

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة العليم العالى والبحث العلى

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة جلالى بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama de Khemis-Miliana



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre Et de l'univers

Filière : Géologie appliquée

Spécialité : Hydrogéologie

**Analyse multicritère pour la sélection d'un réseau de surveillance
qualitatif et quantitatif d'une nappe,
(Cas de la nappe de la Mitidja orientale).**

Présenté par :

FELFOUL Hassiba

MOHAMMED BELKEBIR Sara

Soutenu le : 13 Juillet 2021

Devant le Jury :

Président : Mr. Boucefiane Abdelkader, maitre de conférences B (UKM)

Promoteur : Mr. Saïd Ramdane, maitre-assistant (UKM)

Co-promoteur : Mr. Belaidi Mouloud chef de département a l'agence nationale
des ressources hydrauliques

Examineur : Mr. Bouderbala Abdelkader, maitre de conférences A (UKM)

Année universitaire : 2020 / 2021

Remerciements

Avant tout, nous remercierons Dieu qui a illuminé notre chemin et qui nous a armés de force et le courage, ainsi que la bonne volonté pour achever ce modeste travail.

Toute notre gratitude et notre sincère remerciement à l'ensemble des enseignants de Faculté des Science de la terre de l'université Djilali Bounaama khemis Miliana, Je tiens à remercier tous ceux qui nous ont apporté de près ou de loin leur aide, leurs conseils et leurs encouragements pour mener à bien ce travail. Grâce à leurs contributions, ce mémoire est rendu possible.

Nous remercions notre promoteur qui a bien voulu assurer le suivi de ce travail. Donc mes chaleureux remerciements à Ms Saïd Ramdane, pour avoir accepté de faire diriger ce mémoire ainsi que Mr. Belaidi Mouloud Co-promoteur. Nos respects s'adressent également aux membres du jury Mr. Boucefiane Abdelkader et Mr. Bouderbala Abdelkader qui nous feront l'honneur d'évaluer ce travail.

Nous remercierons toute l'équipe de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique de Blida et Mr. Belaidi Mouloud en particulier pour sa grande contribution dans ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A ma chère maman qui m'a toujours soutenu dans mon travail et pour qui je serai éternellement reconnaissante, que Dieu lui accorde bonne santé, longue vie et miséricorde de Dieu sur mon cher père.

A mes chères sœurs et cousines et mes chers frères pour leurs encouragements et leurs soutien moral, et mes chers neveux : Ahmed et Abdelmalek et mes chères nièces : Djihane, Besma, Melissa, Maya, Ranime et Bouchra.

A mes chères amies : Ines, samah, Ikram, Sara, Fella, Hanine, Ferial.

*Remercie spécialement pour mon binôme MOHAMMED BELKEBIR
SARA*

Je vous aime

FELFOUL HASSIBA

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma très chère maman, et mon Cher père pour leur soutien et leurs prières tout au long de mes études et mes chers grands parents, que Dieu leur procure bonne santé et une longue vie.

A ma chère sœur et mes chers frères

A mes chères amies : Aya, Hounaida, Racha, Fella, Ikram, Hassiba, et Hanine, en souvenir de nos éclats de rire et des bons moments, en souvenir de tout ce qu'on a vécu ensemble, j'espère de tout mon cœur que notre amitié durera éternellement

Mes chaleureux remerciements à mon binôme FELFOUL HASSIBA.

Je vous aime

MOHAMMED BELKEBIR SARA

Résumé

Les eaux souterraines constituent des ressources très prisées pour satisfaire les besoins en eau dans diverses régions de l'Algérie. Elles sont souvent exposées aux risques de pollution engendrés par les activités anthropiques d'une part sont surexploitées par la prolifération des points d'exhaure, d'où la nécessité d'un plan de gestion qui nécessite un suivi de contrôle de leur qualité et de leur état piézométrique. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail, dont l'objectif porte sur l'analyse multicritère pour la conception optimale d'un réseau de surveillance qualitatif et quantitatif des eaux souterraines. Cette contribution a été appliquée aux aquifères de la Mitidja orientale (Algérie).

La définition et l'importance des critères choisis (facteurs et contraintes) qui influencent la conception du réseau de surveillance ont été fondées sur les informations disponibles. Les facteurs pris en compte sont la fluctuation du niveau des nappes, le risque de pollution, le gradient hydraulique et la densité des points d'eau d'où se fait l'exploitation de la nappe. L'analyse hiérarchique des procédés (AHP) a été utilisée pour pondérer les facteurs retenus, Elle est basée sur la pondération des produits des poids relatifs et des cotes prédéterminées relatifs à chaque paramètre. La combinaison de ces paramètres a permis d'établir d'une échelle des priorisations qui varie de 10 à 41. Cela nous a conduits à déterminer 3 classes de priorisation. Les résultats ont été exprimés par la suite sous forme de cartes thématiques indicielle pour chaque critère. Le recouplement de ces cartes thématiques a permis l'établissement de la carte finale caractérisée par des indices finaux qui déterminent les priorisations de surveillance d'eaux souterraine dans la plaine alluviale de la Mitidja orientale.

Les résultats montrent que 24.23% de la région étudiée correspond à des zones de faible priorité, et 51.21% correspond à des zones de moyenne priorité ; tandis que 75.60% correspond à des zones prioritaires qui nécessitent un étouffement du réseau de surveillance.

Mot clés : l'analyse hiérarchique, réseau de surveillance, Mitidja orientale, eaux souterraines, analyse multicritère.

Abstract

Groundwater is a highly valued resource for meeting water needs in various regions of Algeria. They are often exposed to the risks of pollution generated by human activities on the one hand are overexploited by the proliferation of dewatering points, hence the need for a management plan which requires monitoring of their quality and control. Their piezometric state. It is in this perspective that our work falls within the scope of the multi-criteria analysis for the optimal design of a qualitative and quantitative groundwater-monitoring network. This contribution was applied to the aquifers of the eastern Mitidja (Algeria).

The definition and importance of the selected criteria (factors and constraints) that influence the design of the surveillance network were based on the available information. The factors taken into account are the fluctuation of the groundwater level, the risk of pollution, the hydraulic gradient and the density of the water points from which the groundwater is exploited. Hierarchical process analysis (AHP) was used to weight the selected factors. It is based on the weighting of the products of the relative weights and predetermined ratings for each parameter. The combination of these parameters made it possible to establish a prioritization scale that varies from 10 to 41. This led us to determine 03 prioritization classes. The results were then expressed in the form of index thematic maps for each criterion. The crosschecking of these thematic maps made it possible to draw up the final map characterized by final indices that determine the priorities for monitoring groundwater in the alluvial plain of the eastern Mitidja.

The results show that 24.23% of the studied region corresponds to low priority areas, and 51.21% to 75.60% corresponds to medium priority areas; while 100% corresponds to priority areas, which require an expansion of the surveillance network.

Keywords: hierarchical analysis, monitoring network, Eastern Mitidja, groundwater, multicriteria analysis.

ملخص

المياه الجوفية هي مورد ذو قيمة عالية لتلبية الاحتياجات المائية في مختلف مناطق الجزائر. غالبًا ما يتعرضون لمخاطر التلوث الناجم عن الأنشطة البشرية من ناحية الاستغلال المفرط بسبب تكاثر نقاط نزح المياه، ومن ثم الحاجة إلى خطة إدارة تتطلب مراقبة جودتها والتحكم فيها. من هذا المنظور، يقع عملنا في نطاق التحليل متعدد المعايير من أجل التصميم الأمثل لشبكة مراقبة المياه الجوفية النوعية والكمية. تم تطبيق هذه المساهمة على طبقات المياه الجوفية في شرق ميطجة (الجزائر)

إن تعريف وأهمية المعايير المختارة (العوامل والقيود) التي تؤثر على تصميم شبكة المراقبة استند إلى المعلومات المتاحة. العوامل التي تؤخذ في الاعتبار هي تقلب مستوى المياه الجوفية، وخطر التلوث، والتدرج الهيدروليكي وكثافة نقاط المياه التي يتم لوزن العوامل المختارة، وهو يعتمد على ترجيح منتجات (AHP) استغلال المياه الجوفية منها. تم استخدام تحليل العملية الهرمية الأوزان النسبية والتقديرية المحددة سلفًا لكل متغير. أتاح الجمع بين هذه المعلمات إمكانية إنشاء مقياس ترتيب للأولويات يتراوح من 10 إلى 41. وقد أدى ذلك بنا إلى تحديد 3 فئات لتحديد الأولويات. ثم تم التعبير عن النتائج في شكل خرائط موضوعية فهرسة لكل معيار. أتاح التدقيق المتقاطع لهذه الخرائط الموضوعية إمكانية رسم خريطة نهائية تتميز بمؤشرات نهائية تحدد أولويات مراقبة المياه الجوفية في السهل الغربي شرق ميطجة.

تظهر النتائج أن 24.23% من المنطقة المدروسة تقابل مناطق ذات أولوية منخفضة، و51.21% إلى 75.60% تقابل مناطق ذات أولوية متوسطة. بينما تتوافق نسبة 100% مع المجالات ذات الأولوية التي تتطلب توسيع شبكة المراقبة.

الكلمات المفتاحية: التحليل الهرمي، شبكة المراقبة، شرق ميطجة، المياه الجوفية، التحليل متعدد المعايير.

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Aperçu bibliographique et généralités	3
I. INTRODUCTION	4
II. Réseau de surveillance qualitative et quantitative des eaux souterraines.....	4
II.1 Généralité sur les réseaux de surveillance	4
II.2 Type des réseaux de surveillance	4
II.2.1 Le réseau quantitatif	4
II.2.2 Les réseaux de contrôle qualitatif	5
III. Objectif des réseaux de surveillance	5
III.1 La durée et fréquence d'une surveillance des eaux souterraines	6
III.2 Entretien des points du réseau de surveillance	7
IV. Etablissement et choix des réseaux de surveillance	7
IV.1 Les critères utilisés.....	7
IV.2 Choix des points de mesures	8
IV.3 Sélection du réseau piézométrique	8
IV.4 Orientation et choix du nombre des points d'accès à l'eau souterraine	9
IV.5 Les substances et paramètres à suivre	10
IV.6 Proposition de trame de rapport pour une campagne de surveillance des eaux souterraines.....	10
V. Méthodologie pour le choix des points du réseau de surveillance (A. Blum, JP. Comte, 2006).	12
V.1 Approche de type systématique.....	12
V.2 Approche de type intégrative	12
V.3 Approche par analyse multicritère	12
V.3.1 Introduction	12
V.3.2 Principe.....	13
V.3.3 Les étapes de l'analyse multicritère	13
V.3.4 Les méthodes d'analyse multicritère - avantages et les inconvénients-	14
V.3.4.1 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)	14
V.3.4.2 Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS)	14

V.3.4.3 Méthodes de sur classement	14
1-Les méthodes d'élimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE).....	15
2. Les méthodes de Préférence Ranking Organisation method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)	15
V.3.4.4 Comparaison des méthodes	16
V.4 Principes fondamentaux de la méthode AHP (Guesdon, 2011).....	17
V.4.1 Les étapes de la méthode AHP	18
V.4.2 Les critères qui influencent la conception de réseaux de surveillance.....	19
V.4.2.1 Fluctuation des eaux souterraines.....	19
V.4.2.2 Risque de pollution	19
V.4.2.3 Gradient hydraulique.....	19
V.4.2.4 Densité des points d'eau	19
VI. Conclusion	19
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	21
I. Présentation de la zone d'étude	22
I.1. Situation géographique et présentation la plaine de Mitidja.....	22
I.2. Géomorphologie :.....	22
I.3. Hydrographie	23
I.3.1 Réseau hydrographique	23
I.4. La végétation	24
II. Hydro-climatologie.....	26
II.1 Introduction.....	26
II.2 La pluviométrie	26
II.3 La Température.....	28
III. Cadre geologique	29
III.1 Introduction	29
III.2 Stratigraphie	29
III.2.1 Le Primaire.....	29
III.2.2 Le Secondaire.....	29
III.2.3 Le Miocène et roches plus anciennes.....	30
III.2.4 Les formations les plus anciennes.....	30
III.2.5 L'Oligocène	30
III.2.6 Le Miocène	30
III.2.7 Le pliocène.....	30
III.2.8 Le Quaternaire.....	30
III.3 Évolution paléogéographique et tectonique	31
III.3.1 La Tectonique.....	31
III.3.2 Évolution paléogéographique	32
III.4 Contexte géologique local de la Mitidja est	34
IV. Hydrogéologie.....	35
IV.1 Identification des aquifères	35

IV.1.1 L'aquifère de l'Astien	36
IV.1.2 L'aquifère des alluvions de la Mitidja.....	37
IV.2 Alimentation de la nappe.....	37
IV.3 Géométrie des aquifères dans la région d'étude et caractéristiques hydrodynamiques.....	38
IV.4 Piézométrie	39
IV.4.1 Comportement hydrodynamique de la nappe.....	39
IV.4.2 Evolution de la piézométrie.....	40
V. Propriétés physico-chimique et risques de pollution.....	42
V.1-Propriétés physico-chimiques	42
V.2-Risques de pollutions par les activités anthropiques.....	43
V.2.1 Population et risques de pollution d'origine urbaine	43
V.2.2 Agriculture	44
V.2.3 Industrie	44
V.2.4 Pollution accidentelle par les hydrocarbures	44
V.2.4 Pollution par le biseau salé dans la baie d'Alger	44
VI. Conclusion	45
Chapitre III : Application.....	46
I. Description et état du réseau de surveillance qualitatif existant	47
II. Paramètres mesurés au niveau du réseau de surveillance.....	49
II.1 Fluctuation de la surface piézométrique pour la période 1980-1990.....	49
III. Partie terrain.....	52
III.1 Matériels utilisés	52
III.2 Mesure du niveau statique.....	58
IV. Conclusion	54
V Critères retenus	55
V.1 Critère fluctuation de la nappe	55
V.2 Critère risque de pollution.....	55
V.3 Critère de gradient hydraulique	56
V.4 Critère de densité des points d'eaux	56
VI. L'application de la méthode AHP	56
VI.1 Processus de pondération	57
VI.2 Calcule des indices	59
VI.2.1 Les indices partiels.....	59
VI.2.2 Les indices finaux.....	60
VI.3 Cartographie	61
VI.4 Interprétations de cartes	62
VI.4.1 Carte de fluctuation	62
VI.4.2 Carte de risque de pollution.....	62
VI.4.3 Carte du Gradient hydraulique	63
VI.4.4 Carte de densité des points d'eau	63

VI.5.5 L'interprétation de la carte finale	68
Conclusion générale	71
Référence bibliographique.....	74

LISTE DES FIGURES

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	21
Figure I-1 Situation géologique de la plaine de la Mitidja sur fond de feuille topographique au 1/200000	22
Figure I-2 Carte des reliefs représentant la dépression de la Mitidja	23
Figure I-3 Situation de la zone d'étude et réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja.	24
Figure I-4 Sous bassins versants de la Mitidja Est (Nouara., 2010)	25
Figure I-5 Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El-Harrach.	25
Figure II-1 Histogramme des précipitations moyennes mensuelles période (2000-2018).....	27
Figure II-2 Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000-2018)	28
Figure II-3 Histogramme des variations de température à la station de dar el Beida (1985-2018)	29
Figure III-2 Carte géologique de la plaine de la Mitidja, ANRH (Cheriet Abdelkarim,2018).	31
Figure III-3 Paléogéographie de la Mitidja (d'après Glangeaud).....	33
Figure III-4 Evolution paléogéographique de la plaine la Mitidja	34
Figure III-5 Coupe géologique longitudinale de la Mitidja Est (Binnie et Atkins, 1983).	35
Figure III-6 Coupe géologique issus de l'interprétation des sondages géophysique, CGG, septembre 1968).....	35
Figure IV-1 Coupe interprétative transversale de la Mitidja dans le bassin de mazafran, carte hydrogéologique de la région d'Alger ANRH,1972(Mohamed Ali Bachir, 2017).....	36
Figure IIV-1-2 Coupe géro-électriques issues de l'interprétation des sondages géophysiques (CGG,1972).	37
Figure IV-3 Log hydrogéologique de la plaine de la Mitidja (ANRH, 2000)	38
Figure IV-4 Carte des transmissivités de la plaine de la baie d'Alger en m2/jour (Binnie et Atkins, 1983).	39
Figure IV-5 carte piézométrique de la plaine de la Mitidja (ANRH,2000).	40
Figure IV-6 Carte piézométrique de la plaine de la Mitidja (Binnie and partenrs,1981-1982).	41
Figure IV-7 Chronique piézométrique sur le piézométrique PZ Hamiz	41
Figure V-1 Diagramme de piper sur les analyses d'eau réalisées	42
dans la partie supérieure de l'aquifère, Campagne de Mai 2005(SOGREAH, ANRH, 2021).....	42
Figure V-2 Diagramme de piper sur les analyses d'eau dans la partie avale, campagne de septembre2007 (SOGREAH, ANRH, 2021).....	43
Chapitre III : Application.....	46
Figure 1-1 Carte de localisation des points d'accès à la nappe (piézomètres).....	48
Figure II-1 Chronique piézométrique des 23 piézomètres de l'ANRH du piézomètre PZ2 de la SEAAL (Meddi Mohammed).....	50
Figure II-2 Evolution de la production du champ captant du Hamiz, Evolution de la cote piézométrique au niveau de la Baie d'Alger et Evolution de la pluviométrie moyenne annuelle.	51
Figure II-3 Evolution du niveau piézométrique du forage E008-04603 Rouïba, période 1990-1995 (Meddi Mohammed).....	51
Figure II-4 Evolution du niveau piézométrique du piézomètre E008-04212 Rouïba, période 1995-2000(Meddi Mohammed).....	52
Figure II-5 Evolution du niveau piézométrique du forage E008-04596 Baraki,période 1999-2010(Meddi Mohammed).....	52

Figure III-1 Piézomètre et escabeau utilisé	57
Figure III-2 Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la plaine de la Mitidja orientale.....	57
Figure III-3 Sonde utilisée pour les mesures.....	58
Figure IV-1 Le gradient hydraulique.	56
Figure VI-1 Construction de différentes cartes et par addition des indices des zones prioritaires.	61
Figure VI-2 Carte de fluctuation des eaux souterraine de la nappe de la Mitidja.	64
Figure VI-3 Carte de risque de pollution de la nappe de la Mitidja.....	65
Figure VI-4 Cartes de gradient hydraulique de la nappe de la Mitidja.	66
Figure VI-5 Carte de la densité des points d'eau de la nappe de la Mitidja.	67
Figure VI-6 Carte des zones prioritaires pour la surveillance du niveau des eaux souterraine.	69

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Aperçu bibliographique et généralités	3
Tableau III-1 Contextes de gestion et durée d'une surveillance du milieu eau souterraine	6
Tableau IV-1 Nombre minimal de forages à considérer pour différents contextes (sur site et hors site, afin de définir l'extension du panache en cas de pollution : vert en amont hydraulique, rouge en aval et boussole donnant sens d'écoulement, Guérin, Mai).	9
Tableau IV-2 Check liste pour les rapports de suivi (Guérin, Mai 2018)	11
Tableau V-1 Principaux avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multi-attribut (Ayadi, 2010)	16
Chapitre II : Présentation de la zone d'étude	21
Tableau I-1 Paramètres géométriques et morphométriques des sous bassins versants (Khoualed Radja, 2017).	26
Tableau II-1 Caractéristiques des stations pluviométriques (Nouara., 2010).....	26
Tableau IV-1 Infiltration directe sur les affleurements perméables (Mohammed, 2015)	37
Tableau V-1 Population 1998-2020.....	43
Chapitre III : Application.....	46
Tableau VII-1 Caractéristiques des piézomètres de la zone d'étude (ANRH).....	53
Tableau VI-1 Le poids selon l'ordre d'importance pour chaque critère	58
Tableau VI-2 Indice de cohérence aléatoire (Saaty, 1991)	59
Tableau VI-3 Calcule les indices	60
Tableau VI-4 Pourcentage des zones prioritaires.....	60

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans la plaine de la Mitidja, l'activité économique et sociale est très importante nécessitant l'utilisation de la ressource en eau puisée essentiellement des nappes d'eau souterraine. C'est ainsi que de nombreux forages et puits ont été réalisés pour satisfaire les besoins des différents secteurs industriels, agriculture et l'alimentation en eau potable de la population. Face à cette situation et la régression des réserves d'eau souterraines qui se manifestent par une baisse progressive et accentuée du niveau piézométrique, ainsi que les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines souvent menacées par les rejets industriels, l'activité agricole et les eaux usées non traitées, la nécessité de surveillance de la ressource aussi bien sur le plan qualitatif et quantitatif devient impérative. Cela a été fait par l'instauration d'un réseau de surveillance des eaux souterraines par l'agence nationale des ressources hydrauliques.

Ce réseau couvre toute la plaine de manière à avoir une idée sur le changement périodique spatial de la surface piézométrique. Il a été conçu dans l'optique d'éviter toute atteinte à l'équilibre écologique. Il permet de signaler tout changement quantitatif et qualitatif opéré au niveau de la nappe.

Le service de l'ANRH qui exploite ce réseau songe toujours à améliorer ce réseau par la proposition de nouveaux points d'eau qui permettront de surveiller, à la fois, la piézométrie et l'aspect qualitatif pour effectuer des analyses périodiques en fonction des spécificités de chaque région de la nappe. Dans le but d'étoffer ce réseau, nous apportons notre contribution pour cibler les zones de priorité par rapport à d'autres pour une meilleure représentativité de ce réseau dans le cas de sa généralisation ou de son extension.

C'est dans cette optique que notre travail, dont les objectifs ont été proposés par l'ANRH, a été effectué. Pour ce faire, nous avons opté pour une méthode multicritère basée sur l'analyse de divers paramètres hydrogéologiques et environnementaux qui ont leur importance ou leur influence sur les ressources en eau souterraine aussi bien d'un point de vue qualitatif que quantitatif. Cette analyse a été effectuée selon la méthode d'analyse hiérarchique (AHP), la plus utilisée dans plusieurs domaines notamment de la gestion des ressources en eau. Son apport porte sur son aide à la prise de décision en intégrant plusieurs critères et arrivant à un choix justifié. La décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise. Cette méthode repose sur l'utilisation de quatre critères retenus pour cette application. Elle est basée sur la pondération des produits des poids relatifs et des cotes prédéterminées relatifs à chaque paramètre. La combinaison de ces paramètres a permis d'établir une échelle des priorisations qui varie de 10 à 41. Cela nous a conduits à déterminer 3 classes de priorisation. Les résultats ont été exprimés par la suite sous forme de cartes thématiques indicelles pour chaque critère. Le recoupement de ces cartes thématiques a permis l'établissement de la carte finale caractérisée par des indices finaux qui déterminent les priorisations.

Le présent travail est structuré selon les chapitres suivants :

Le chapitre 01 consacré à un aperçu bibliographique dans lequel ont été décrits les réseaux de surveillance qualitative et quantitative des eaux souterraines, leurs buts, les méthodes classiques de leur instauration, suivi d'un examen et critique du réseau de surveillance existant dans la plaine de la Mitidja orientale qui englobe notre région d'étude. Ce chapitre compile également un résumé des différentes méthodes d'analyse pour le choix et la répartition des points d'accès à la nappe.

Le second chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. On y trouve une synthèse hydrogéologique de la plaine alluviale de la Mitidja Orientale. Aussi, les aspects liés à la géologie, climatologie et géomorphologie et à la piézométrie ont été abordés. Les aspects environnementaux ont été également décrits notamment ceux liés à la qualité de l'eau d'une manière générale et aux menaces de pollution qui « guettent » la nappe de la Mitidja orientale.

Et enfin, le dernier chapitre est exclusivement consacré à l'application de la méthode d'analyse multicritère à la nappe de la Mitidja orientale avec interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I : Aperçu bibliographique et généralités

I INTRODUCTION

Les systèmes d'eau souterraine sont dynamiques et sont continuellement sous l'influence des changements du climat à court et à long terme, des prélèvements des eaux souterraines et des risques de pollution. Les mesures du niveau d'eau dans les piézomètres sont la principale source d'information sur les contraintes hydrologiques agissant sur les aquifères et sur la surexploitation des réserves. La qualité des eaux est appréciée par analyses systématiques des eaux prélevées dans des points d'accès à la nappe qui constituent le réseau de suivi qualitatif.

À long terme, les mesures des niveaux d'eau fournissent des données essentielles nécessaires pour évaluer les changements de la ressource à l'échelle du temps et de l'espace, pour développer des modèles de tendances et de prévisions des eaux souterraines et pour concevoir et mettre en œuvre un plan de gestion de la nappe aussi bien sur le plan qualitatif et quantitatif.

II Réseau de surveillance qualitative et quantitative des eaux souterraines

II.1 Généralité sur les réseaux de surveillance

La surveillance des eaux souterraines et l'acquisition de données sur les eaux souterraines sont des préalables pour toute gestion efficace des ressources en eaux souterraines, tant en termes de qualité et de disponibilité de la ressource elle-même. En raison de la complexité des systèmes d'eau souterraine, la conception et le fonctionnement d'un contrôle efficace des eaux souterraines est loin d'être simple. Les systèmes de surveillance bien conçues sont capables de fournir des informations vitales à un coût raisonnable sur l'aquifère (Vanessa Vaessen, 2015).

La surveillance des eaux souterraines doit toujours être axée sur la cible. Cela signifie que la question de gestion doit être définie d'abord et la surveillance doit être conçue en conséquence. De cette façon, le but de la surveillance et ses résultats sont d'autant mieux reconnus par les gestionnaires de l'eau, ainsi que les usagers de l'eau qui à la fin vont supporter le coût de la surveillance. Le suivi ne doit jamais devenir un but en soi. (Vanessa Vaessen, 2015)

II.2 Type des réseaux de surveillance

Classiquement les systèmes aquifères sont dotés de deux réseaux de surveillance ; à savoir : (Miquel, 18 mars 2003)

II.2.1 Le réseau quantitatif

Le réseau quantitatif, dit aussi réseau piézométrique, a pour but de suivre l'évolution quantitative de la ressource ainsi que les fluctuations du niveau piézométrique. Le paramètre mesuré est la profondeur de l'eau dans la nappe, appelé le niveau piézométrique de la nappe. Un piézomètre est un instrument qui mesure le niveau de l'eau souterraine. Dans le cas des nappes libres, le niveau est apprécié par mesure de la profondeur (quand la nappe se décharge, le niveau baisse et inversement). Dans le cas des nappes captives, le niveau est apprécié par la pression d'eau.

La mesure piézométrique peut être effectuée :

- **Ponctuellement** : par une sonde manuelle : la sonde est accrochée à un ruban métré, que l'on descend dans l'ouvrage. Lorsque la sonde atteint l'eau, un contact électrique se fait déclenchant une sonnerie et/ou un voyant lumineux. La lecture du ruban renseigne sur la profondeur de l'eau.

- **Régulièrement** : à l'aide d'enregistreur automatique, avec données télétransmises, les mesures sont réalisées dans des forages, puits ou piézomètre

II.3.2 Les réseaux de contrôle qualitatif

Les réseaux de contrôle qualitatif, juxtaposition de plusieurs réseaux distincts destinés à suivre la qualité de l'eau prélevée pour l'eau potable, la qualité des eaux souterraines dans leur globalité, ou seulement relatif à quelques paramètres chimiques prédéfinis.

La surveillance peut jouer un rôle de détection en venant par exemple compléter des dispositifs de prévention, ou de suivi selon que la pollution des eaux souterraines est avérée ou non. Dans le cas où l'impact est avéré, la surveillance permet en outre d'aider à la recherche de la source de polluant et d'envisager des mesures adéquates pour la gestion de cet impact.

Enfin, la surveillance constitue aussi, au droit de certains sites pollués, un outil de maîtrise et la gestion des phénomènes d'atténuation naturelle de certains polluants.

III Objectif des réseaux de surveillance

Il y a quatre objectifs de base pour l'établissement d'un système de surveillance :

- **Suivi des ressources** : pour améliorer la compréhension du système aquifère dans un bassin (recharge, décharge, interaction avec les eaux de surface, les changements dans la qualité et la quantité au fil du temps).

- **Surveillance de la conformité** : pour obtenir des informations sur l'efficacité des mesures de gestion. Cela a deux dimensions principales :

- a) Mesure de l'usage des eaux souterraines et la réponse de l'aquifère : recueillir les informations nécessaires pour les mesures de gestion liées à la quantité (restriction sur le nombre de puits, ainsi que les débits et l'espacement des forages ou la réglementation pour prévenir les niveaux d'eau des forages et champs de forages de descendre en dessous d'un certain seuil).

- b) Mesure des paramètres de qualité des nappes d'eau souterraine captées pour vérifier le respect des teneurs maximales prescrites.

- **Suivi de la protection des impacts potentiels sur les infrastructures spécifiques des eaux souterraines ou sur les eaux souterraines** : des exemples typiques sont la protection des :

- a) Champs de forages ou des sources d'approvisionnement en eau publique contre les risques d'épuisement et de menaces sur la qualité des eaux ;

- b) Infrastructures urbaines contre les affaissements de terrain ou les inondations causées par les remontées de nappes ;

- c) Sites archéologiques contre la hausse de niveau des nappes phréatiques ;

- d) Réserves stratégiques d'eau contre les risques d'épuisement ou de dégradation de la qualité.

- e) Écosystèmes dépendants des eaux souterraines contre des changements indésirables en quantité et/ou en qualité de l'eau.

- **Suivi du confinement de la pollution pour fournir des informations d'alerte précoce sur les impacts des risques potentiels de pollution provenant de :**

- a) L'utilisation intensive des terres agricoles ;
- b) Sites industriels de secteurs spécifiques ;
- c) Sites d'enfouissement de déchets solides ;

(Vanessa Vaessen, 2015).

III.1 La durée et fréquence d'une surveillance des eaux souterraines

La durée d'une surveillance peut aller d'une à deux campagnes dans le cadre de la définition d'un fond hydrogéochimique ou environnement local témoin (état initial ou rapport de base) à plusieurs campagnes annuelles, selon une fréquence plus ou moins élevée comme l'atteste le tableau ci-dessous :

Tableau IIII-II-1 Contextes de gestion et durée d'une surveillance du milieu eau souterraine (Guérin), Mai 2018).

Contexte de gestion		Objectif	Durée	
Incident/ Accident	Découverte d'une pollution récente	<ul style="list-style-type: none"> • Suivre l'impact sur les eaux souterraines, • Évaluer l'efficacité d'un traitement en cours 	Tant que le critère de gestion n'est pas atteint	De quelques mois à plusieurs années
Cessation d'activité	Arrêt de l'activité ICPE	<ul style="list-style-type: none"> • S'assurer de l'absence d'impact de l'activité sur le milieu eau souterraine 	Surveillance sur une durée permettant de constater l'état du milieu en conditions de hautes et basses eaux	De quelques mois à plusieurs années selon les éventuelles données déjà disponibles (liées en particulier à l'auto surveillance) ou le type d'activité

La fréquence de l'échantillonnage doit elle aussi être adaptée au contexte hydrogéologique, aux polluants recherchés ainsi qu'aux enjeux. Sa détermination peut s'appuyer sur un calcul tel que celui présenté ci-dessous. Il est toutefois nécessaire de disposer d'un minimum d'éléments avant de déterminer la fréquence la plus adaptée (étude hydrogéologique préalable).

La vitesse effective de l'eau dans les formations poreuses saturées est déterminée par l'équation suivante :

$$V_e = K_i / n_e \text{ Avec :}$$

V_e : vitesse effective

K : conductivité hydraulique

i : gradient hydraulique (variation de charge hydraulique entre deux points de mesure, $i = (H_2 - H_1)/L$)

n_e : porosité efficace

Lorsqu'il s'agira de contrôler l'absence d'impact en direction d'un enjeu, le temps de transfert « t » entre le forage de contrôle et l'enjeu, séparés par une distance « d », est estimé de la manière suivante :

$$t = d / Ve \text{ Avec :}$$

t : temps de transfert

d : distance entre le forage de contrôle et l'enjeu

Ils existent aussi d'autres formules qui permettent de déterminer ce temps de transfert comme celle de Wissling et Lallemand Barres et J.C Croux qui considère qu'une particule peut parvenir au forage de pompage au bout du temps de transfert exprimé par $t = \sqrt{\pi bnr} / Q$

Q = débit du forage en m³/s

b = épaisseur de l'aquifère en mètre

n = porosité cinématique équivalente au coefficient d'emménagement dans le cas des nappes libres.

R : distance au puits du point considéré en (m)

t : temps de transfert (s)

Ce temps de transfert peut donc être retenu pour établir une fréquence des mesures tant d'un point de vue quantitatif et qualitatif notamment.

III.2 Entretien des points du réseau de surveillance

Pour garantir la bonne représentativité d'un point d'accès à l'eau souterraine, il est recommandé d'effectuer des vérifications, plus ou moins régulières comme : la profondeur, le rabattement au cours de la purge, qui sont des indices de dégradation du piézomètre ou du forage de prélèvement. Il existe également des caméras permettant de vérifier de visu l'état de l'ouvrage, une inspection caméra est ainsi recommandée tous les 8 ans notamment en cas d'hydrogéochimie « agressive » (faible ou fort Ph, biodégradation en cours, fortes teneurs en Fe, Mn par exemple). (Guérin, Mai 2018)

IV Etablissement et choix des réseaux de surveillance

IV.1 Les critères utilisés

Pour rappel, la mise en place de la surveillance des eaux souterraines s'appuie sur une étude hydrogéologique préalable. Cette étude considère généralement différents critères repris ci-après. (Guérin, Mai 2018)

- **La géologie** (lithologie, présence de failles, karstification, etc.) ;

- **L'hydrogéologie** (nombre et typologie du ou des aquifères, type de nappe : libre captive, semi-captive ; épaisseur de la zone non saturée ; perméabilité ou conductivité hydraulique ; variation périodique du niveau piézométrique, de la direction, sens et vitesse d'écoulement des eaux souterraines, etc.) ;

- **L'hydrologie** (pluviométrie et infiltration efficace, présence d'eau de surface, niveau limnométrique, relation avec l'eau souterraine, etc.) ;

• **L'hydrogéochimie** (notamment Ph, redox ou Eh, déterminants pour appréhender la mobilité des polluants, en particulier dans le cas des ETM – métaux et métalloïdes).

Ces critères sont indispensables pour définir le réseau (position, nombre et profondeur) et évaluer la vulnérabilité intrinsèque de la (des) nappe(s) au droit du site.

IV.2 Choix des points de mesures

Mesures ponctuelles : un piézomètre comme point d'accès à la nappe (puits, forage) permettant le suivi périodique de cette nappe

- Suivi temporel en général
- Observer l'influence d'un point sur un autre (ex : essai de pompage, pollutions...)

Mesures en réseau : des piézomètres (réseau piézométrique) pour le suivi périodique du niveau de l'eau des nappes souterraines

- Suivi spatialisé et vue d'ensemble
- Localisation (horizontalement et verticalement)
- Représentativité du territoire de la nappe :
- Surface, géologie, topographie, réseau hydrographique
- Dynamique (à l'échelle de la réponse hydrogéologique)
- Quel(s) aquifère(s) observé(s) – suivi(s)
- Objectifs du réseau, scientifique, opérationnel...etc. (Lise ponchat, 2015)

IV.3 Sélection du réseau piézométrique

Toutes les procédures de surveillance du niveau d'eau dépendent du fonctionnement du réseau de puits d'observation.

Les puits d'observation sont des puits spécialement sélectionnés pour collecter des données sur le niveau d'eau dans un ou plusieurs aquifères désignés. Les décisions concernant le nombre et l'emplacement géographique des puits d'observation sont essentielles à tout programme de collecte de données sur les niveaux d'eau.

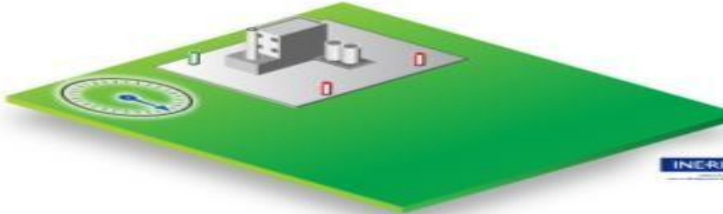
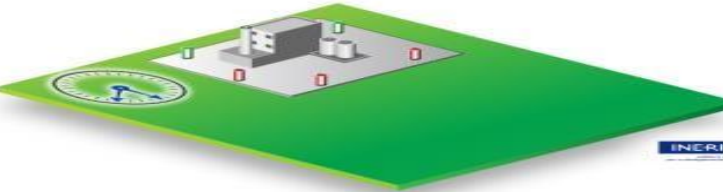
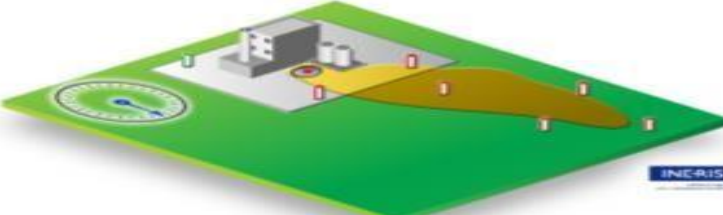
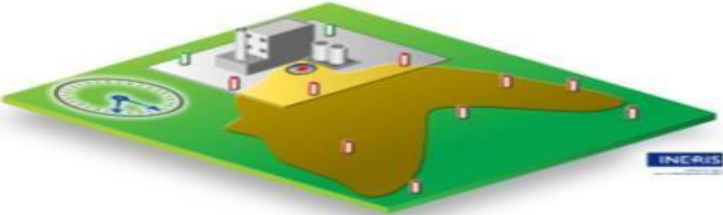
Idéalement, les points de mesure sélectionnés pour le réseau de puits d'observation fourniront des données représentant divers environnements topographiques, géologiques, climatiques et d'utilisation des terres. La détermination de la répartition des zones des puits d'observation et de la profondeur de complétion devrait également tenir compte des limites physiques et de la complexité géologique de l'aquifère à l'étude. Les programmes de surveillance du niveau d'eau pour les systèmes aquifères complexes et multicouches peuvent nécessiter des mesures dans des puits réalisés à plusieurs profondeurs dans différentes unités géologiques. Les données obtenues à partir des programmes de points d'observation sont utilisées pour déterminer : (McCobb, 2003)

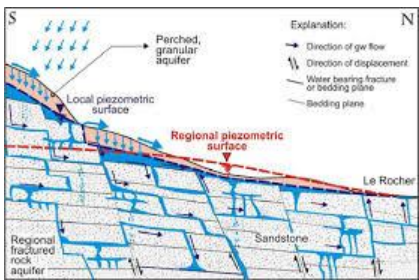
- L'effet des prélèvements sur les conditions de recharge et de décharge,
- Les caractéristiques hydrauliques des systèmes d'eau souterraine,
- L'étendue et le degré de confinement des aquifères.

IV.4 Orientation et choix du nombre des points d'accès à l'eau souterraine

Le nombre et la localisation des piézomètres sont des choix reposant principalement sur les informations disponibles sur le contexte naturel et les enjeux. Le nombre indiqué dans le tableau suivant correspond bien au nombre de piézomètres requis pour mener à bien la surveillance. Le nombre va également être fonction d'autres facteurs comme la taille du site, l'existence d'une ou plusieurs sources de pollution, etc. Il est important de signaler que l'implantation de piézomètres en amont du site étudié est indispensable afin d'être en mesure de discerner la part de pollution potentiellement imputable aux activités du site. (Guérin, Mai 2018)

Tableau IIIV-1 Nombre minimal de forages à considérer pour différents contextes (sur site et hors site, afin de définir l'extension du panache en cas de pollution : vert en amont hydraulique, rouge en aval et boussole donnant sens d'écoulement, Guérin, Mai).

Contexte	Nombre minimal de piézomètres	Illustration
Pollution non détectée Une seule direction, sens d'écoulement	3	
Pollution non détectée Variation direction, sens d'écoulement	5	
Pollution détectée Une seule direction, sens d'écoulement	6-8	
Pollution détectée Variation direction, sens d'écoulement	10-12	

<p>Autres cas : milieu fracturé, phase plongeante (DNAPL), nappes superposées, etc.</p>	<p>> 12</p>	
--	----------------	--

Lorsque des ouvrages hors site préexistent, ils peuvent être intégrés au réseau de surveillance à condition qu'ils permettent l'accès à certaines informations. La coupe de forage est également un élément important afin de juger de la pertinence de ce point au regard de la zone crépinée ou encore des terrains traversés.

Il pourra donc être nécessaire d'implanter un réseau resserré et/ou densifié pour être à même d'intercepter un éventuel panache avec un degré d'incertitude acceptable.

IV.5 Les substances et paramètres à suivre

Selon le contexte, les éléments à intégrer au programme analytique peuvent varier. Dans le cas d'une surveillance préventive, le programme analytique doit contenir :

- Les traceurs spécifiques du site (« signature du site ») ;
- Les traceurs de mobilité : substances les plus mobiles (sels, chlorures, sulfates, etc.) et les plus persistantes ;
- Les substances « porteuses » du risque : toxiques, cancérigènes ;
- Quelques paramètres globalisants (Ph, Eh, conductivité, température, oxygène dissous, etc.) dont les conditions physico-chimiques qui sont des éléments de compréhension des mécanismes liés au transport du polluant.

Dans le cas d'une surveillance destinée à suivre des polluants biodégradables, ce programme analytique est complété par :

- Les molécules mères et les molécules filles (produits de dégradation) ;
- Les accepteurs/donneurs d'électrons (indices d'atténuation naturelle comme le fer, les sulfates, les nitrates, etc.). (Guérin, Mai 2018).

IV.6 Proposition de trame de rapport pour une campagne de surveillance des eaux souterraines

Le rapport relatif à une campagne de surveillance a pour objet de :

- Résumer la campagne réalisée ;
- Restituer les résultats acquis au cours de l'intervention ;

- Mettre en évidence un éventuel impact ou une évolution non attendue d'une pollution préalablement identifiée et en cours de gestion depuis la précédente campagne.

Le rapport de suivi à rédiger porte sur la campagne « N » menée dans le cadre d'une surveillance basée sur une fréquence donnée, les campagnes précédentes N-1, N-2, etc. ont fait l'objet de rapports antérieurs, dont les résultats seront intégrés dans le rapport de la campagne N afin de faire ressortir les évolutions temporelles.

Ce modèle concerne plus particulièrement la restitution d'une surveillance menée sur du moyen à du long terme dans le cadre d'une surveillance en cours d'activité, après cessation d'activité ou pour une opération de dépollution (Guérin, Mai 2018).

Tableau IIIV-2 Check liste pour les rapports de suivi (Guérin, Mai 2018)

Place dans le sommaire proposé	Information à intégrer	Sources potentielles information
Contexte de gestion	Cadre du suivi (surveillance préventive, surveillance post accidentelle, etc.)	Arrêté de wilaya
Contexte de gestion	Schéma conceptuel (intégrant les ouvrages de surveillance)	Rapports techniques antérieurs (étude d'impact, diagnostic, bilan quadriennal, etc.)
Contexte de gestion	Critères de gestion (valeurs de concentrations pour substances suivies ou niveaux de flottants, etc.)	Arrêté de wilaya ou rapports techniques antérieurs (plan de gestion, etc.)
Références documentaires et méthodologies	Références utilisés	
Présentation de la campagne menée	Présentation du suivi actuel (points, substances et paramètres, fréquence), du protocole de prélèvement	Étude hydrogéologique ayant servie à la définition du réseau ou précédent rapport de suivi, bilan quadriennal Arrêt de wilaya
Présentation de la campagne menée	Présentation des caractéristiques des ouvrages (diamètres, position des crépines, niveaux d'eau) et résultats du nivellement (par un géomètre professionnel en NGF) avec indication du niveau repère	Rapport(s) de forage Rapport(s) de nivellement
Présentation de la campagne menée	Réalisation de l'échantillonnage et des mesures associées (remarques éventuelles sur l'état des forages ou toute autre observation pouvant agir sur la représentativité des résultats)	Fiche(s) de prélèvement, Compte rendu de mission de l'équipe de préleveurs (à compléter d'échanges à tracer si besoin)
Présentation de la campagne menée /Annexes	Illustrations : Cartes piézométriques Cartes et/ou chroniques de concentrations, de paramètres physico-chimiques	Résultats des mesures (niveaux, physico- chimie) Fiche(s) de prélèvement Bordereaux d'analyses
Interprétation des résultats	Levée de doute vis-à-vis des résultats illustrés si ceux-ci mettent en exergue une incohérence	Contacts avec le préleveur, le laboratoire, interroger le donneur d'ordre quant à de récents travaux sur site, etc.
Interprétation des résultats	Interprétation s'appuyant notamment sur l'évolution vis-à-vis des résultats des précédentes campagnes (sur 2 ans)	Rapports de suivi antérieur Évolution récente de la surveillance

Recommandations et perspectives	Si besoin, propositions d'actions à engager à court terme afin d'expliquer une situation « anormale » et la corriger
---------------------------------	--

V Méthodologie pour le choix des points du réseau de surveillance (A. Blum, JP. Comte, 2006).

V.1 Approche de type systématique

Il s'agit, dans un premier temps, à partir des données pertinentes pour le suivi de la qualité des eaux souterraines, d'identifier pour chaque masse d'eau des sous-unités homogènes. Plusieurs types d'informations seraient croisés :

- Contexte géologique,
- Contexte hydrogéologique et connaissance des formations potentiellement aquifères
- carte de recensement agricole et des sites de pollution potentiels
- Pluviométrie

Un ou plusieurs sites de mesures seraient ainsi retenus dans chacune de ces sous unités. L'avantage de cette méthode est qu'elle est basée sur une approche directe de la géologie et des eaux souterraines. Elle est cependant lourde et n'exclut pas totalement le risque de non représentativité des sites de prélèvements. Enfin, avec une telle approche, le réseau de surveillance devra être dense et donc plus coûteux. C'est cette approche qui est surtout utilisée par l'ANRH pour le suivi et l'instauration du réseau existant.

V.2 Approche de type intégrative

Des mesures pourraient être réalisées dans les cours d'eau à l'étiage, notamment à l'étiage, quand les limites du bassin versant hydrogéologique correspondent à celles des bassins versants hydrographiques. Des points de prélèvements situés dans les cours d'eau pourraient être retenus. Les prélèvements pourraient être réalisés à l'étiage, lorsque la contribution des eaux souterraines à l'alimentation des rivières est maximale et pratiquement exclusive.

Le principal avantage de cette méthode est de disposer de points intégrateurs et donc représentatifs de la chimie de l'ensemble des eaux situées en amont. D'autre part, cette méthode nécessite une bonne connaissance des relations nappes/rivières.

V.3 Approche par analyse multicritère

V.3.1 Introduction

Une clarification sémantique s'impose au préalable, dans la mesure où le terme « analyse multicritère » recouvre des réalités très diverses. L'analyse multicritère sera donc abordée dans un premier temps à son sens originel, en tant que démarche d'évaluation des projets a priori, se voulant scientifique et concurrente des méthodes socio-économiques classiques. Dans un second temps, il sera question de l'approche multicritère en tant que méthode d'aide à la décision, partageant une partie des postulats à l'origine des analyses multicritères « historiques », mais dépossédée de ses aspects « scientifiques » et n'ayant pas vocation à tirer une conclusion définitive : c'est aujourd'hui

la forme la plus courante des « analyses », qui sera particulièrement détaillée dans les parties suivantes.

La méthodologie repose généralement sur un diagnostic et une grille d'analyse multicritères. Plusieurs critères physiques et environnementaux peuvent être sélectionnés et retenus : le contexte géologique, la sensibilité des eaux souterraines aux pollutions, la sensibilité des eaux de surface, la proximité des habitations, la sensibilité du paysage, la taille et l'âge des sites de pollution, la composition des rejets potentiels. Une note comprise entre 1 et 5 est affectée à chaque critère selon un barème préétabli. Les critères sont ensuite pondérés selon le risque que l'on cherche à évaluer. Le total (note par critère + pondération) donne un score qui permet d'établir un diagnostic simplifié de la situation et d'évaluer le risque.

V.3.2 Principe

L'analyse multicritères permet d'effectuer un choix entre plusieurs solutions en décomposant une grille d'analyse en plusieurs critères chacun pondéré d'un coefficient (poids relatif). Il s'agit donc d'un outil d'aide à la décision. On commence par identifier quels sont les critères sur lesquels seront basés l'analyse, puis on affecte à chaque critère un coefficient selon son importance relative. Chaque solution envisagée est ensuite comparée en utilisant cette grille d'analyse multicritères. En face de chaque critère retenu, on donne une note aux différentes solutions (Nadia Lehoux, 2004).

Cette note est ensuite pondérée en fonction du coefficient affecté au critère. La pondération des critères est donc prépondérante dans cette méthode, elle influe directement sur la qualité du choix effectué.

Plusieurs exemples d'application en hydrogéologie ont été étudiés, nous citons : choix d'un site d'aménagement, cartographie de la zonalité hydro chimique, zonalité de potentialité, choix de l'utilisation d'une technologie paramétrique ou d'un système d'information.

Pour l'application de ces méthodes, une démarche doit être respectivement suivie en 5 étapes :

1. Identifier l'objectif global de la démarche et le type de décision,
2. Dresser la liste des solutions possibles ou envisageables,
3. Dresser la liste des critères à prendre en considération,
4. Juger chacune des solutions aux en tenant compte des critères,
5. Agréger ces jugements pour désigner la solution qui obtient les meilleures évaluations.

V.3.3 Les étapes de l'analyse multicritère

- Définition des solutions potentielles (actions ou scénarii) et désignation de la problématique
Analyse des conséquences des actions, l'élaboration des critères et évaluation de chaque action sur les critères (tableau de performance) ;
- Modélisation des préférences globales et des procédures d'agrégation des performances (critères à retenir, importance relative des critères) ;
- Synthèse multicritère, analyse de résultats, sensibilité ou robustesse (Guesdon, 2011)

V.3.4 Les méthodes d'analyse multicritère – avantages et les inconvénients-

Il existe plusieurs méthodes pour résoudre les problèmes d'aide à la décision multi-attribut. Dans cette section, nous présentons les particularités des méthodes suivantes : le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP), la Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale TOPSIS et les méthodes de sur classement y compris la Préférence Ranking Organisation méthode for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) et l'élimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE), WPM (Weight Product Method), WSM (Weight Sum Method),

V.3.4.1 Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP)

La méthode AHP est développée par [Saaty, 1980]. Cette méthode tient son avantage de sa similitude au raisonnement de l'être humain, notamment la décomposition, le jugement et la synthèse. Elle se différencie par sa capacité à gérer différentes classes de critères qualitatifs et quantitatifs. L'application de cette méthode se fait à deux niveaux : la structure hiérarchique et l'évaluation. L'inconvénient de cette méthode est l'instabilité du classement des différentes alternatives dans le cas où le problème à traiter contient un grand nombre d'alternatives

V.3.4.2 Technique pour l'Ordre de Préférence par similarité de Solution Idéale (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est proposée par [Yoon et Hwange, 1981]. L'objectif de cette méthode est de choisir une alternative, parmi un ensemble d'alternatives, qui a d'une part, la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure alternative sur tous les critères), et, d'autre part, qui a la plus grande distance à l'alternative négative idéale (celle qui dégrade tous les critères). Pour cela, la méthode TOPSIS vise, dans un premier temps, à réduire le nombre de scénarios de désambiguïsation en écartant les scénarios dominés et, en deuxième temps, à classer les scénarios efficaces selon leurs scores globaux calculé

V.3.4.3 Méthodes de sur classement

L'intérêt des méthodes de sur classement est d'assurer la comparaison des alternatives par paires au moyen d'une relation de sur classement S . Nous rappelons la définition de [Roy, 1985] soulignant qu'une alternative a surclasse une alternative b (aSb) si, étant donné de ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire (vétos). Cette relation de sur classement est exploitée dans le but de répondre aux différentes problématiques notamment le choix, le tri, le rangement et la description.

Du point de vue pratique, l'avantage de ces méthodes de sur classement est qu'elles nécessitent une information moins riche et des hypothèses moins restrictives (Mammeri, 2013) :

- les critères ne sont pas totalement compensatoires,
- la transitivité des préférences n'est pas imposée,
- l'hétérogénéité des échelles n'est pas un problème (échelles ordinales, intervalles ou ratio) lors de l'agrégation des critères,
- l'incomparabilité, l'hésitation et l'indétermination sont prises en compte. Cela permet de prendre en considération en plus de celles de préférence et d'indifférence, la situation d'incomparabilité aRb et de préférence faible aQb ,
- le modèle de sur classement peut s'appuyer à la fois sur l'information qualitative et quantitative.

Parmi les méthodes de sur classement, nous présentons ci-après deux grandes familles de méthodes : l'Élimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE) et la Préférence Ranking Organisation Méthode for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) avec ses différentes versions.

1-Les méthodes d'élimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE)

Pour les méthodes ELECTRE, le sur classement de a sur b (aSb) (à et b sont deux alternatives) repose sur deux principes, en particulier, la concordance et la non-discordance

a) La concordance : ce principe assure l'obligation qu'une majorité suffisante de critères, représentés par leurs poids, soient en faveur de l'affirmation $a \geq b$. L'importance de la coalition de critères qui sont en faveur de l'affirmation en question est représentée par un indice de concordance.

b) La non discordance : après l'application de la condition de concordance, le principe de discordance fonctionne comme un veto dans une sélection. Ce principe assure le respect des minorités, où il ne faut pas qu'il y ait un critère qui s'oppose fortement au sur classement de a sur b. Cela signifie qu'il ne doit pas exister de critère où l'avantage de b sur a contredit fortement l'affirmation aSb. Dans ce principe, il existe un indice de non discordance. Celui-ci indique l'existence d'un critère émettant un veto sur l'affirmation.

La différence entre les différentes versions de la famille ELECTRE, peut être résumée comme suit :

— La méthode ELECTRE I

La méthode ELECTRE I [Roy, 1968] est développée pour traiter le problème du choix ($P\alpha$). Le but est d'obtenir comme résultat un choix ou une procédure de sélection selon un groupe de critères, précisément de vrais-critères, dont le pouvoir discriminant est caractérisé par la relation de préférence stricte ou d'indifférence (sans seuil). Pour atteindre cet objectif, la méthode ELECTRE I vise à sélectionner un sous-ensemble d'alternatives contenant les bonnes alternatives, y compris certainement le meilleur compromis cherché qui sera choisi par le décideur.

— La méthode ELECTRE IS

Cette méthode est proposée par [Roy et Skalka, 1987] et inspirée de la méthode ELECTRE I. La différence entre les deux méthodes c'est que la méthode ELECTRE IS est adaptée au cas où les critères sont des pseudos critères, où le pouvoir discriminant est marqué par deux seuils : un seuil de préférence et un seuil d'indifférence

2. Les méthodes de Préférence Ranking Organisation method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)

Nous présentons dans cette partie les différentes méthodes de la famille PROMETHEE : PROMETHEE I et II, [Marechal et al. 1984] [Brans et Vincke, 1985] [Brans et al. 1986].

— PROMETHEE I

La méthode PROMETHEE I vise à utiliser une relation de sur classement valeur afin de construire un proèdre partiel des alternatives. L'objectif est de trouver une solution au problème du choix ($P\alpha$). Cette méthode n'assure pas forcément le classement de toutes les alternatives. Par conséquent, certaines alternatives peuvent rester incomparables. Cela peut être très utile pour la prise de décision

du point de vue proèdre partiel qui peut contenir plus d'informations. PROMETHEE I s'applique au cas où les critères sont des pseudo-critères et repose exclusivement sur une analyse de concordance.

— PROMETHEE II

La méthode PROMETHEE II a comme but la résolution du problème du choix ($P\alpha$) et le problème de rangement ($P\gamma$). Contrairement à la méthode PROMETHEE I, elle consiste à construire un préordre complet des alternatives. En effet, l'utilisation de ce proèdre complet est considérée plus simple par le décideur sollicité pour apporter une réponse au problème de décision.

— PROMETHEE III

La méthode PROMETHEE III est une extension de PROMETHEE II. Elle vise à amplifier la notion d'indifférence, due au proèdre complet des alternatives, existant dans PROMETHEE II.

V.3.4.4 Comparaison des méthodes

(Ayadi, 2010) Récapitule les avantages et les inconvénients de chaque méthode comme les montre le tableau suivant :

Tableau IIV-1 Principaux avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multi-attribut (Ayadi, 2010)

Méthodes	Avantages	Inconvénients
AHP	-La structure hiérarchique du problème de décision. -L'échelle sémantique utilisée pour exprimer les préférences du décideur.	-L'explosion du nombre de comparaison par paires au cas du traitement d'un grand nombre d'éléments. -Le renversement de rang des alternatives suite à la suppression/ajout d'une ou de plusieurs alternatives -L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive.
Topsis	-L'introduction des notions d'idéales et d'anti-idéal. -Facile à appliquer.	-L'obligation que les attributs doivent être de nature cardinale. -au cas où toutes les alternatives sont mauvaise Topsis Propose la meilleure alternative parmi les mauvaises
Electre I et Is	L'introduction de la notion de noyau permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux meilleures alternatives	L'exigence de traduire les performances des alternatives en notes peut conduire à une perte de maîtrise des données
Electre II	-Le classement des alternatives des meilleures aux moins bonnes	-L'exigence des évaluations cardinales et l'articulation a priori des préférences
Electre III	-Le classement d'alternatives des meilleures aux moins bonnes.	-La nécessité d'un grand nombre de paramètres techniques.

	-L'admission de la notion floue dans les choix du décideur et l'introduction de seuil veto.	-Trop complexe et parfois difficile à interpréter.
Electre IV	-L'association à chaque critère des seuils de préférences et la suppression de la pondération des critères	-La nécessité d'un grand nombre de paramètres techniques.
Electre TRI	-la capacité du traitement d'un grand d'alternatives.	-La nécessité d'un grand nombre de paramètres technique. -L'impossibilité dans certain cas de comparer chaque alternative avec les alternatives bornant les différentes catégories. -LA définition des catégories liées aux choix des alternatives de références.
Prométhée I	-La construction de la relation de sur classement évaluée traduisant une intensité de préférence.	-L'indifférence est en pratique très vu les nombreux calculs pour obtenir les flux.
Prométhée II	-La construction d'un préordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.	-Les comparaisons deux à deux ne servent qu'à masquer le calcul du score final de chaque alternative.
Prométhée III	-L'introduction des seuils d'indifférence sur les flux. Ce qui minimise les nombreux calculs pour l'obtention de ces flux.	-Les seuils d'indifférences n'ayant pas d'interprétation concrète pour le décideur. Ces seuils font l'objet des calculs statistiques qui rendent Prométhée III moins accessible.
Prométhée IV	-L'intérêt théorique apporté et le traitement des ensemble infinis d'alternatives.	-La nécessité du calcul des intégrales au lieu des sommes.

II.3.2.5 Conclusion

Parmi les méthodes examinées ci-dessus nous tenterons de ce qui suit d'appliquer la méthode AHP à la plaine de la Mitidja orientale (cf. chapitre suivant) qui est une des techniques les plus importantes d'analyse multicritère (Marinoni, 2004). C'est aussi l'une des méthodes les plus couramment utilisées dans la gestion des ressources en eau car elle permet de classer les divers critères (Juan M, 2015) considérés et pondérés en fonction de leur importance. Mais avant cela nous détaillons dans ce qui suit ses principes fondamentaux et ses étapes d'application

V.4 Principes fondamentaux de la méthode AHP (Guesdon, 2011).

Cette méthode multicritère d'aide à la décision est établie selon les étapes suivantes :

- Structuration hiérarchique (classes – critères – poids)
- Structuration des priorités (sous critères – rangs)
- Cohérence logique
- Méthode semi-quantitative

Elle intègre plusieurs critères qui permettent un choix justifié de technologie et la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise.

Parmi les avantages de cette méthode :

- Sa capacité de structurer un problème complexe, multicritère, multi personne et multi période de façon hiérarchique,
- La comparaison binaire des éléments (alternatives, critères et sous critères), Et la facilité de son support informatique.

V.4.1 Les étapes de la méthode AHP

Étape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique

Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires

Les valeurs de cette méthode sont déterminées à l'aide de l'échelle suivante :

Appréciation	degré d'importance
▪ Importance égale de deux éléments	1
▪ Faible importance d'un élément par rapport à un autre	3
▪ Importance moyenne d'un élément par rapport à un autre	4
▪ Importance forte d'un élément par rapport à un autre	5
▪ Importance attestée d'un élément par rapport à un autre	7
▪ Importance absolue d'un élément par rapport à un autre	9

Étape 3 :

- Déterminer les priorités,
- Calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente,
- La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propre,
- L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé à 1.0,
- Plus cette valeur est grande, plus le critère correspondant est important. (Niveau 0 c'est le but, niveau 1 c'est les critères et le niveau 2 c'est les alternatives).

Étape 4 : Synthétiser les priorités :

- Une fois que les priorités locales pour tous les critères figurant dans la hiérarchie ont été déterminées, AHP calcule un score d'évaluation global attaché à chacune des solutions alternatives identifiées,
- On obtient alors un vecteur $\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$ qui indique l'impact du critère i sur chacune des alternatives.

Étape 5 : Cohérence des jugements.

V.4.2 Les critères qui influencent la conception de réseaux de surveillance

V.4.2.1 Fluctuation des eaux souterraines

Les changements dans les réserves d'eau souterraine se manifestent par des fluctuations du niveau de la nappe. Ces changements peuvent être observés dans les forages et les piézomètres. Ces changements peuvent se manifester par des rabattements lors des périodes d'exploitation de la nappe en étiage et des remontées du niveau statique pendant les saisons de recharge naturelle. Dans la région d'étude ce phénomène est palpable d'une saison à l'autre et on observe généralement un rabattement progressif du niveau de la nappe suivant une chronique de 10ans notamment dans les zones où sont concentrés les champs captant, comme l'illustre les résultats compilés dans le chapitre 3.

Ce risque de surexploitation de la nappe doit être surveillé afin de pouvoir suivre son évolution dans le temps et suivre l'étendue des dépressions engendrées. Cette surveillance doit se faire par la multiplication des piézomètres d'observation aussi bien à l'intérieur de ces champs captant et aux périphériques. Ce critère est donc impératif et sur cette base qu'il a été retenu d'autant plus que des données sont disponibles.

V.4.2.2 Risque de pollution

Les sites à risque de pollution des eaux souterraines représentés par des zones où la nappe présente le plus grand degré de vulnérabilité et sur lesquelles sont implantés des activités industrielles potentiellement polluantes. Les risques de pollution concernent aussi les rejets d'eau usées quand ils ne sont pas traités et les activités agricoles.

Ces zones à risques de pollution constituent donc un critère de taille pour la répartition des réseaux de surveillance qualitatifs.

V.4.2.3 Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique représente la différence de niveaux piézométriques entre deux points et indique la direction et l'intensité de l'écoulement (l'eau s'écoule des charges les plus élevées vers les plus faibles). Le gradient hydraulique vertical est l'un des éléments les plus importants pour identifier la sensibilité des régions aux polluants passant de la surface de la terre ou de la partie la plus productive de l'aquifère (Cherry JA, 2004). Il est également nécessaire de comprendre quelles zones sont les plus intensivement exploitées et comment s'y comporte le gradient vertical (Juan M, 2015).

V.4.2.4 Densité des points d'eau

La densité des points d'eau est définie comme le nombre des points d'eau par unité de surface. Ce facteur est choisi en raison de la nécessité de surveiller les zones à forte concentration de points d'eau, car ces zones peuvent connaître des phénomènes de synergie et une exploitation plus intensive ayant un impact direct sur l'évolution des réserves des nappes.

VI . Conclusion

Ce chapitre a permis de définir et de décrire les réseaux de surveillance qualitative et quantitative des eaux souterraines tout en énumérant les critères prépondérants retenus dans le choix d'un réseau type. Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'aide à la décision multicritère, en termes de définitions, de classification des problématiques et du processus d'aide à la décision multicritère.

Enfin, nous avons détaillé certaines des méthodes d'aide à la décision multi-attribut constituant la base de notre contribution dans le cadre de ce mémoire. En conséquence, nous avons souligné les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

I. Présentation de la zone d'étude

I.1. Situation géographique et présentation la plaine de Mitidja

La plaine de la Mitidja est l'une des plaines les plus riches d'Algérie que ce soit par ses terres fertiles ou bien par ses ressources en eau souterraine, située juste au Sud d'Alger. Il s'agit d'une vaste plaine d'environ 100km de longueur et 8 à 18 km de largeur, et se présente comme une dépression allongée d'Ouest en Est, de Hadjout à Blida, et s'incurve en direction WSW-ENE de Blida jusqu'à l'oued El Hamiz et la mer.

Cette plaine, limitée à l'Ouest par l'Oued Nador et à l'Est par l'Oued Boudouaou, est bordée par deux zones élevées : le Sahel (260m) au Nord et l'Atlas blidéen (1200m) au Sud (Fig.I-1) (Mohamed Ali Bachir, 2017).

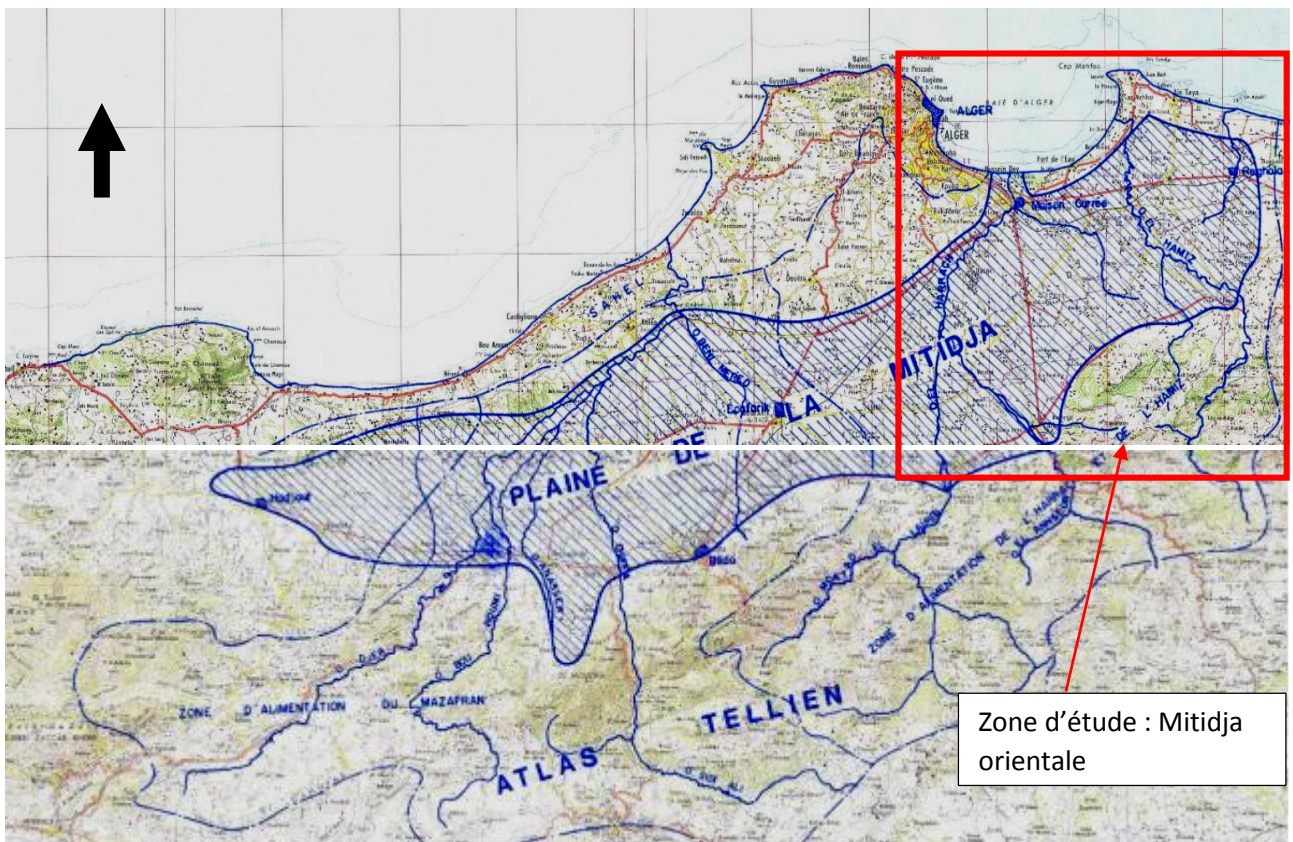


Figure I-1 Situation géographique de la plaine de la Mitidja sur fond de feuille topographique au 1/200000

I.2. Géomorphologie

Du nord au sud de la plaine de la Mitidja ; on peut définir trois unités géographiques distinctes (Fig. I-2) :

- Le piémont Sud du Sahel : Il englobe les petits reliefs qui s'étendent de l'oued el Hamiz jusqu'au massif du Chenoua en passant par le massif de Bouzaréah au Nord et les rives
- Le bassin mio-plio-quaternaire qui constitue la plaine de la Mitidja proprement dite,
- L'Atlas Blidéen qui correspond à un vaste massif montagneux composé des séries épaisses du Crétacé.

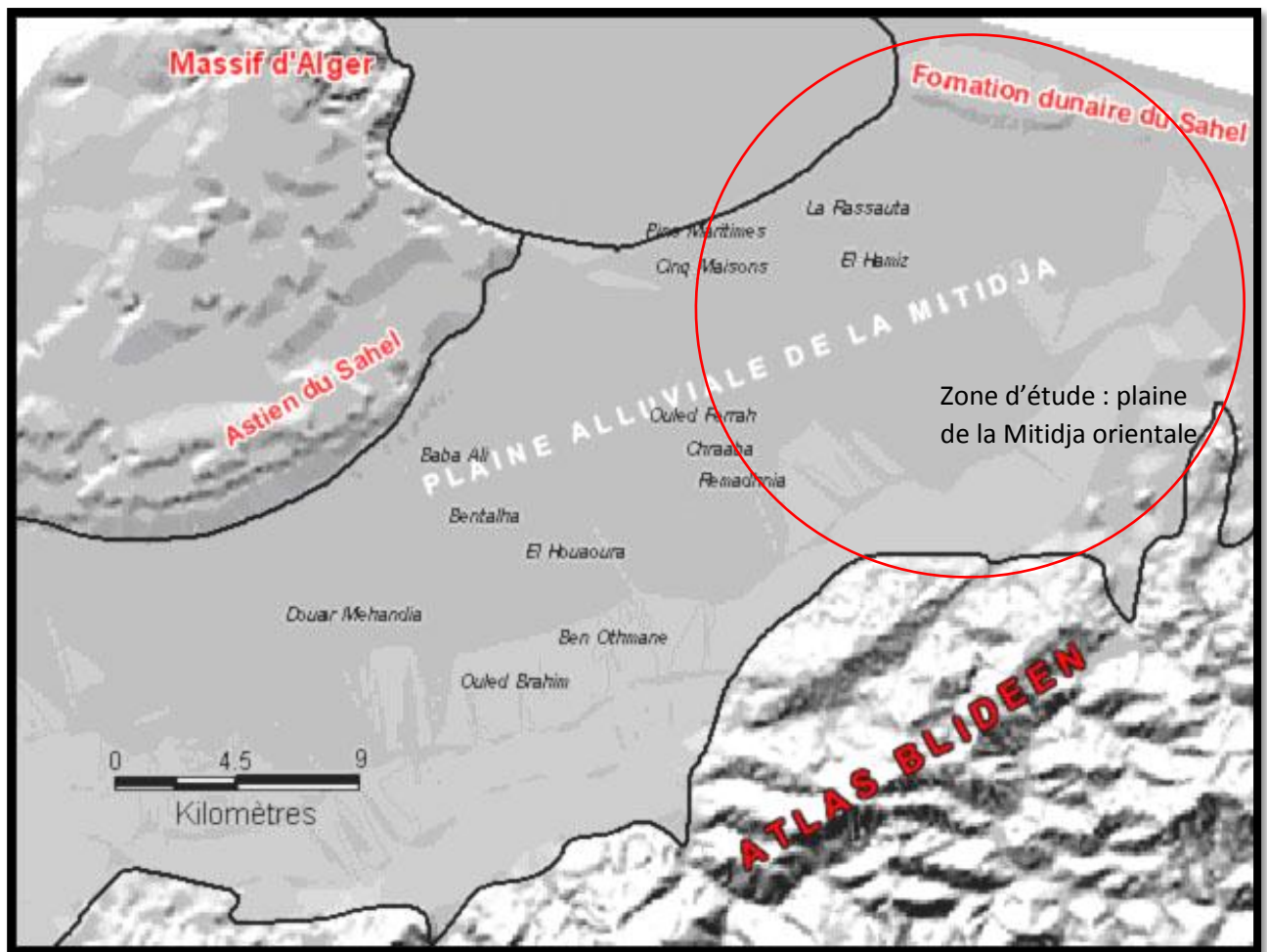


Figure I-2 Carte des reliefs représentant la dépression de la Mitidja

I.3. Hydrographie

I.3.1 Réseau hydrographique

La plaine de la Mitidja est traversée par des oueds issues de l'Atlas qui se jettent dans la mer, soit dans la baie d'Alger (par oued el Harrach et oued Hamiz), soit par une vallée incisée dans le Sahel ouest constituant l'Oued Mazafran. Ce dernier, formé par la réunion des Oueds Djer, Bouroumi et Chiffa, constitue le fleuve côtier le plus important de la plaine.

La région qui fait l'objet de l'étude est cependant circonscrite sur la partie orientale de la plaine. Elle s'étend entre Oued el Harrach à l'Ouest et Oued Reghaia à l'Est (Fig. I-3).

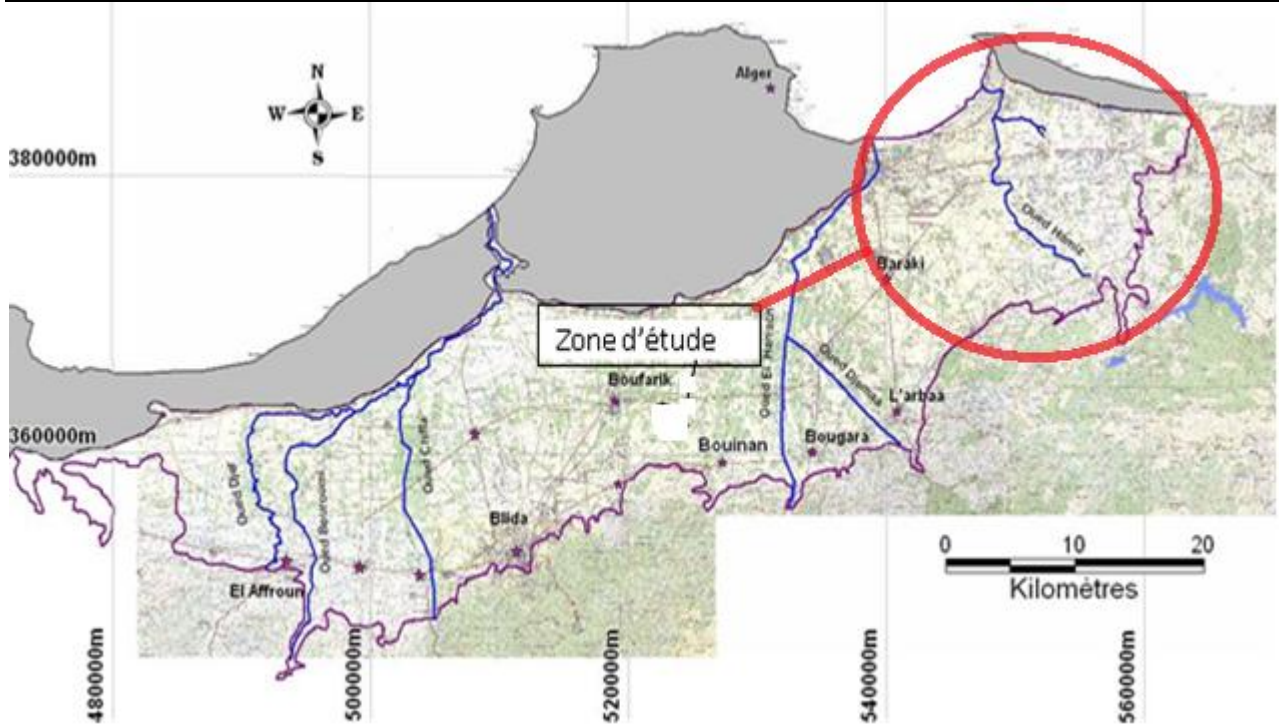


Figure I-3 Carte de situation géographique de la plaine de la Mitidja (ANRH, 2013)

La plaine de la Mitidja orientale est subdivisée en deux bassins principaux (Fig. I-4 et II-5) :

- **Bassin de l'oued El-Harrach** : Sa superficie est de 1 236 km². Il est drainé par oued El Harrach qui prend naissance des reliefs de Tablât et traverse la plaine du sud au nord. Avec ses affluents (oued Djemâ, oued Smar et oued Boutrik), il draine une aire de 1 236 km². et se jette à la mer dans l'écluse d'El Harrach.
- **Bassin l'oued Hamid** : Il est situé dans la partie orientale de la plaine, couvrant une superficie de 370 kilomètres carrés. Il est drainé par oued Arbatache en amont qui rejoint oued El Hamiz et coule de Khemis el Khechna au nord-ouest, jusqu'au Sahel, en se jetant dans la mer au sud de Bordj El Bahri.

I.4. La végétation

La répartition de la végétation dans notre région d'étude est dominée par les cultures annuelles. Sur les plaines, la région est consacrée essentiellement à l'agriculture maraîchère, de la vigne, des fourrages, des céréales, et les légumes secs. Sur les collines, on pratique essentiellement de la céréaliculture et des fourrages. Sur les montagnes et les piémonts, c'est la zone où prédomine la culture d'olives et d'autres espèces forestières telles que le peuplier, le chêne-liège et le pin.

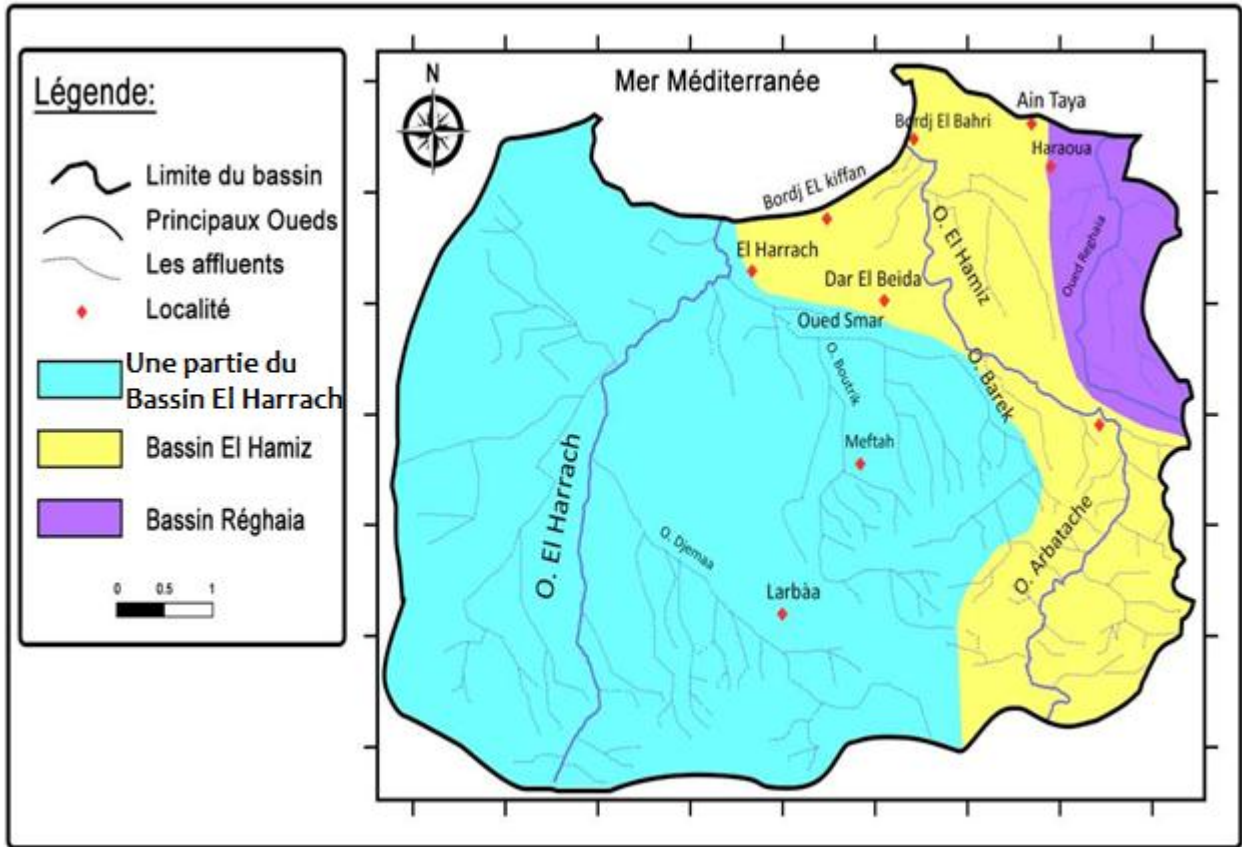


Figure I-4 Sous bassins versants de la Mitidja Est (Nouara., 2010)

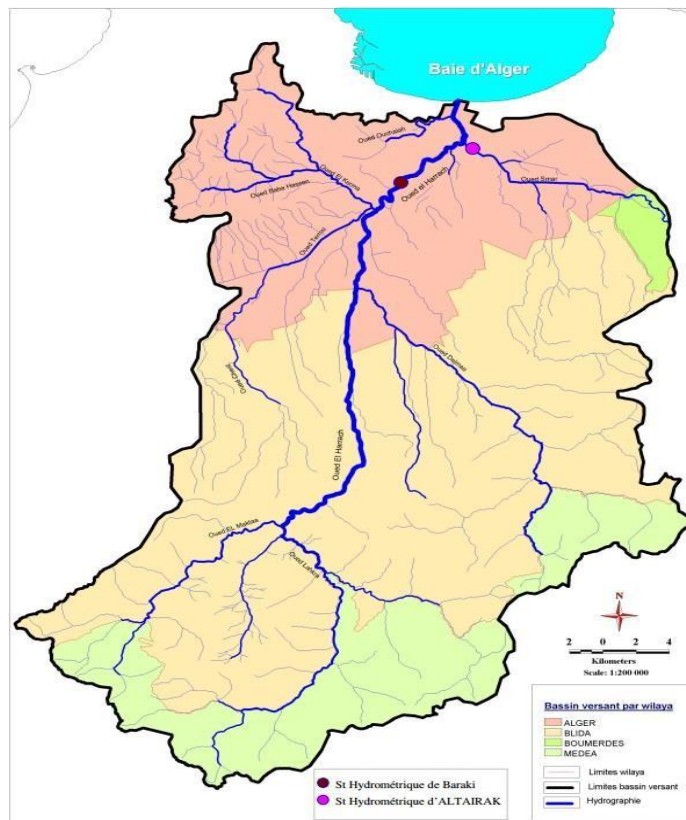


Figure I-5 Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued El-Harrach. (Nouara., 2010)

I.4.1 Caractéristiques morpho métriques

Pour l'estimation de ces paramètres nous avons regroupé les deux sous bassins versants Hamiz et Réghaia sous un seul sous bassin versant Hamiz Réghaia qui occupe 370 km² de la superficie de la Mitidja Est.

Les caractéristiques géométriques et morpho métriques du bassin du Hamiz sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III-1 Paramètres geometriques et morphometriques des sous bassins versants (Khoualed Radja, 2017).

PARAMETRE	UNITE	FORMULE DE CALCULE	VALEUR	
			Bassin versant du Hamiz	Bassin versant d'El-Harrach
Altitude moyenne	M	Courbe hypsométrique	375,03	430
Indice de pente globale (I _g)	m/km	$I_g = h5\%/L - h95\%/L = D/L$	19,88	13.8
Indice de compacité de Gravelius (K _c)	%	$K_c = 0,28 P \sqrt{A}$	1.7	1.5
Longueur du rectangle équivalent (L)	Km	$L = K_c \sqrt{A} / 1,12 [1 + \sqrt{1 - (1,12/ K_c)^2}]$	53,91	78.30
Largeur du rectangle équivalent (l)	Km	$l = K_c \sqrt{A} / 1,12 [1 - \sqrt{1 - (1,12/ K_c)^2}]$	7,62	15.80

Avec un indice de compacité supérieur à 1, les deux sous bassin versant ont une de forme allongée qui traduit un temps de concentration et de ruissellement assez long, donnée confirmée par la forme du rectangle équivalent (L>2l).

Les indices de pente globale montrent également que les sous bassin versant présentent un relief relativement faible, traduisant ainsi une infiltration favorable optimale qui dépend du ruissellement.

II. Hydro-climatologie

II.1 Introduction

Les réserves en eaux souterraines de la Mitidja orientale dépendent des paramètres hydro climatiques. Ainsi le fonctionnement des aquifères et l'évolution des niveaux piézométriques dépendent principalement des précipitations. Il s'avère donc nécessaire d'étudier l'aspect climatique de notre région d'étude.

II.2 La pluviométrie

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie. La connaissance de ces apports d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau. Les données pluviométriques sont recueillies au niveau de trois stations réparties de façon plus ou moins homogènes sur le sous bassin versant d'oued El-Harrach-Hamiz. L'Agence nationale des ressources hydraulique a mis à notre disposition les données de trois stations hydro-climatiques. (Nouara., 2010).

Les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau II-2 Caractéristiques des stations pluviométriques (Nouara., 2010).

Cordonnées Lambert				
Station	Code ANRH	X (km)	Y (km)	Altitude (m)
Dar El Beida	020611	547,400	379,600	25
Réghaia	020632	557820	382230	20
Hamiz Bge	020602	558,550	367,400	130

II.2.1 Précipitations moyennes mensuelles

Les données des pluies mensuelles enregistrées au niveau des trois stations citées ci-dessus ont permis de représenter le diagramme suivant (figure suivante) qui illustre l'évolution des pluies mensuelles en fonction du temps.

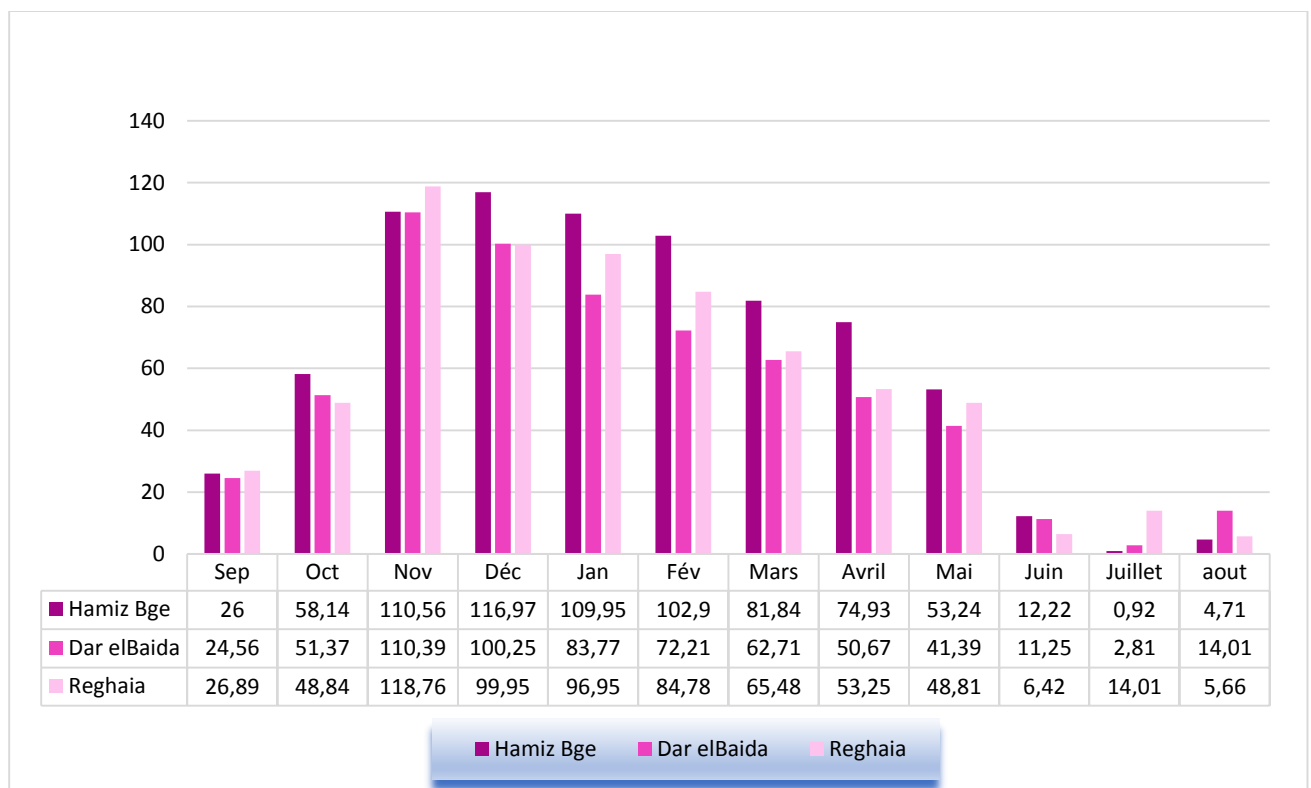


Figure II-1 Histogramme des précipitations moyennes mensuelles période (2000-2018)

Ce diagramme permet de déduire ce qui suit :

- Une saison pluvieuse qui s'étend du mois de novembre à avril, avec une valeur maximale de l'ordre de 118.76 mm enregistré au mois de novembre au niveau de la station de Réghaia.
- Une saison sèche qui s'étend du mois de mai à octobre avec une valeur minimale de l'ordre de 0.92 mm enregistré au mois de juillet au niveau de la station de Hamiz Barrage.
- Le mois le plus pluvieux à la station de Réghaia est novembre avec une valeur maximale de l'ordre de 118.76 mm, alors qu'à la station de Hamiz-Bge, c'est le mois de Janvier qui présente les fortes précipitations avec 116.97mm.
- Les précipitations sont donc très irrégulières d'une année à l'autre et dans l'espace malgré la proximité des stations. Elles dépendent de plusieurs facteurs qui sont la latitude et la continentalité.

II.2.2 Précipitations moyennes annuelle

Les données des pluies annuelles enregistrées au niveau des trois stations citées ci-dessus ont permis de représenter le diagramme suivant (figure suivante) qui illustre l'évolution des pluies annuelles en fonction du temps.



Figure II-2 Histogramme des précipitations moyennes annuelles (2000-2018)

La pluviométrie moyenne annuelle enregistrée sur une période de 18 ans (2000 – 2018) dans les stations climatiques Hamiz barrage, Réghaia et Dar El Beida permet de constater ce qui suit :

- La pluviosité moyenne annuelle aux différentes stations est de 670 mm, avec une valeur minimale de 316 mm enregistrée en 2013 à la station de Dar El Beida et un maximum de 1089 mm en 2011 dans la station de Hamiz Barrage.
- La pluviométrie annuelle varie dans le temps et dans l'espace. Cette pluviosité varie de 316 à 1089 mm durant la période de (2000 – 2018). À cette irrégularité annuelle, s'ajoute une irrégularité interannuelle, les années humides pouvant être deux fois plus arrosées que les années sèches.

II.3 La Température

La température permet de caractériser le régime climatique d'une région. Les données de la température de notre région sont celles mesurées à la station de Dar el Beida par l'ONM sur une période de 33 ans (1985 – 2018). Les données collectées ont permis alors d'établir le diagramme (Figure suivante) qui permet de conclure ce qui suit :

- Une température maximale mensuelle de l'ordre de 32.76 °C en août et une température minimale mensuelle de 6.51 °c enregistrée au mois de février
- Une période froide (saison humide) qui débute au mois de Novembre jusqu'au mois de mai La température moyenne la plus basse enregistrée dans cette saison est de 11.61 °C au mois de janvier
- Une période chaude (saison sèche) qui débute en mois de juin jusqu'au mois d'octobre. La température moyenne la plus élevée enregistrée dans cette saison est de 26.61 °C au mois d'Août.



Figure II-3 Histogramme des variations de température à la station de dar el Beida (1985-2018)

III. Cadre géologique

III.1 Introduction

La synthèse géologique que nous présentons ci-dessous est établie sur la base des travaux de Glangeand et Ayne (1964) et de Bennie and Partner (1983). (Mohamed Ali Bachir, 2017).

La Mitidja est une vaste plaine subsidente dont la superficie est estimée à environ 1300Km². Elle a une forme allongée et s'étend au sud d'Alger, entre Hadjout à l'Ouest et Réghaia à l'Est. Du Nord vers le Sud, on distingue :

- **Le piémont Sud du Sahel** : Il englobe les petits reliefs qui s'étendent entre le massif de Bouzaréah au Nord et les rives gauches d'Oued El Hamiz au sud-est,
- **Le bassin mio-plio-quaternaire** : qui constitue la plaine de la Mitidja proprement dite,
- **L'Atlas Blidéen** qui correspond à un vaste massif montagneux composé de séries épaisses du Crétacé.

III.2 Stratigraphie

La succession lithologique rencontrée dans la plaine de la Mitidja se présente comme suit :

III.2.1 Le Primaire

- Les roches sédimentaires : elles sont composées de grès micacés rouges, de poudingues à galets de quartz blanc dans une matrice argileuses parfois marneuses. L'affleurement est très réduit est localisé dans l'atlas au Sud de Meftah et Khemis El Khechna.
- Les roches métamorphiques : ce sont des roches du socle cristallin affleurant localement sur des surfaces réduites au Nord et à l'Est du bassin de la Mitidja (Glangeaud 1932, binnie and Atkins 1983). Elles sont constituées de schistes, micaschistes et gneiss.
- Les roches éruptives : apparues après une série d'effondrements et de distension, elles sont composées de dacites et d'andésites. On les rencontre très localement dans la région de khemis el khechna (Glangeaud and Aymé, 1935) et au Nord Est dans le Sahel. (Mohamed Ali Bachir, 2017)

III.2.2 Le Secondaire

- Le Crétacé supérieur : les marnes à nodules calcaire jaunes à incérâmes du sénonien et les marnes schistoïdes forment principalement cet étage.
- Le Crétacé moyen : le Crétacé moyen est constitué par des calcaires marneux à passées régulières de calcaires compacts du Cénomaniens.
- Le Crétacé Inferieur : le Crétacé inferieur est constitué par de calcaires et des marnes argileuses.(Mohamed Ali Bachir, 2017)

III.2.3 Le Miocène et roches plus anciennes

Ces formations sont présentes sous le bassin de la Mitidja dans le cœur de l'anticlinal du Sahel et affleurent par endroits dans l'Atlas, sur la bordure Sud du bassin.

III.2.4 Les formations les plus anciennes

Elles sont constituées par les roches éruptives du tertiaire (rhyolites et andésites) sont visibles sur le pourtour SW de la Mitidja.

III.2.5 L'Oligocène

Composé de schistes rouges, de poudingues, sables, argiles, et nummulites (Glangeaud, 1932), l'Oligocène est largement réparti dans l'Atlas bien au sud de Meftah et Khemis El Khechna. (Mohamed Ali Bachir, 2017)

III.2.6 Le Miocène

Il affleure le long de l'Atlas entre Meftah et Khemis El Khechna, et à l'Est de Oued Réghaia. Il est représenté par des marnes de 50 m d'épaisseur du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires, et aussi des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien.

III.2.7 Le pliocène

-Le Plaisancier

Formé essentiellement de marnes bleues avec localement des bancs de grès faiblement glauconieux, cet étage peut atteindre une puissance considérable (>200m). Les affleurements sont visibles uniquement dans les collines du Sahel.

-L'Astien

Bien développé sur le versant sud du Sahel et apparaît très peu sur la bordure sud de la Mitidja, l'astien peut atteindre 100 à 200 m d'épaisseur et se présente sous différents faciès :

- Un faciès marno-sableux,
- Un Faciès calco-gréseux,
- Un faciès gréseux et sableux.

III.2.8 Le Quaternaire

- Le Calabrien-villafranchien (formation d'El Harrach) connue sous le nom de marnes d'El Harrach est une séquence relativement uniforme d'argiles plastiques jaunâtres ou grises se développant sur une puissance de 200m,

- Le Soltano-tensiftien (Formation de la Mitidja) constitué principalement de matériaux grossiers : graviers et galets avec des limons ou des argiles. Ces dépôts, représentés dans toute la plaine (à l'exception de la partie occidentale) constituent la formation de la Mitidja puissante de 100 à 200m.

- Le Flandrien-Rharbien (Formations du Mazafran et de Halloula) constituées de limons gris et d'argiles marneuses que l'on rencontre dans les terrains bas de la plaine de la Mitidja. La formation de Halloula se situe à l'ouest des oueds Djer et Bouroumi où elle occupe la zone de l'ancien lac de Halloula. Les limons de la formation du Mazafran se rencontrent le long et dans la cluse du Mazafran. Ils ont une épaisseur maximum de 60 m.

- Les dépôts récents qui comprennent des dépôts de sables dunaires en bordure de la baie d'Alger, de sables et graviers des lits des oueds actuels et de dépôts divers des piémonts de l'Atlas.

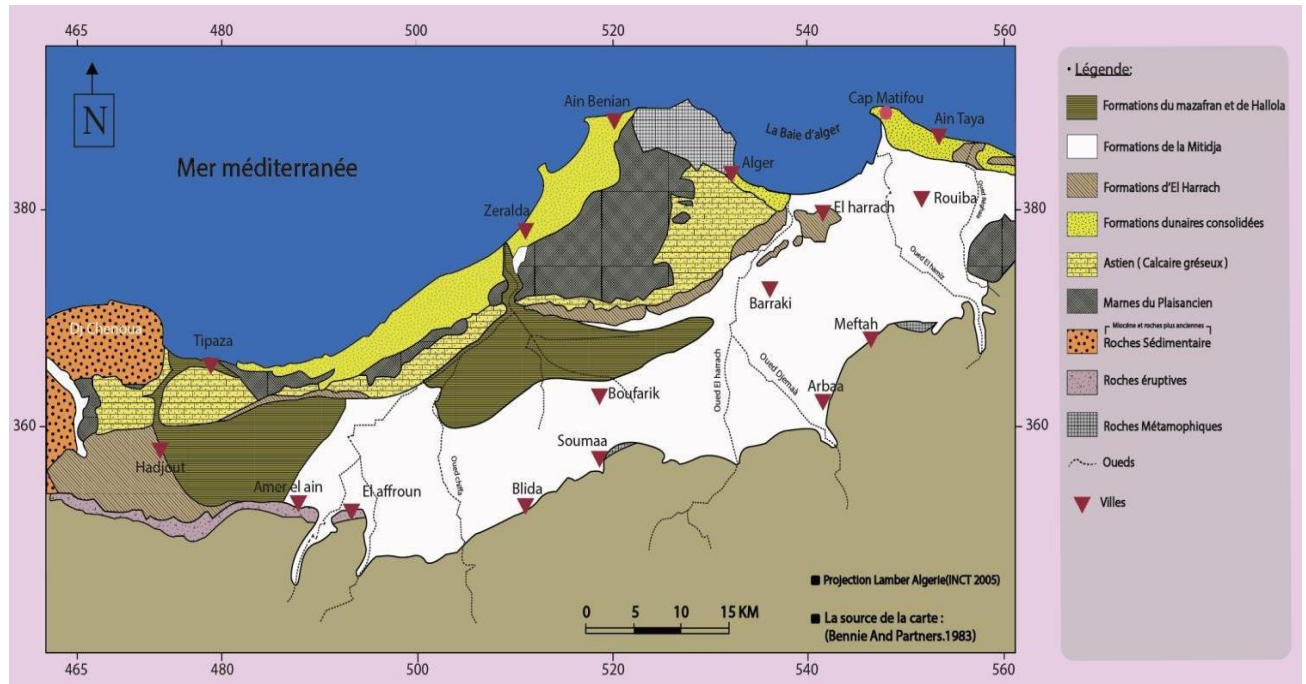


Figure III-2 Carte géologique de la plaine de la Mitidja, ARNH (Cheriet Abdelkarim, 2018).

III.3 Évolution paléogéographique et tectonique

III.3.1 La Tectonique

La plaine de la Mitidja est un vaste synclinal subsidient et limité par deux flexures nord et sud plus ou moins visibles. Les deux extrémités sont déférentes.

-La bordure Nord : Elle est constituée par l’Astien, le pendage prend une forme subverticale, il est formé de faciès calcaire gréseux, alternant de faciès gréseux.

La bordure sud : L’Astien est formé par les faciès grésocalcaires qui n’apparaît que localement aux environs de Meftah, sous forme de deux petits mamelons à la cote 138 entre Bouinan et Soumaa de direction Est Ouest et de pendage Nord 30° à 40° est sous la forme de lambeaux entre Hadjout et El Affroun. (Mohamed Ali Bachir, 2017)

Le remplissage de la plaine de la Mitidja depuis le Miocène se caractérise par une grande hétérogénéité verticale et latérale des dépôts sédimentaires sous l’action conjuguée de facteurs tectoniques (jeu des failles et phénomène de subsidence) et climatiques. Le bassin de la Mitidja s’est défini en tant qu’unité structurale à la fin du Miocène après que ce soient produit les principaux mouvements de la période de l’orogénèse alpine. Les phénomènes d’affaissement et de sédimentation se poursuivent pendant le Pléistocène en modifiant la forme et la distribution des dépôts. Ces mouvements structuraux ainsi que d’importantes variations du niveau de la mer expliquent la succession des formations stratigraphiques rencontrées au droit de la plaine :

- Au Miocène, l'affaissement du bassin s'accompagne de l'apparition de roches volcaniques en périphérie, notamment sur la bordure sud.
- Le Pliocène correspond à une longue période de sédimentation avec une alternance de phases de dépôts et de phases d'érosion en relation avec les fluctuations du niveau de la mer. Il se caractérise notamment par :
 - Les dépôts de couches épaisses de marnes bleues au Plaisancien (en mer profonde). Ces dépôts constituent le substratum hydrogéologique de l'aquifère de la Mitidja ;
 - Les dépôts de marnes sableuses et de calcaires gréseux à l'Astien (en mer peu profonde),
 - Le dépôt de marnes et cailloutis au Villafranchien ;
 - Le dépôt de sédiments argilo-gréseux, glauconieux et coquillers au Calabrien.
- Au Quaternaire, les alluvions déposées dans la plaine de la Mitidja et la formation de dunes consolidées au niveau de la Baie d'Alger.

III.3.2 Évolution paléogéographique

L'histoire géologique de la région d'étude peut se résumer comme suit (Figures suivantes) :

- Dépôts du Plaisancien et de l'Atlas ;
- Dépôts des marnes et cailloutis du comblement de la Mitidja dont l'axe synclinal s'individualise de plus en plus ; Naissance du Sahel à la faveur des mouvements tectoniques et dessin de l'axe anticlinal du Sahel ;
- Cette érection du Sahel va être suivie par l'érosion des faciès marneux et cailloutis et des mollasses astiennes dans le Sahel. Ce soulèvement du Sahel a eu lieu en même temps que s'accroît la subsidence du bassin synclinal de la Mitidja. Des accidents tectoniques encadrent la Mitidja (Fig. IV 1). Ils auront une influence sur la répartition des eaux notamment les eaux thermo-minérales.

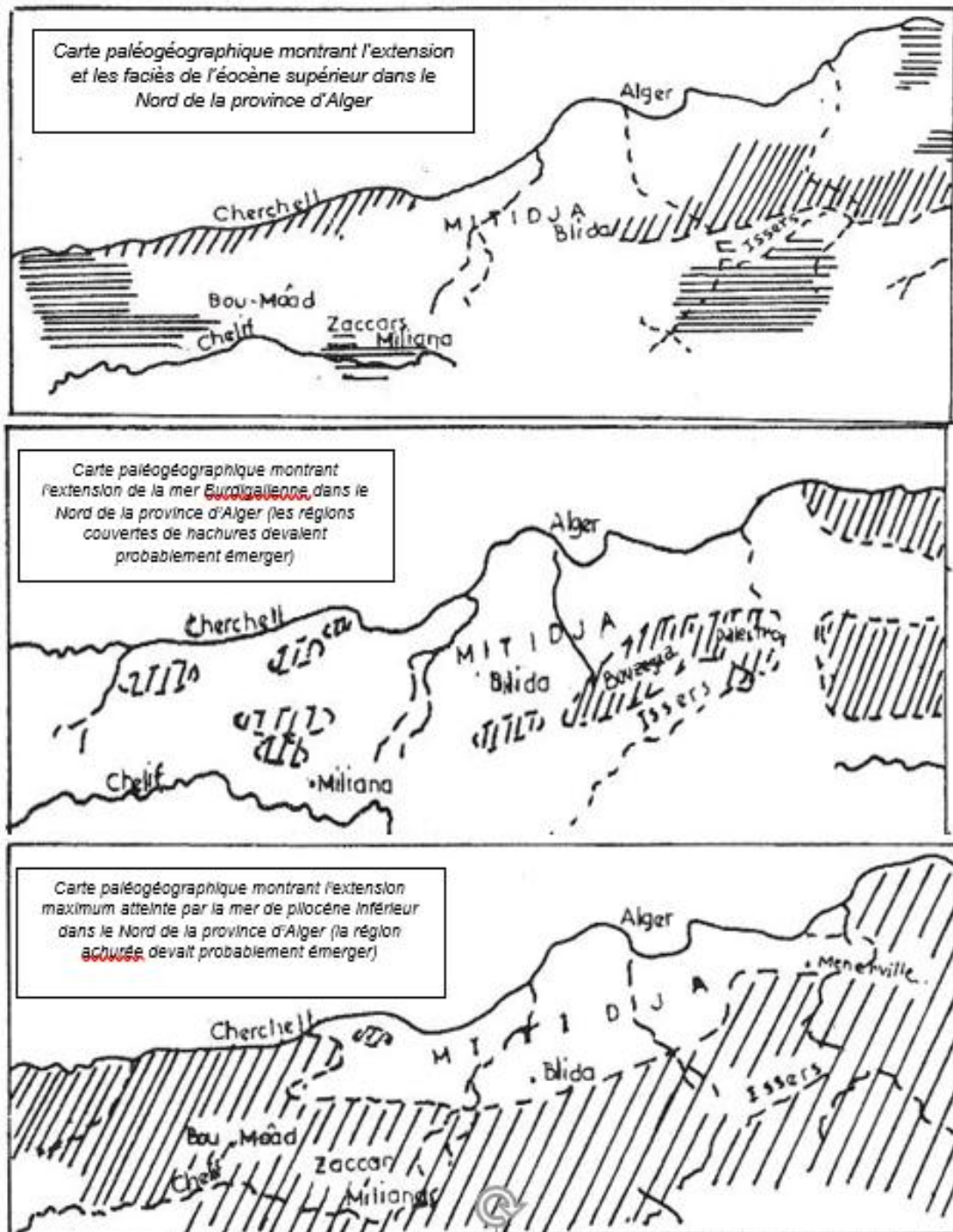


Figure III-3 Paléogéographie de la Mitidja (d'après Glangeaud)

- Durant le Quaternaire, plusieurs phases de régression marines vont se succéder et avoir pour conséquence
 - Le dépôt des divers types de sables et grès dunaires ;
 - La naissance de la baie d'Alger de l'érosion différentielle des faciès résistants et rocheux du socle métamorphique (Amirauté et cap Tamenfoust) et des terrains tendres du recouvrement sédimentaire.
 - L'apparition de zones marécageuses, dans le Nord de la Mitidja. Ces zones sont séparées de la mer par le cordon littoral.

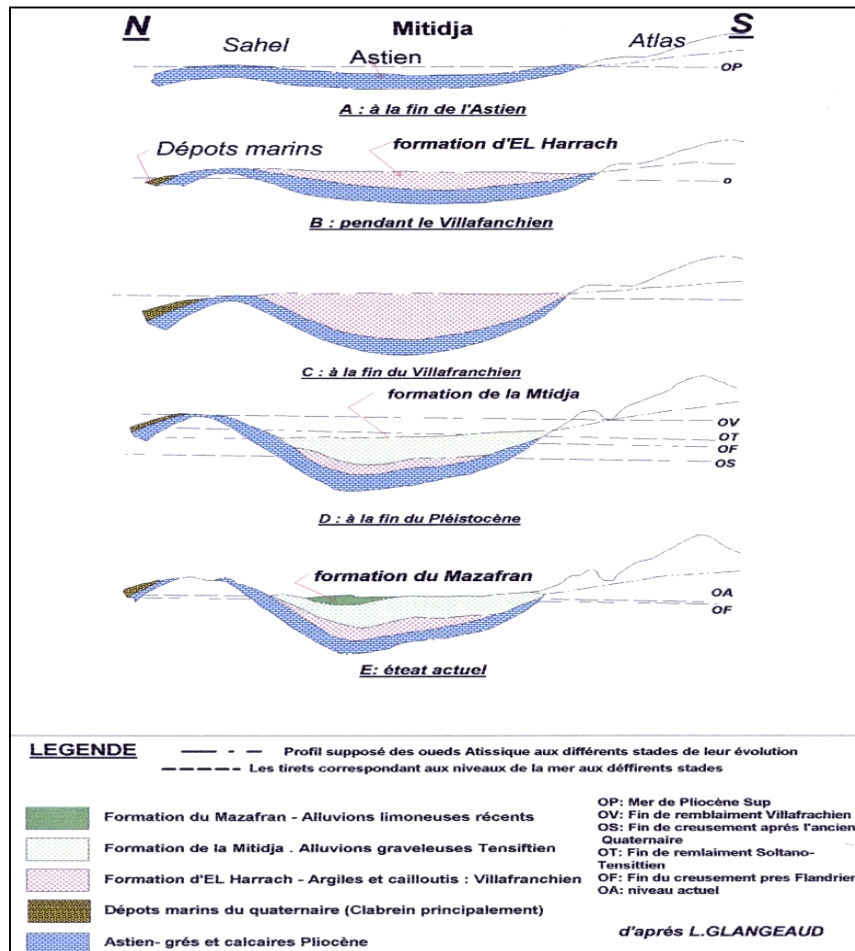


Figure II-4 Evolution paléogéographique de la plaine de la Mitidja (d'après Glangeaud)

III.4 Contexte géologique local de la Mitidja est

A partir du Pliocène, la plaine de la Mitidja est isolée de la mer par le Sahel. Seule l'extrémité Est, au niveau de la baie d'Alger reste en communication avec la mer.

La coupe géologique ci-dessous (Fig. III-5) montre la présence de formations dunaires au Nord-Ouest de la zone d'étude, près de la mer. Les marnes d'El Harrach se biseautent et permettent le contact des deux horizons aquifères de la Mitidja (Astien et Quaternaire).

Il est à noter que ces formations dunaires sont également présentes dans la Mitidja Est. L'épaisseur de l'Astien varie énormément, de 75 à 20 m d'épaisseur. Cette formation est recouverte par des alluvions récentes, les formations dunaires et les formations de la Mitidja. La position du substratum Plaisancien, varie également et peut atteindre plus de 150 m de profondeur dans le secteur Hamiz – Rouïba.

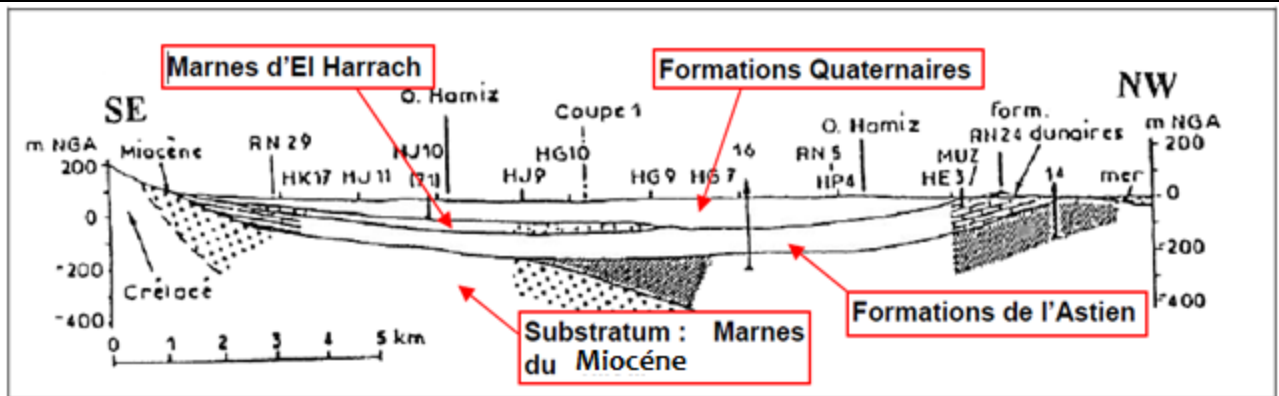


Figure III-5 Coupe géologique longitudinale de la Mitidja Est (Binnie et Atkins, 1983).

La Compagnie Générale de Géophysique (CGG) a effectué une étude par prospection électrique dans la plaine Mitidja Est de juin à septembre 1968. L'objectif de cette étude était de préciser la position du substratum imperméable (Marnes du Plaisancien), de déterminer les différents aquifères de la zone SE et de préciser le toit de la formation de l'Astien quand elle existe.

Des sondages verticaux, en grand nombre, ont été effectués dans la zone d'étude. Leur interprétation a permis de tracer des coupes géologiques interprétatives. La Figure suivante (Coupe géologique issues de l'interprétation des sondages géophysiques, CGG, Septembre 1968) présente une coupe significative au niveau de la zone d'étude, orientée Nord-Sud depuis Bateau Cassé jusqu'au pied de l'Atlas Blidéen (Fig. III.6).

Cette coupe montre la structure des formations présentes dans le secteur et indique la position du substratum marneux (Plaisancien). Il se situe à environ 200 m de profondeur puis affleure au niveau de la côte.

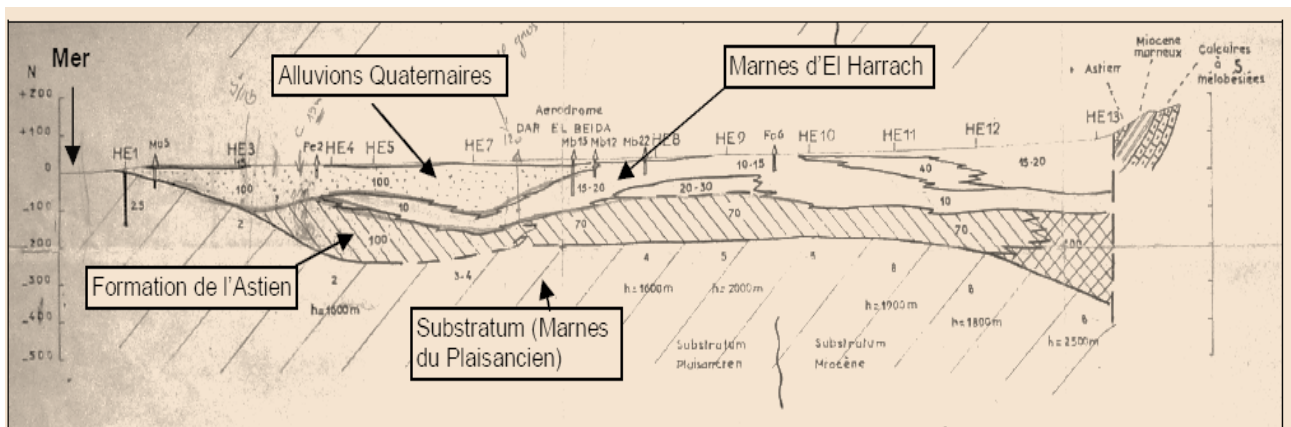


Figure III-6 Coupe géologique issue de l'interprétation des sondages géophysiques, CGG, septembre 1968).

IV. Hydrogéologie

IV.1 Identification des aquifères

La plaine de la Mitidja est constituée de 2 niveaux aquifères principaux (Fig. IV-1) :

- L'Astien gréseux ou grésocalcaire, où la nappe est généralement captive avec une épaisseur moyenne de 100 à 130 m,
- Les alluvions du Quaternaire : constitués par les alluvions quaternaires de la Mitidja, présents sur toute la plaine et par des formations dunaires consolidées au niveau de la Baie d'Alger.

Les deux aquifères, de l'Astien et des alluvions de la Mitidja, sont séparés de manière plus ou moins continue par les marnes d'El Harrach et peuvent donc être localement en relation hydraulique comme sur le cas dans la partie orientale de la Mitidja et de la zone étudiée.

La nappe de la Mitidja est captée par de nombreux forages, elle est relativement bien connue par suite des reconnaissances géologiques et géophysiques. Il a été rencontré, par forages, de nombreux niveaux aquifères dans cette formation qui se développe de façon continue depuis les piémonts Sud du Sahel jusqu'au rebord de l'Atlas Blidéen. Les piémonts contribueraient à l'alimentation de la nappe profonde.

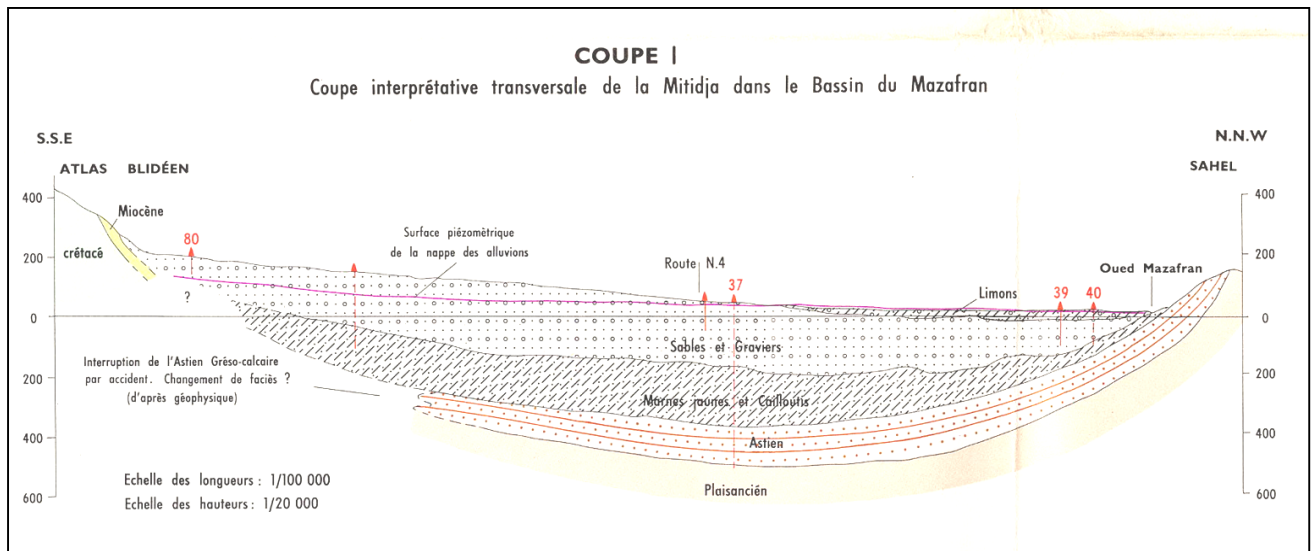


Figure IV-1 Coupe interprétative transversale de la Mitidja dans le bassin de mazafran, carte hydrogéologique de la région d'Alger ARNH, 1972 (Mohamed Ali Bachir, 2017)

IV.1.1 L'aquifère de l'Astien

Le réservoir astien se trouve dans les grès fins consolidés. Dans la région d'étude (Mitidja Est), il n'est généralement pas séparé de l'aquifère des alluvions suite à la disparition (par variation latérale de faciès) des marnes d'El Harrach.

L'alimentation de cet aquifère se fait essentiellement par les infiltrations des eaux de pluie sur le Sahel où il affleure. Il est également alimenté par la nappe alluviale sus-jacente par drainance à travers les marnes jaunes peu épaisses et dont la perméabilité varie de 10^{-7} à 10^{-8} m/s (Bénie Partner, 1972).

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues. Les estimations de la perméabilité donnent des valeurs qui varient dans de larges fourchettes avec une moyenne de l'ordre de 4,3m/j et le coefficient d'emmagasinement est compris entre $5 \cdot 10^{-6}$ et $5 \cdot 10^{-3}$.

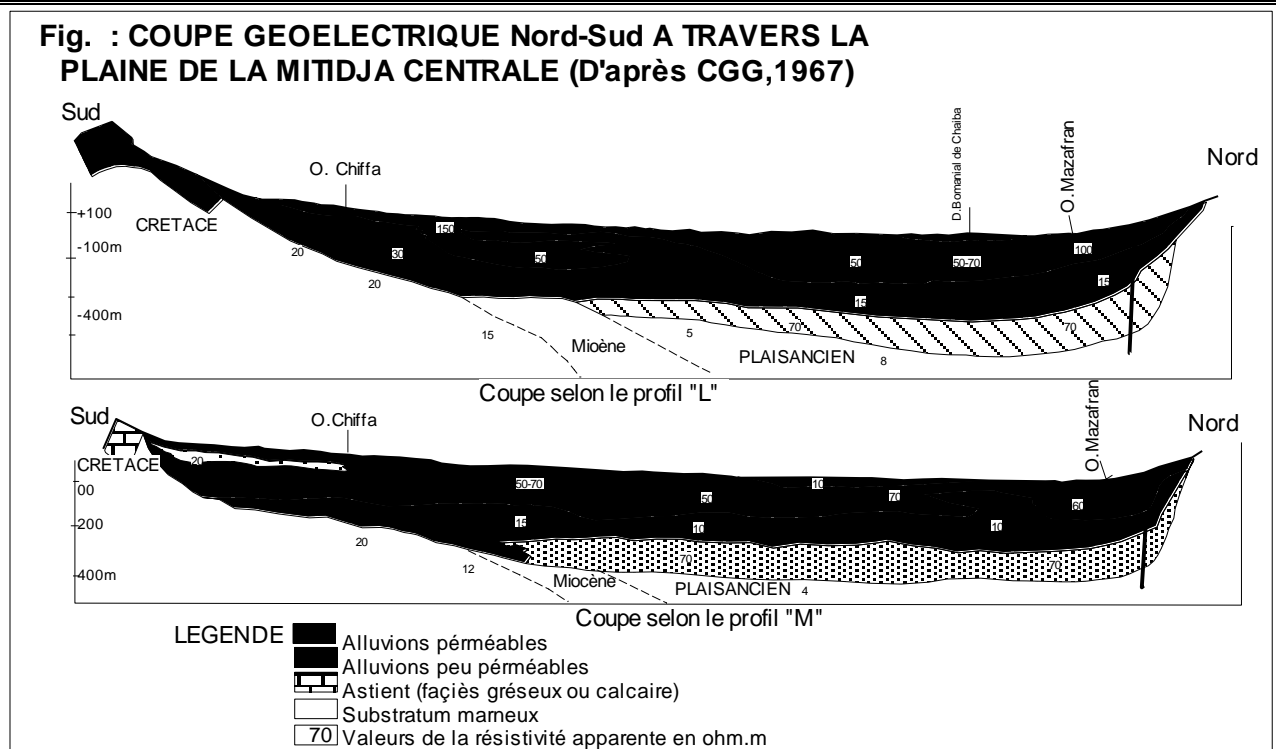


Figure II-2 Coupe géo-électriques issues de l'interprétation des sondages géophysiques (CGG, 1972).

IV.1.2 L'aquifère des alluvions de la Mitidja

Les sédiments clastiques de la formation de la Mitidja et les sédiments fluviaux récents constituent l'aquifère le plus important de la plaine de la Mitidja.

Cet aquifère, composé de graviers et de galets alternant avec des limons et argiles, occupe toute l'étendue la plaine. Sa limite inférieure est constituée par les marnes de la formation d'El Harrach et sa limite supérieure est libre sauf dans la zone du Mazafran où la nappe est captive sous les limons du Rharbien. L'aquifère se développe sur une épaisseur de 100 à 200m en moyenne et va en s'amincissant vers le sud pour atteindre 50 30m près de l'Atlas.

IV.2 Alimentation de la nappe

La recharge comprend essentiellement les paramètres suivants :

- Infiltration directe d'une partie des précipitations sur la plaine de la Mitidja
- Infiltration des eaux dans les oueds importants
- Infiltration d'une partie des eaux d'irrigation excédentaires.
- Pertes des réseaux de distribution urbains
- Les apports de l'Atlas blidéen et de l'astien du Sahel

Nous considérerons que seuls les affleurements perméables de la plaine de la Mitidja autorisent infiltration directe des précipitations. Les affleurements recouvrent près de 75% de la surface total de la plaine. Le tableau ci-dessous fournit les débits infiltrés en fonction du coefficient d'infiltration adopté. Ces débits varient de 1.3 m³ /s pour un coefficient d'infiltration de 5% et à 5.1 m³ /s pour un coefficient d'infiltration de 20%. (Mohammed, 2015)

Tableau II-3 Infiltration directe sur les affleurements perméables (Mohammed, 2015)

	Surface d'affleurement (Km ²)	Pluie moyenne (mm)	Débit des exhaures (Hm ³ /an)	Volume infiltré (Hm ³ /an)		
				Coef_inf 5%	Coef_inf 10%	Coef_inf 20%
Alluvions Mitidja	1227	650	798	40	80	160
Grès Astien (hm ³ /an)	150	700	105	5.25	10.5	21

IV.3 Géométrie des aquifères dans la région d'étude et caractéristiques hydrodynamiques

Dans la région ou est circonscrit la région d'étude, les deux aquifères quaternaire et astien ne sont pas séparés comme ce fut le cas dans l'ensemble de la Mitidja par les argiles du Villafranchien (appelées marnes d'El Harrach). Il existe alors une relation hydraulique directe entre ces deux horizons si bien que l'on peut parler d'un aquifère unique. Cette configuration est confirmée par les résultats des études géophysiques et surtout par ceux des coupes lithologiques des forages.

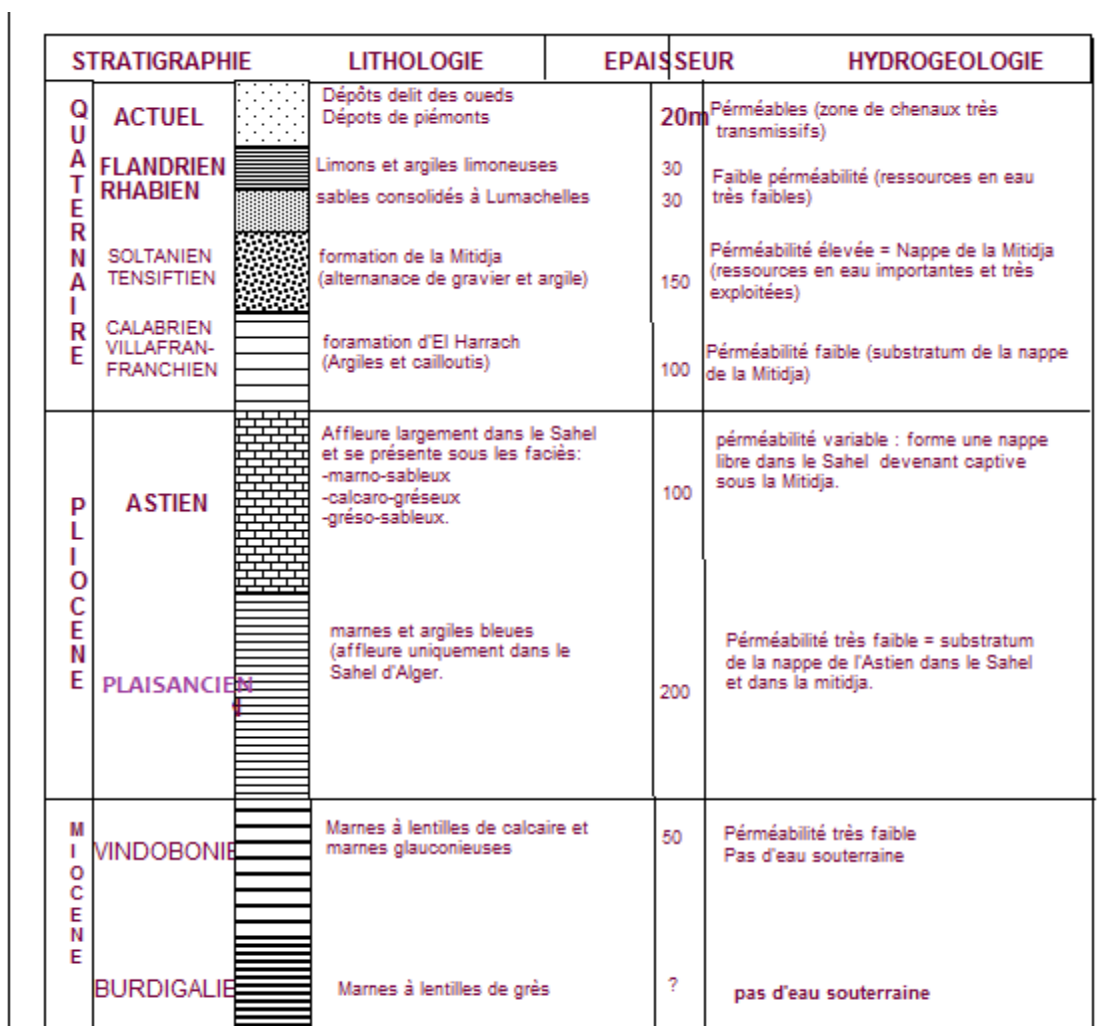


Figure IV-3 log hydrogéologique de la plaine de la Mitidja (ANRH, 2000)

Les transmissivités synthétisées par Binnie et Atkins en 1983 (Fig. IV-4), fournissent des valeurs cohérentes avec la composition de l'aquifère. Les terrains sont relativement perméables de l'ordre de 10-4 m/s au niveau du champ captant du Hamiz (Benziada, 1994) et un emmagasinement de l'ordre de 3 à 10% dans le bassin El Harrach- Hamiz (J. Mania 1985), caractéristiques d'une nappe libre.

Les transmissivités les plus importantes se retrouvent au niveau du champ captant du Hamiz et celui de Rouïba et sont de l'ordre de 2000 à 3000 m²/jour soit environ 2.10-2 à 3.10-2 m²/s.

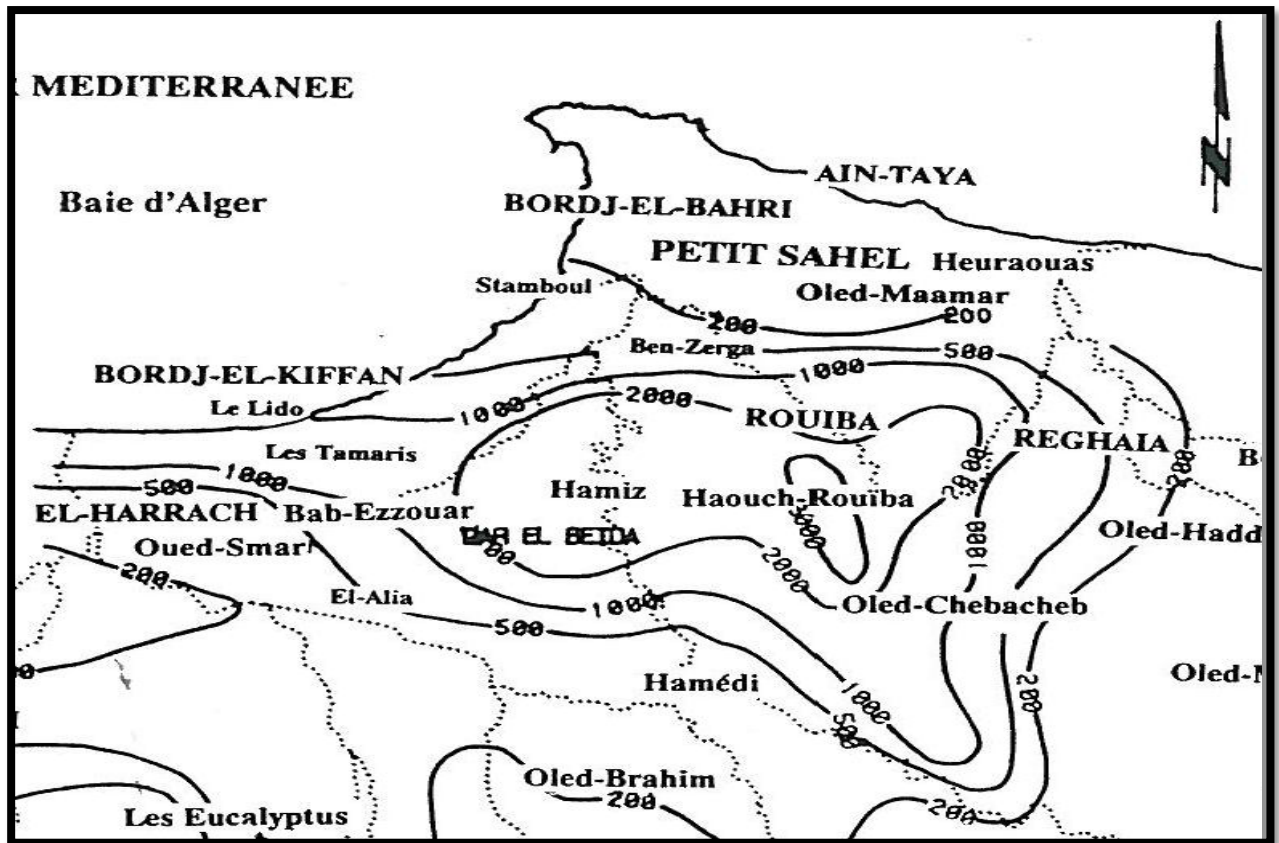


Figure IV-4 Carte des transmissivités de la plaine de la baie d'Alger en m²/jour (Binnie et Atkins, 1983).

IV.4 Piézométrie

IV.4.1 Comportement hydrodynamique de la nappe

La piézométrie dont la forme est « modelée » par les hétérogénéités morphologiques et par l'existence de grandes stations de pompage, présente des gradients hydrauliques décroissants d'amont vers l'aval ($I = 3\%$ en amont du piémont, $0,5\%$ en aval du piémont et $0,1\%$ dans la plaine).

Les courbes isopièzes, parallèles à l'Atlas en amont, s'incurvent vers l'aval pour mettre en évidence la convergence des écoulements vers les principaux exutoires naturels (cluse du Mazafran à l'ouest et baie d'Alger à l'est) ou artificiels (champs de captage) où s'effectue un pompage permanent (Fig. IV-5).

Sous l'influence conjuguée des alimentations hivernales et des pompages estivaux, la nappe présente des fluctuations saisonnières importantes.

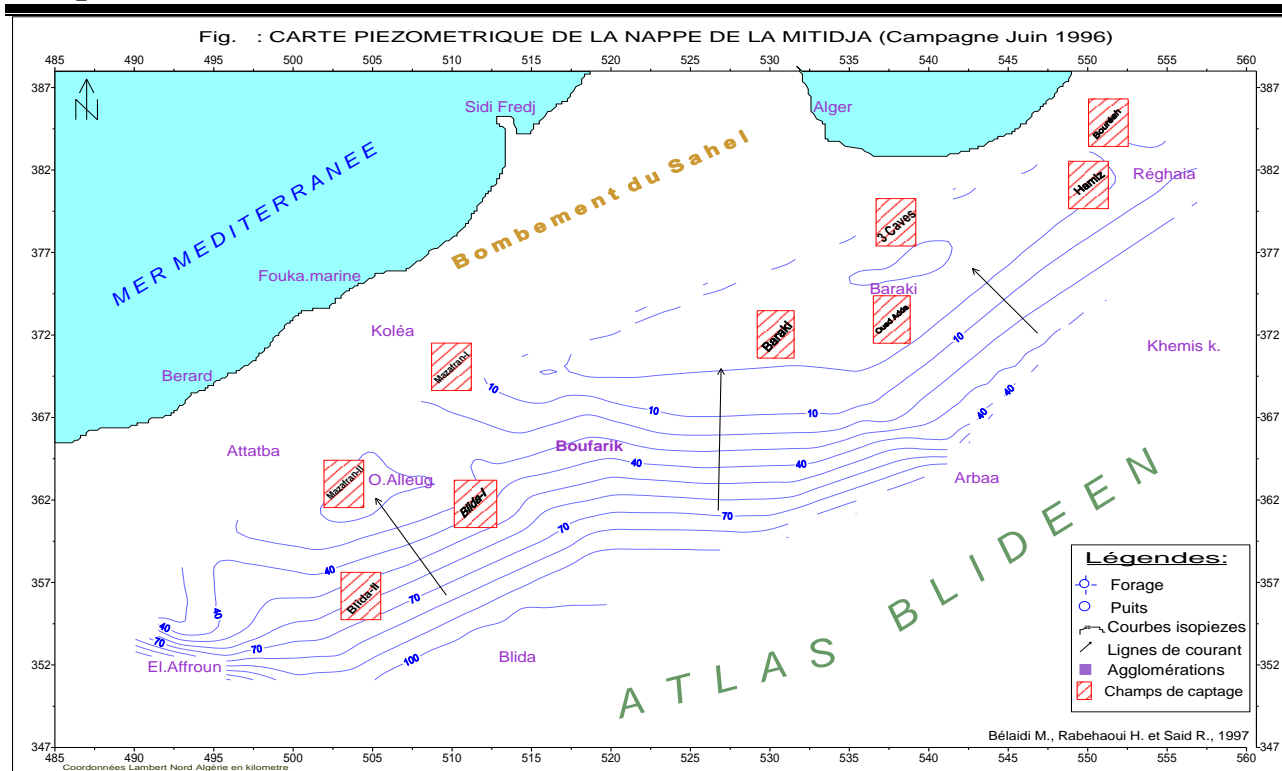


Figure IV-5 Carte piézométrique de la plaine de la Mitidja (ANRH, 2000).

Dans la partie orientale de la plaine (figure suivante) la côte piézométrique atteint 70 m mètres dans les piémonts. La nappe est libre dans tout le bassin Harrach-Hamiz ou est circonscrite la région d'étude. Localement aux environs de Khemis el Khechna la cote piézométrique est située autour de 60 à 70m au-dessus de la mer.

Les gradients hydrauliques décroissants d'amont vers l'aval ($I = 3\%$ en amont : Région de Khemis el Khechna, $0,5\%$ en aval du piémont et $0,1\%$ dans la plaine centrale). Les courbes isopièzes, parallèles à l'Atlas en amont, s'incurvent vers l'aval pour mettre en évidence la convergence des écoulements vers le principal exutoire naturel (Baie d'Alger) ou artificiels (champs de captage) où s'effectue un pompage permanent.

Les axes de drainage sont presque parallèles aux lits des oueds. A cet écoulement naturel se superpose un écoulement très accentué vers les centres de pompages (Baraki-El Harrach) ainsi que vers les marais de Réghaïa (Fig. IV 6).

IV.4.2 Evolution de la piézométrie

Dans le secteur du Mazafran, la nappe se trouve à un niveau plus bas. Les niveaux mesurés varient de 44m dans le bas Mazafran à 70m à Oued El Alleug. Au niveau du champ captant Blida, le toit de la nappe se trouve à plus de 60m de profondeur. Les pompages effectués dans ces champs captant, affectent considérablement le niveau souterrain.

Dans la Mitidja orientale, l'augmentation des prélèvements par la mise en exploitation des champs captant (Baraki 1979, Dar El Beida 1980, Hamiz 1983, Rouïba et Boureah 2001) ainsi que par la présence de nombreux forages agricoles et industriels, licites et illicites, ont entraîné un rabattement de nappe de l'ordre de 25 mètres en 30 ans

Dans le but de déterminer l'évolution des fluctuations de la surface piézométrique de l'aquifère alluvial de la Mitidja, nous avons cherchés à comparer les niveaux d'eaux relevés par l'ANRH dans les anciennes études (1980) avec ceux mesurés récemment. La première lecture des données de

l'ANRH, depuis les années 1980, montre que la piézométrie de la Mitidja a beaucoup diminué. Un rabattement très important et remarquable dans la nappe, varie de 10 à 25 mètres sur une période de 30 ans.

La chronique piézométrique au niveau du piézomètre PZ 2 Hamiz, suivi depuis 1995 montre l'évolution du niveau de la nappe au sein du champ captant du Hamiz (Fig. IV 7).

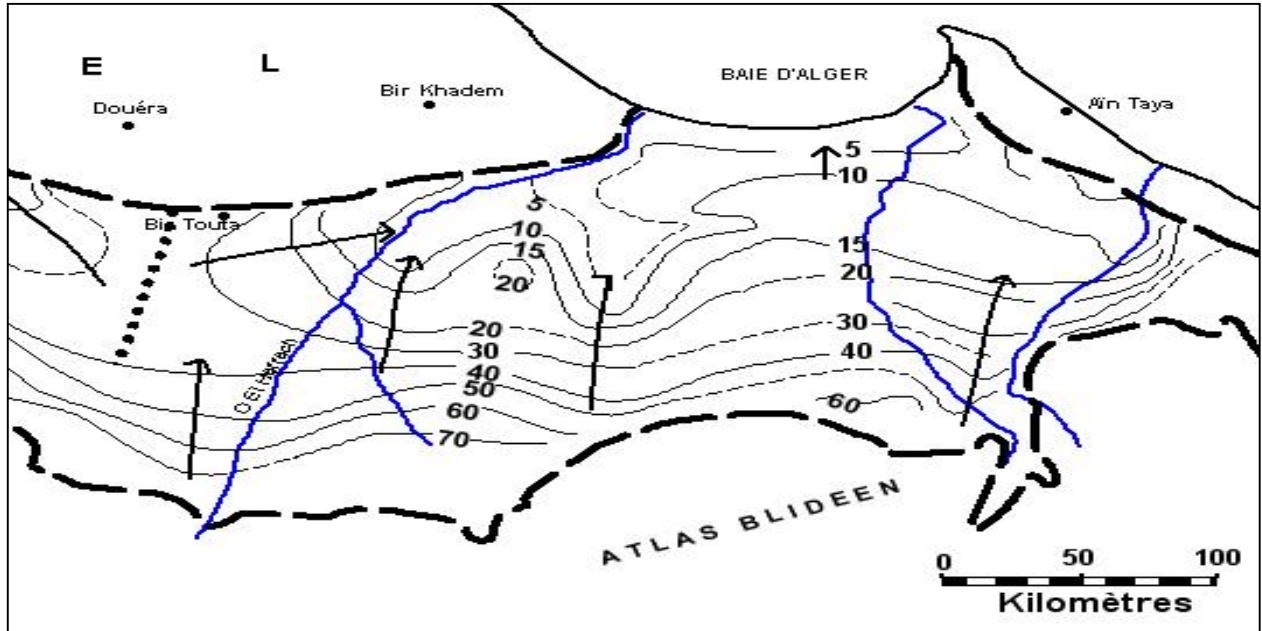


Figure IV-6 Carte piézométrique de la plaine de la Mitidja (Binnie and partenrs, 1981-1982).

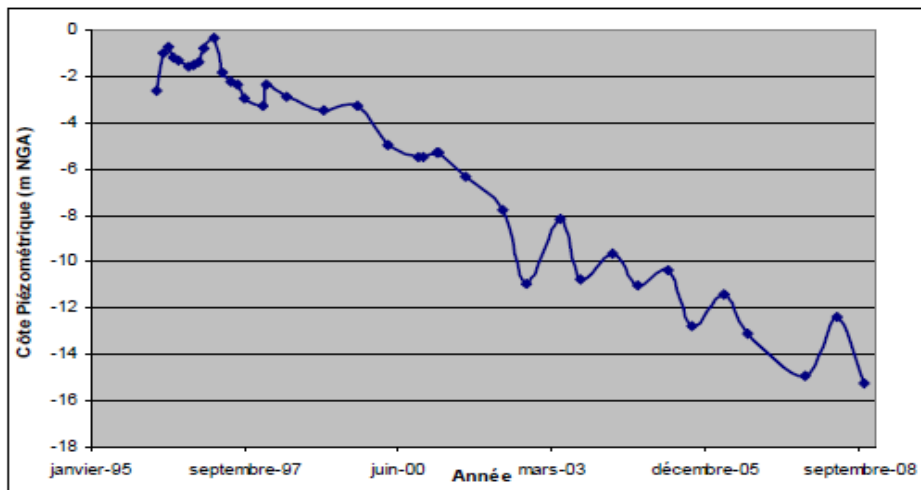


Figure IV-7 Chronique piézométrique sur le piézométrique PZ Hamiz

Cette baisse importante de la surface piézométrique est la conséquence de plusieurs facteurs à savoir.

- Longue période de sécheresses combinée à une importante prolifération de forages.
- Le commencement précoce de l'irrigation dû à cette sécheresse.
- Importance des surfaces irriguées.

- La déperdition des eaux par ruissellement favorisée par les extractions du tout-venant et de sable dans les lits des oueds.
- Au pompage continu au niveau des principaux champs de captage à cause de l'augmentation de la demande de la ressource au niveau de l'algérois.
- Prolifération des forages agricoles et industriels illicites

V. Propriétés physico-chimique et risques de pollution

V.1-Propriétés physico-chimiques

Les eaux de l'aquifère alluvionnaire de la Mitidja sont caractérisées par un faciès chimique prédominant de type chloruré et sulfate calcique et magnésien. Ce faciès caractérise les zones les moins minéralisées (400 à 900 mg /l). Le faciès chloruré sodique et potassique ou carbonaté sodique occupe, par contre, une zone d'étendue réduite et coïncide avec les régions à forte minéralisation (Fig.V-1).

Mais, en général, la minéralisation croit du Sud vers le Nord de la plaine, dans le sens d'écoulement de la nappe. Dans la partie Nord près de la baie d'Alger le faciès devient hyperchloruré sodique, témoins de la pollution des eaux par le biseau salé (Fig. V- 2).

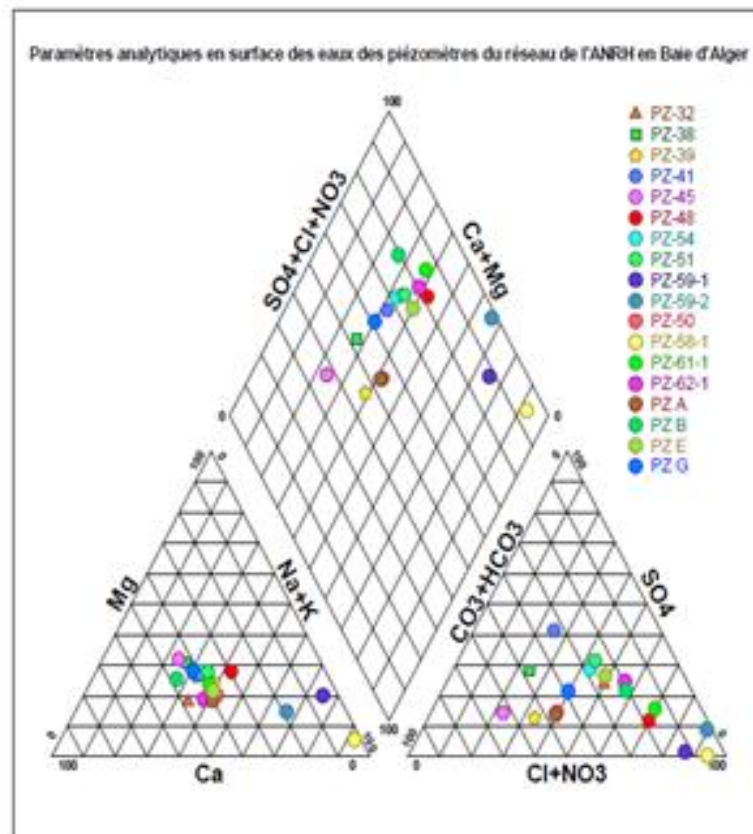


Figure V-1 Diagramme de piper sur les analyses d'eau réalisées dans la partie supérieure de l'aquifère, Campagne de Mai 2005(SOGREAH, ANRH, 2021).

Paramètres analytiques des eaux des piézomètres du réseau de l'ANRH en Baie d'Alger en collaboration avec le CRNA

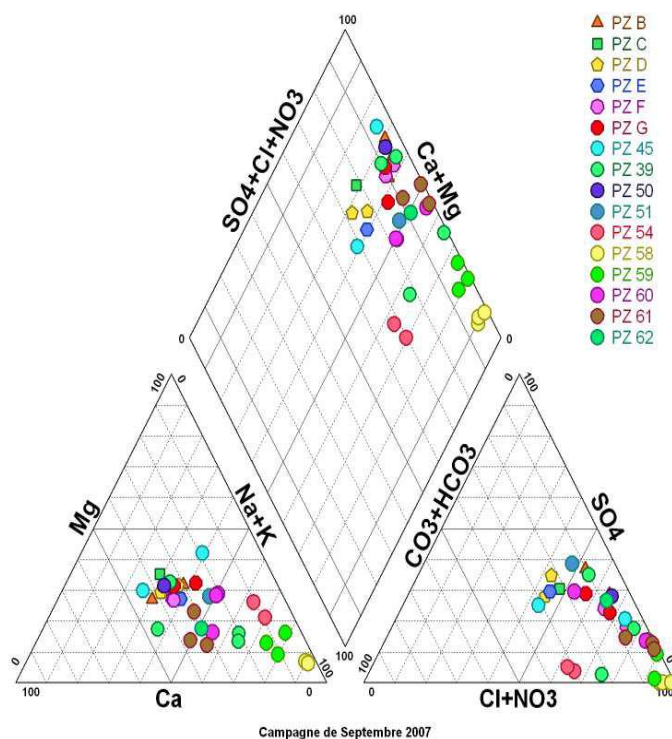


Figure V-2 Diagramme de piper sur les analyses d'eau dans la partie avale, campagne de septembre 2007 (SOGREAH, ANRH, 2021).

V.2-Risques de pollutions par les activités anthropiques

Les phénomènes de pollution dans la plaine de la Mitidja prennent ces dernières années une ampleur inquiétante. Elles sont souvent la conséquence du développement des centres urbains, des industries polluantes, de la multiplication des points de rejets d'eaux usées dans les oueds sans aucun traitement préalable, du passage d'un Oléoduc souterrain qui traverse la nappe d'Est en Ouest, des dépôts d'ordures et de la pratique des cultures à risque nitrate.

V.2.1 Population et risques de pollution d'origine urbaine

Au recensement de 1998 (RGPH), la population des quatre wilayas bâties sur la Mitidja été de 2.623.631 habitants. Le tableau ci-dessous donne la population par wilaya d'après le recensement de 1998 et sa projection pour l'horizons2020. (Mohammed, 2015)

Tableau II-4 Population 1998-2020

Wilaya	Population 1998	Population 2020
Alger	1 179 475	1 694 303
Blida	978 150	1 489 532
Boumerdes	215 739	340 796

Le tableau ci-dessus montre que 45% de la population est concentrée au niveau de la wilaya d'Alger et 37% dans la wilaya de Blida. Ces villes sont dotées de réseaux d'assainissement qui sont pour la plupart des réseaux unitaires munis de déversoirs d'orages au niveau des Oueds et se terminant malheureusement par un ou plusieurs rejets sur les Oueds proches, sans aucun traitement préalable

(mis à part certaines communes qui sont dotées d'une station d'épuration des eaux). C'est ainsi que la plupart des Oueds sont devenus, en périodes sèches, des caniveaux d'évacuations des eaux usées non traitées, ce qui a obligé quelques communes à canaliser et à couvrir ces Oueds à leurs passages des agglomérations.

V.2.2 Agriculture

La plaine de la Mitidja est une région agricole en raison de sa topographie et de la fertilité des sols. Les activités agricoles les plus répandues sont l'arboriculture et les cultures maraîchères. La végétation en tant que facteur de pédogénèse a été presque complètement détruite par une exploitation intensive, autant dire qu'aujourd'hui, elle n'existe presque plus. Cependant, les forêts de Réghaia et le bois de Boulogne au Sud de la ville de Larbaa sont parmi les seuls vestiges de cette végétation naturelle. Cette végétation est constituée, principalement, d'une association de chêne-vert et d'épais bosquets de maquis méditerranéen.

La pollution agricole est occasionnée par trois sources possibles :

- **pollution animale** : L'élevage bovin, l'élevage ovin, de même que les volailles sont généralement à l'origine de cette pollution. En effet, les fosses à purin non étanches, les fumiers, les eaux de lavage des étables, les eaux de ruissellement des parcs forment les principales sources de pollution par percolation.

- **pollution par les engrais** : Les nitrates sont généralement les engrais les plus employés. Leur utilisation fréquente pour augmenter les rendements des terres est sans doute très utile pour l'agriculture. Mais la concentration des nitrates dans le sol augmente les risques de propagation de ce polluant dans la nappe.

V.2.3 Industrie

La région de la Mitidja est l'une des plus importants pôles industriels de l'Algérie (zone industrielle de Réghaia, Dar el Beida, Oued Semar et Rouïba). L'image de cette région se caractérise par le poids des industries chimiques et agro-alimentaires (pharmaceutique, sucreries, unités laitières.). En plus de ces branches, la région est connue aussi par ses industries de textile, de conserves de poissons, de plastique et produits pharmaceutiques. Les rejets industriels et sanitaires se font dans les réseaux d'assainissement, dans les Oueds et dans les décharges publiques, souvent sans aucun traitement préalable. De ce fait, la plupart des Oueds passant à côté des zones industrielles sont fortement pollués. (Cheriet Abdelkarim, 2018)

V.2.4 Pollution accidentelle par les hydrocarbures

Depuis 1989, six cas de pollutions accidentelles par les hydrocarbures ont été enregistrés dans la plaine de la Mitidja. Ils sont dus aux pipes 10'' multi-produits (Sidi Arcine-Chiffa), qui traverse la plaine d'Est en Ouest. Les zones contaminées sont localisées à Sidi Arcine (Baraki), à Ben Hamdani, à Tessala El Merdja et à Baba Ali. Ceci a entraîné la fermeture définitive du champ de captage de l'oued Adda (4 forages au débit total de 1hm³/an).

V.2.4 Pollution par le biseau salé dans la baie d'Alger

Le sur-pompage des aquifères d'eau douce dans les zones côtières peut provoquer l'intrusion d'eau saline dans les zones d'eau douce des aquifères. Cela se produit par le soulèvement de l'eau salée et le mélange avec de l'eau douce, donnant lieu à une salinisation irréversible de l'aquifère

VI. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la zone d'étude du point de vue géologique, hydrogéologique, climatologique et géomorphologique. Ainsi la synthèse des données et études antérieures a permis de montrer que la plaine de Mitidja, limitée au Nord par le bombement du Sahel où affleurent les terrains d'âge Pliocène, et au Sud par l'Atlas Blidéen formé par des terrains d'âge Crétacé essentiellement.

D'un point de vue hydrogéologique, l'analyse des séries stratigraphiques sur la plaine permet de mettre en évidence les deux principaux aquifères :

- Aquifères des calcaires et grès d'Astien.
- Aquifère des alluvions quaternaires (Soltano-Tensiftien)

Ces deux niveaux aquifères ont pour substratum imperméable les marnes du Plaisancien. Ces deux aquifères sont séparés par la formation d'El Harrach, sauf à l'est dans la Mitidja orientale, où ils sont en contact direct. Les eaux souterraines s'écoulent du Sud vers le Nord. Les axes de drainage sont presque parallèles aux lits des oueds. A cet écoulement naturel se superpose un écoulement très accentué vers les centres de pompages (champs de captage) ainsi que vers les marais de Réghaïa. Près de la cote, dans la baie d'Alger, les écoulements souterrains sont inversés et se font de la mer vers la nappe, conséquence d'un rabattement généralisé causés par la surexploitation de la nappe dans ce secteur.

Les eaux sont en général moyennement minéralisées et leur charge minérale croît du Sud vers le Nord de la plaine, dans le sens d'écoulement de la nappe. Dans la partie Nord près de la baie d'Alger le facies chimique devient hyperchloruré sodique, témoins de la pollution des eaux par le biseau salé

L'étude hydro climatologique montre que le secteur étudié est caractérisé par un climat régional méditerranéen très froid et humide en hivers, et chaud et sec en été. La pluviométrie moyenne annuelle irrégulière est de 670 mm.

Chapitre III : Application

I. Description et état du réseau de surveillance qualitatif existant

Dans le cadre de la surveillance périodique de la fluctuation des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja, deux campagnes de mesures du niveau de la profondeur de la nappe sont effectuées régulièrement par les services de l'ANRH.

Le réseau actuel de la Mitidja est composé de 89 points de mesures, 11 puits, 19 forages et 37 piézomètres, dont 22 piézomètres spécifiques au suivi de l'intrusion marine au niveau de la Baie d'Alger.

Dans l'optique de combler les lacunes de prise de mesures d'une part et l'étouffement du réseau de surveillance des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja d'autre part, ont tient à rappeler ce qui suit :

- Les 10 (dix) piézomètres récemment réalisés par la SEAAL ont été intégrés dans ce réseau depuis la (campagne haute eaux 2010).
- suite à l'assèchement de plusieurs puits, et de certains forages qui composaient le réseau de surveillance, une fiche technique a été proposée en 2009 pour la réalisation de 16 piézomètres. Ainsi que 34 sondes autonomes pour le suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja ont été acquises.

Le matériel acquis est composé des dispositifs suivants :

- 30 appareils de mesure des niveaux d'eau et température en continue.
- 04 appareils de mesure des niveaux d'eau, température et conductivité électrique.
- 03 baro-Diver installés, qui mesurent les variations de pression atmosphérique. (Messaoud, 2017) .

Ces appareils offrent une gestion optimale des nappes souterraines. Ils permettent de mesurer les niveaux de la nappe (pression) avec des fréquences allant d'une seconde jusqu'à 99 heures.

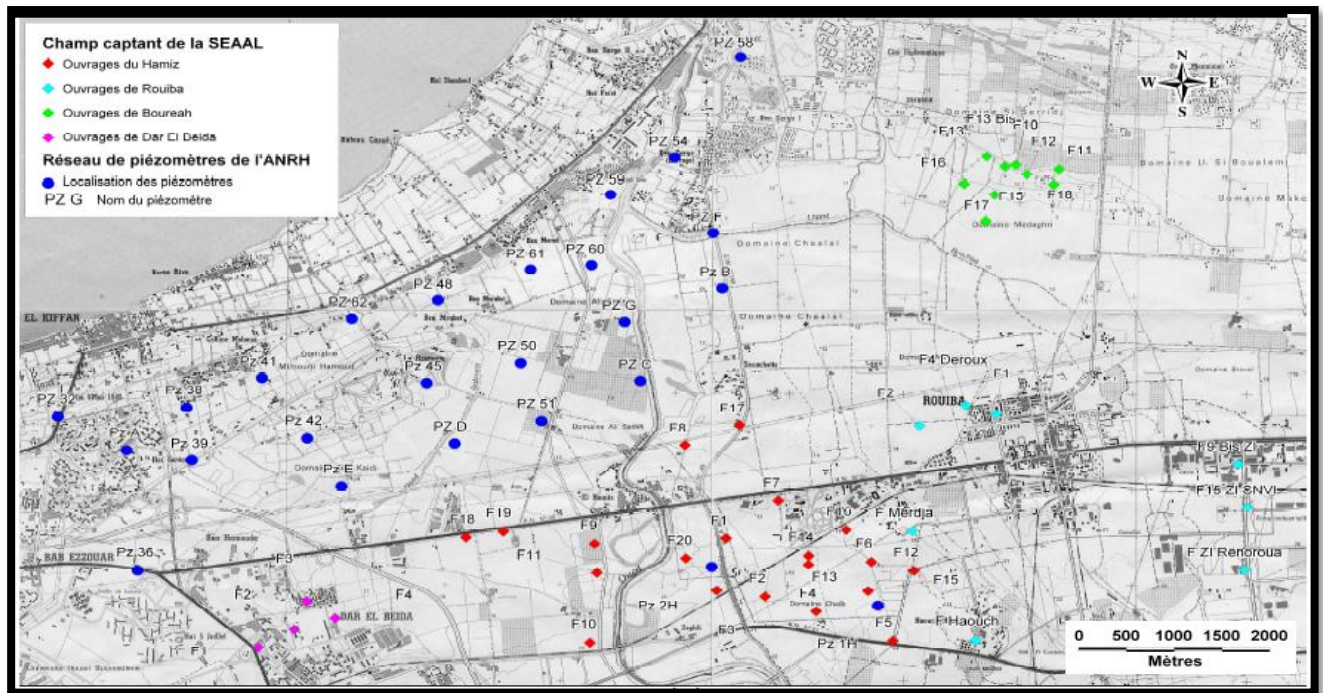


Figure 1-1 Carte de localisation des points d'accès à la nappe (piézomètres).

Le tableau suivant représente les caractéristiques des piézomètres de la plaine de la Mitidja orientale :

Tableau 0I-1 Caractéristiques des piézomètres de la zone d'étude (ANRH).

N	N BIRH	N CATALOGUE	NATURE	X	Y	Z/rr(m)	N statique		conductivité	
							oct-10	oct-11	2008	2010
1	w021-4212/pz 1 Hz	E008-4211	piézomètre	550,55	380,45	25,705	41,15	41,5	1220	
2	w021-4212/pz 2 Hz	E008-4212	piézomètre	549,3	380,75	27,347	39,83	39,12	1115	1900
3	w021/pz32BA	E007-9141	piézomètre	543,55	382,25	27,01		23,8	1940	
4	w021/pz36BA	E007-9142	piézomètre	544,5	380,5	18,07		27,38	610	
5	w021/pz38BA	E007-9143	piézomètre	544,75	382,35	19,65		19,3	1180	
6	w021/pz39BA	E007-9144	piézomètre	544,9	381,85	17,67		28,86	550	
7	w021/pz41BA	E007-9145	piézomètre	545,38	382,75	19,38	24,13	24	1953	
8	w021/pz42BA	E007-9146	piézomètre	545,9	382	23,67		34,47	2343	
9	w021/pz45BA	E007-9146	piézomètre	546,85	382,6	17,82	29,01	27,75	1390	
10	w021/pz48BA	E007-9147	piézomètre	546,9	383,35	14,2		21,3	1280	
11	w021/pz50BA	E007-9148	piézomètre	547,4	382,8	16,01	25,33	27,2	2833	
12	w021/pz51BA	E007-9149	piézomètre	547,8	382,25	17,38		21,2	2864	
13	w021/pz51BA	E007-9150	piézomètre	548,85	385,05	10,69		14,8	810	
14	w021/pz54BA	E008-4573	piézomètre	549,45	386,05	13,72		12,7	2490	
15	w021/pz58BA	E007-9152	piézomètre	548,3	384,65	13,73		19,2	3470	
16	w021/pz59BA	E007-9153	piézomètre	548,15	383,75	15,11		22,7	2685	

17	w021/pz60BA	E008-4577	piézomètre	547,65	383,75	14,28		19,15	1710	
18	w021/pz61BA	E08-4578	piézomètre	546,15	383,25	15,1		22,58	1880	2400
19	w021/pz62BA	E007-9754	piézomètre	544,2	381,85	14,28		25,45	950	
20	w021/pzA BA	E008-4579	piézomètre	549,35	383,6	15,1		27,8	2300	
21	w021/pzB BA	E007-4580	piézomètre	548,5	382,55	19,24		20,7	2630	
23	w021/pzC BA	E007-4581	piézomètre	547	382	16,38		27,9	1310	
24	w021/pzD BA	E007-8159	piézomètre	546,13	381,45	18,34		27,95	2454	800
25	w021/pzE BA	E007-8161	piézomètre	549,2	384,25	15,49		22,8	1160	1000
27	w021/pz1Rouiba	SEAAL	piézomètre	551,41	382,27		37,3	37		
28	w042/pz4 eucalyptus	E007-09681	Piézomètre	540,6	369,85	51,199	57,35	61,75		
29	w042/pz79 baraki	E007-09126	Piézomètre	533,8	371,75	79,247		50,1	660	
30	w042/pz10 sidi moussa	E007-09127	Piézomètre	534,9	369,25	45,244	56,75	59,55	1080	
31	w042/pz 51	SEAAL	Piézomètre	531,64	361,4	87,701		43,1		
32	w042/pz 2 hammadi	SEAAL	Piézomètre	550,48	376,44		46,69	50		
33	w042/pz 3 h, félit	SEAAL	Piézomètre	540,67	374,47		52,17	52,7		
34	w042/pz 4 rais	SEAAL	Piézomètre	538,18	368,67		65,65	69,25		
35	w042/pz 5 baraki	SEAAL	Piézomètre	533,96	373,73					

II. Paramètres mesurés au niveau du réseau de surveillance

Le réseau de surveillance de la Mitidja est utilisé pour la surveillance quantitative des ressources en eau (évolution et chronologie de la surface piézométrique) ainsi que les suivis de certains paramètres physico-chimiques (conductivité, pH, Nitrates, nitrites et les ions majeurs).

II.1 Fluctuation de la surface piézométrique pour la période 1980-1990

Dans le cadre de la surveillance des nappes, l'ANRH procède au suivi des niveaux d'eau dans certains piézomètres. Depuis les années 1980, la piézométrie de la zone d'étude a beaucoup évolué. L'augmentation des prélèvements par la mise en exploitation des champs captant (Baraki 1979, Dar El Beida 1980, Hamiz 1983, Rouïba et Boureah 2001) ainsi que par la présence de nombreux forages agricoles et industriels, licites et illicites, ont entraîné un rabattement de nappe de l'ordre de 25 mètres en 30 ans (Fig. II-1). (Meddi Mohammed)

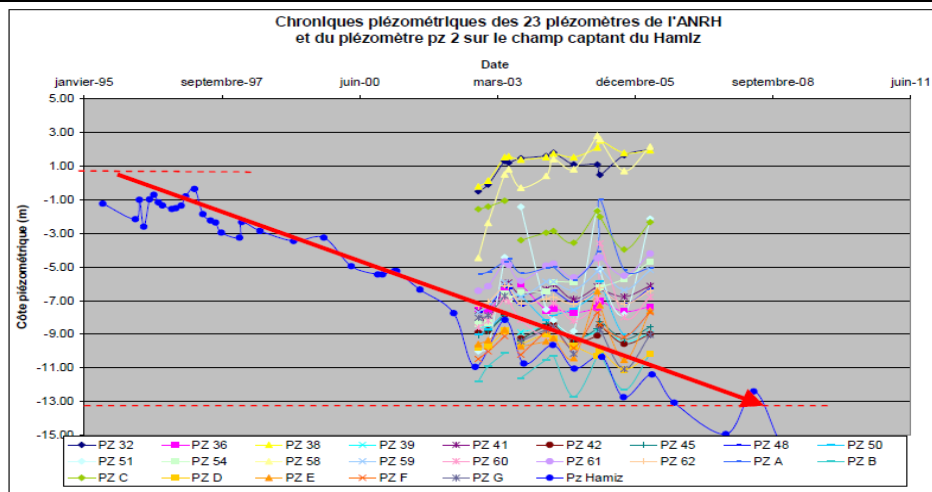
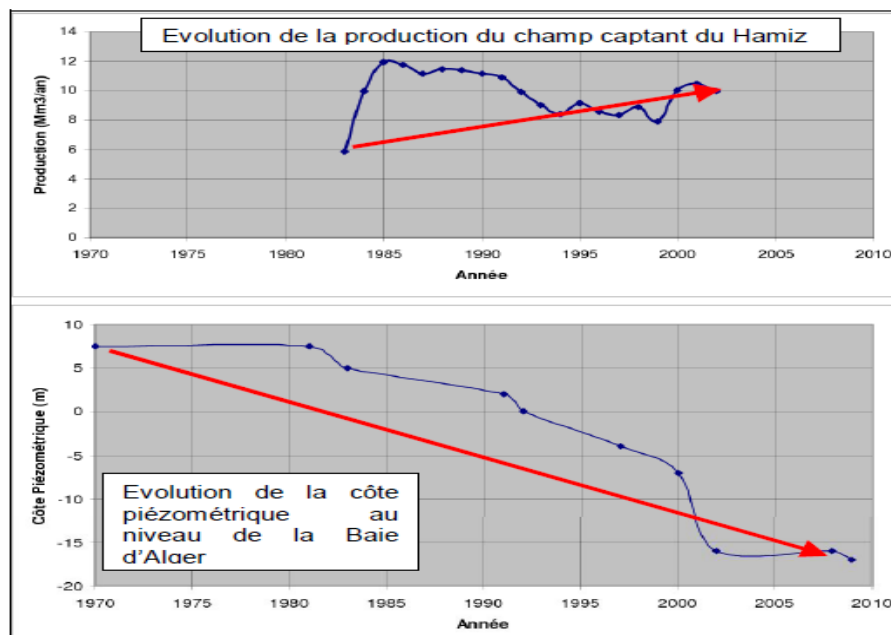


Figure II-1 Chronique piézométrique des 23 piézomètres de l'ANRH du piézomètre PZ2 de la SEAAL (Meddi Mohammed).

Sur le piézomètre Pz 2 du Hamiz, on remarque une baisse significative d'environ 14 m entre

1995 et 2008. La côte était de - 1m par rapport au niveau de la mer dans le piézomètre Pz 2 de la SEAAL (Pz Hamiz) en 1995. Les ouvrages ANRH, suivi depuis 2002, présentent des variations intra-annuelles des niveaux d'eau. Ces piézomètres suivent les mêmes tendances intra annuelles que le piézomètre de la SEAAL. Ces fluctuations seraient induites par les variations saisonnières des nappes et par les pompages des champs captant (Fig. II-2).



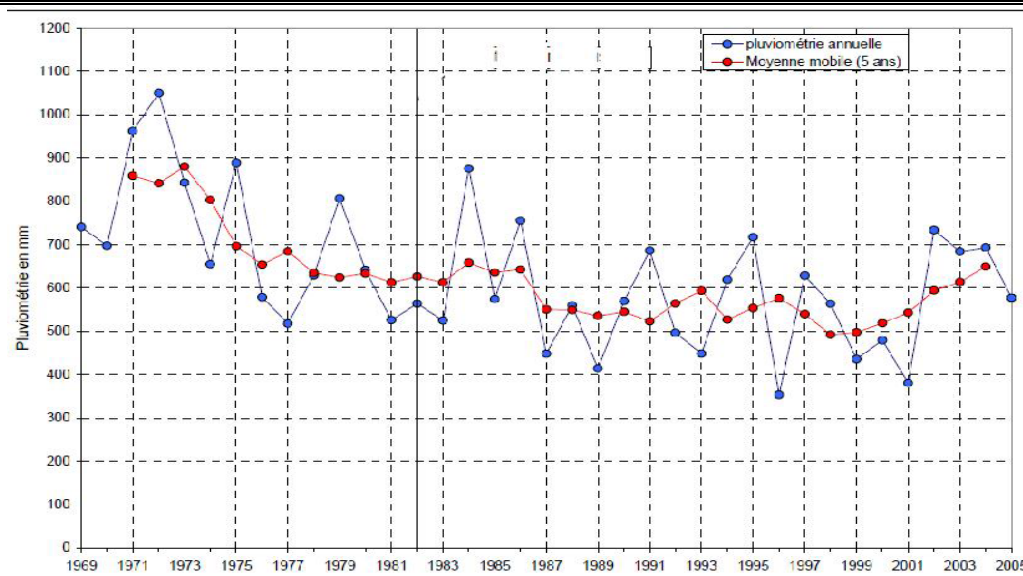


Figure II-2 Evolution de la production du champ captant du Hamiz, Evolution de la cote piézométrique au niveau de la Baie d’Alger et Evolution de la pluviométrie moyenne annuelle.

La période déficitaire en Algérie (1990-2000) est très bien marquée par une baisse très nette du niveau piézométrique, près de 10 mètres sur 10 ans. Les graphes établis montrent que :

- la période 1990-1995 est marquée par une baisse importante du niveau piézométrique (près de 5 mètres) dans le forage (E008-04603 Rouïba).
- durant l’année 2006, on a enregistré une remontée rapide de la surface piézométrique dans le forage (E008-04211 Rouïba).
- le niveau du plan d’eau a diminué durant le cycle de 1996-2000 dans le forage (E008- 04603 Rouïba) (Fig.II-3 , II-4). (Meddi Mohammed)

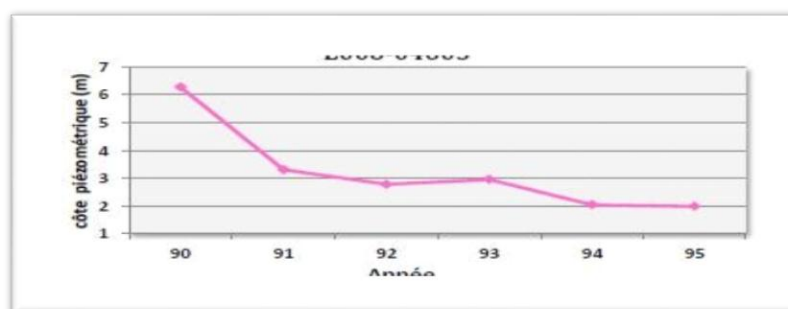


Figure II-3 Evolution du niveau piézométrique du forage E008-04603 Rouïba, période 1990-1995 (Meddi Mohammed).

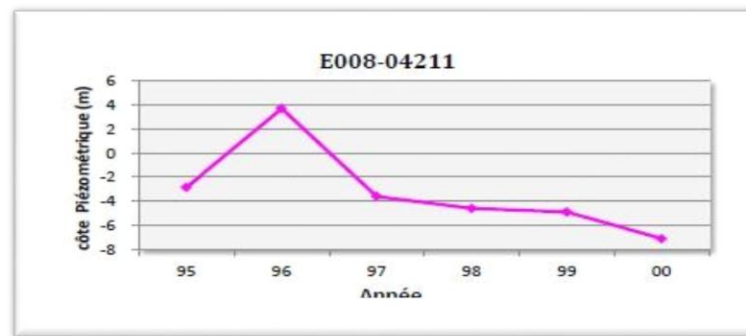


Figure II-4 Evolution du niveau piézométrique du piézomètre E008-04212 Rouïba, période 1995-2000(Meddi Mohammed).

Le graphe montrant l'évolution du niveau piézométrique du forage (E008-04596 Baraki) établi pour la période 2000-2010 montre que les faibles rabattements enregistrés durant cette période sont le résultat de l'accroissement des précipitations qui ont dépassé les 600 mm/an en plus de l'installation des bassins d'infiltrations (recharge artificielle) du projet pilote dans la partie amont de l'oued El Harrach, par l'ANRH et la DRE de Blida, pour la recharge de la nappe artificiellement à partir de l'année 2005 (Fig. II-5).

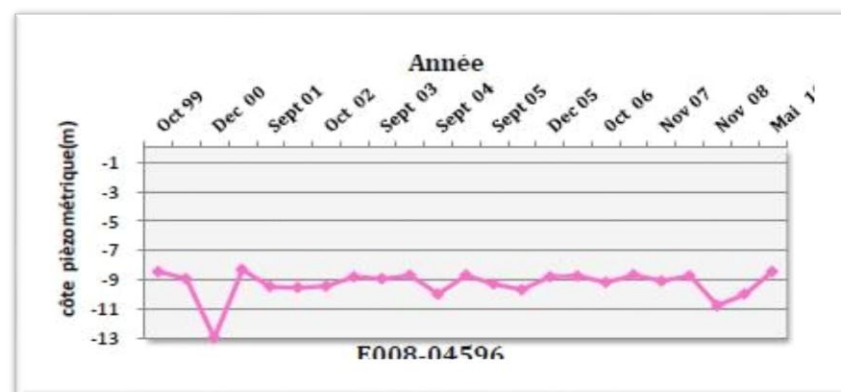


Figure II-5 Evolution du niveau piézométrique du forage E008-04596 Baraki,période 1999-2010(Meddi Mohammed).

III Partie terrain

Afin de participer à une campagne de mesure piézométrique, nous avons eu le privilège d'accompagner l'équipe de l'ANRH de participer à la mission de terrain effectuée le 19 mai 2021. Nous avons mesuré le niveau statique dans les piézomètres dans le but de connaître le niveau d'eau actuel de la nappe de la région de la plaine de la Mitidja orientale. Cette équipe était composé de :

- Un Ingénieur hydrogéologue (Mr Brahim).
- Un chauffeur.

III.1 Matériels utilisés

Les missions de terrain ont été réalisées par le matériel suivant :

- Véhicule de terrain.
- Une sonde de niveau
- Phmetre, conductivimètre de terrain
- Flacons pour prélèvement d'échantillons d'eau

III.2 Mesure du niveau statique

À l'aide d'une sonde, nous avons mesuré le niveau statique dans les piézomètres, dans le but de connaître le niveau d'eau actuel de la nappe de la région de la plaine de la Mitidja orientale.



Figure III-1 Piézomètre et escabeau utilisé



Figure II01-2 Mesures du niveau statique sur les piézomètres au niveau de la plaine de la Mitidja orientale.



Figure III-3 Sonde utilisée pour les mesures

IV. Conclusion

En conclusion nous pouvons attester que la surface piézométrique a considérablement baissée entre 1980 et 2010 induisant des rabattements conséquents qui se manifestent au niveau des principaux champs de captages.

Le réseau de surveillance de la plaine de la Mitidja, composé de 89 points de mesures, doit être optimisé. En effet, cela représente un piézomètre pour plus de 13km². Il demeure donc insuffisant et la proposition de nouveaux piézomètres doit tenir compte d'une répartition judicieuse car au-delà du cout de réalisation des piézomètres, un réseau composé de plusieurs points de mesure sera difficile à gérer et surtout à entretenir.

C'est pourquoi nous proposons dans cette contribution une méthodologie qui permettra de rationaliser le nombre des points de mesures et surtout sa bonne répartition dans l'espace en fonction des critères qui ont un impact direct sur la surexploitation de la nappe, les risques de pollution et la vitesse de propagation des polluants.

V. Critères retenus

Dans l'objectif d'optimiser le réseau de surveillance de la nappe de la Mitidja, nous avons retenus quatre critères qui seront par la suite pondérés en fonction de leur poids définis. Ces critères sont les suivants :

- Critère fluctuation de la nappe
- Critère densité des points de prélèvement
- Critère gradient hydraulique
- Critère risque de pollution

V.1 Critère fluctuation de la nappe

La comparaison des chroniques de mesures de la piézométrie a permis d'apprécier les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe de la Mitidja. Ces fluctuations nécessitent une surveillance accrue en multipliant le nombre de points de mesures dans les zones fortement affectées. Elles sont essentiellement dues à plusieurs facteurs à savoir :

- Longue période de sécheresse (des deux dernières décennies) combinée à une importante prolifération de forages.
- Le commencement précoce de l'irrigation
- Importance des surfaces irrigables
- La déperdition des eaux par ruissellement (Mr.Belaidi Mouloud, 2005)
- Pompage continu, et d'une façon intensive, au niveau des principaux champs de captage à savoir : Baraki, Hamiz, Bouréah, les trois caves, ...etc.
- La prolifération de forages illicites dans les périmètres de protection des champs de captage (Mr.Belaidi Mouloud, 2005).

Ainsi, il en ressort que le suivis de la fluctuation de la piézométrie nous renseigne aussi bien sur l'évolution de la profondeur du toit de la nappe et la localisation des zones surexploitées. C'est pourquoi, nous considérons ce critère comme étant d'importance de premier niveau et lui avons attribué un poids de 4.

V.2 Critère risque de pollution

La nappe de la plaine de la Mitidja, menacée par de nombreux foyers de pollution (urbanisations, industrie, élevages, décharges sauvages, etc.), qui se sont multipliés dans la région en dehors de toute mesure de protection de l'environnement, nécessite un suivi rigoureux de la qualité des eaux souterraine. Celles-ci sont exposées à des risques potentiels d'altération continue ou épisodique, et seront menacées davantage dans l'avenir par l'insuffisance des volumes de recharge.

Nous avons choisi ce critère afin de connaître l'origine de la pollution des eaux souterraines et de prévenir le risque qu'elle engendre, et nous lui avons donné un poids d'importance d'ordre trois (03).

La nappe alluviale de la Mitidja a été affectée par quatre types de pollution :

1. Pollution d'origine industrielle : la région Est de la Mitidja connaît une très forte activité industrielle dont les effluents sont déversés directement dans les oueds sans traitement préalable.

2. Pollution d'origine agricole : L'impact des activités agricoles qui atteint dans sa région ouest près de 400 kg d'azote/hectare, sur la qualité des eaux est la conséquence des pertes de fertilisants (engrais chimiques, effluents d'élevages, effluents agro-alimentaires et boues) et des produits de traitement des cultures (produits phytosanitaires).

3. Pollution d'origine urbaine : les rejets urbains de 628.516 habitants drainés par le réseau d'assainissement public cause de nombreuses perturbations et supporter de nombreux flux. En effet, ce réseau provoque une pollution ponctuelle du milieu récepteur à cause des effluents pendant des événements pluvieux forts. Dans ce cas, les effluents en excès sont détournés vers des déversoirs d'orage pour être ensuite rejetés dans le cours d'eau récepteur si le volume du déversoir ne permet pas de stocker toute l'eau.

4. Biseau salé : Le sur-pompage des aquifères d'eau douce dans les zones côtières peut provoquer l'intrusion d'eau saline dans les zones d'eau douce des aquifères. Cela se produit par le soulèvement de l'eau salée et le mélange avec de l'eau douce, donnant lieu à une salinisation irréversible de l'aquifère qui affecte la région de la baie d'Alger, dont le front salé a progressé vers le nappe sur une distance de 4km à partir du rivage.

V.3 Critère de gradient hydraulique

Le gradient hydraulique est défini comme le rapport entre la différence de charge et la longueur du trajet de l'écoulement. Pour un écoulement en canal ouvert, le gradient hydraulique est la pente de la surface de l'eau considérée comme parallèle à l'écoulement. Le gradient hydraulique vertical est l'un des éléments les plus importants pour identifier la sensibilité des régions aux polluants passant de la surface de la terre ou de la partie la plus productive de l'aquifère (Cherry JA, 2004). Il est également nécessaire de comprendre quelles zones sont les plus intensivement exploitées et comment s'y comporte le gradient vertical (Juan M, 2015). Nous lui avons donné un poids d'importance d'ordre deux (02).

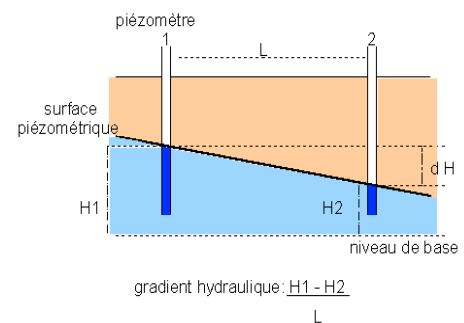


Figure V-1 Le gradient hydraulique.

V.4 Critère de densité des points d'eaux

Ce critère est défini comme le nombre de points de mesure par unité de surface. Ce facteur a été choisi en raison de la nécessité de surveiller les zones à plus forte densité de points d'eau car ces zones peuvent présenter des phénomènes de synergie avec une exploitation plus intense. Une base de données de points d'eau de prélèvement développée par l'ANRH a permis de déterminer la densité de points de mesure, c'est-à-dire le nombre de points d'eau par kilomètre carré. Nous donnons à ce critère un poids d'importance d'ordre un (01).

VI. L'application de la méthode AHP

Méthode AHP Analytique Hiérarchie Processus c'est une méthode la plus utilisée dans la littérature

-Elle se distingue par sa façon de déterminer les poids de critères

-Elle procède par combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur :

• Raisons de sa popularité :

-Unités de mesures : Qualitatives et quantitatives, valeurs relatives ou absolues pour établir les priorités.

-Structure hiérarchique : Trie des éléments d'un système dans différents niveaux et dans de groupes à caractéristiques similaires.

-Interdépendance : Permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un système sans insister dans le raisonnement linéaire.

-Consistance : Permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités

-Synthèse : Permet d'obtenir une appréciation générale de la désirabilité de chaque alternative.

-Unicité : Sa flexibilité permet son utilisation dans un éventail varié de problèmes non structurés.

Identification des priorités : Permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir la meilleure alternative selon les objectifs identifiés.

La fonction de pertinence (fonction croissante monotone) devait également être définie pour chaque facteur en se basant sur la théorie des groupes flous, ou logique floue (JR, 2012). La standardisation de chacune des cartes des facteurs établies, requis permet d'identifier les valeurs minimales et maximales des échelles originales.

VI.1 Processus de pondération

Après avoir sélectionné et standardisé les facteurs, l'étape suivante consistait à identifier le poids de chaque facteur. Cela consistait à attribuer la valeur de l'importance d'un facteur par rapport à un autre en fonction de l'importance ou de l'influence qu'il a dans la réalisation de l'objectif proposé (JR, 2012). Nous avons procédé à la comparaison de différents facteurs, sur la base de laquelle une hiérarchie a été élaborée. Après avoir défini l'importance de chaque facteur, l'une des trois méthodes a dû être choisie :

- a) Poids égaux
- b) Poids définis par l'utilisateur
- c) Processus de hiérarchie analytique

Pour notre cas nous avons opter pour la méthode des poids prédéfinis

La méthode AHP a été sélectionnée pour la présente étude et appliquée en adoptant une comparaison par paires. L'AHP a été utilisé pour construire des matrices basées sur ces comparaisons et des éléments d'algèbre matricielle ont été appliqués pour établir des priorités entre les facteurs d'ordre de priorité par rapport à un autre niveau d'ordre supérieur.

Le processus de comparaisons par paires a été réalisé en utilisant une échelle de 4 points correspondant aux niveaux d'importance : 1 = égal, 2 = modéré, 3 = élevé, 4 = très élevé). Un nombre entier a été attribué dans la matrice si le facteur de ligne est plus important pour l'objectif de l'étude que le facteur de colonne, et s'il n'est pas plus important, une fraction a été utilisée.

La valeur des poids, les coefficients de pondération et l'ordre d'importance de chaque facteur utilisé sont présentés dans le tableau suivant. L'ordre d'importance des facteurs prédéfini est comme suit :

L'ordre 01 : Fluctuation d'eau souterraine Fs.

L'ordre 02 : Risque de pollution Rp.

L'ordre 03 : Gradient hydraulique Gh.

L'ordre 04 : Densité des points d'eau Dp.

La méthode de combinaison linéaire pondérée (WLC) a été choisie et appliquée comme l'illustre le tableau suivant :

Tableau 0VI-1 Le poids selon l'ordre d'importance pour chaque critere

	Fluctuation	Risque de pollution	Gradient hydraulique	Densité des points d'eau	combinaison linéaire pondérée WLC	Priorité
Fluctuation	1	4/3	4/2	4/1	Row1 $= \sqrt[4]{1 \times \frac{4}{3} \times 2 \times 4} = 1.807$	$\frac{1.807}{4.577}$ $= 0.39$
Risque de pollution	3/4	1	3/2	3/1	Row2 = $\sqrt[4]{\frac{3}{4} \times 1 \times \frac{3}{2} \times 1 \times 2} = 1.22$	$\frac{1.22}{4.577}$ $= 0.26$
Gradient hydraulique	1/2	3/2	1	2/1	Row3 = $\sqrt[4]{\frac{1}{2} \times \frac{3}{2} \times 1 \times 2} = 1.10$	$\frac{1.10}{4.577}$ $= 0.24$
Densité des points d'eau	1/4	1/3	1/2	1	Row4 $= \sqrt[4]{\frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 1} = 0.45$	$\frac{0.45}{4.577}$ $= 0.09$
sommes	2.5	4.16	5	10	4.577	0.98

1. Calcule des Priorités:

On va calculer l'importance relative de chacun des critères de la hiérarchie a parti à la formule suivante :

$$Priority = \frac{combinaison\ linéaire\ pondérée}{la\ sommes\ de\ Row}$$

2. Calcule la valeur propre (λ max) poids par facteur :

On va multiplier la priorité d'un facteur par la combinaison linéaire pondérée WLC par la somme de ce facteur plus multiplie la priorité d'autre facteur par la combinaison linéaire pondérée WLC par la somme de ce facteur.

$$\lambda\ max = P\ (Row\ 1) \times \sum F + P\ (Row\ 2) \times \sum Rp + P\ (Row\ 3) \times \sum GH + P\ (Row4) \times \sum Dp$$

$$\lambda\ max = 0.39 \times 2.5 + 0.26 \times 4.16 + 0.24 \times 5 + 0.09 \times 10 = 4.1566$$

3. Calcule de CI:

Pour évaluer la cohérence des données ; on a la formule suivante :

$$CI = \frac{\lambda\ max - n}{n - 1}$$

Où : λ : poids par facteur

n : Nombre de facteurs

$$CI = \frac{4.1566-4}{4-1} = 0.0522$$

L'indice de cohérence obtenu pour cette application est acceptable, avec une valeur de 0.0522

4. Calcul de CR :

Le rapport de cohérence « CR » a également été calculé. Lorsque le CR est inférieur à 0,1, les coefficients de pondération sont acceptables.

La cohérence est définie comme : $CR = \frac{CI}{RC}$

Où : **RC** : Indice aléatoire RC correspond à 0.90 déduit du tableau ci-dessous pour un effectif de facteur de 4

CI : Indice de cohérence

$$CR = \frac{0.0522}{0.90} = 0.058$$

Tableau 0VI-2 Indice de cohérence aléatoire (Saaty, 1991)

Indice de cohérence aléatoire :	
Nombre de facteurs	RC
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

VI.2 Calcule des indices

VI.2.1 Les indices partiels

Ils correspondent aux poids multipliés par la cote de chaque paramètre, les cotes sont déterminées comme suite :

a. Fluctuation : d'après l'examen des données qu'on a, la fluctuation varie de 0m à 16m, on a subdivisé cette dernière en 5 classes, les zones où la fluctuation est importante on attribue la cote maximale de 5. Pour la faible valeur (<2m) on attribue une cote de 1.

b. Risque de pollution : on divise les origines de pollution en 4 classes classés selon leur impact sur la nappe, l'agriculture attribue une cote de 1, le biseau salé aura une cote de 4.

c. Gradient hydraulique : on attribue 3 classes, fort gradient avec une cote de 3, moyen gradient à une cote de 2 et le faible gradient avec une cote de 1.

d. Densité des points d'eau : on a subdivisé la plaine de la Mitidja en 3 zones, zone qui un nombre de points d'eau important avec une cote de 3, la zone où la densité des points d'eau est faible attribue une cote de 1.

VI.2.2 Les indices finaux

C'est la somme algébrique des indices partiels, cette addition se fait numériquement pour les valeurs maximales et minimales.

Tableau 0VI-3 Calcule les indices

Fluctuation			Risque de pollution			Gradient hydraulique			Densité des points d'eau		
Poids = 4			Poids = 3			Poids = 2			Poids = 1		
Classe	Cote	Indice	Classe	Cote	Indice	Classe	Cote	Indice	Classe	Cote	Indice
0-2m	1	4	Agricole	1	3	<0.5%	1	2	1 point/km2	1	1
2-4	2	8	Urbain	2	6	1-0.5%	2	4	1 à 4 points/km2	2	2
4-8	3	12	Industrielle	3	9	>1%	3	6	5 à 8 points/km2	3	3
8-16	4	16	Biseau salé	4	12						
>16	5	20									

-L'indice maximale = 20+12+6+3= 41. (Indice de première priorité).

-L'indice minimale = 4+3+2+1= 10. (Indice de faible priorité).

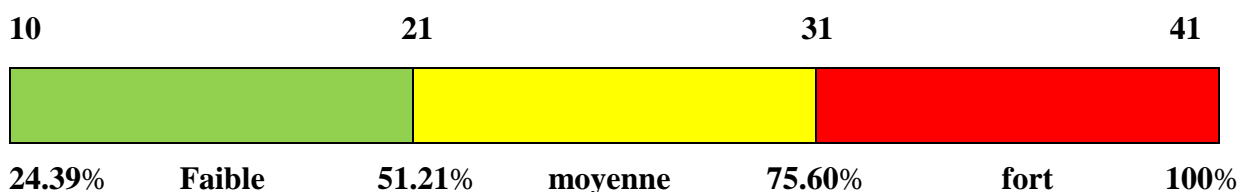
Les indices finaux varient de 10 à 41, on les subdivise en 3 classes, on obtient le tableau suivant :

Tableau 0VI-4 Pourcentage des zones prioritaires

Indice	Pourcentage
10	24.39%
21	51.21%
31	75.60%
41	100%

On représente les résultats obtenus par l'échelle des priorités suivante :

Echelle des priorités :



VI.3 Cartographie

L'analyse et l'expression des classes de priorité de réseau de surveillance ont été dès leur départ inséparable de sa représentation cartographique. Les principales étapes qui mènent à la création des cartes de fluctuation des eaux souterraines, risque de pollution, gradient hydraulique et la densité des points d'eau sont les suivantes (Fig. V-5). Les outils SIG (MapInfo) et de cartographie automatique (Surfer) ont été utilisés pour ce faire.

1. Acquisition des données permettant évaluer tous les paramètres de la méthode employés..
2. Tracé des cartes thématiques et attribution des cotes aux différents paramètres de la méthode considérée (fluctuation, risque de pollution, gradient hydraulique et densité des points d'eau) on réalise une carte thématique sur laquelle sont délimitées les zones en fonction des intervalles établies par le système de cotation. Chacune des zones ainsi délimitée reçoit une côte correspondant au paramètre représenté, et l'indice (poids x côte) correspondant est ainsi calculé. Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser pour chaque carte thématique une couleur, afin de visualiser les intersections des zones dans la phase de superposition.
3. Effectuer une série de superposition de toutes les cartes paramétriques afin de visualiser les intersections des grandes unités hydrogéologiques ainsi que les sous unités correspondantes.

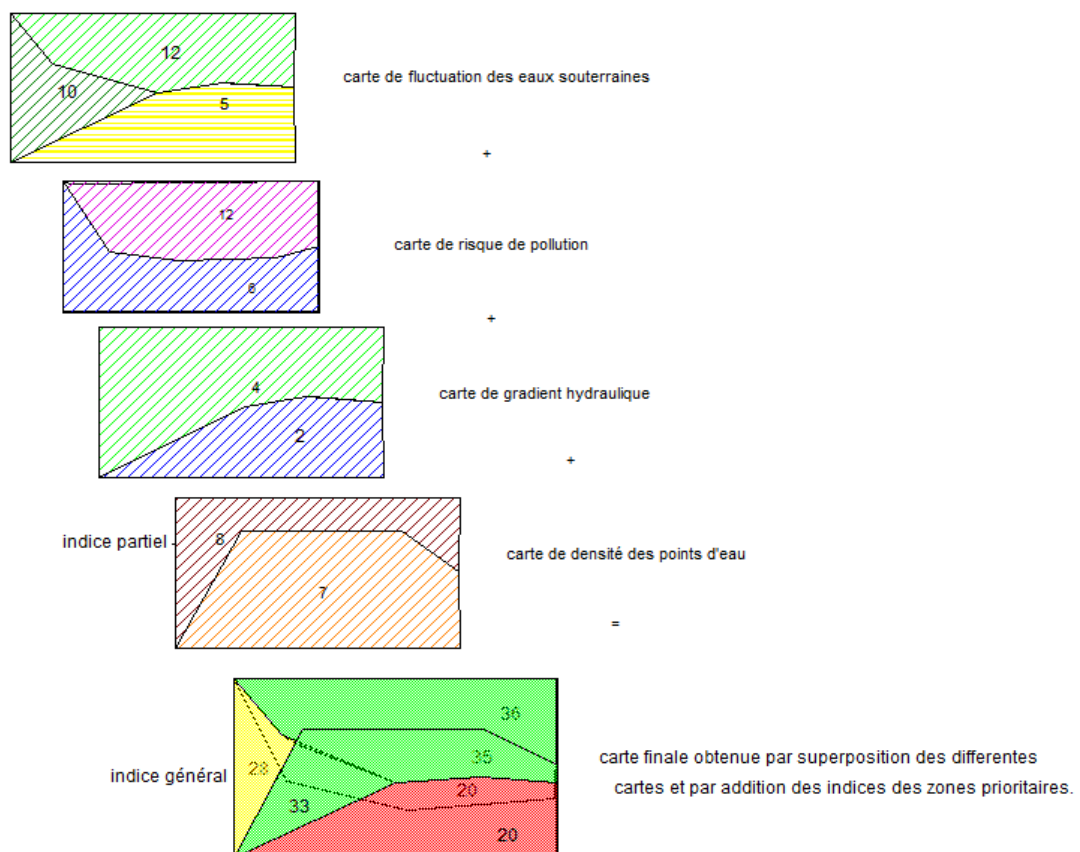


Figure VI-1 Construction de différentes cartes et par addition des indices des zones prioritaires.

4. Représenter les limites des différentes unités hydrogéologiques sur un fond topographique et porter à l'intérieur de ces unités leurs numéros d'identification ainsi que la valeur de l'indice général de priorisation correspondant
5. Les différentes unités hydrogéologiques peuvent alors être coloriées pour faciliter la lecture de la carte synthétique de priorité ainsi obtenue de sorte qu'elles permettent une visualisation graduelle du degré de priorité.

VI.4 Interprétations de cartes

VI.4.1 Carte de fluctuation

Les données mensuelles sur le niveau piézométrique des eaux souterraines ont été fournies par l'Agence Nationale des ressources hydrique (ANRH) de Blida. Ces données comportent deux campagnes par an, une en hautes eaux effectuée au mois d'avril et une autre en basses eaux effectuée aux mois de septembre-octobre. La fluctuation représente la variation des niveaux entre ces deux périodes et le couple retenu correspond à la dernière année de la série de données. Ces données permettent de constater que la variation du niveau de la nappe varie dans de larges intervalles de 2 à 16m dans les zones où prolifèrent les forages. Pour établir la carte de fluctuation de la nappe de la Mitidja orientale nous avons subdiviser les données sur cinq classes distinctes (0 à 2m, 2 à 4m, 4 à 8m, 8 à 16m et >16m). Suivant cette cotation, nous avons pu mettre en évidence 5 zones distinctes :

- Une zone colorée en bleu correspond à une très faible fluctuation (entre 0 et 2m) concentrée dans la partie Nord -Ouest de la carte. Cette région de la plaine est peu exploitée car il s'agit d'une zone très urbanisée.
- Une faible fluctuation de 2 à 4m représentée par des polygones colorés en jaune observée au sud des zones urbaines entre Alger et bordj el Kiffan.
- Une zone colorée en orange caractérise les régions où la fluctuation est moyenne (entre 4 à 8m) et caractérise un secteur s'étendant à l'ouest des Eucalyptus, au sud de Hamedi jusqu'à la région de Khemis El Khechna – Meftah et la partie Nord-est de la carte (entre Ain taya et Bordj El Kiffan.
- les zones colorées en rouge correspondent à une forte fluctuation (entre 8 et 16m) et correspondent au secteur où la nappe est très sollicitée par les différents champs captant de Baraki, Rouiba et Regahia...etc).

VI.4.2 Carte de risque de pollution

Cette carte de risque de pollution des eaux de la nappe de la Mitidja, causée par de nombreux foyers de pollution qui apparaissent dans la région d'identifier et de localiser 4 zones : la zone colorée en rouge correspond aux secteurs où la nappe est exposée aux risques de pollution par le phénomène du biseau salé, qui méritent d'être surveillés par un réseau de surveillance important. Cette zone identifiée par la couleur rouge sur la carte (Fig. V-2) porte un indice de priorisation d'ordre 12. Tandis que dans la zone colorée en orange sont concentrées au niveau des secteurs où des activités industrielles sont très concentrées (Zone industrielle de Rouiba, Regahia, de Dar El Beida, de Khemis Khechena...etc. A cette zone on a attribué un indice de 9. La couleur jaune (portant l'indice de 6) représente les secteurs où la nappe est exposée aux risques de pollution par les engrais azotés et les pesticides utilisés dans l'agriculture. Enfin les zones urbaines caractérisée par un indice de priorisation d'ordre 3 sont colorées en bleu et se concentrent dans les zones urbaines autour des chefs-lieux des principales villes.

Ces zones ont été cartographiées sur la base des connaissances de terrain mais surtout de l'exploitation des documents de cartes topographiques et des images satellitaires de Google earth.

VI.4.3 Carte du Gradient hydraulique

Les gradients hydrauliques ont été déduits des cartes piézométriques représentée sur les figures IV.4 et IV-5 illustrées au chapitre précédent. La lecture de cette carte montre la présence de 4 zones caractérisées par des gradients hydrauliques qui varient comme suit :

- Une zone de fort gradient ($>1\%$) colorée en rouge qui se localisent en amont de la plaine et dans les zones dépressionnaires causées par les champs de captage (Rouiba, Baraki). L'indice attribuée varie de 6
- Une zone de gradient moyen (entre 0.5% et 1%) représentée par une couleur jaune qui occupe la majorité partie de l'étendue de la région cartographiée. L'indice attribuée varie de 4
- La couleur bleue caractérise les zones de faible gradient hydraulique ($<0.5\%$) avec un'indice de 2.

VI.4.4 Carte de densité des points d'eau

L'observation de cette carte permet d'apprécier 3 grandes zones : la première zone colorée en bleu est celle où la densité des points d'eau est faible correspondant à l'intervalle de 0 à 1 forage / km^2 . La zone intermédiaire en bleu ciel correspond à une classe d'intervalle de 2 à 4 forages/ km^2 destiné à l'irrigation essentiellement et enfin une zone de priorité 3 ou la concentration des forages apparait nettement importante et cela représente 6 à 8 forages/ km^2 . Cette zone correspond au fait, a un secteur où la nappe présente les meilleures propriétés hydrodynamiques qui lui confère une productivité importante, ce qui a emmené les services de l'hydraulique d'implanter beaucoup de forages destinés à l'AEP.

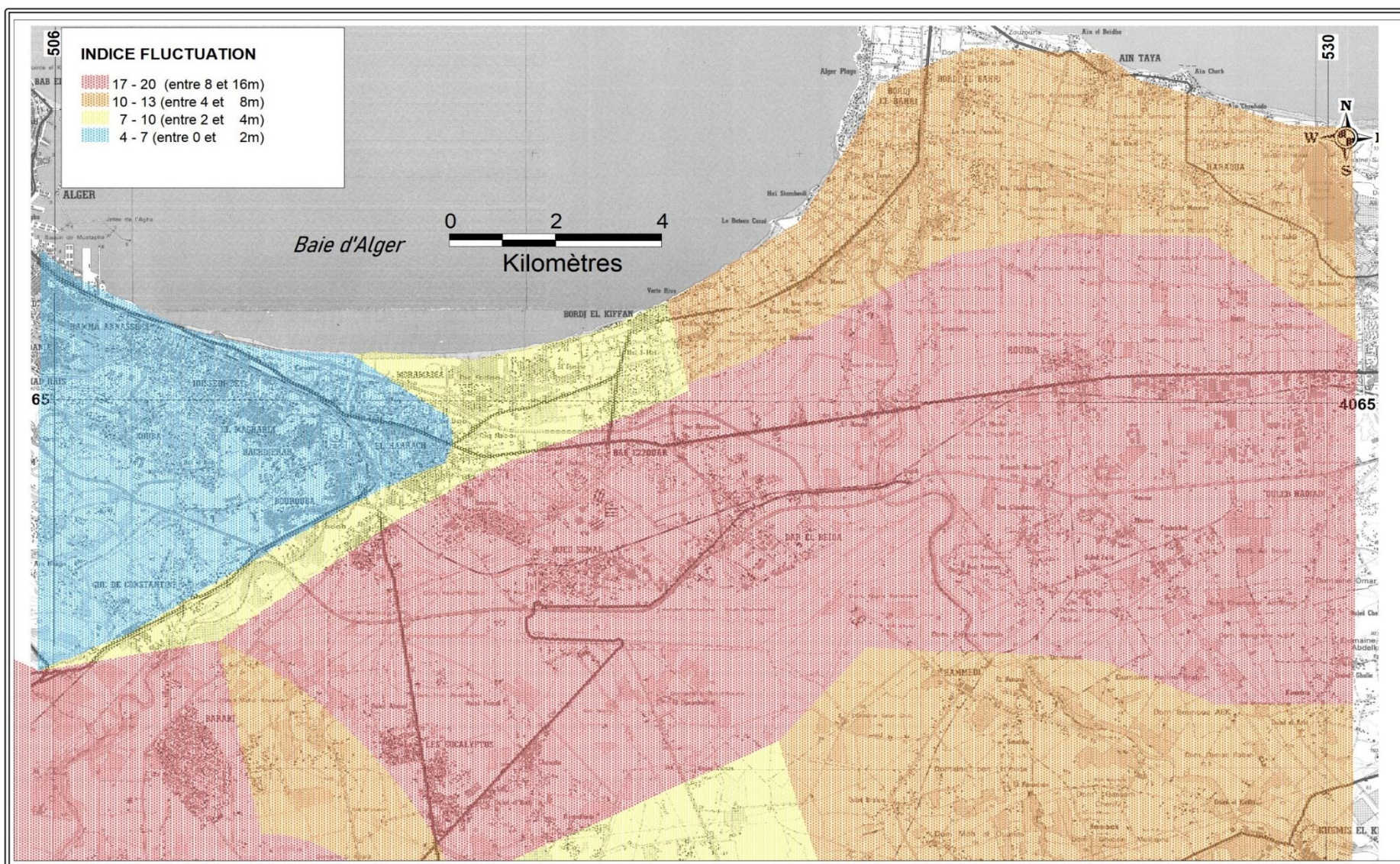


Figure VI-2 Carte de fluctuation des eaux souterraine de la nappe de la Mitidja.

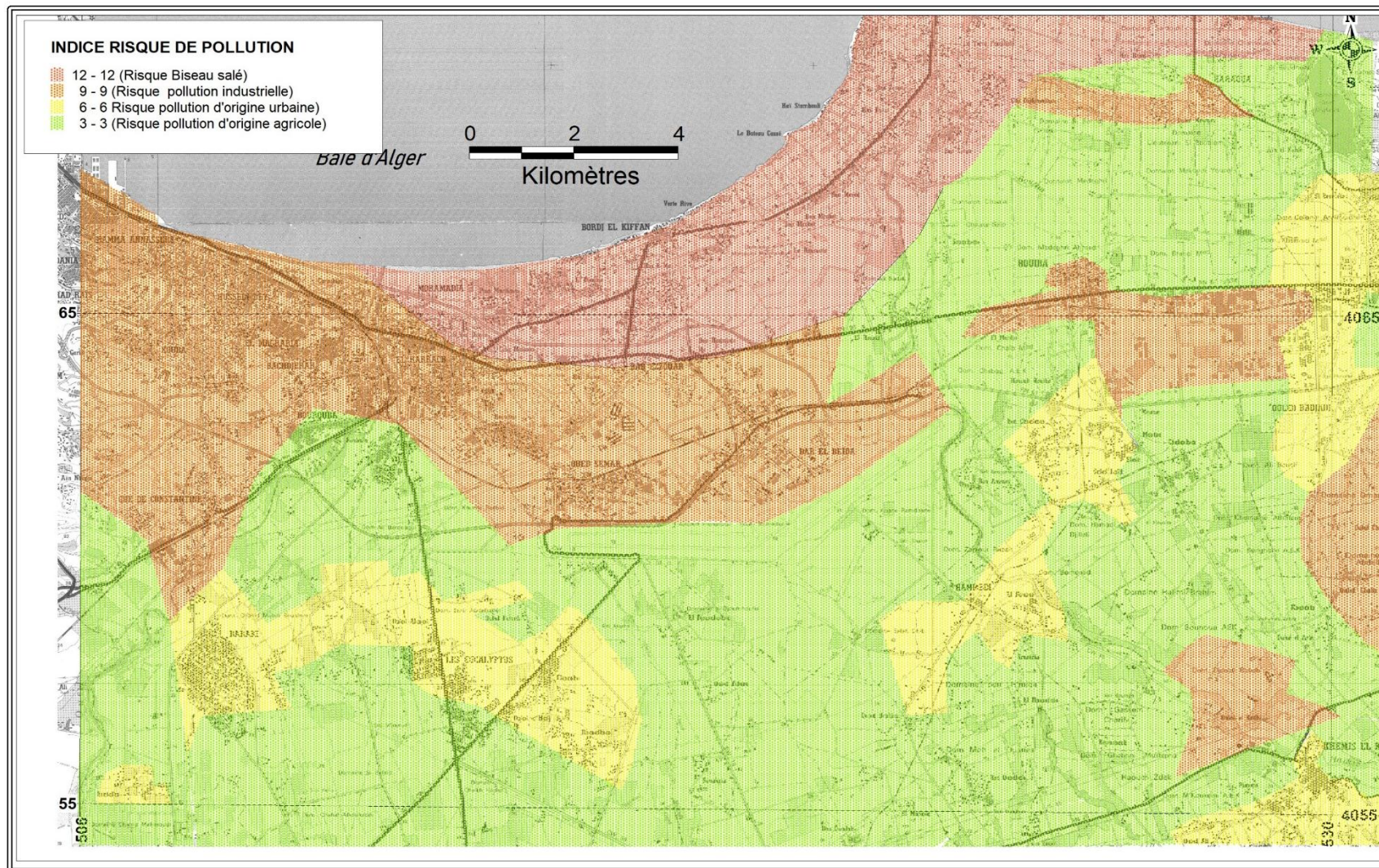


Figure VI-3 Carte de risque de pollution de la nappe de la Mitidja

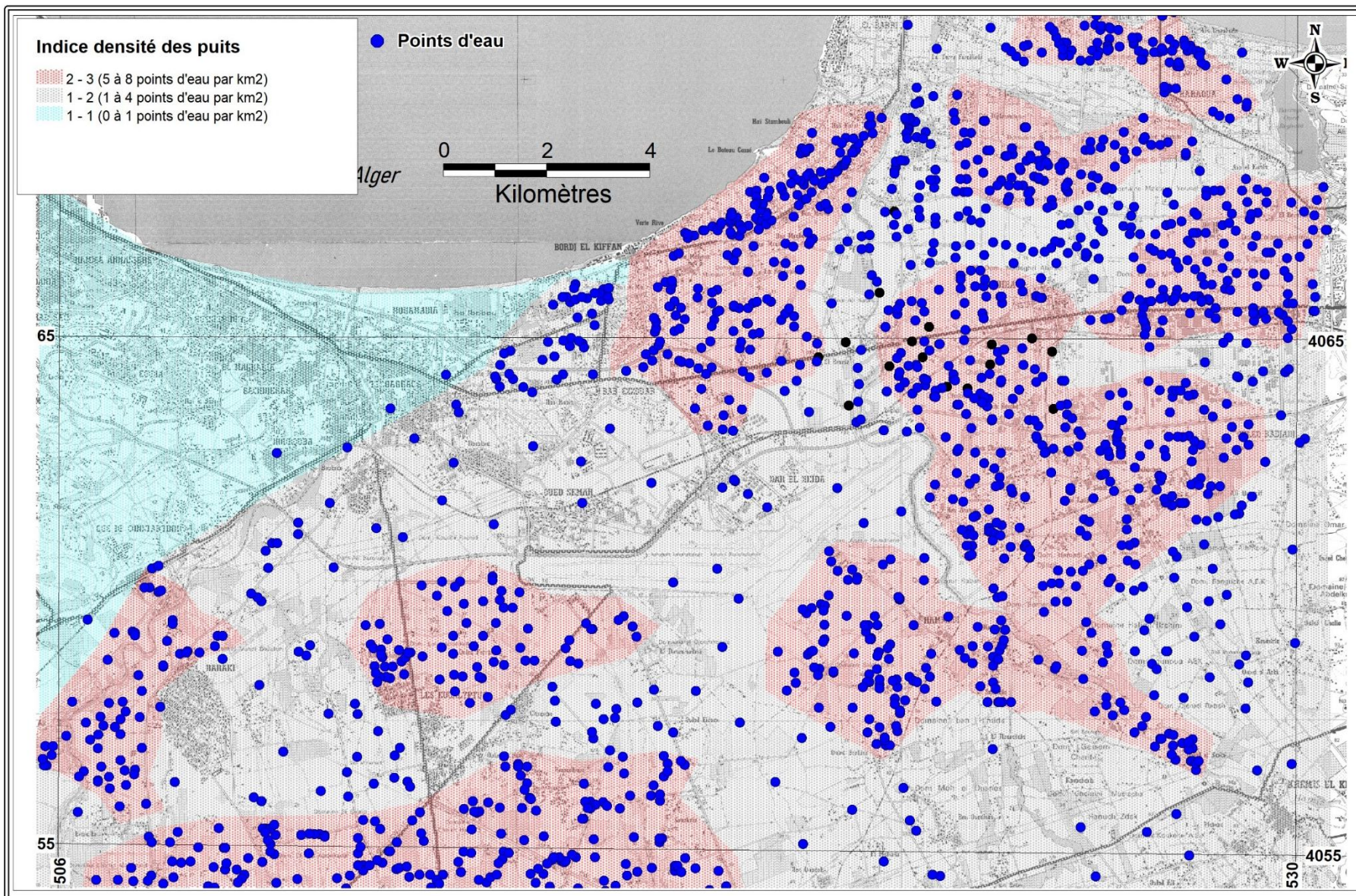


Figure VI-5 Carte de la densité des points d'eau de la nappe de la Mitidja.

VI.5.5 L'interprétation de la carte finale

L'analyse de la carte finale a montré que, selon la catégorisation patio-cartographique, la zone colorée en vert de la plaine est caractérisée par une faible priorité (indice situé entre 10 et 21 : 24 %) se trouvent dans les parties Ouest de la plaine. Cette zone ne nécessite pas un réseau de surveillance important i on considération qu'elle est caractérisée par une forte urbanisation. La priorité moyenne représente un secteur dont la propriété varie selon l'échelle de priorisation entre 50% et 75% (indice variant entre 21 et 31). Cette zone colorée en jaune, se situe principalement dans la partie Est de la zone d'étude. La zone à haute priorité correspond à 100% selon l'échelle de priorisation avec un indice compris entre 31 et 41. Colorée en rouge, ce secteur de la nappe mérite un réseau de surveillance très important et dense, car elle est caractérisée par un taux d'activité industrielle très élevé et une densité des forages destinés aussi bien à l'AEP qu'à l'industrie.

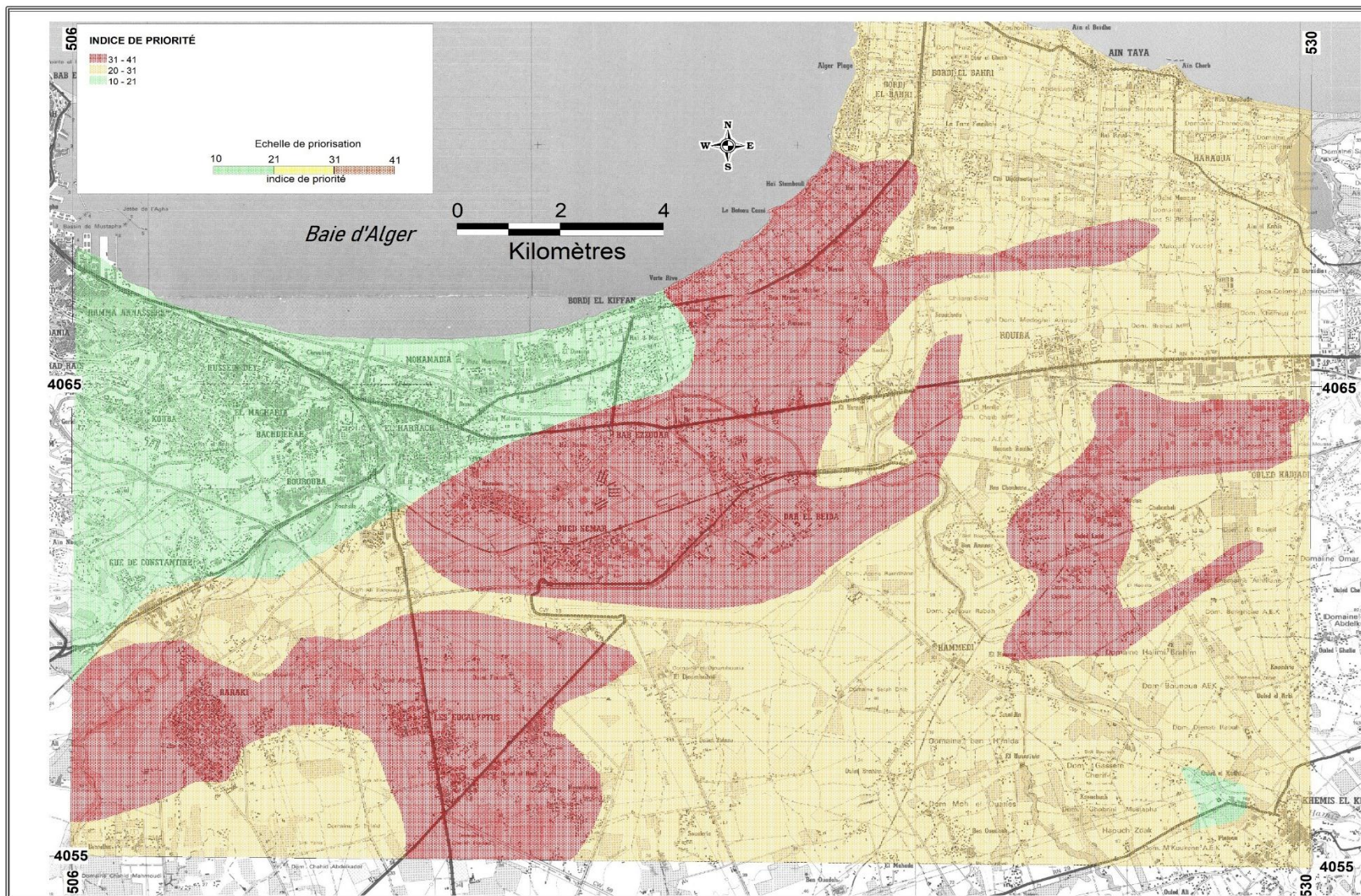


Figure VI-6 Carte des zones prioritaires pour la surveillance du niveau des eaux souterraine.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons proposé une méthode pour l'optimisation et la conception optimale du réseau de surveillance des eaux souterraines. Il s'agit d'une analyse multicritère inspirée de la méthode dite Analyse Hiérarchique Processus (AHP).

L'objectif de cette méthode est de combiner les informations de plusieurs critères pour créer un seul indice d'évaluation. L'un des avantages de l'AHP est qu'elle facilite la prise de décisions liées à des problèmes complexes. La base sur laquelle les critères sont sélectionnés et la notation des résultats sont souvent simples et compréhensibles. Ils sont déterminés efficacement par combinaison de plusieurs facteurs, hydrogéologiques et environnementaux afin de concevoir une cartographie optimale visuelle du réseau additif de surveillance piézométrique dans la plaine alluviale de la Mitidja orientale qui a fait l'objet d'une application.

La définition et l'importance des critères choisis (facteurs et contraintes) qui influencent la conception du réseau de surveillance ont été fondées sur les informations disponibles. Les facteurs pris en compte sont la fluctuation du niveau des nappes, le risque de pollution, le gradient hydraulique et la densité des points d'eau d'où se fait l'exploitation de la nappe. Pour chacun de ces facteurs une classification par intervalle de classes est établie avec affectation d'une cote. L'indice partiel propre à chaque paramètre correspond alors au poids du paramètre considéré par la cote de la classe correspondante.

La combinaison de ces paramètres a permis d'établir une échelle des priorisations qui varie de 10 à 41. Cela nous a conduits à déterminer 3 classes de priorisation. Les résultats ont été exprimés par la suite sous forme de cartes thématiques indicielle pour chaque critère établi par la combinaison des outils de cartographie automatique et les SIG (Surfer et Mapinfo). Le recoupement de ces cartes thématiques a permis l'établissement de la carte finale caractérisée par des indices finaux qui déterminent les priorisations de surveillance de eaux souterraine.

La carte finale montre que les zones à forte indice de priorité (entre 31 et 41) qui méritent d'être surveillées par un réseau de surveillance très important et dense se situent pratiquement dans :

- La partie centrale de la plaine de la Mitidja orientale menacée par les risques de pollution industrielle et de surexploitation de la ressource. Cette zone nécessite un réseau qualitatif pour surveiller les paramètres chimiques indicateurs de la contamination des eaux de la nappe par les eaux de rejet industriels. Les paramètres chimiques et physico-chimiques doivent être choisis en fonction des spécificités des industries installées. Le réseau installé servira aussi aux mesures piézométriques car ces zones font l'objet d'une forte exploitation de la ressource notamment par les industries agro-alimentaires (production de boissons, laiterie) les tanneries. Et l'industrie pharmaceutique.
- La partie côtière ou baie d'Alger entre Bordj El Kiffan et Ain Taya où la nappe est soumise à l'avancé du biseau salé engendré par la surexploitation de la nappe ayant provoqué des rabattements de la nappe au-dessous du niveau 0 de la mer. Cette zone nécessite un réseau qualitatif pour surveiller les paramètres chimiques indicateurs de la contamination des eaux de la nappe par les eaux salées (conductivité, teneurs en sodium et en chlorures).
- Le secteur situé entre les Eucalyptus et Baraki où la nappe est très sollicitée par la prolifération de forage d'EAP (Champs captant) et les forages d'irrigation.

La plaine de la Mitidja orientale qui renferme une nappe d'eau souterraine contenue dans les alluvions quaternaires et la molasse astienne présente une surface piézométrique qui considérablement baissée entre 1980 et 2010 induisant des rabattements conséquents. Aussi, elle subit actuellement une dégradation de la qualité des eaux par suite de nombreux foyers de pollution liés surtout au phénomène du biseau salé dans la baie d'Alger, à la pollution industrielle dans les zones industrielles et par les nitrates notamment dans le reste de la plaine qui, rappelons-le est à vocation agricole. Le réseau de surveillance existant est composé de 89 points de mesures et doit être optimisé selon les services de l'agence nationale des ressources hydrauliques. En effet, cela représente un piézomètre pour plus de 13km². Il demeure donc insuffisant et la proposition de nouveaux piézomètres doit tenir compte d'une répartition judicieuse car au-delà du cout de réalisation des piézomètres, un réseau composé de plusieurs points de mesure sera difficile à gérer et surtout à entretenir. C'est dans cette optique que notre travail se veut une contribution qui permettra de rationaliser le nombre des points de mesures et surtout sa bonne répartition dans l'espace en fonction des critères qui ont un impact direct sur la surexploitation de la nappe, les risques de pollution et la vitesse de propagation des polluants.

Références bibliographiques

Référence bibliographique

A. Blum, JP. Comte. , 2006 : *Définition des réseaux de suivi de l'état quantitatif et du contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Martinique*. BRGM/RP-55098-FR.

Ayadi, D. (2010). *Optimisation Multicritère De La Flabilité : application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz*. Mem. Mag, Université d'Agers.

Cheriet Abdelkarim, C. N. (2018). *La recharge artificielle de l'aquifère alluvial dans la région de TABAINET (Mitidja Orientale)*. Mémoire de Master, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumedienne (U.S.T.B).

Cherry JA, P. B. (2004). *Role of aquitards in the protection of aquifers from contamination a Bstate of the science* . Research Foundation, Denver.

Guérin), I. (. (Mai 2018). *Surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués*. France: Ministère de la transition écologique et solidaire.

Guesdon, G. (15-03-2011). *Méthodes et outils aide multicritère à la décision-Comparaison de Saaty*. Faculté des sciences et de génie Université Laval.

JR, E. (2012). *Guide to GIS and image processing* . Clark University, Whistler, Canada.

Juan M, E. L. (2015). *Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis* .

Khoualed Radja, R. S. (2017). *Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers : cas de la plaine mitidja orientale* . Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah-Ourgla.

Lise ponchat, S. M. (3 Mars 2015). *Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens*. Ecole d'Hiver.

Mammeri, M. L. (17 Septembre 2013). *Une approche d'aide multicritère a la décision pour l'évaluation du confort dans les trains*. Université Paris- Dauphine, École Doctorale de Dauphine (ED543) .

Marinoni, O. (2004). *Implementation of the Analytical Hierarchy Process With VBA in ArcGis*. *Food and Nutrition Sciences, Vol.5 No.10, April 30, 2014*.

McCobb, T. a. (2003). *Long-term hydrologic monitoring protocol for coastal ecosystems*. National Park Service Washington DC.

Meddi Mohammed, B. A. (s.d.). *Recharge Artificielle de la Nappe de la Mitidja*. Ecole Supérieure D'hydraulique de Blida.

Référence bibliographique

- Messaoud, M. (Avril 2017).** *Cartographie Hydrochimique Appliquée a La Nappe de La Mitidja.* Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique -ARBAOUI Abdellah.
- Miquel, M. G. (18 mars 2003).** *La qualité de l'eau et assainissement en France (annexes), Annexe 15:Les réseaux de suivi des eaux souterraines.* france: Rapport de l'OPECST n° 2152 (2002-2003).
- Mohamed Ali Bachir, K. B. (2017).** *Le suivi hydrogéologique des travaux de forages d'eau pour l'alimentation en eau potable de la nouvelle ville de Blida (dans la plaine de la Mitidja, Bouinane) .*
- Mohammed, M. (Mars 2015).** *Contribution a l'étude de la recharge des nappes par procedes artificielles.* Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique -ARBAOUI Abdellah.
- Belaidi Mouloud, R. (2005).** *Note .* ANRH.
- Nadia Lehoux, P. V. (2004).** *Analyse Multicritère.*
- Nouara., M. é. (2010).** *Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouïba).* Mémoire Magister.
- Vanessa Vaessen, R. B.-B. (2015).** *Module 5: suivi des nappes d'eau souterraine et gestion de l'information.* Transfrontaliers en Afrique: works.