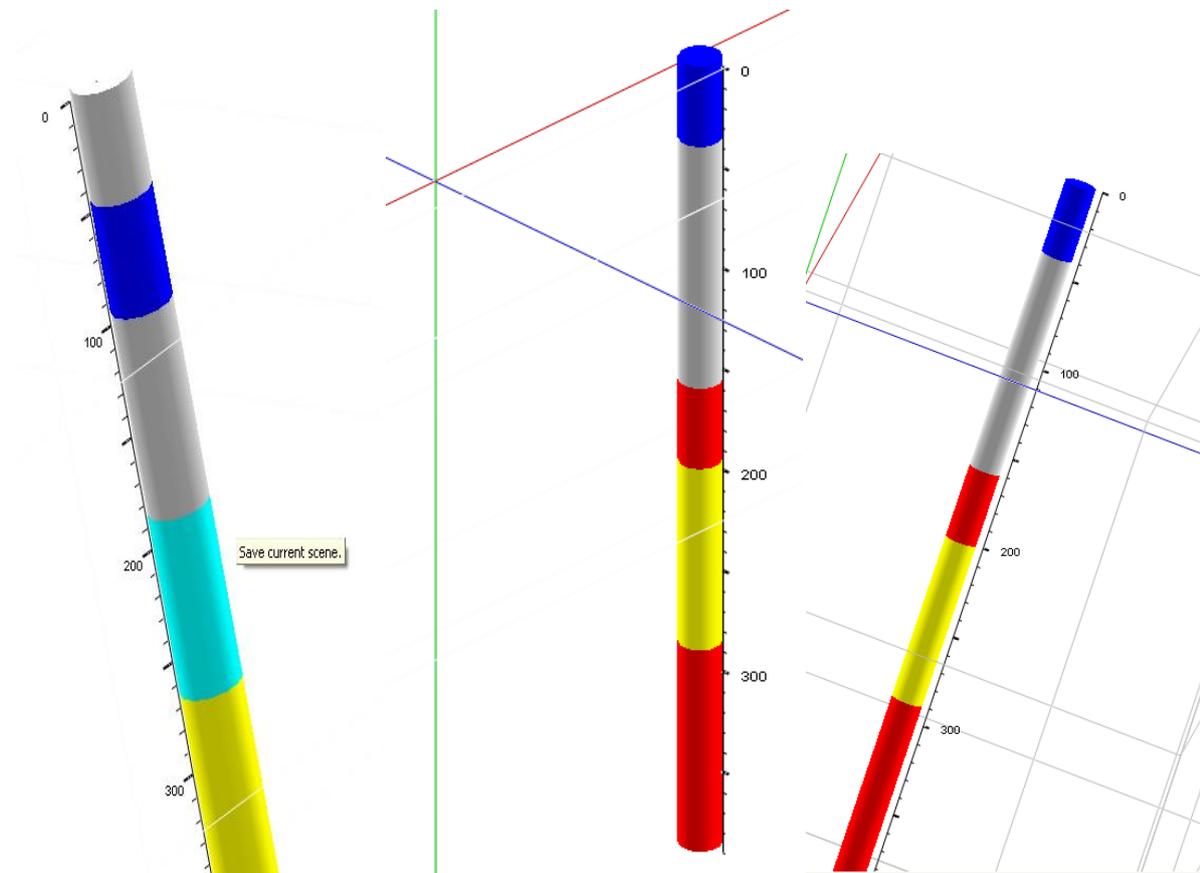


Figure 16. Géo-visualisation des sondages géoélectriques en 2D.

Il est par conséquent intéressant de noter que bien que le nombre de forages par Km² soit important (densité de sondage) dans cette région ils permettent bien de décrire complètement la géométrie du système aquifère. Ces sondages sont majoritairement alignés le long de l'Oued Cheliff et qui sont bien réparties dans notre plaine d'étude.



Légende

- Substratum
- Marnes
- Grés
- Alluvions grossières
- Alluvions argileuses et limons

Figure 17. Vue tridimensionnelle d'un sondage à l'aide du logiciel 3D RockWorks.

Il est par conséquent intéressant de noter que bien que le nombre de forages par Km² soit important (densité de forages) dans cette région ils permettent bien de décrire complètement la géométrie du système aquifère. Ces forages sont majoritairement alignés le long de l'Oued Cheliff et qui sont bien réparties dans notre plaine d'étude.

Chaque sondage aura sa propre information lithologique et stratigraphique; les données peuvent être visualisées sous forme de :

- Cartes d'égale hauteur lithologique, où chaque niveau représentera un faciès déterminé ;
- Carte d'égale hauteur stratigraphique ; où chaque couche représentera une surface hydrogéologique définie ;
- Modèles 3D de réservoir ;
- Ou des logs de puits en 3D, surmontés par une carte topographique ou géologique, permettant d'illustrer les anomalies recherchées.

La figure (18), illustre la variation des niveaux hydrogéologiques dans la région ; entre chaque deux plans successifs se trouve une unité hydrogéologique déterminée ; les logs des forages serviront en quelques sorte à la validation du modèle ;

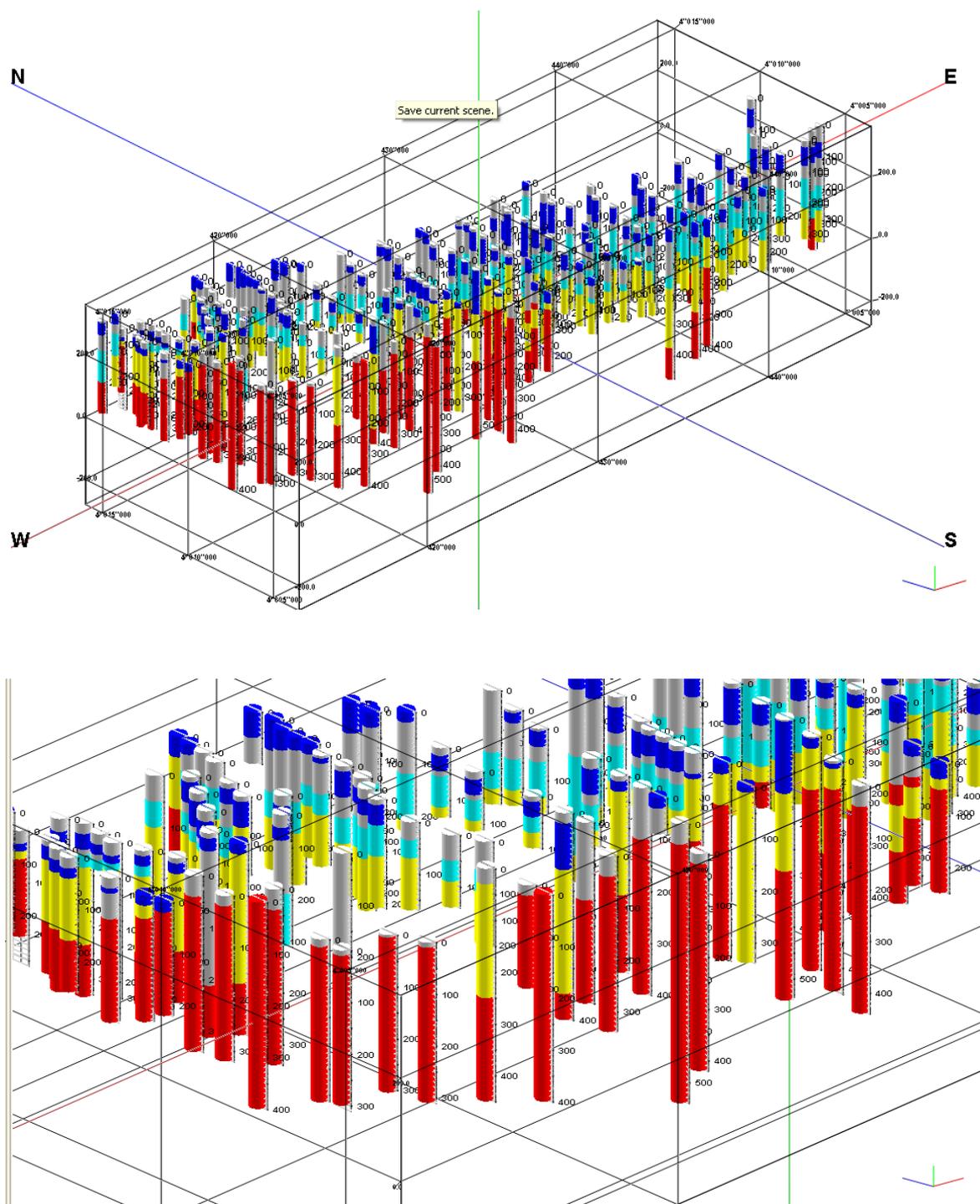


Figure 18. Répartition tridimensionnelle des sondages dans la région d'étude.

Il est donc possible de représenter dans notre région les unités par leur frontière ou par à l'aide de volumes. À des fins de visualisation, il est souvent utile de représenter les unités par leurs

frontières puisqu'on évite ainsi de surcharger le modèle géologique et on en obtient une visualisation plus claire

Cependant, pour des analyses volumiques plus poussées, il convient mieux de représenter les unités géologiques en entier par des volumes pleins aux quels on peut assigner des propriétés qui varient à l'intérieur même de l'objet géologique.

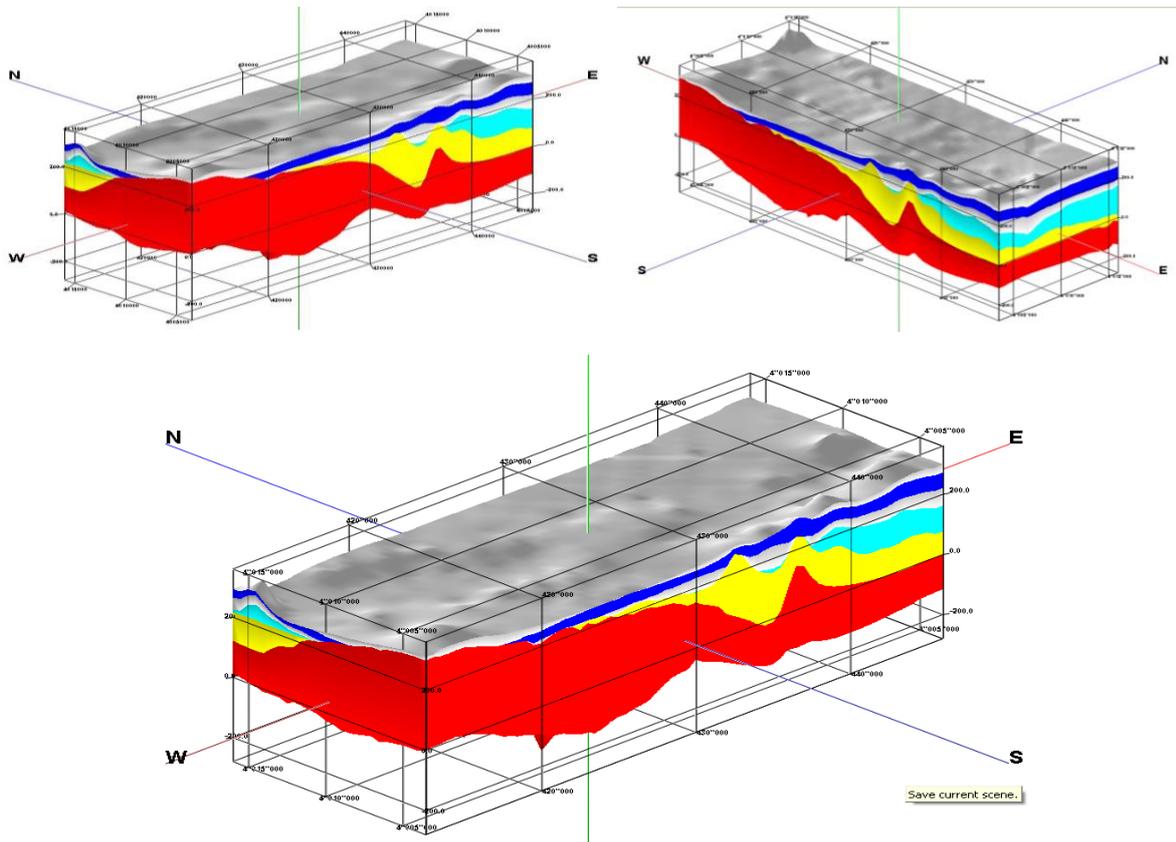


Figure 19. Représentation des unités géologiques avec des volumes géologiques.

Un autre modèle paraît très intéressant à réaliser, c'est celui du digramme en panneaux de la stratigraphie ; il peut être conçu sous différents angles et selon les panneaux voulus ; Après qu'on a sélectionné les sondages à introduire dans le modèle, et à travers la commande « fence » du menu « stratigraphy », on demande au programme de tracer des panneaux diagonaux et les mettre dans la même figure que les logs de forages.

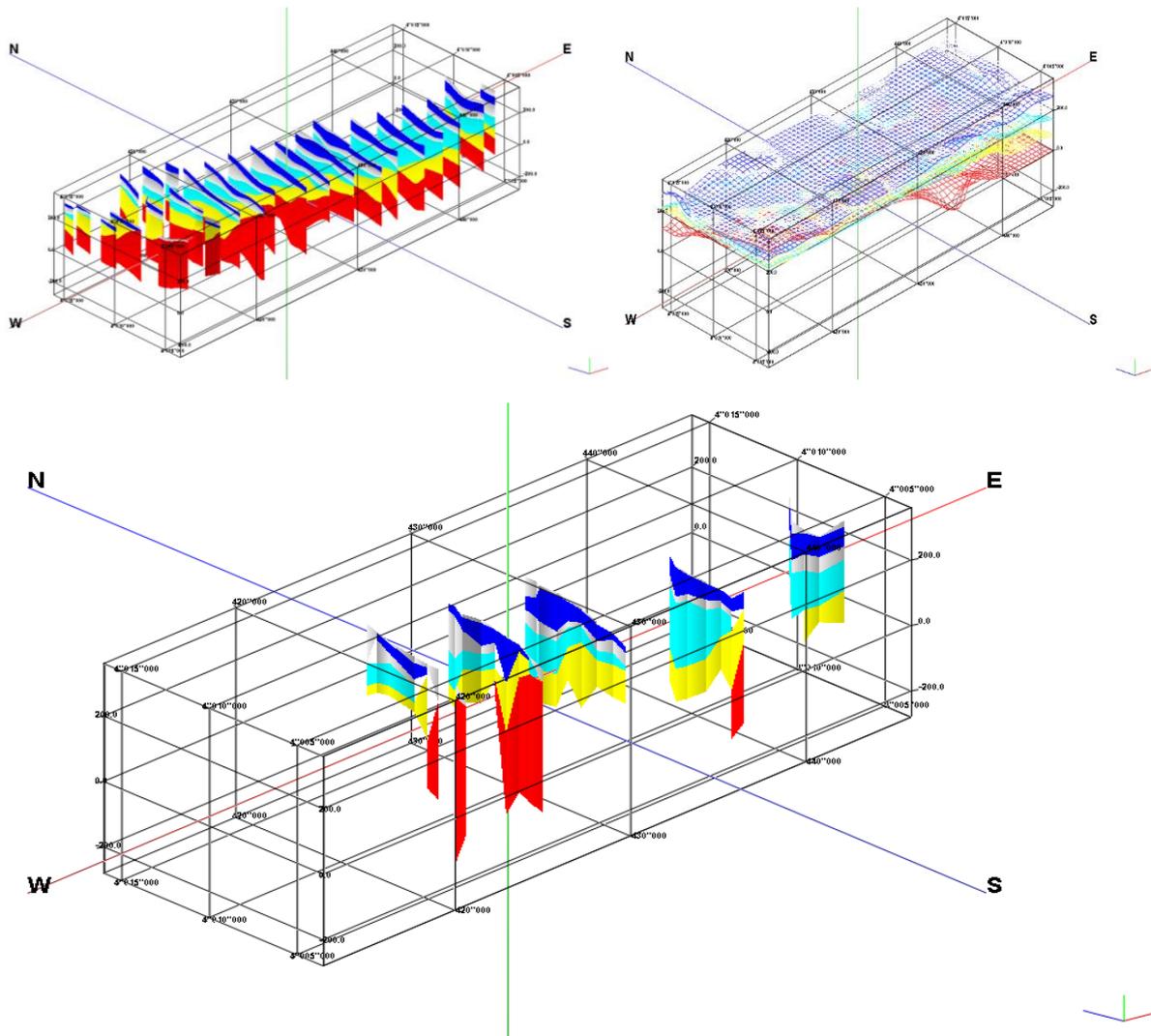


Figure 20. Diagramme en panneaux diagonaux, montrant la variation spatiale des unités hydrogéologiques dans le Haut Cheliff (Plaine de Khemis Miliana).

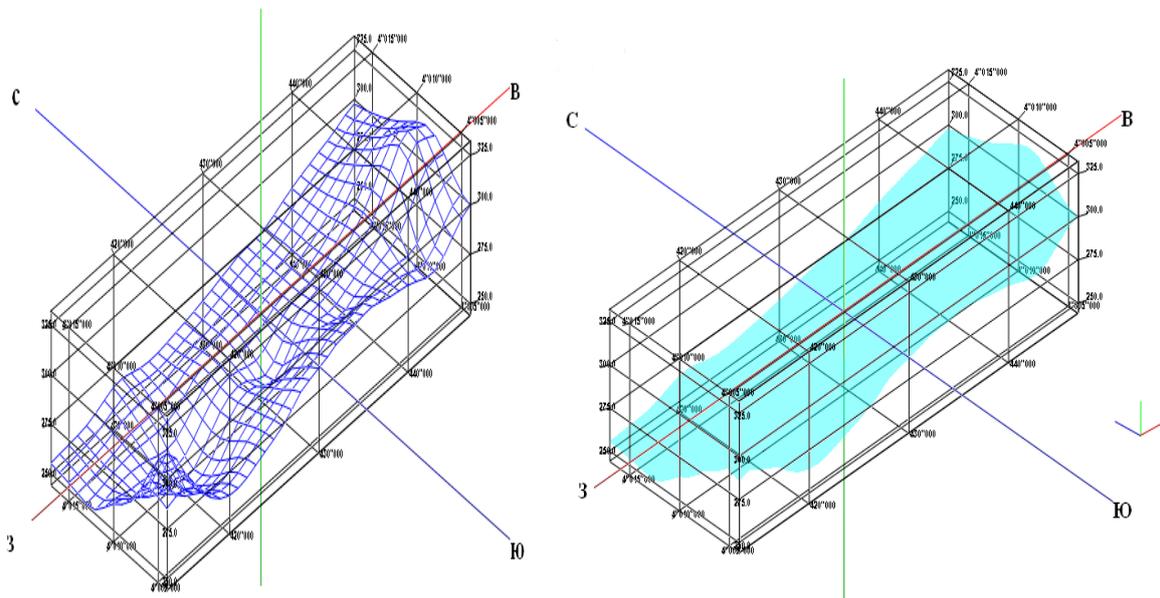
III.4 Intégration des surfaces piézométriques -3D GRID au sein du model géologique

Pour la visualisation de la surface d'eau souterraine, on doit créer un profil 3D de dépression de la nappe (en 3D), d'une campagne piézométrique moyenne d'au moins de 10 campagnes comme moyenne pour en juger sur l'abaissement ou le soulèvement du plan d'eau dans l'aquifère ou d'une éventuelle surexploitation des réserves. Et bien comprendre l'allure générale et la morphologie des eaux souterraines.

La méthode utilisée pour l'obtention de ces profils de dépression est le « *Gridding* ou *Maillage* », le *Gridding* est un processus dans lequel les données dispersées, spatialement

distribuées peuvent être transformées dans une grille régulière de valeurs numérique. Dans le processus de « *Gridding* », le programme assigne une valeur aux intersections des lignes de grille, ces intersections sont appelées des nœuds de grille. Plusieurs logiciels offre plusieurs méthodes mathématiques pour en faire à l'aide d'interpolation spatiale. Un dossier de Grid est le dossier informatique de nombres qui contient les résultats du processus de Gridding. Il contient une liste du X et Y qui sont les coordonnées du lieu de la grille, les noeuds de cette grille sont régulièrement-espacés et pour chaque nœud sera extrapolée une valeur de Z (niveau d'eau pour la piézométrie dans notre cas).

Le Gridding est un processus d'interpolation, le choix de la méthode d'interpolation est un facteur très important et déterminant de la qualité des cartes et profils construits, sur lequel il est possible avant de construire une carte ou un profil de dépression de faire quelques réglages (l'utilisation du variogramme pour l'interpolation Kriging). Les avantages de Gridding incluent le fait d'avoir plus de contrôle sur le processus de cartes et profils, pour avoir des cartes en 2D et en 3D plus lisses, en outre sa capacité à construire des cartes en 3ème dimension semble être d'une utilité majeure dans notre mémoire.



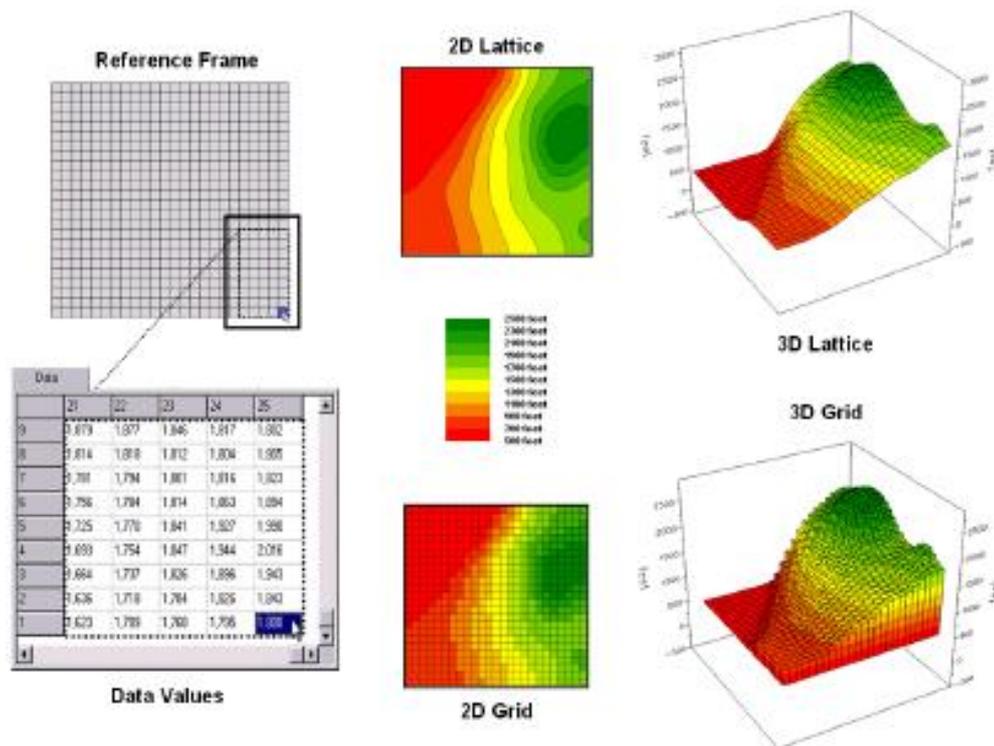


Figure 21. Les formes d'organisation d'un Grid de surface piézométrique moyenne.

Les modèles de grilles (Grid) qui représentent les couches de niveaux d'eau souterraine (piézométrie) sont le résultats de l'interpolation spatiale des points de mesures (puits et forages d'observation) , de telle sorte que chaque point de mesure contient les coordonnées X,Y et sa valeur Z(H) qui représente la valeur du niveau d'eau en m et qui doit être extrapolée à chaque nœud, l'organisation des données se fait par création d'un tableau pour chaque campagne piézométrique et faire l'interpolation pour avoir le Grid pour chaque campagne piézométrique.

Les données des campagnes piézométriques de 2000 jusqu'au 2016 ont été retenues pour cela ; la procédure Pour chaque campagne, est comme suite:

On crée un fichier " Grid " ou grille (GRD); il servira à la réalisation d'une maille en 3D, des données de localisation géographique et de l'altitude du niveau de l'eau dans les ouvrages de captages.

X (Easting): Easting; Y (Northing): Northing; Z (Elevation): water surface Level;

Ces Grids ont été créés à partir de la Méthode d'interpolation dite Krigeage (kriging) à l'aide des niveaux statiques des points de mesure piézométrique. Nous pouvons visualiser ces Grids en deux formes, une forme solide avec une couleur pour chaque surface

piézométrique et la forme maillée aussi avec couleur pour différencier une campagne piézométrique d'une autre. Les grilles de plusieurs campagnes sont moyennées afin d'obtenir deux grilles moyennes, une pour les basses eaux et l'autre pour les hautes eaux, qui sont utilisés pour le calcul et l'estimation de la réserve d'eau souterraine.

III.4.1 Intégration des surfaces piézométriques dans le modèle géologique

L'utilisation de l'outil de la superposition, visualisation des couches de Grid de la piézométrie de la plaine de Khemis Miliana nous amène à procéder à la technique d'intégration par superposition des Grid de basses eaux et hautes eaux souterraines avec les grilles des limites des couches géologiques les figures ci-dessous montre l'utilisation et l'application de cette technique. Nous allons utiliser une dégradation de couleurs pour distinguer une campagne piézométrique et la limite de la couche géologique. Une comparaison a été élaboré entre les Grids piézométriques moyens (Basses eaux et Hautes eaux) nous a permet d'extraire des informations sur la fluctuation piézométrique ainsi que la notion volumétrique de la réserve régulatrice.

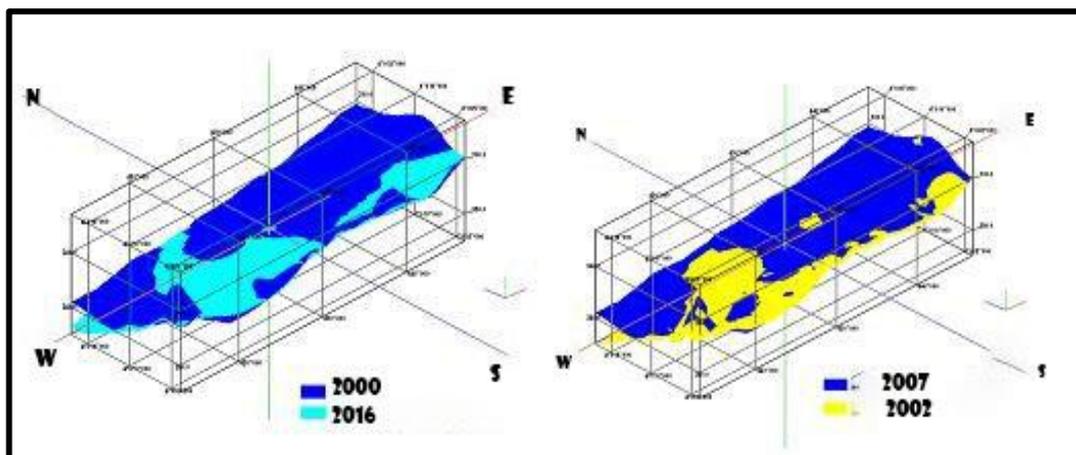


Figure 22. Superposition des 3D-Grid piézométriques.

III.5 L'utilisation de la technologie 3D-Modeling pour évaluer les réserves d'eau souterraine dans la plaine de Khemis-Miliana

Dans la pratique hydrogéologique à des fins d'approvisionnement en eau, généralement les ressources naturelles et exploitables des eaux souterraines sont évaluées. Lors de l'évaluation des ressources naturelles, la possibilité d'utiliser les réserves statiques et élastiques (régulatrices), les apports d'eau de l'extérieur (recharge) et d'autres facteurs sont

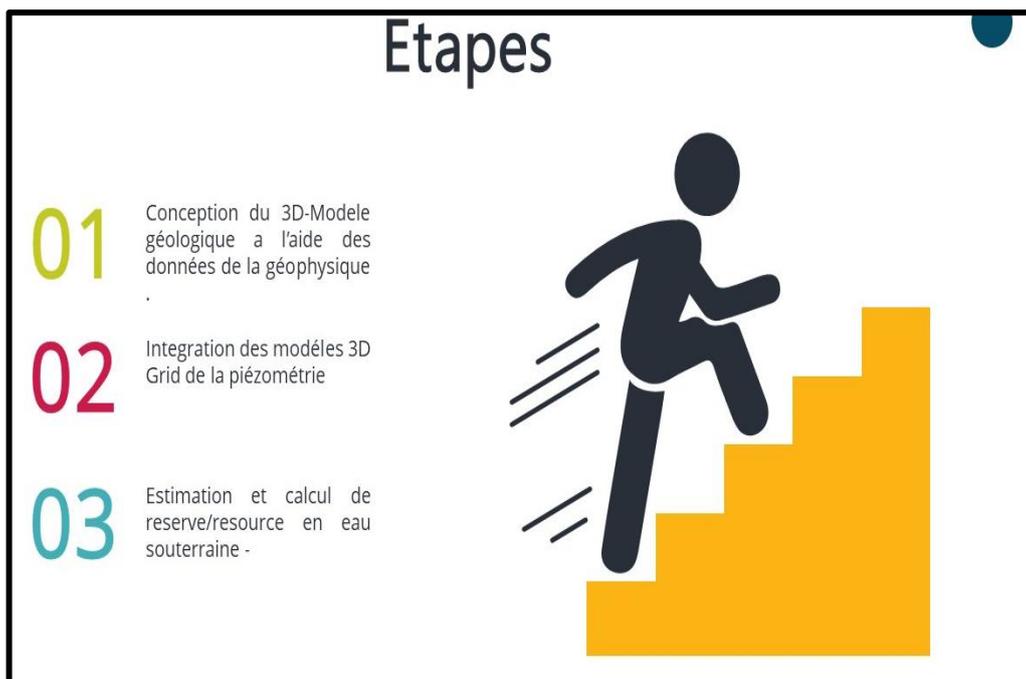
pris en compte. L'utilisation de méthodes modernes pour évaluer les réserves d'eau souterraine est d'une grande importance dans notre travail.

Selon la DHW de la wilaya de Ain Defla, les besoins en eau souterraine dans la plaine de Khemis Miliana sont estimés de 360,14 hm³ / an (Tableau ci-dessous) :

Tableau 06. Besoin en eau souterraine dans la plaine de Khemis Miliana (2007-2008) source DHW-DREW.

	AEP	Irrigation	AEP / Irrigation	Besoin industriel en eau	Tout
Débit en Hm³/an	247.14	84.6	27.74	0.67	360.14
Nombre total de prise d'eau (points d'eau)	624	243	594	9	1470

- ✓ Les principales démarches qui ont été élaborés pour la conception d'un model conceptuel de calcul sont résumé comme suit :



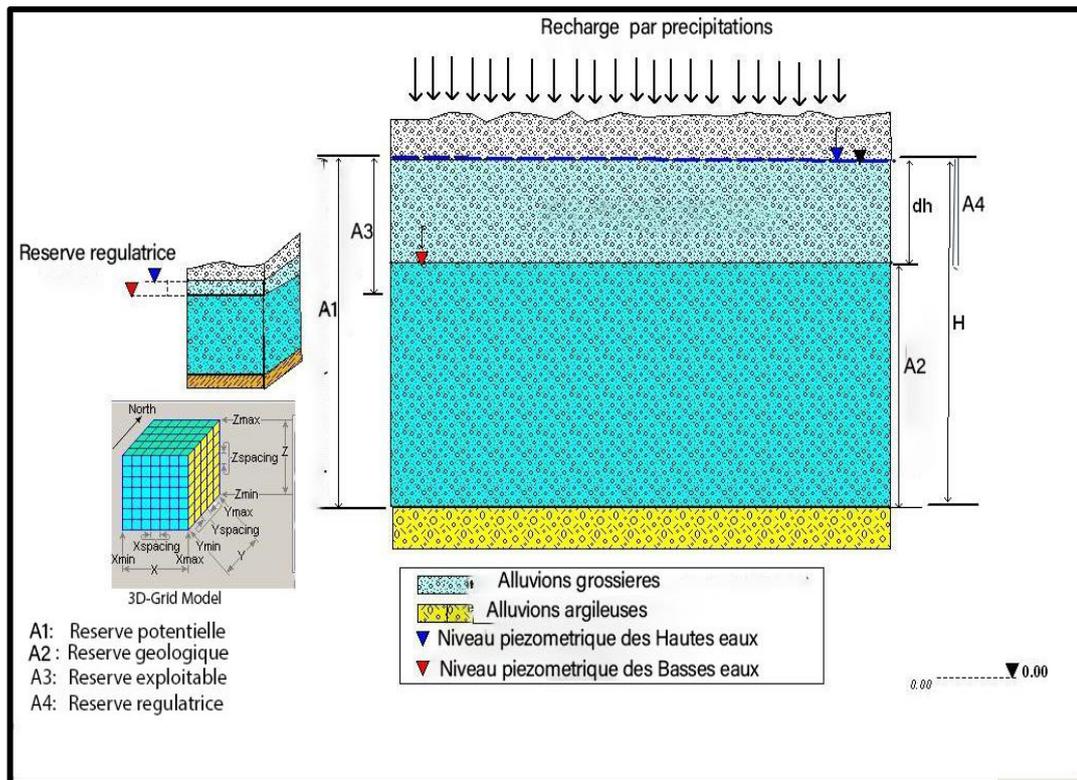


Figure 23. Schéma représentatif de la conceptualisation du modèle de calcul des réserves/ressources d'eau souterraine de l'aquifère alluviale de Khemis Miliana.

Afin d'évaluer les ressources exploitables en eau souterraine et la réserve régulatrice, nous avons procédé à la démarche suivante :

$$Q_3 = Q_e + \frac{W}{t}$$

$$W = \frac{V \cdot \mu}{t}$$

Avec :

Q_e : Ressources naturelles de l'horizon aquifère alluvial de la région.

Q₃ : Ressources exploitables.

W : Réserves régulatrices dans l'aquifère déclenchées lors de l'exploitation.

t : période de prévision de l'exploitation de la ressource, prise égale à 25 années.

les réserves régulatrices en eau souterraine dans notre région ont été calculées à l'aide du programme Rockworks , en se basant sur des méthodes volumétriques, les modèles sous forme Grid-3D (Grille-3D), représentent des couches moyenne de surface piézométrique des eaux souterraines pour la période s'étalant de 2008-2016, ainsi que des interfaces

géologiques, les ressources exploitables en eau souterraine peuvent être obtenues pour un rabattement de niveau d'eau de $S = 10$ m.

μ : coefficient d'emmagasinement (20%, ce coefficient a été déterminé par les essais de pompage).

V : volume régulateur (millions.m³).

$$W = \frac{3587413456 \cdot 0.20}{25} = 28.69 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

D'où $F = 359$ km² (superficie de l'extension de la nappe d'eau souterraine), les ressources exploitables pour la zone d'étude sont calculées, en tenant compte de la moyenne annuelle de la lame d'eau souterraine écoulée;

$$Q_e = 2,74 \cdot h_{ct} \cdot F$$

h_{ct} : lame d'eau souterraine écoulée ou lame d'écoulement souterrain mm/an (= 11.15 mm/an ; ce paramètre a été déterminé en utilisant la méthode du bilan hydrologique pour la période 1980-2007).

$$Q_e = 2,74 \cdot 11.15 \cdot 10^{-3} \cdot 359 \cdot 10^6 = 10.967809 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$Q_3 = 10.96 + 28.69 = 39.65 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

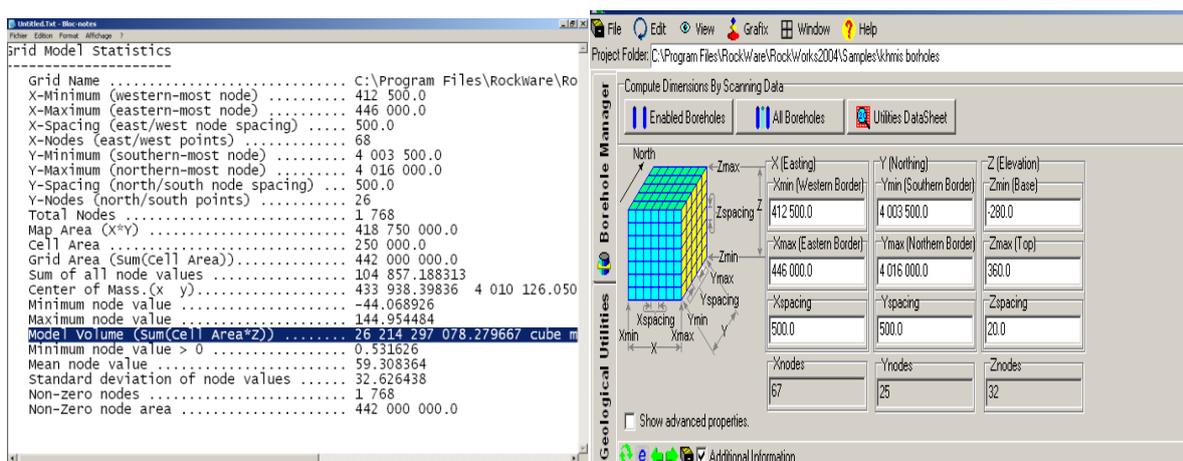


Figure 24. Interface de calcul volumétrique par Voxel dans la plateforme RockWorks.

Les ressources en eau souterraine douce et faiblement minéralisée jusqu'à $C < 1,5$ g/l sont concentrées dans la partie ouest de la zone d'étude, dans une superficie située au limite des contours de minéralisation $C < 1.5$. cette superficie est estimée de 105.12 km^2 (la superficie de la nappe d'eau souterraine dont la minéralisation $C < 1,5$ g/l et $C < 1$ g/l a été calculée en utilisant la carte de zonalité hydrogéochimique de la zone d'étude avec l'aide du l'analyse spatiale Raster Calculator de ArcGIS et Rockworks), les résultats obtenus sont ci-dessous :

$$C < 1, 5 \text{ g/l}$$

$$W = 1049797432 \times \frac{0.20}{25} = 8.39 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$Q_e = 2.74 \times 11 \times 15 \times 10^{-3} \times 105.12 \times 10^6 = 3.21 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$Q_3 = 11.6 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$C < 1 \text{ g/l}$$

$$W = 95272712 \times \frac{0.20}{25} = 0.76 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$Q_e = 2.74 \times 11 \times 15 \times 10^{-3} \times 9.5 \times 10^6 = 0.29 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

$$Q_3 = 1.05 \text{ millions.m}^3/\text{an}$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire de modernes techniques de Géomodélisation sont appliquées pour l'estimation des ressources en eau souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana, en Algérie, qui s'étend sur une superficie d'environ 359 km², caractérisée par des dépôts alluvionnaires du Plio-Quaternaire. Les eaux souterraines de cet aquifère alluvial jouent un rôle capital dans le développement socio-économique de la région tant, pour l'alimentation en eau potable, activités agricoles et industrielles.

On s'est concentré sur la conception d'un modèle hydrogéologique tridimensionnel (3D), à l'aide de la corrélation spatiale par interpolation avancée de tous les sondages électriques verticaux de la campagne de géophysique réalisée dans la zone d'étude, afin de générer et visualiser la géométrie de l'aquifère, squelette des calculs volumétriques, sur la plateforme (Rockworks). Des variations spatiales des épaisseurs de chaque unité hydrogéologique sont générées, un substratum schisteux, marne, grés, alluvions argileuses, alluvions grossières et une formation limoneuse avec des alluvions argileuses.

Des surfaces piézométriques Grid des bases eaux et des hautes eaux sont établies, nous avons pu extraire des informations sur la fluctuation du niveau piézométrique; dont les modèles sous forme Grid-3D (Grille-3D) qui présentent des couches moyennes s'étalant de 2008-2016, ces GRIDs piézométriques sont intégrées en piles superposables dans le modèle hydrogéologique.

En se basant sur des méthodes volumétriques, nous avons pu estimer la réserve régulatrice dans notre région qui est de 28.69 M.m³/an. Les ressources naturelles de l'horizon aquifère sont évaluées à 10.96 M.m³/an. Compte tenu de la lame d'eau écoulee 11.15 mm/an les ressources exploitables sont évaluées à 39.65 M.m³/an.

L'analyse spatiale de la carte de zonalité hydrogéochimique à montrer que les ressources en eaux souterraines douces et faiblement minéralisées $M < 1,5$ g/l sont concentrées dans la partie aval de la zone d'étude, d'une superficie de 105.12 km², dont la réserve régulatrice est estimé à 8.39 M.m³/an, les ressources naturelles à 3.21 M.m³/an et les ressources exploitables à 11.6 millions.m³/an. Pour les eaux souterraines dans la minéralisation $M < 1$ g/l, la réserve régulatrice est estimer à 0.76 M.m³/an, les ressources naturelles à 0.29 M.m³/an et les ressources exploitable à 1.05 M.m³/an.

Conclusion générale

Les estimations préliminaires des ressources en eau souterraines extraites via la modélisation dans la plaine de Khemis Miliana, nous a fourni, efficacement des informations sur l'état actuel et potentielle de la réserve d'eau souterraine, sur la base de différentes conditions hydrogéochimiques (minéralisation). Cette première estimation est une source d'information très utile pour identifier la priorité des zones cibles et les méthodes appropriées pour la gestion et la protection des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

Références Bibliographiques

- Ahmed Rahmani, R. (2018). Valorisation des ressources en eau dans une zone semi-aride à aride (Cas bassin du moyen Chéelif oriental) [PhD Thesis]. (Mémoire de Magister Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed).
- Apel, M. (2004). A 3d geoscience information system framework [PhD Thesis]. Citeseer. (Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine).
- Artimo, A., Mäkinen, J., Berg, R. C., Abert, C. C., & Salonen, V.-P. (2003). Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer, southwestern Finland. *Hydrogeology Journal*, 11(3), 378-386. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0256-6>.
- Baba Hamed, K. (2007). Hydrodynamique et modelisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche geostatistique application a la nappe de la plaine de Meghnia (NW Algerien) [PhD Thesis]. (Thèse de Doctorat Université de Tlemcen).
- Benmeridja, A. (2004). Base de données, système d'information géographique et modélisation tridimensionnelle de la géologie, de l'hydrodynamisme et de la pollution des eaux souterraines à l'échelle locale : approche intégrée appliquée à la région du Haut Cheliff, plaine de Khemis Miliana. (Mémoire d'Ingénieur, universitaire de Khemis Miliana).
- Bong, N., & Meziani, S. (2013). Application des SIG et de technique de spatialisation pour l'identification, l'évaluation et le développement des ressources en eau souterraine de la plaine de Khemis Miliana. (Mémoire de Master université de Khemis Miliana).
- Bouderbala, A. (2017). Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain, Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, 90(3), 347-356. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0723-7>.
- Bouderbala, A., & Gharbi, B. Y. (2017). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 76(21), 744.
- Boudjenane, I., & Maarouf, N. (2015). Utilisation du système d'information géographique et l'indice de qualité des eaux (IQE) pour évaluer la qualité des eaux

Références Bibliographiques

- souterraines dans la plaine Khemis Miliana. (Mémoire de Master université de Khemis Miliana).
- Bouziane Errahmani, A. (2005). Contribution à l'étude de la protection de la nappe Alluvial du Haut Cheliff. (Mémoire d'Ingéniorat université de Khemis Miliana).
 - Castany, G. (1982). Hydrogéologie principes et méthodes, 196p, 200-202p.
 - Chesnaux, R., Lambert, M., Walter, J., Fillastre, U., Hay, M., Rouleau, A., Daigneault, R., Moisan, A., & Germaneau, D. (2011). Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems : Application to the Saguenay–Lac-St.-Jean region, Canada. *Computers & Geosciences*, 37(11), 1870-1882. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.04.013>
 - Conde, F. C., Martínez, S. G., Ramos, J. L., Martínez, R. F., & Mabeth-Montoya Colonia, A. (2014). Building a 3D geomodel for water resources management : Case study in the Regional Park of the lower courses of Manzanares and Jarama Rivers (Madrid, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 61-66. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2694-3>.
 - Fernandez O, Muñoz JA, Arbue's P, Falivene O, Marzo M (2004). Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: an example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). *Am Assoc Pet Geol Bull* 88(8): 1049–1068.
 - Gharbi, B. (environnement-SIHE-2013). Cartographie de la qualité des eaux souterraines en utilisant les systèmes informations géographiques SIG-3D geomodeling et analyse spatiale: cas d'application la plaine alluviale du Haut Cheliff, ALGERIE.
 - Gogu, R., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., & Dassargues, A. (2001). GIS-Based Hydrogeological Databases and Groundwater Modeling. *Hydrogeology Journal*, 9, 555-569. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0167-3>.
 - Hamdi, M., Zagrarni, M. F., Djamai, N., Jerbi, H., Goita, K., & Tarhouni, J. (2018). 3D geological modeling for complex aquifer system conception and groundwater storage assessment : Case of Sisseb El Alem Nadhour Saouaf basin, northeastern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 143, 178–186.

Références Bibliographiques

- Janssens-Coron, E. (2007). Automatisation du processus de modélisation 3D en hydrogéologie par système expert et ontologies; Proposé de recherche présenté dans le cadre du programme de doctorat en Géomantique.
- Kemp, K. K. (2008). Encyclopedia of Geographic Information Science. SAGE Publications, Inc.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000tww&AN=474337&lang=fr&site=ehost-live>.
- Laughton, R. H. (2011). Aquifers : Formation, Transport, and Pollution. Nova Science Publishers, Inc.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000tww&AN=540305&lang=fr&site=ehost-live>.
- Mahdjoub, A. (2013). Approche intégrée pour la modélisation 3D du gisement d'hydrocarbure d'Ain Zeft sur la plate forme gOcad [PhD Thesis]. (Mémoire de Magister, Université d'Oran2 Mohamed ben Ahmed).
- Margat, J. (2008). Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde. Coédition: UNESCO et BRGM, 52p.
- Mattauer, M. (1958). Etude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). Th.Doct.Es sciences, Besançon, France, 343 p.
- Mohamed, M., & Abdessalam, B. (2011). L'action de pluie sur l'évolution du sol à l'échelle d'une parcelle dans la plaine du haut Chélif (Khemis Miliana).
- Nury S, Zhu X, Cartwright I, Ailleres L (2009). Aquifer visualization for sustainable water management. Manag Environ Quality: Int J 21(2):253–274.
- Perrin, M., Zhu, Z., Rainaud, JF., & Schneider. S. (2005). Knowledge-driven applications for geological modelling. J Pet Sci Eng 47:89–104.
- Petit, O. (2004). La surexploitation des eaux souterraines : Enjeux et gouvernance. Natures Sciences Sociétés, 12(2), 146- 156. <https://doi.org/10.1051/nss:2004020>.
- Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828, 8.

Références Bibliographiques

- Sibson, R. (1981) A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation In Barnett; V., Ed Interpreting Multivariate Data; John Wiley & Sons; New York 21-36.
- Touaibia, W., & Harkat, I. (2019). Etude et utilisation du stress hydrique comme pratique agro-écologique sur la culture de courgette dans la plaine de Khemis Miliana. (Mémoire de Master université Khemis-Miliana).
- Trabelsi, F., Tarhouni, J., Mammou, A. B., & Ranieri, G. (2013). GIS-based subsurface databases and 3-D geological modeling as a tool for the set up of hydrogeological framework: Nabeul–Hammamet coastal aquifer case study (Northeast Tunisia). *Environmental Earth Sciences*, 70(5), 2087-2105.
- Wu, Z., Guo, F., & Li, J. (2019). The 3D modelling techniques of digital geological mapping. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(15), 467. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4615-6>.