

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

جامعة مولود معمري +.⊙V.:Σ+ E:II:V .+ E.E.O

FACULTÉ DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES
AGRONOMIQUES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES GÉOLOGIQUES



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES DE LA TERRE ET DEL'UNIVERS

Filière : géologie

Option : hydrogéologie

Par : ASKLOU Fouad

Thème :

**Caractérisation du phénomène du biseau sale dans un
réservoir côtier par le modèle cartographique GALDIT.**

Cas de la baie d'Alger

Soutenu publiquement le 23 / 09/ 2023, devant le Jury composé de:

M.BRAHMI Boualem	M.A.A à l'UMMTO	Président
M. DROUCHE Abdelmadjid	M.C.B à l'UMMTO	Encadrant
Mme DJEMA Manal	Ingénieur, DREW Boumerdès	Co-encadrant
M. KARDACHE Ramdane	M.C.A à l'UMMTO	Examineur

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, j'exprime ma gratitude envers Dieu pour m'avoir accordé la force, la patience, le courage et la détermination nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes profondes reconnaissances envers mon encadrant de mémoire, M. DROUCHE Abdelmadjid, ainsi qu'envers Mme. DJEMA Manal, pour leurs précieux conseils et orientations qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

J'adresse mes remerciements à M. BRAHMI Boualem qui a bien voulu présider le jury
Je remercie également M. KARDACHE Ramdane., membre du jury, pour avoir consacré du temps à l'examen de mon travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers M. BELAROUI Abdelhakim, Docteur en hydrogéologie et spécialiste de la protection de l'environnement, et maître de conférences à l'USTHB pour ses conseils et son soutien tout au long de la rédaction de mon mémoire

Je n'oublie pas de témoigner ma reconnaissance à mes enseignants du département des Sciences Géologiques à l'UMMTO, qui m'ont transmis leurs connaissances et leurs expériences tout au long de ma formation.

Enfin, mes remerciements vont à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

ASKLOU Fouad

DEDICACES

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

À l'être le plus cher de ma vie, ma mère.

À celui qui a fait de moi un homme, mon cher père.

À mon frère

À mes chers amis (BENTAFAT Zakaria

Et AICHAOUI Houssam, BENTAFAT Moumen, ABERKAN

Yahia, BAKIR Naim, SEFROUN

Ali, OURADI Islam, KHALFIHichame. HAMRIOUI Tayebet

SOULOHO Oussama).

*A la personne qui m'a soutenu et aidé ces trois dernières
années ABIDALLAH Mounia*

Et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

A toutes les personnes que j'ai oubliées involontairement.

Asklou Fouad

Résumé

Ce mémoire est consacré à l'étude du phénomène du biseau salé dans un réservoir côtier, en utilisant le modèle cartographique GALDIT.. Après avoir introduit la problématique du biseau salé et présenté la géologie et l'hydrogéologie du réservoir côtier de la zone d'étude, le modèle GALDIT est établi sur des paramètres pertinents : le type (G) et la conductivité hydraulique (A) de l'aquifère, l'altitude de la nappe (L), la distance par rapport au rivage (D), l'impact de l'intrusion marine (I) et l'épaisseur de la nappe (T). le résultat de cette approche montre que la vulnérabilité de la nappe de la baie d'Alger augment d'amont en aval. En effet, toute la partie nord limitrophe du rivage présente un degré de vulnérabilité fort à la pollution par les eaux de mer.

Mots-clés : Biseau salé, réservoir côtier, GALDIT, Hydrogéologie, Baie d'Alger, Intrusions marine.

Abstract

This thesis is dedicated to the study of the saltwater wedge phenomenon in a coastal reservoir, utilizing the GALDIT cartographic model. After introducing the issue of the saltwater wedge and presenting the geology and hydrogeology of the coastal reservoir in the study area, the GALDIT model is established using pertinent parameters: the type (G) and hydraulic conductivity (A) of the aquifer, the water table altitude (L), distance from the shoreline (D), the impact of marine intrusion (I), and the aquifer thickness (T). The result of this approach reveals that the vulnerability of the water table in the Bay of Algiers increases from upstream to downstream. Indeed, the entire northern part adjacent to the shoreline exhibits a high degree of vulnerability to pollution from seawater.

Key-words : Saltwater wedge, coastal reservoir, GALDIT, Hydrogeology, Bay of Algiers, Marine intrusion.

LISTE DES ACRONYMES

m	Mètre (unité de longueur ou distance)
Km ²	Kilomètre carré (superficie)
Km	Kilomètre (unité de longueur ou distance)
mm	Millimètre
m/s	Mètre par seconde
%	pourcentage
pH	Potentiel hydrique
P min	Précipitation minimale
P max	Précipitation maximale
T min	Température minimale
T max	Température maximale
T moy	Température moyenne
°C	Degré Celsius
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : FONDEMENTS GEOLOGIQUES ET CONCEPTS CLES	3
1. Introduction :	3
2. Différents de réservoirs aquifères	3
2.1 Aquifères en domaine sédimentaire :	3
2.1.1 Aquifère à nappe libre :	3
2.1.2 Aquifère à nappe captive :	4
2.1.3 Nappes alluviales :	5
2.2 Aquifères en domaine de socle :	5
2.3 Aquifères karstiques :	5
2.4 Aquifères des dépôts glaciaires :	5
3. Captages d'eau souterraine	5
4. Vulnérabilité des nappes à la pollution.....	6
5. Auto-épuration biologique des eaux souterraines	7
6. Salinisation et minéralisation des aquifères côtiers	8
7. Description d'un aquifère côtier :	8
8. Source possible de minéralisation des eaux douces :	10
8.1 Salinisation naturelle.....	10
8.2 La salinité anthropique.....	10
9. Origines de la salinité des aquifères côtiers.....	10
10. Définition d'un biseau salé :	10
11. L'intrusion marine :	11
11.1 Définition et origine de l'intrusion marine.....	11
11.2 La zone de transition ou zone de mélange :	11
11.3 L'intrusion marine dans le monde :	12
11.4 Critères de reconnaissance de l'invasion marine :	13
11.4.1 Critères géologiques :	13
11.4.2 Critères hydrodynamiques :	13
11.4.3 Critères géophysiques :	13
11.4.4 Critères hydrochimiques :	14
11.5 Méthodes d'étude de l'intrusion marine :	14

11.5.1	Surveillance des puits :	14
11.5.2	Échantillonnage des eaux souterraines :	14
11.5.3	Diagraphies géophysiques :	14
11.5.4	Modélisation numérique :	14
11.5.5	Marquage des traceurs :	14
11.5.6	Mesure des gradients hydrauliques :	14
11.5.7	Télédétection et imagerie satellitaire :	14
12.	Conclusion :	15
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....		16
1.	Introduction :	16
2.	Cadre géographique :	16
3.	Caractéristiques géomorphologiques.....	18
3.1	Morphologie de la baie :	18
3.2	Morphologie du bassin versant	18
4.	Caractéristiques générales du climat méditerranéen :	18
4.1	Répartition saisonnière des précipitations :	18
4.2	Variabilité interannuelle :	18
4.3	Régimes de vents :	18
4.4	Influence sur la végétation :	19
4.5	Rôle de la mer Méditerranée :	19
5.	Aperçu climatique de la zone d'étude :	19
5.1	Les précipitations	19
5.1.1	Précipitations moyenne mensuelle	19
5.1.2	Précipitations annuelles	21
5.2	Les températures :	24
6.	Caractéristique hydrologique.....	26
6.1	Limites hydrologiques	26
6.2	Réseau hydrographique.....	26
7.	Caractéristiques morpo métriques :	27
7.1	Paramètres géométriques :	27
7.2	Paramètres de relief :	28
7.2.1	La courbe hypsométrique :	28

7.2.2	Les altitudes caractéristiques :.....	30
8.	Conclusion.....	30
CHAPITRE 3 : CADRE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET		
HYDROCHIMIQUE.....		
1.	Géologie :	33
2.	Stratigraphie et lithostratigraphie :	33
2.1.1	33
2.2	Miocène et formations anciennes dans la région de la Mitidja.....	34
2.2.1	Le Miocène :	34
2.2.2	Formations géologiques plus anciennes :	34
2.3	Le Pliocène :	34
2.3.1	Le Plaisancien :.....	34
2.3.2	L'Astien :.....	35
2.4	Pléistocène	35
2.4.1	Le Villafranchien :.....	35
2.4.2	Le Soltano-Tensifien :	35
2.4.3	Le Rharbien - Actuel :	35
3.	Evolution paléogéographique et tectonique :	36
3.1	À l'Éocène :	36
3.2	Au Miocène :.....	36
3.3	Au Pliocène :.....	36
3.4	Au Plaisancien :	37
3.5	À la fin de l'Astien :	37
3.6	Au Quaternaire :.....	37
3.7	Récapitulation des différents stades d'évolution de la Mitidja :.....	37
4.	Hydrogéologie :	39
4.1	Morphologie et structure des aquifères.....	40
4.1.1	Aquifère de l'Astien :	40
4.1.2	Aquifère quaternaire :.....	40
5.	Piézométrie et hydrochimie :	40
6.	Conclusion :.....	44
CHAPITRE 4 : LE MODELE CARTOGRAPHIQUE GALDIT : ASPECT THEORIUE		
45		

1.	Introduction :	45
2.	Présentation de la méthode de GALDIT :	45
2.1	. Description des paramètres de la GALDIT :	46
2.1.1	Paramètre G (Type d'aquifère) :	46
2.1.2	Paramètre A (La conductivité hydraulique de l'aquifère) :	46
2.1.3	Paramètre L (L'altitude de la nappe par rapport au niveau de la mer) :	47
2.1.4	Paramètre D (La distance par rapport au rivage) :	47
2.1.5	Paramètre I (L'impact de l'intrusion saline présente dans la zone) :	48
2.1.6	Paramètre T (L'épaisseur de la nappe phréatique ou l'épaisseur saturée d'un aquifère) :	48
2.2	Méthodologie d'application :	49
2.2.1	Pondération :	49
2.2.2	Notation (ou rang) :	50
2.2.3	Classification :	50
2.3	Classes de vulnérabilité relatives à l'index GALDIT	51
3.	Conclusion	52
CHAPITRE V : LE MODELE CARTOGRAPHIQUE GALDIT : APPLICATION LA BAIE D'ALGER		
	BAIE D'ALGER	53
1.	Introduction	53
2.	L'application de la méthode de GALDIT	53
2.1	Paramètre 1 : le type d'aquifère (G)	53
2.2	Paramètre 2 : la conductivité hydraulique de l'aquifère (A)	53
2.3	Paramètre 3 : altitude de la nappe(L)	54
2.4	Paramètre 4 : distance de la côte (D)	55
2.5	Paramètre 5 : l'impact de l'intrusion saline (I)	56
2.6	Paramètre 6 : L'épaisseur de la nappe (T)	57
2.7	Carte finale d'indice "Indice GALDIT" de vulnérabilité à la pollution	58
3.	Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE		
	CONCLUSION GENERALE	58
	Recommandations	58
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aquifère à surface libre (Bouchardon, 2003).....	4
Figure 2 : Aquifère à nappe captive (Bouchardon, 2003)	4
Figure 3: schéma simplifier d'un aquifère libre côtier (d'après Werner et al., 2013)	9
Figure 4 : biseau salé	11
Figure 5 : Zone de transition dans le cas d'une intrusion marine (Custodio, 2002).....	12
Figure 6 : Situation géographique de la zone d'étude	16
Figure 7 : Situation géographique de la baie d'Alger (Google Earth, 2023)	17
Figure 8 : précipitations annuelles moyennes (en millimètres)(1990-2019).....	23
Figure 9 : précipitations mensuelles moyennes (en millimètres) (1990-2019)	23
Figure 10 : Graphe des Températures mensuelles de Kedara pour la période (2005-2012)25	
Figure 11 : Les sous bassins versants de la Mitidja Est.(ouardi,2019).....	26
Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mitidja Est.(khoualed et Remili.2017).....	27
Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Hamiz-Réghaïa	29
Figure 14 : Carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983).....	33
Figure 15 : fonctionnement des nappes de la Mitidja (M. Engalenc Géohydraulique 1971)	39
Figure 16 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja-Est, Compagne de Mai 2015(Zahouani ,2017).	41
Figure 17: Répartition des points d'eau dans la plaine de la Mitidja-Est (Zahouani ,2017)42	
Figure 18 : Représentation du paramètre G de la Mitidja Est	53
Figure 19 : Représentation du paramètre A de la Mitidja Est	54
Figure 20 : Représentation du paramètre L de la Mitidja Est.....	55
Figure 21 : Représentation du paramètre D de la Mitidja Est	56
Figure 22 : Représentation du paramètre D de la Mitidja Est	57
Figure 23 : Représentation du paramètre T de la Mitidja Est.....	57
Figure 24 : Carte Vulnérabilité GALDIT de la Mitidja Est	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (source : ANRH)	19
Tableau 2 : précipitations mensuelles moyennes (en millimètres) enregistrées pour chaque mois de l'année	20
Tableau 3 : précipitations annuelles moyennes (en millimètres) enregistrées dans les stations pluviométriques.....	21
Tableau 4 : Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales Période (2005- 2012) kedara. Barrage.....	24
Tableau 5: paramètres géométriques des sous bassins versants.(khoualed et Remili.2017)	28
Tableau 6 : répartition altimétrique d'altitudes du bassin versant de l'oued ElHamiz.....	29
Tableau 7 : Les caractéristiques de relief de bassin versant du Hamiz-Reghaïa.....	30
Tableau 8 : Lithostratigraphie Synthétique de la Mitidja-est	38
Tableau 9 : Concentrations des éléments chimiques dans la plaine de la Mitidja-Est (ANRH,	43
Tableau 10 : Composition chimique standard de l'eau de mer (Rodier, 2009).....	48
Tableau 11 : Poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi et al, 2005)	51
Tableau 12 : Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005).....	52

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau, source fondamentale de la vie sur Terre, est l'une des ressources les plus vitales pour l'humanité. La disponibilité en eau douce est une préoccupation majeure, et sa gestion responsable est devenue une nécessité mondiale. Les régions côtières, où les populations ont souvent convergé pour exploiter les avantages économiques et culturels de la proximité de la mer, sont confrontées à des défis uniques liés à l'eau. Dans ces régions, les aquifères côtiers, ces vastes réservoirs d'eau souterraine situés à l'interface entre les eaux douces et l'eau de mer, revêtent une importance capitale pour la sécurité hydrique et environnementale.

Ce mémoire se consacre à une exploration approfondie du phénomène complexe du biseau salé dans un réservoir côtier spécifique, en utilisant le modèle cartographique GALDIT. Notre étude de cas se concentre sur la baie d'Alger, une région côtière méditerranéenne aux caractéristiques géologiques, géographiques et hydrologiques spécifiques.

Ce mémoire est structuré en suivant la séquence logique suivante :

Chapitre 1 : Fondements Géologiques et Concepts Clés : Ce premier chapitre établit les fondements conceptuels de notre étude. Il explore en détail les notions essentielles relatives aux aquifères, à la salinisation des eaux souterraines, à l'intrusion marine, et à la méthodologie GALDIT. Cette section présente les bases théoriques indispensables à la compréhension et à l'interprétation de notre étude.

Chapitre 2 : Généralités sur la Zone d'Étude : Notre deuxième chapitre plonge dans le contexte spécifique de la baie d'Alger. Nous analysons en profondeur la morphologie côtière, le climat, et l'hydrogéologie de cette région. Cette connaissance contextuelle est essentielle pour contextualiser et interpréter les résultats de notre recherche.

Chapitre 3 : Cadre Géologique, Hydrogéologique Et Hydrochimique : ce chapitre est réservé à la présentation des caractéristiques géologique, hydrogéologiques et hydrochimiques.

Chapitre 4 : Le Modèle Cartographique GALDIT : Aspect théorique : Ce chapitre détaille notre méthodologie d'étude. Nous présentons de manière exhaustive le modèle GALDIT, ainsi que les paramètres spécifiques que nous utiliserons pour notre analyse. Nous expliquons en détail la manière dont ces outils seront appliqués pour caractériser le phénomène du biseau salé dans la baie d'Alger.

Chapitre 5 : Le Modèle Cartographique GALDIT : Application à la Mitidja-est: L'essence même de notre étude réside dans ce chapitre. Nous appliquons le modèle GALDIT à la baie d'Alger, en évaluant et en notant les paramètres pertinents, puis en construisant une échelle des risques. Les résultats de cette analyse nous permettront d'acquérir une compréhension approfondie du phénomène du biseau salé dans cette région particulière.

Conclusion Générale : Enfin, nous réunissons les conclusions de notre étude et discutons de leurs implications pour la gestion durable des aquifères côtiers, non seulement dans la baie

d'Alger mais aussi en tant que modèle potentiel pour d'autres régions côtières confrontées à des problématiques similaires

CHAPITRE 1

FONDEMENTS GEOLOGIQUES
ET CONCEPTS CLES

Chapitre 1 : FONDEMENTS GEOLOGIQUES ET CONCEPTS CLES

1. Introduction :

Les réservoirs côtiers et le phénomène du biseau salé constituent un domaine d'étude crucial dans le contexte de la gestion des ressources en eau souterraine. Dans ce chapitre introductif, nous allons explorer les principaux concepts liés aux aquifères côtiers, à la salinisation des eaux souterraines, à la formation des biseaux salés et à l'intrusion marine

2. Différents de réservoirs aquifères

Diverses structures géologiques présentent la capacité d'emmagasiner de l'eau en raison de leur porosité ou de leurs fissures. Ces formations sont qualifiées d'aquifères. Selon la composition géologique des terrains, plusieurs types d'aquifères peuvent être distingués :

2.1 Aquifères en domaine sédimentaire :

Ces systèmes hydrogéologiques sont typiquement associés aux bassins sédimentaires, qui sont constitués de roches sédimentaires poreuses ou fissurées telles que le sable, le grès, le calcaire ou la craie, qui se sont accumulées en couches épaisses au fil du temps. Ces formations aquifères peuvent être classées en deux catégories principales : les aquifères libres et les aquifères captifs, en fonction de la présence ou de l'absence d'une couche imperméable les recouvrant.

Dans un aquifère libre, la surface de l'eau souterraine varie librement, et ils peuvent être rechargés par les précipitations sur toute leur surface.

Dans un aquifère captif, en revanche, une couche géologique imperméable limite le mouvement de l'eau. Sous pression, l'eau peut surgir à la surface naturellement dans ce que l'on appelle des forages artésiens, lorsque les conditions le permettent. L'alimentation de ces aquifères ne peut se faire que par des zones d'affleurement limitées ou par des échanges souterrains. Les nappes captives sont souvent situées en profondeur (JEAN RODIER - 2001).

2.1.1 Aquifère à nappe libre :

Il s'agit d'un aquifère où la nappe d'eau souterraine n'est pas saturée sur toute son épaisseur, laissant une zone non saturée entre la nappe et la surface du sol.

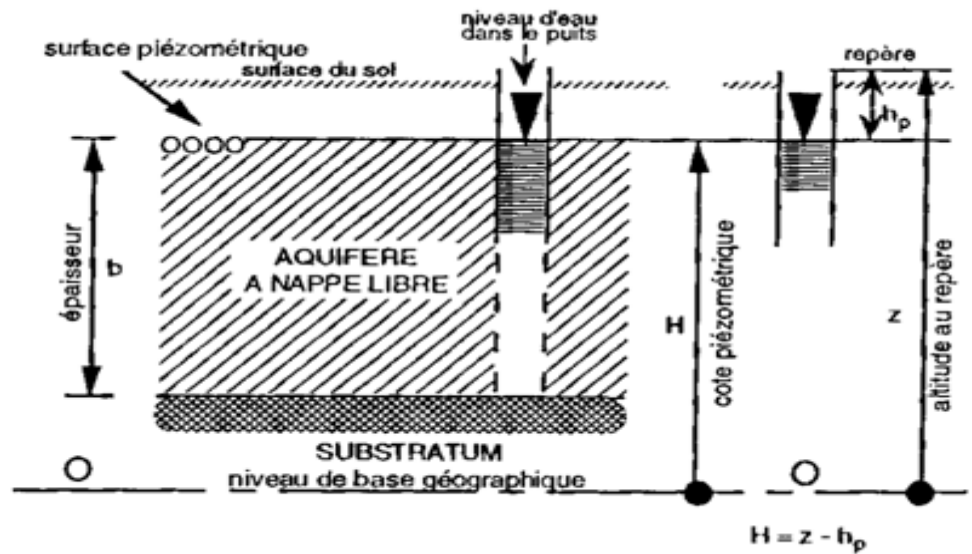


Figure 1 : Aquifère à surface libre(Bouchardon, 2003)

2.1.2 Aquifère à nappe captive :

Dans ce cas, l'aquifère est saturé sur toute son épaisseur, mais il est limité par une couche imperméable ou semi-perméable en haut, créant un niveau piézométrique au-dessus de son toit ou parfois au-dessus de la surface du sol. Ce derniers cas concerne les forages artésiens permettent à l'eau de remonter naturellement jusqu'à la surface.

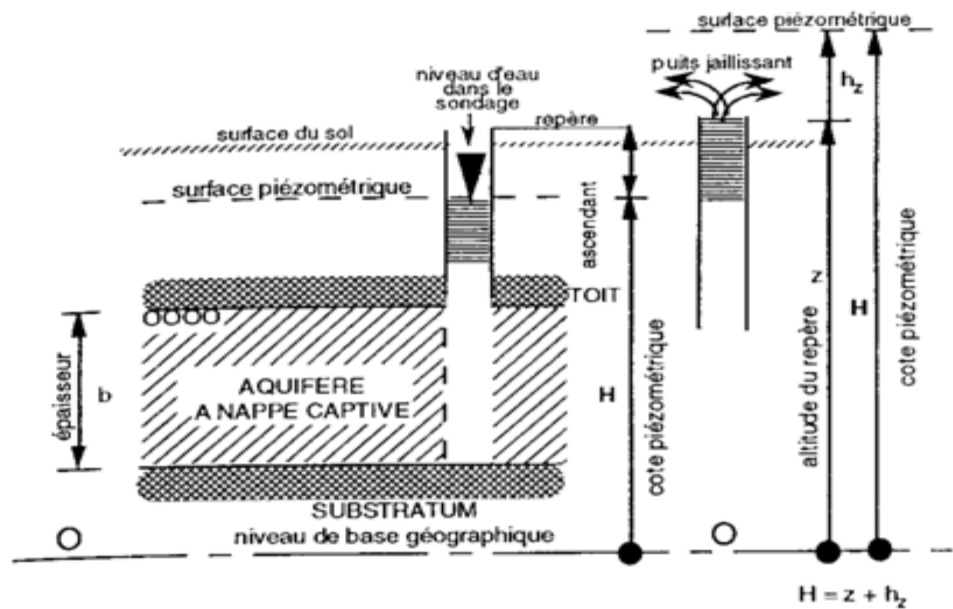


Figure 2 : Aquifère à nappe captive(Bouchardon, 2003)

2.1.3 Nappes alluviales :

Située au sein des vastes dépôts de sables, de graviers et de galets qui bordent les cours d'eau et les rivières, la nappe alluviale constitue un espace privilégié pour les interactions avec les cours d'eau et les zones humides environnantes. Cette catégorie particulière de nappe souterraine présente la particularité d'être rechargée lors des périodes de crues, redistribuant ainsi de l'eau vers les cours d'eau en période de sécheresse.

2.2 Aquifères en domaine de socle :

Les aquifères en domaine de socle englobent les formations géologiques cristallines ou cristallophylliennes, notamment les granites, les gneiss et d'autres roches métamorphiques.. Dans ce type d'aquifère, l'eau est contenue et circule principalement dans les zones d'altération, ainsi que dans les fissures et fractures des roches. Il convient de noter que ces aquifères se caractérisent généralement par leur nature discontinue et leur petite échelle.

2.3 Aquifères karstiques :

Ils se forment dans les couches calcaires, par exemple dans le Djurdjura, le massif de Tlemcen..., Dans ces régions, les eaux souterraines dissolvent progressivement le calcaire, créant ainsi des cavités où l'eau peut circuler librement. Ces cavités peuvent atteindre des tailles considérables, telles que des gouffres et des cavernes. À l'intérieur de ces conduits, l'eau peut s'écouler rapidement, formant ainsi des cours d'eau souterrains.

Lorsque ces eaux ressurgissent à la surface, elles donnent naissance à des sources. Cependant, les débits de ces sources karstiques sont souvent très variables au fil du temps, parfois multipliés par un facteur allant de 1 à 100 au cours de l'année

2.4 Aquifères des dépôts glaciaires :

Les dépôts résultant de l'action glaciaire se caractérisent par leur complexité en termes de sédimentologie. Ils se composent de matériaux variés en termes de taille des grains, ce qui donne lieu à une granulométrie très diversifiée. Ces dépôts sont à l'origine de petits aquifères qui se trouvent très compartimentés. Ils sont principalement localisés dans d'anciens ombilics glaciaires ainsi que dans les cirques morainiques.

Ces aquifères issus de dépôts glaciaires sont généralement limités en termes d'étendue en surface, mais ils peuvent en revanche présenter une certaine épaisseur, en particulier derrière les verrous glaciaires ou au sein d'anciens sillons sous-glaciaires ou périglaciaires. Cette configuration découle des processus géologiques complexes liés à l'activité glaciaire. (G. de Marsily, 2004).

3. Captages d'eau souterraine

Les installations destinées à la captation des eaux souterraines, communément appelées points d'eau, se déclinent généralement en trois principales catégories : les forages, les puits et les sources.

- Un forage : Il s'agit d'un ouvrage de grande profondeur (plusieurs dizaines de mètres), avec un faible diamètre variant entre 18 et 30 centimètres. Les forages sont conçus

pour accéder à la nappe. L'eau ainsi captée est considérée comme potable et non contaminée, et elle est disponible en permanence. Cependant, les forages nécessitent un dispositif de pompage pour extraire l'eau.

- Un puits : Souvent désigné comme un puits traditionnel, il est creusé manuellement, offrant un accès à une nappe superficielle. L'eau dans les puits n'est pas garantie en termes de qualité, car elle peut être rapidement contaminée. De plus, son renouvellement est aléatoire.
- Un puits à grand diamètre ou puits cuvelé : Il s'agit d'un ouvrage de petite profondeur, environ 30 mètres, mais de grand diamètre, environ 1,80 mètre. Il permet également d'atteindre la nappe superficielle et est revêtu de parois cimentées. La réalisation d'un puits cuvelé nécessite des moyens importants, tels que des compresseurs, de la dynamite, du ciment, et de l'eau. Bien qu'il puisse être utilisé par plusieurs personnes simultanément et convienne à l'abreuvement du bétail, l'eau qu'il fournit est sujette à une contamination rapide.
- Le piézomètre : Un piézomètre, qu'il s'agisse d'un puits ou d'un forage, est destiné à mesurer le niveau de l'eau souterraine en équilibre avec la pression atmosphérique, connu sous le nom de niveau piézométrique. Si la variation de la pression hydrostatique avec la profondeur est linéaire dans toute la nappe, le piézomètre peut être crépiné sur toute sa hauteur. Cependant, si l'aquifère est composé de plusieurs couches ayant des niveaux piézométriques différents, plusieurs piézomètres, souvent appelés tubes piézométriques, peuvent être nécessaires pour représenter correctement la piézométrie. Les mesures de niveau peuvent être effectuées périodiquement manuellement à l'aide d'une sonde, ou en continu à l'aide d'instruments tels que des limnigraphes ou des capteurs de pression numériques.

L'exploitation des données piézométriques se traduit principalement par la création de cartes piézométriques et de courbes de variations piézométriques, permettant une meilleure compréhension de la dynamique des eaux souterraines.

4. Vulnérabilité des nappes à la pollution

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine exprime la facilité avec laquelle cette nappe peut être exposée à une contamination, qu'elle provienne d'une source ponctuelle telle qu'une décharge, un cimetière, ou des rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles, ou bien d'une source diffuse, telle que des engrais chimiques, des pesticides ou des herbicides.

Il est important de noter que la vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, qui ne peut être mesurée de manière directe et qui n'a pas d'unité de mesure. L'exactitude de son évaluation dépend largement de la qualité, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées dans l'analyse. Pour caractériser la vulnérabilité, on se base généralement sur l'estimation de divers paramètres liés principalement à la couverture de la nappe (la nature du sol et de la zone non saturée) ainsi qu'à la zone saturée proprement dite.

La vulnérabilité varie en fonction du type de nappe, qu'elle soit libre ou captive, ainsi que du mode de circulation de l'eau au sein de l'aquifère. Les nappes libres sont généralement plus vulnérables, car les polluants provenant de la surface peuvent se déplacer librement à travers le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique. De plus, les fluctuations saisonnières du niveau piézométrique contribuent à nettoyer la zone non saturée en emportant les substances qui y sont adsorbées. En revanche, les nappes captives sont mieux protégées grâce aux couches imperméables qui les recouvrent. Leur alimentation en eau de surface est plus limitée et donc plus facile à protéger. La pollution de ces nappes survient souvent lorsque la couche imperméable est percée par un forage ou une excavation profonde.

Il est également essentiel de comprendre que la percolation de l'eau à travers un milieu poreux peut entraîner la fixation des substances aux particules, ce qui équivaut à une forme d'épuration de l'eau. Cette capacité de rétention n'est pas présente dans les milieux fissurés où la circulation de l'eau est beaucoup plus rapide. Pour qu'un polluant atteigne une nappe libre dans un milieu poreux, il doit franchir plusieurs barrières, notamment :

- Le sol, où l'activité chimique et microbiologique est intense, entraînant des modifications chimiques, la métabolisation et la minéralisation des polluants organiques, ainsi que la fixation de nombreux composés minéraux et organiques par adsorption.
- La zone non saturée, qui joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances, avec une efficacité accrue lorsque la granulométrie est plus fine.
- La zone saturée, où la filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe, diluant ainsi le polluant dans la masse d'eau.

Cette compréhension des processus de filtration, de rétention et de dilution dans les nappes souterraines est cruciale pour évaluer et gérer efficacement leur vulnérabilité à la pollution.

5. Auto-épuration biologique des eaux souterraines

Les eaux souterraines, même à des profondeurs considérables, abritent des organismes vivants inoffensifs tels que des bactéries et de petits invertébrés. Ces organismes ont la capacité de métaboliser les polluants qui sont introduits dans la nappe. Par exemple, les polluants organiques toxiques tels que les polychlorobiphénols (PCB) subissent une transformation lente sous l'influence de ces organismes. De même, les nitrates sont décomposés en milieu anaérobie, ce qui se produit notamment dans les nappes captives.

Il est important de noter que la protection d'une nappe souterraine est d'autant plus efficace lorsque le sol et la zone non saturée sont épais, que leur granulométrie est fine et que la vitesse de percolation de l'eau à travers la nappe est faible. Cependant, une fois qu'une nappe de ce type est contaminée par un polluant, elle conserve cette contamination pendant une longue période.

Cette compréhension des processus biologiques et hydrogéologiques dans les nappes souterraines est cruciale pour évaluer l'impact potentiel de la pollution et élaborer des stratégies de protection adéquates.

6. Salinisation et minéralisation des aquifères côtiers

Les aquifères côtiers sont des milieux très sensibles à la dégradation, en raison de la densité élevée de population dans les zones côtières. Près de 70 % de la population mondiale vit en zone côtière (Bear et al., 1999). Ces systèmes aquifères sont confrontés à diverses menaces, telles que l'exploitation intensive par pompage, les variations climatiques et la proximité de l'eau de mer.

La salinité est un critère utilisé pour différencier les types d'eau. Les eaux douces ont une salinité inférieure à 3 g/l, tandis que les eaux marines ont une salinité moyenne d'environ 33 g/l (Williams, 1987). Les concentrations totales des composants dans l'eau de mer restent relativement constantes. Cependant, dans les eaux continentales, les concentrations varient en fonction de l'origine de la salinité et du type de sol. Le calcium est le cation le plus abondant dans les eaux souterraines, surtout dans les aquifères carbonatés (Meybeck et Helmer, 1989).

L'intrusion marine, c'est-à-dire la pénétration de l'eau de mer dans les aquifères côtiers en contact avec l'océan ou la mer, peut être causée par plusieurs facteurs tels que les pompages excessifs, les variations climatiques ou les fluctuations du niveau de la mer. Cela peut entraîner une réduction du volume d'eau douce disponible, la contamination des puits exploités et, par conséquent, une augmentation de leur salinité. Il est important de noter que moins de 1 % d'eau de mer, soit environ 250 mg/l de chlorure, suffit à rendre l'eau douce impropre à la consommation (Wigley et Plummer, 1976).

De nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre les processus de transfert lors d'une intrusion marine, dans le but d'améliorer la gestion durable et la préservation des aquifères côtiers (Diersch et Kolditz, 2002 ; Post, 2005). Cependant, l'hydrodynamique de l'intrusion marine dans ces aquifères reste difficile à mesurer et à quantifier (Werner et al., 2013), ce qui rend les prévisions de fonctionnement futur relativement incertaines, tant à l'échelle régionale que locale (Sanford et Pope, 2010).

7. Description d'un aquifère côtier :

Un aquifère côtier est une formation géologique souterraine qui se trouve près des zones côtières et qui contient de l'eau douce. Il est caractérisé par sa proximité avec l'océan ou la mer, ce qui en fait un milieu particulièrement sensible et influencé par les interactions avec l'eau de mer.

La structure géologique d'un aquifère côtier peut être complexe et varier selon la région. Il est généralement composé de roches perméables, comme les sables, les graviers ou les calcaires, qui permettent à l'eau de s'infiltrer et de se stocker dans les espaces interstitiels entre les particules.

L'eau douce dans un aquifère côtier provient généralement de précipitations, de rivières ou de sources souterraines alimentées par des eaux de surface. Cette eau s'infiltré lentement à travers les couches de roches perméables pour former une réserve souterraine.

L'une des caractéristiques clés d'un aquifère côtier est sa zone d'interface avec l'eau de mer, connue sous le nom de zone de transition. Cette zone est soumise à des échanges d'eau avec

l'océan ou la mer, soit par infiltration de l'eau de mer, soit par rejet d'eau douce. Ces échanges peuvent être influencés par divers facteurs tels que les marées, les variations du niveau de la mer, les pompages d'eau douce, et les conditions climatiques.

En raison de sa proximité avec les zones côtières densément peuplées, l'aquifère côtier est souvent soumis à une forte pression due à l'exploitation intensive de l'eau pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et les activités industrielles. Cela peut entraîner des risques d'intrusion marine, où l'eau de mer peut s'infiltrer dans les zones d'eau douce en cas de surpompage ou de changements hydrologiques.

En résumé, un aquifère côtier est une formation géologique souterraine proche des zones côtières, contenant de l'eau douce stockée dans des roches perméables. Sa zone de transition avec l'eau de mer est sensible aux échanges d'eau et aux risques d'intrusion marine en raison des activités humaines et des variations environnementales. La gestion durable de ces aquifères est essentielle pour protéger cette ressource en eau vitale et préserver l'équilibre écologique des zones côtières

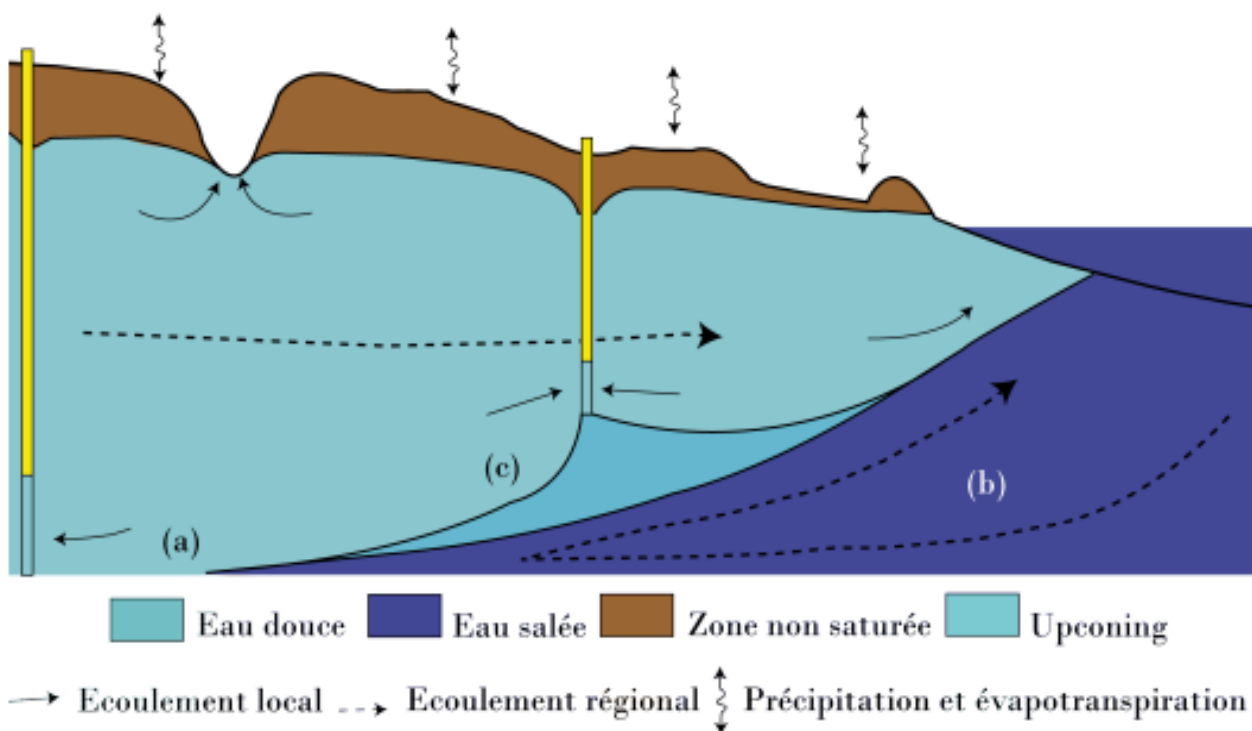


Figure 3 : schéma simplifié d'un aquifère libre côtier (d'après Werner et al, 2013)

(a) : intrusion marine ; (b) : circulation dans l'eau de mer ; (c) : Upconing ou remontée de l'eau de mer en raison du pompage

8. Source possible de minéralisation des eaux douces :

Certaines sources de salinisation des eaux douces peuvent être regroupées en deux catégories principales : la salinisation naturelle et la salinisation anthropique, comme décrit par (Williams en 1987.)

8.1 Salinisation naturelle

La salinisation des eaux douces est la conséquence de deux facteurs principaux : les caractéristiques géologiques de l'aquifère et les conditions climatiques. En effet, certains éléments chimiques se retrouvent naturellement dans la roche aquifère et peuvent contribuer à la salinisation de l'eau. Dans les régions arides et semi-arides de la planète, le phénomène d'évaporation entraîne une concentration en sels dans les eaux souterraines (Williams, 1987). De même, dans les zones côtières arides, la salinisation peut être causée par l'intrusion de l'eau de mer, résultant d'une faible recharge de la nappe en raison de la rareté des précipitations. Ces facteurs géologiques et climatiques peuvent jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la salinité des eaux douces dans certaines régions.

8.2 La salinité anthropique

La salinisation des eaux douces est principalement due à l'activité humaine, avec les pratiques agricoles et le pompage non contrôlé considérés comme les facteurs anthropiques les plus influents (Williams, 1987). En raison de la demande croissante en eau souterraine, l'irrigation intensive et le pompage excessif entraînent une baisse du niveau de la nappe phréatique, ce qui favorise l'intrusion de l'eau de mer dans les aquifères côtiers. Cette intrusion marine et la salinisation qui en résulte sont des problèmes majeurs pour la qualité et la disponibilité de l'eau douce dans ces régions.

9. Origines de la salinité des aquifères côtiers

Le phénomène de l'intrusion marine est l'origine principale de la salinisation des aquifères côtiers, cependant il existe d'autres origines à la salinité (Custodio, 1997 ; Bear et al., 1999 ; Barlow, 2003) : on peut citer les apports d'embruns marins qui peuvent être une source non négligeable, l'évaporation et la concentration des eaux des nappes libres peu profondes. La dissolution des évaporites présentes dans les formations aquifères, les eaux fossiles et le déplacement des eaux par drainance entre les formations aquifères sont des sources très importantes de la minéralisation. La salinisation anthropique, peut s'ajouter aux sources de la minéralisation des aquifères côtiers.

10. Définition d'un biseau salé :

Un biseau salé, également connu sous le nom de "biseau d'eau salée" ou "interface saumâtre", est une zone de transition entre l'eau douce et l'eau salée dans un aquifère côtier. Il se forme là où l'eau douce souterraine de l'aquifère rencontre l'eau de mer de l'océan ou de la mer (figure 4). Cette zone est caractérisée par un gradient de salinité, où la concentration en sel augmente progressivement à mesure que l'on s'approche de l'eau de mer.

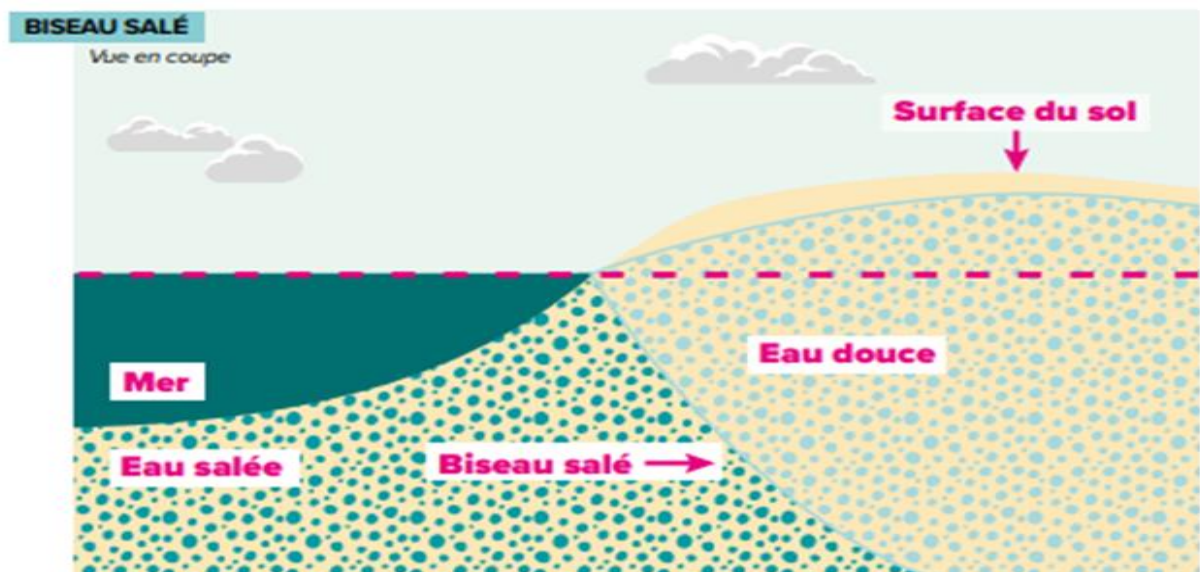


Figure 4 : biseau salé (Plaquette Forages en milieu littoral - Préconisations pour la réalisation et l'exploitation)

La préservation et la gestion du biseau salé sont cruciales pour maintenir l'équilibre hydraulique de l'aquifère côtier et pour prévenir l'intrusion marine, qui peut entraîner une augmentation de la salinité de l'eau douce et affecter la qualité de l'eau souterraine utilisée pour l'approvisionnement en eau potable et les activités agricoles dans les régions côtières.

11. L'intrusion marine :

11.1 Définition et origine de l'intrusion marine

L'intrusion marine est un phénomène complexe dans lequel de l'eau de mer pénètre dans les aquifères côtiers et se mélange avec l'eau douce souterraine. Cette interaction entre les eaux douces et salées peut avoir un impact significatif sur la qualité et la disponibilité de l'eau dans les régions côtières.

L'origine de l'intrusion marine est principalement liée à la différence de densité entre l'eau douce et l'eau de mer. L'eau de mer est plus dense en raison de sa plus grande concentration en sels, tandis que l'eau douce est moins dense. Lorsque ces deux types d'eau entrent en contact, l'eau de mer a tendance à s'infiltrer sous l'eau douce en raison de sa densité plus élevée.

Le phénomène d'intrusion marine commence à prendre une ampleur préoccupante dans la baie d'Alger. Dès 1970, des chercheurs hydrogéologues ont souligné l'importance d'étudier les risques d'invasion d'eau salée dans la nappe de la Mitidja.

11.2 La zone de transition ou zone de mélange :

La zone de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer joue un rôle essentiel dans les aquifères côtiers (Michael et al., 2005). Lorsque l'eau de mer avance dans les aquifères, une zone de contact se forme entre l'eau douce, moins dense, et l'eau de mer, plus dense. Des

études ont été menées depuis la fin du 19^{ème} siècle, notamment par Ghyben (1889) et Herzberg (1901), pour déterminer la forme et la position de cette zone de contact.

La zone de mélange est généralement étroite dans les milieux poreux et homogènes (Abarca et Clement, 2009 ; Goswami et Clement, 2007), mais son épaisseur varie considérablement. Elle peut être de quelques mètres à plusieurs kilomètres (Paster et al., 2006 ; Price et al., 2003 ; Barlow, 2003). L'épaisseur de la zone de transition est étroitement liée aux caractéristiques géologiques et hydrodynamiques de l'aquifère, telles que la perméabilité et la diffusivité (Cooper et al, 1964 ; Custodio, 1985). Dans les aquifères côtiers présentant de faibles gradients hydrauliques, la zone de transition peut s'étendre sur plusieurs kilomètres (Kohout dans Cooper et al, 1964).

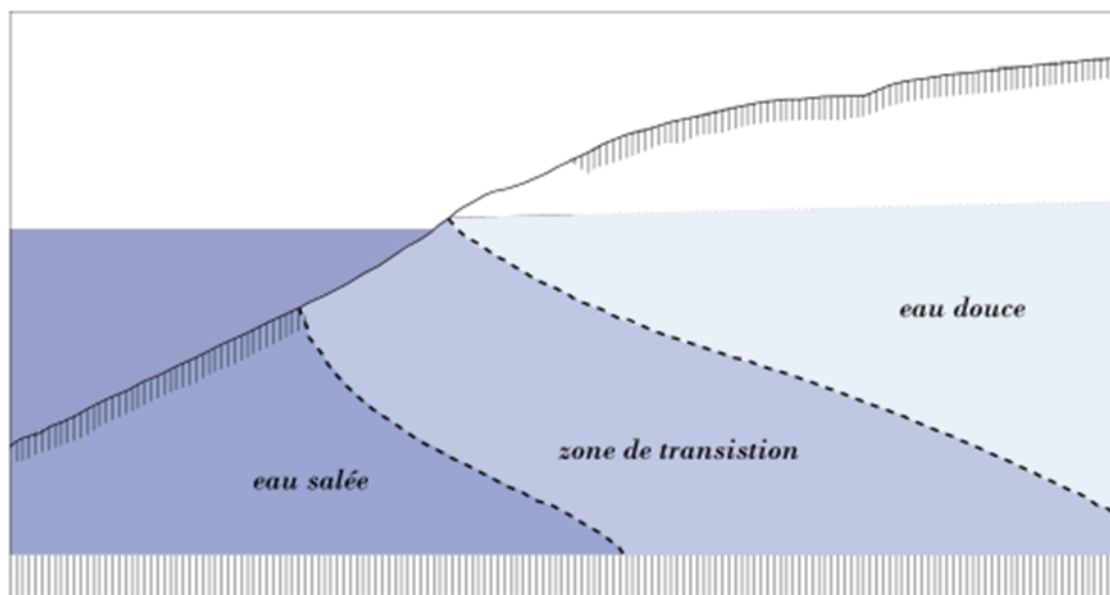


Figure 5 : Zone de transition dans le cas d'une intrusion marine (Custodio, 2002)

Divers facteurs extérieurs peuvent influencer l'épaisseur de la zone de mélange. Par exemple, les variations de marée peuvent jouer un rôle (Kim et al., 2006), tout comme la surexploitation de la nappe (Custodio, 1985). Ces facteurs peuvent contribuer à la dynamique complexe de la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer dans les aquifères côtiers

11.3 L'intrusion marine dans le monde :

Les aquifères côtiers présentent un problème majeur d'intrusion marine, qui a été étudié à travers le monde depuis de nombreuses années. Les premières études remontent au 19^{ème} siècle, notamment en Angleterre où Braithwaite (1855) a décrit une augmentation de la salinité des eaux souterraines à Londres et Liverpool.

En France, malgré un climat humide avec un taux élevé de pluviométrie, les aquifères côtiers souffrent également du problème d'intrusion marine. Des études menées par le Bureau de Recherche Géologique et Minières et l'École des Mines de Paris ont utilisé des diagraphies et des lignes isochlores pour localiser les intrusions et suivre l'évolution de l'interface sous l'effet du pompage ou de la recharge (Debuissou et Moussu, 1965 ; Fried et Ungemach, 1974).

Aux Pays-Bas, où des travaux précoces ont été réalisés sur l'exploitation des eaux souterraines en zone côtière, les aquifères ont enregistré différentes phases de salinisation par intrusion marine et désalinisation par apports d'eau douce suite aux variations du niveau marin pendant le Pléistocène. Ces études se sont concentrées sur les processus chimiques de la salinisation et de la désalinisation, ainsi que sur les échanges ioniques, l'équilibre $\text{CO}_2\text{-CaCO}_3$, l'oxydation de la matière organique, la production de méthane et les interactions avec les composés sulfurés (Appelo et Geirnaert, 1983 ; Stuyfzand, 1985).

En Afrique, la zone côtière est très vulnérable en raison de l'intensité des activités humaines. Environ 50 à 70 % de la population mondiale, y compris en Afrique, vit dans les zones côtières (Bear et al., 1999 ; Benoit et al., 2007). L'exploitation croissante des eaux souterraines, surtout dans les pays arides, contribue à l'avancée des eaux marines dans les aquifères côtiers. Les pays d'Afrique du Nord, comme l'Algérie, la Tunisie, la Libye, et le Soudan, ont été touchés par l'intrusion saline dans leurs aquifères côtiers.

Les causes principales de ce phénomène sont les pompages intensifs associés au déficit pluviométrique et à la nature lithologique des aquifères. Les travaux de recherche ont mis en évidence l'importance de mieux comprendre les processus d'intrusion marine afin de mettre en place des stratégies de gestion durable des ressources en eau douce dans les zones côtières africaines.

11.4 Critères de reconnaissance de l'invasion marine :

Les critères de reconnaissance de l'intrusion marine dans les aquifères côtiers reposent sur plusieurs aspects hydrogéologiques et hydrochimiques. Voici les principaux critères utilisés pour identifier une intrusion marine :

11.4.1 Critères géologiques :

La connaissance détaillée de la géologie de la zone littorale, notamment la lithologie et la stratigraphie, ainsi que la délimitation précise des limites géologiques de l'aquifère (mur et toit), permettent de détecter les signes précurseurs de l'intrusion marine.

11.4.2 Critères hydrodynamiques :

L'établissement d'une carte piézométrique, qui montre les variations des niveaux d'eau dans les puits et les piézomètres, est essentiel pour déterminer la direction de l'écoulement de l'eau souterraine. Un écoulement de la mer vers la nappe peut être un indicateur d'intrusion marine.

11.4.3 Critères géophysiques :

L'étude de la résistivité électrique du sous-sol peut permettre de détecter les variations de salinité et de localiser la zone de contact entre l'eau douce et l'eau de mer. Des mesures de résistivité électrique, par exemple à l'aide de méthodes de sondage électrique vertical, sont effectuées pour suivre ces évolutions.

11.4.4 Critères hydrochimiques :

L'analyse des éléments majeurs dans l'eau souterraine tels que le sodium (Na^+), le chlorure (Cl^-), le bicarbonate (HCO_3^-), ainsi que l'étude de certains rapports caractéristiques comme le rapport de Todd ($r_{\text{Cl}}/r_{\text{HCO}_3}$), permettent de caractériser l'intrusion marine. Une augmentation significative des concentrations de sodium et de chlorure, ainsi que des rapports spécifiques, est indicative de l'intrusion marine.

11.5 Méthodes d'étude de l'intrusion marine :

Plusieurs méthodes sont utilisées pour étudier l'intrusion marine dans les aquifères côtiers. Voici quelques-unes des principales méthodes d'étude :

11.5.1 Surveillance des puits :

La surveillance régulière des puits permet de mesurer les niveaux d'eau, les variations de salinité et d'autres paramètres hydrochimiques. Cela permet de suivre l'avancée de l'intrusion marine dans les aquifères.

11.5.2 Échantillonnage des eaux souterraines :

Des échantillons d'eau souterraine sont prélevés à différents points de l'aquifère pour analyser leur salinité, leurs concentrations ioniques et leurs isotopes. Cela permet de détecter la présence d'eau de mer infiltrée et de comprendre les processus de mélange et d'intrusion.

11.5.3 Diagraphies géophysiques :

Les diagraphies électriques, sismiques et autres techniques géophysiques sont utilisées pour caractériser les propriétés géologiques et hydrodynamiques des formations souterraines. Elles permettent de détecter les zones d'intrusion et de cartographier la zone de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer.

11.5.4 Modélisation numérique :

Les modèles numériques d'écoulement des eaux souterraines sont utilisés pour simuler le comportement de l'intrusion marine. Ils intègrent des données hydrogéologiques, des paramètres de transport et des conditions hydrologiques pour prédire l'évolution de l'intrusion dans le temps et l'espace.

11.5.5 Marquage des traceurs :

Des traceurs chimiques ou isotopiques sont parfois injectés dans l'aquifère pour suivre leur déplacement et étudier les processus de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer.

11.5.6 Mesure des gradients hydrauliques :

La mesure des gradients hydrauliques le long des profondeurs de l'aquifère permet de comprendre les mouvements de l'eau souterraine et l'influence de l'intrusion marine.

11.5.7 Télédétection et imagerie satellitaire :

Les images satellites et la télédétection peuvent être utilisées pour cartographier les variations de salinité de la surface de l'océan et de l'eau douce, ainsi que pour identifier les

zones vulnérables à l'intrusion marine. Les programmes spatiaux tels que SMOS et ACQUARIUS permettent de mesurer la salinité de l'océan depuis l'espace, les mesures de la salinité de surface sont importants pour déterminer la circulation océanique et comprendre le cycle de l'eau. Les scientifiques peuvent également utiliser les images satellites pour détecter les anomalies salines, notamment aux hautes latitudes et dans les tropiques, et améliorer les prévisions climatiques régionales, les changements de salinité provoquent des changements importants de la température de brillance de l'eau pour des fréquences inférieures à 5 GHz, ce qui permet de déterminer la salinité à l'aide de la télédétection, les propriétés des hyperfréquences sur la surface de la mer sont une fonction de son état physique et chimique, et l'émissivité de l'eau de mer est en rapport avec la salinité

L'utilisation combinée de ces différentes méthodes permet d'obtenir une meilleure compréhension de l'intrusion marine, de sa dynamique et de son impact sur les aquifères côtiers. Cela facilite la gestion et la protection des ressources en eau douce dans ces zones sensibles.

12. Conclusion :

L'intrusion marine est incontestablement un phénomène préoccupant qui se manifeste au sein des aquifères côtiers. Cette intrusion découle principalement de l'exploitation non raisonnée de la nappe d'eau douce pour des besoins variés tels que l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et les besoins industriels.

Pour surveiller et évaluer ce phénomène complexe, divers critères sont mobilisés, qu'ils soient d'ordre géologique, hydrodynamique, géophysique ou hydrochimique. Ces critères permettent de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de l'intrusion marine et d'en anticiper les conséquences.

En somme, la gestion durable des aquifères côtiers, tout en répondant aux besoins humains et industriels, demeure un défi crucial pour préserver ces précieuses ressources en eau douce et minimiser les effets néfastes de l'intrusion marine.

CHAPITRE 2
GENERALITES SUR LA ZONE
D'ETUDE

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction :

La plaine de la Mitidja constitue une ressource en eau considérable pour la région, étant essentielle principalement pour la consommation humaine. Sa grande importance découle de sa position géographique stratégique et de la fertilité de ses sols. Toutefois, au fil des années, les ressources en eau souterraine ont été mises en péril en raison d'une surexploitation et de conditions pluviométriques souvent défavorables, entraînant une diminution notable de la nappe. Cette baisse du niveau de la nappe a également entraîné une détérioration de la qualité de l'eau et une augmentation de l'intrusion d'eau salée. Par conséquent, il est impératif de porter une attention particulière à la préservation et à la gestion de cette nappe aquifère.

2. Cadre géographique :

La région d'étude est située dans la plaine de la Mitidja, délimitée par le Sahel au nord, l'Atlas Blidéen au sud, l'Oued Reghaïa à l'est et El Harrach à l'ouest.

La zone d'étude, occupe la partie nord de la plaine de la Mitidja orientales. Cette dernière correspond à une vaste plaine alluviale s'étendant le long de la côte méditerranéenne, entre les monts du Sahel au Nord et les montagnes de Blida au Sud. La baie d'Alger et la plaine de la Mitidja sont deux entités géographiques liées.



Figure 6 : Situation géographique de la zone d'étude

La baie d'Alger est située sur la côte nord de l'Algérie. Elle est d'une longueur 10 kilomètres environ et d'une largeur variant entre 4 et 6 kilomètres.



Figure 7 : Situation géographique de la baie d'Alger (Google Earth, 2023)

Les montagnes de l'Atlas Tellien, qui s'étendent au Sud de la baie, sont un élément géographique majeur qui influence le climat et le régime des précipitations de la région. Ces montagnes agissent comme une barrière, bloquant en partie les masses d'air humide venant de la mer Méditerranée, ce qui entraîne des précipitations plus importantes dans la baie.

En raison de son ouverture sur la mer Méditerranée, la baie d'Alger est soumise à des influences maritimes importantes, notamment les courants marins, les marées et les houles. Ces facteurs jouent un rôle crucial dans la dynamique des eaux de la baie, en influençant les mouvements des marées et les courants côtiers.

Sur le plan socio-économique, la baie d'Alger est un centre névralgique pour les activités maritimes et portuaires. Le port d'Alger, situé dans la baie, est le plus grand port du pays et joue un rôle crucial dans les échanges commerciaux internationaux.

3. Caractéristiques géomorphologiques

3.1 Morphologie de la baie :

La baie d'Alger présente une forme semi-circulaire, avec une ouverture vers la mer Méditerranée. Sa géomorphologie est influencée par des formations géologiques anciennes, notamment des sédiments déposés lors de l'orogénèse alpine.

3.2 Morphologie du bassin versant

La région d'étude se trouve dans la partie septentrionale de la Mitidja Orientale, couvrant une superficie d'environ 1140 km². Ses limites sont définies par la mer Méditerranée au Nord, une limite géologique étanche au Nord-est, l'Oued El Harrach à l'Ouest et l'Oued El Hamiz à l'Est. Le bassin versant de cette région est de forme allongée, avec un indice de compacité de GraveliusKc de 1,24, indiquant un temps de concentration des eaux relativement lent. La topographie du bassin montre une pente globale relativement faible avec un indice de pente Ig de 17,79 m/km, environ 1,8 %, favorisant l'infiltration plutôt que le ruissellement.

4. Caractéristiques générales du climat méditerranéen :

Le climat méditerranéen se caractérise en général par des étés chauds et secs, et des hivers doux et humides. Il est typique des régions côtières bordant la mer Méditerranée, dans des pays tels que l'Espagne, la France, l'Italie, la Grèce, la Tunisie, le Maroc, et bien sûr l'Algérie où se situe la baie d'Alger.

4.1 Répartition saisonnière des précipitations :

Comme mentionné précédemment, le climat méditerranéen est caractérisé par des saisons contrastées en termes de précipitations. Les mois d'automne et d'hiver enregistrent généralement des précipitations plus importantes, tandis que les mois d'été sont plus secs. Cela entraîne souvent des périodes de sécheresse estivales, ce qui peut avoir des conséquences sur l'agriculture et la disponibilité en eau.

4.2 Variabilité interannuelle :

Le climat méditerranéen est sujet à une variabilité importante d'une année à l'autre. Des années de pluies abondantes peuvent être suivies de périodes de sécheresse prolongées. Cette variabilité rend la gestion des ressources en eau et de l'agriculture dans la région plus complexe.

4.3 Régimes de vents :

Dans certaines régions méditerranéennes, des vents spécifiques peuvent influencer le climat local. Par exemple, le "Mistral" est un vent froid et sec qui souffle du Nord vers le Sud en direction de la mer Méditerranée. Le "Sirocco", quant à lui, est un vent chaud et sec qui vient du désert du Sahara et peut provoquer des tempêtes de sable et des périodes de chaleur intense.

4.4 Influence sur la végétation :

Le climat méditerranéen favorise la végétation de type maquis et garrigue, caractérisée par des buissons et des arbustes résistants à la sécheresse. Les forêts de chênes verts et de pins sont également courantes dans certaines régions.

4.5 Rôle de la mer Méditerranée :

La mer Méditerranée exerce une influence majeure sur le climat des régions côtières. Les températures marines modèrent les températures terrestres, en particulier pendant les mois d'été. La mer joue également un rôle dans la formation des systèmes météorologiques, tels que les dépressions et les fronts, qui peuvent apporter des précipitations.

5. Aperçu climatique de la zone d'étude :

En raison de sa proximité avec la mer, la zone d'étude bénéficie d'un climat méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

Pour caractériser le climat de la zone d'étude, on se base sur les données de 2 paramètres importants observés au niveau de la Mitidja-est.

5.1 Les précipitations

L'analyse pluviométrique de la zone d'étude est effectuée sur les mesures des précipitations enregistrées sur la période 1990-2019 au niveau de 4 stations couvrant la zone d'étude : Réghaïa, Keddara barrage, Boumerdes et Baraki. Les caractéristiques des stations de mesures sont récapitulées dans le tableau 2.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (source : ANRH)

	<i>Reghaia</i>	<i>Keddara</i>	<i>Boumerdes</i>	<i>Baraki</i>
<i>Code ANRH</i>	<i>02-06-32</i>	<i>02-06-46</i>	<i>02-06-47</i>	<i>02-14-21</i>
<i>Coordonnées</i>	<i>Longitude</i>	<i>3°20'E</i>	<i>3°28' E</i>	<i>3°42' E</i>
	<i>Latitude</i>	<i>36°48'N</i>	<i>36°36'N</i>	<i>36°46' N</i>
	<i>Altitude(m)</i>	<i>20</i>	<i>151</i>	<i>50</i>

5.1.1 Précipitations moyenne mensuelle

Les précipitations moyennes mensuelles observées sur une période de 30 ans (1990 à 2019) sont présentées dans le tableau 3

Tableau 2 : précipitations mensuelles moyennes (en millimètres) enregistrées pour chaque mois de l'année

<i>mois</i>	<i>Reghaa</i>	<i>Keddara Barrage</i>	<i>Boumerdes</i>	<i>Baraki</i>
<i>Janvier</i>	<i>24,54</i>	<i>21,02</i>	<i>45,64</i>	<i>32,26</i>
<i>Février</i>	<i>23,02</i>	<i>21,69</i>	<i>50,88</i>	<i>38,21</i>
<i>Mars</i>	<i>26,42</i>	<i>21,32</i>	<i>57,23</i>	<i>39,91</i>
<i>Avril</i>	<i>22,31</i>	<i>9,85</i>	<i>36,73</i>	<i>28,73</i>
<i>Mai</i>	<i>20,63</i>	<i>5,65</i>	<i>25,92</i>	<i>20,76</i>
<i>Juin</i>	<i>10,71</i>	<i>9,85</i>	<i>6,52</i>	<i>5,89</i>
<i>Juillet</i>	<i>4,86</i>	<i>5,65</i>	<i>3,91</i>	<i>3,08</i>
<i>Août</i>	<i>4,06</i>	<i>4,08</i>	<i>4,59</i>	<i>3,65</i>
<i>Septembre</i>	<i>8,86</i>	<i>10,41</i>	<i>13,39</i>	<i>10,05</i>
<i>Octobre</i>	<i>20,35</i>	<i>20,78</i>	<i>34,69</i>	<i>28,36</i>
<i>Novembre</i>	<i>24,37</i>	<i>25,61</i>	<i>38,64</i>	<i>29,64</i>
<i>Décembre</i>	<i>23,39</i>	<i>23,93</i>	<i>38,91</i>	<i>34,07</i>

5.1.2 Précipitations annuelles

Tableau 3 : précipitations annuelles moyennes (en millimètres) enregistrées dans les stations pluviométriques (1990-2019)

<i>Année</i>	<i>Reghaia</i>	<i>Keddara Barrage</i>	<i>Boumerdes</i>	<i>Baraki</i>
1990	20	28	35,2	19,3
1991	48,8	52,2	46	30,4
1992	94,8	42,9	137,9	13,4
1993	34	28,3	83,6	34
1994	45,2	32,7	94,2	27,8
1995	50,8	49,2	162,9	49,2
1996	43,4	44	209,5	43,4
1997	64	59,6	170,6	59,6
1998	37,5	43,7	151,2	43,7
1999	38,1	37,3	197,2	37,3
2000	34,5	31,5	117,7	31,5
2001	46	52,2	281,7	52,2
2002	40,1	45,2	229,4	45,2
2003	42,2	46,6	103,5	46,6
2004	38,6	40,9	162,7	40,9
2005	42,2	62,2	166,5	62,2
2006	62,2	24,5	209,3	62,2
2007	45	45	137,9	45
2008	54,2	41,7	151,2	41,7
2009	62,3	105,3	136	48,6
2010	32,6	62,2	166,5	62,2
2011	52,2	52,2	281,7	52,2
2012	41,2	84,3	131	84,3
2013	47,1	41,1	228,1	41,1
2014	40,9	38,6	133,5	38,6
2015	42,2	42,2	117,7	42,2
2016	40,1	209,3	209,3	209,3
2017	42,2	42,2	98,2	45
2018	54,2	54,2	151,2	54,2
2019	40,2	40,2	124,2	40,2

En analysant les résultats du tableau des précipitations annuelles moyennes pour chaque année dans les stations pluviométriques de la zone d'étude sur la période de 1990 à 2019, nous pouvons observer les variations des précipitations au fil des années (figure 8). Pendant certaines années ont enregistré des précipitations supérieures à la moyenne, tandis que d'autres années ont été plus sèches avec des précipitations inférieures à la moyenne.

Reghaïa: Cette région a connu des variations significatives des précipitations au fil des années, avec des valeurs maximales allant de 20 mm en 1990 à 94,8 mm en 1992. Les précipitations minimales varient également, passant de 20 mm à 32,6 mm en 2010.

Keddara Barrage : Les précipitations maximales varient de 24,5 mm en 2006 à 105,3 mm en 2009. Les précipitations minimales oscillent entre 24,5 mm en 2006 et 31,5 mm en 2000.

Boumerdes : Cette région a enregistré des précipitations maximales de 98,2 mm en 2017 à 281,7 mm en 2001. Les précipitations minimales varient de 13,4 mm en 1992 à 62,2 mm en plusieurs années (2005, 2006, 2010, 2011).

Baraki : Les précipitations maximales vont de 13,4 mm en 1992 à 62,2 mm en 2006, 2010, et 2011. Les précipitations minimales varient entre 13,4 mm en 1992 et 31,5 mm en 2000.

Ces données montrent que chaque région a connu des années de précipitations abondantes et des années de précipitations plus faibles. L'année 2001 semble avoir été particulièrement pluvieuse dans toutes les régions, tandis que 1992 a été relativement sèche. Les précipitations minimales sont généralement plus stables que les précipitations maximales, mais elles présentent également des variations au fil des ans.

Cette variabilité des précipitations peut avoir un impact significatif sur les ressources en eau, l'agriculture et l'environnement de la région.

En examinant les données des précipitations mensuelles pour chaque station pluviométrique, nous constatons que les précipitations varient également considérablement d'un mois à l'autre. Les mois d'hiver, janvier, février et mars, présentent généralement des précipitations plus élevées, tandis que les mois d'été, juin, juillet et août, ont tendance à être plus secs (figure 9).

Reghaïa : Le mois le plus pluvieux est mars avec une précipitation maximale (P max) de 26,42 mm. Le mois le moins pluvieux est août avec une précipitation minimale (P min) de 4,06 mm.

Keddara Barrage : le mois le plus pluvieux est novembre avec une précipitation maximale (Pmax) de 25,61 mm. Le mois le moins pluvieux est août avec une précipitation minimale (Pmin) de 4,08mm.

Boumerdes : le mois le plus pluvieux est mars avec une précipitation maximale (Pmax) de 57,23 mm. Le mois le moins pluvieux est juillet avec une précipitation minimale (Pmin) de 3,91 mm.

Baraki : Le mois le plus pluvieux est mars avec une précipitation maximale (Pmax) de 39,91 mm. Le mois le moins pluvieux est août avec une précipitation minimale (Pmin) de 3,08 mm.

Cela donne une idée plus précise des variations saisonnières et des différences entre les régions en termes de précipitations maximales et minimales. Ces variations saisonnières sont typiques du climat méditerranéen, qui se caractérise par des hivers humides et des étés secs.

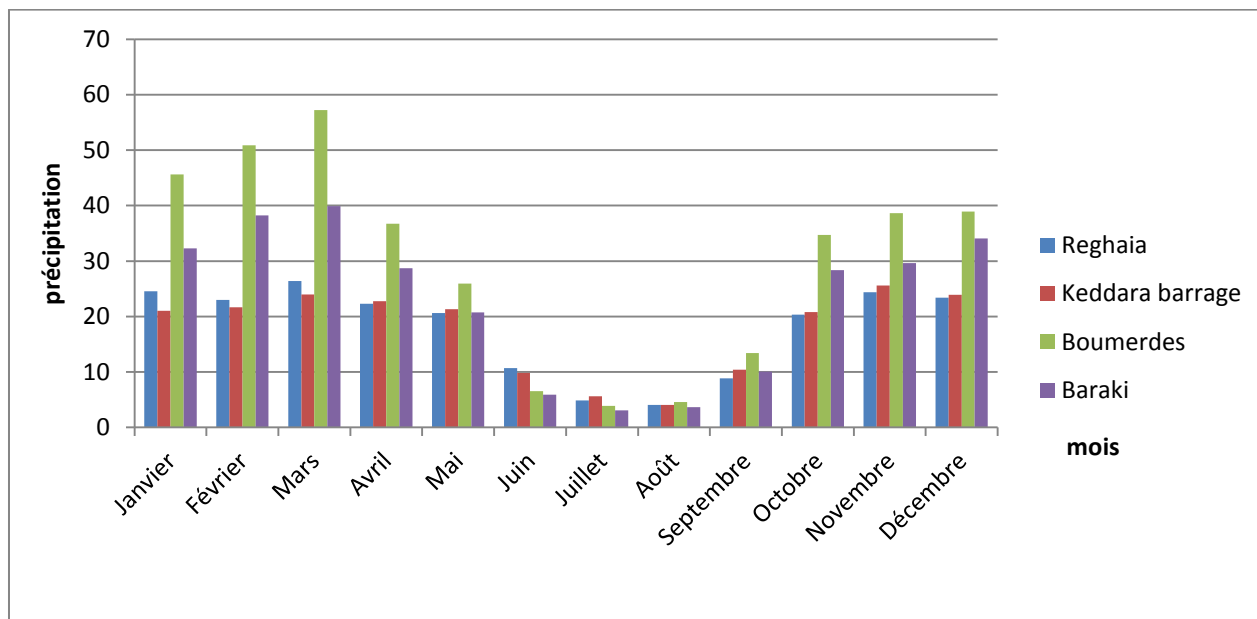


Figure 9 : précipitations mensuelles moyennes (en millimètres) (1990-2019)

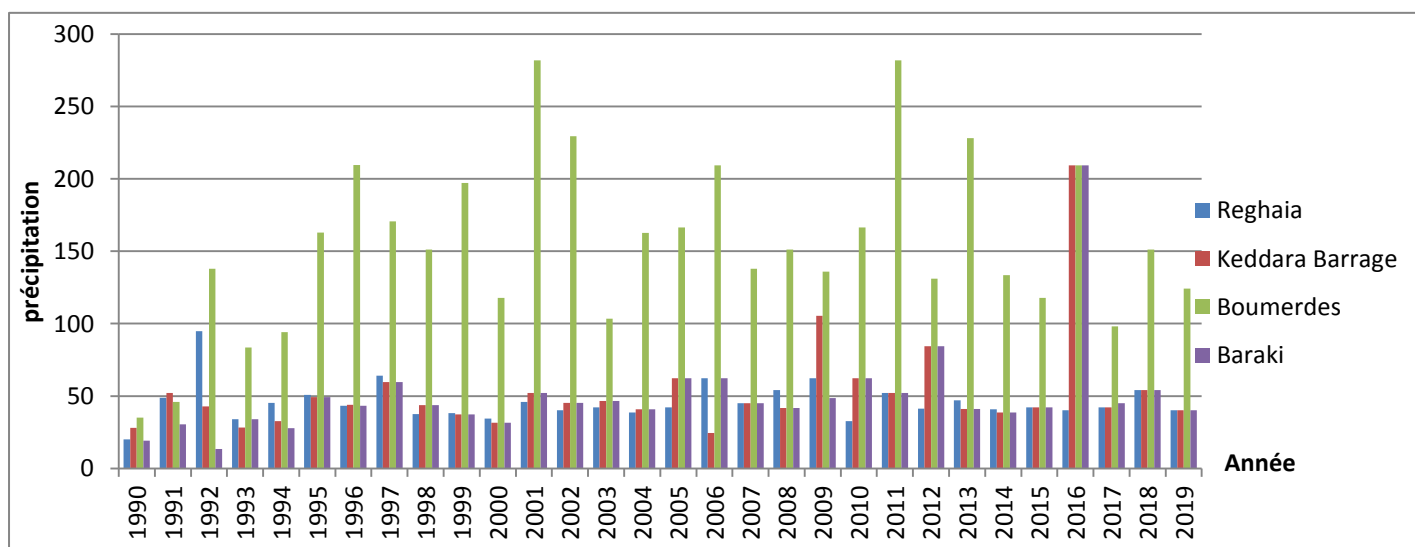


Figure 8 : précipitations annuelles moyennes (en millimètres)(1990-2019)

5.2 Les températures :

La station météorologique de Keddara barrage enregistre une température moyenne annuelle d'environ 17 °C. Pendant les mois d'hiver, entre décembre et février, les températures moyennes se situent autour de 11°C, tandis qu'en été, en juillet et août, elles atteignent environ 24 °C.

Les températures maximales moyennes varient entre 17 °C en hiver et 31 °C en été, montrant ainsi une amplitude thermique saisonnière significative. De même, les températures minimales moyennes évoluent de 6 °C en hiver à 18 °C en été. Ces variations de température entre les saisons sont caractéristiques du climat méditerranéen, où l'alternance entre les saisons est bien marquée.

Les calculs des températures sont indiqués dans le tableau ci-après

Tableau 4 : Mensuelles des températures moyennes, maximales et minimales Période (2005-2012) keddara. Barrage

Mois	Température Maximale (°C)	Température Minimale (°C)	Température Moyenne (°C)
Janvier	17	6	11
Février	18	6	12
Mars	20	8	14
Avril	23	10	16
Mai	26	13	19
Juin	31	17	24
Juillet	34	19	27
Août	35	20	28
Septembre	31	17	24
Octobre	27	13	20
Novembre	21	9	15
Décembre	18	6	12
Moyenne Annuelle			19

Dans la station météorologique de Keddara barrage période (2005-2012) on a remarqué qu'en hiver, de janvier à mars, les températures sont relativement douces, avec des températures maximales atteignant environ 20°C en mars. Les minimales varient entre 6°C en janvier et 8°C en mars. La température moyenne durant cette période est d'environ 14°C.

Au printemps, d'avril à juin, les températures commencent à augmenter progressivement. Les maximales atteignent environ 31°C en juin, tandis que les minimales se situent autour de 10°C en avril et de 17°C en juin. La température moyenne au printemps est d'environ 19°C.

En été, de juillet à août, la chaleur est plus intense avec des températures maximales qui peuvent atteindre jusqu'à 35°C. Les minimales restent relativement douces, autour de 19°C. La température moyenne en été est d'environ 27°C.

En automne, de septembre à novembre, les températures commencent à baisser progressivement. Les maximales tournent autour de 31°C en septembre et diminuent jusqu'à 21°C en novembre. Les minimales varient entre 9°C en novembre et 17°C en septembre. La température moyenne en automne est d'environ 15°C.

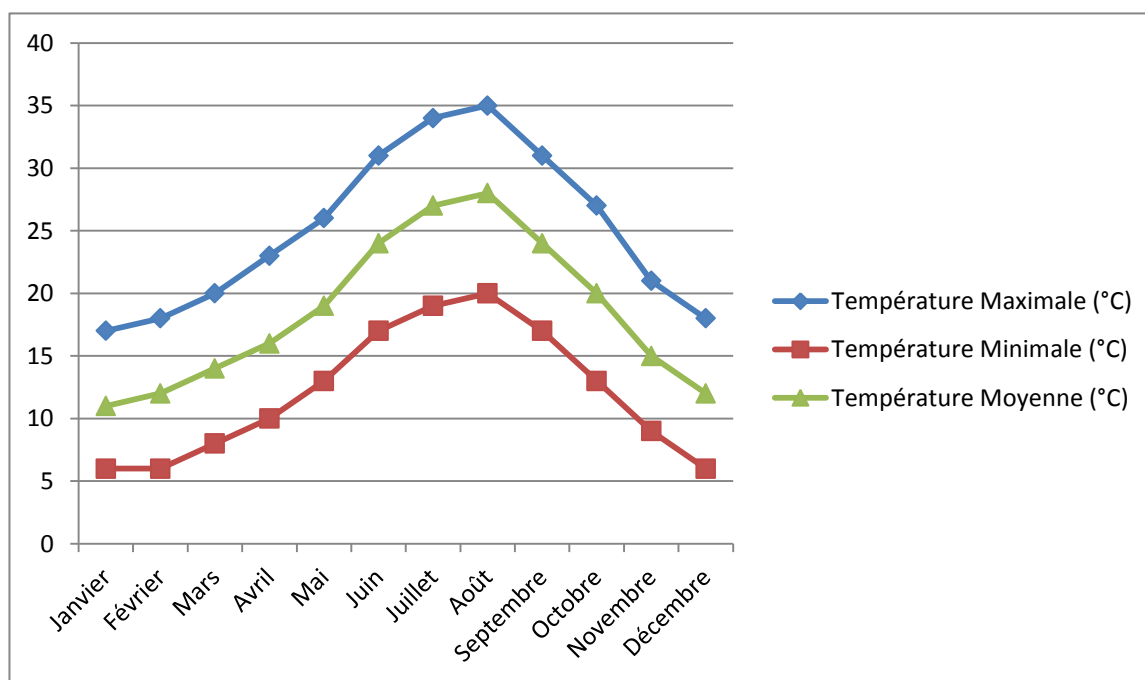


Figure 10 : Graphe des Températures mensuelles de Keddara pour la période (2005-2012)

6. Caractéristique hydrologique

6.1 Limites hydrologiques

La zone d'étude est partagée entre deux sous bassin versants de la plaine de la Mitidja orientale qui couvre une superficie de 510 km², Ces deux sous bassin versants sont : le bassin versant de l'Oued El-Harrach d'une superficie de 1236 km² et le bassin versant de l'Oued Hamiz d'une superficie de 370 km² (figure 16). Le sous bassin versant de Réghaia est intégré dans celui de Hamiz en raison de sa petite taille (88 km²).

6.2 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja orientale est composé de trois principaux cours d'eau : l'Oued El Harrach, l'Oued El Hamiz et l'Oued Réghaïa (figure 11). Ces oueds traversent la plaine selon des directions méridiennes, et sont caractérisés par des plans d'eau naturels tel que le barrage de Hamiz ou artificiels tel que le lac de Réghaïa.

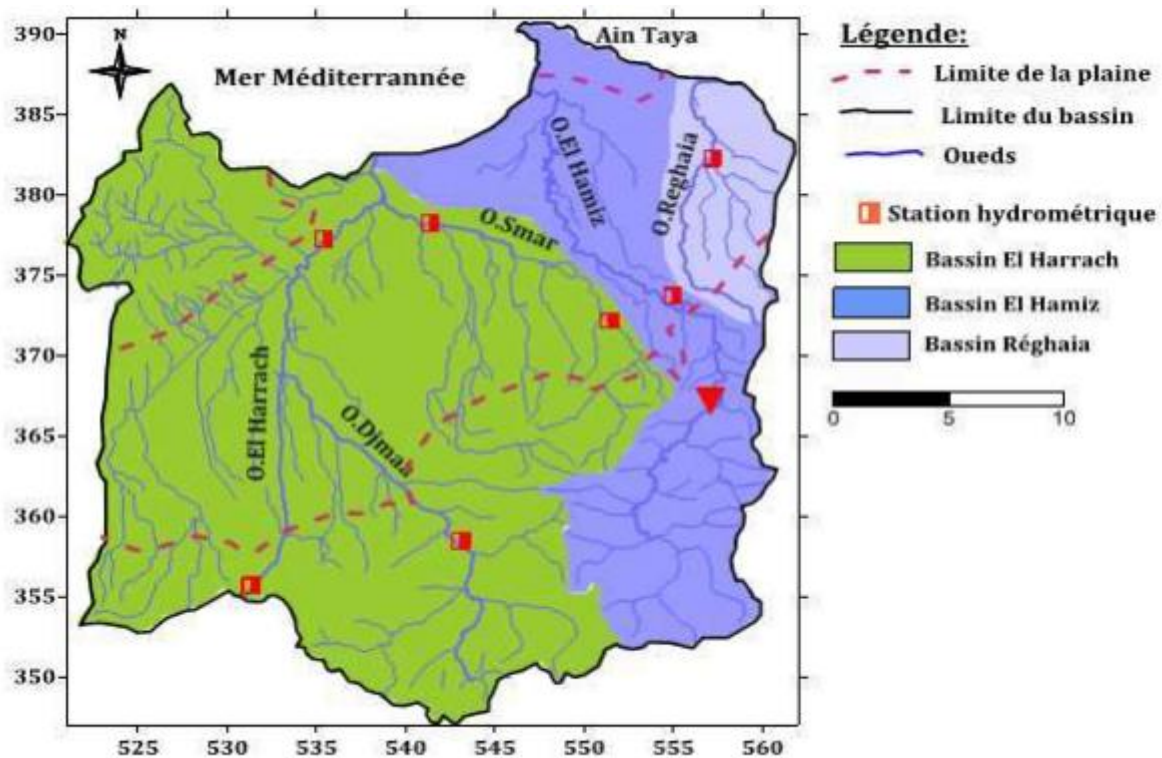


Figure 11 : Les sous bassins versants de la Mitidja Est.(khoualed et Remili.2017)

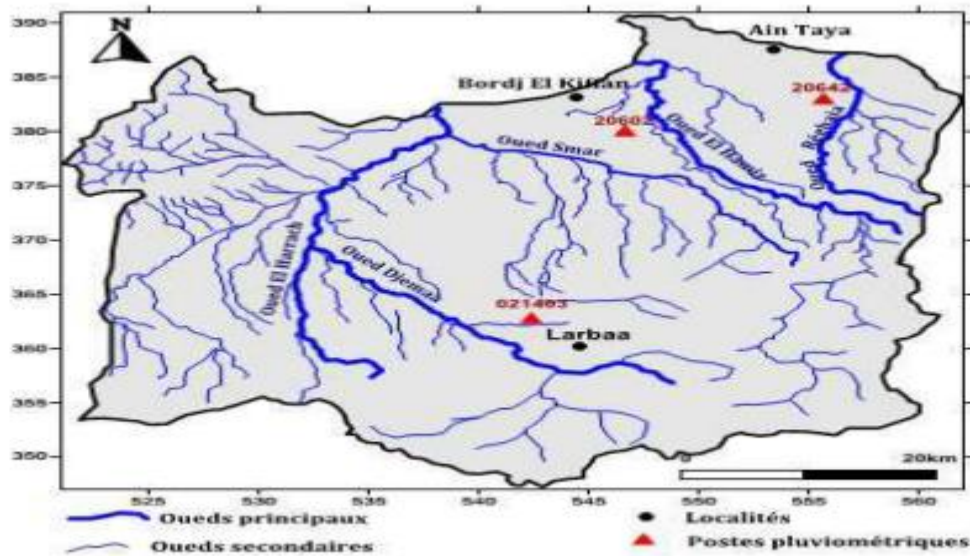


Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mitidja Est.(khoualed et Remili.2017)

L'Oued El Harrach reçoit trois affluents : l'Oued Djemââ, l'Oued Smar et l'Oued Boutrik. Il prend sa source dans les monts de Tablât et son tracé a été modifié à plusieurs reprises. Actuellement, il traverse la plaine du Sud au Nord avant de se diriger vers le Nord-est au pied du Sahel jusqu'à la cluse d'El Harrach.

L'Oued El Hamiz, quant à lui, est alimenté par deux affluents importants : l'Oued Arbattache et l'Oued Sekhine. Il prend une direction Nord-ouest à partir de Fondouk jusqu'à Hamadi, puis s'incline vers le Sahel avant de se jeter dans la mer au Sud du cap Matifou (Bordj El Bahri).

L'Oued Réghaïa est considéré comme un oued secondaire. Tous ces oueds côtiers présentent des caractéristiques communes, comme leur origine dans l'Atlas et leur petite taille. Leur profil longitudinal se divise en deux parties distinctes, et leur pente est très forte en montagne. Ces cours d'eau ont été influencés par le jeu tectonique dans le passé

7. Caractéristiques morpho métriques :

7.1 Paramètres géométriques :

Pour l'évaluation des paramètres géométriques du bassin versant Hamiz-Réghaïa, nous avons combiné les deux sous-bassins versants, Hamiz et Réghaïa, pour former un seul bassin versant d'une superficie totale de 370 km² dans la région de la Mitidja Est.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques géométriques et morphométriques du bassin versant du Hamiz-Réghaïa :

Tableau 5: paramètres géométriques des sous bassins versants.(khoualed et Remili.2017)

paramètres	unité	Formule de calcul	Valeur
Superficie(S)	Km ²		370,9
Périmètre(P)	Km		127,5
Indice de compacité de GRAVELIUS (Kc)	%	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,7
Longueur du rectangle équivalent (L)	Km	$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$	53,91
Largeur du rectangle équivalent (I)	Km	$I = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right]$	7,62
Facteur de forme (Rf)		$Rf = \frac{L^2}{S}$	7,83
Indice de conformité (Ic)		$Ic = \frac{S}{L}$	6,88
Coefficient de compacité (C)		$C = \frac{L}{I}$	7.075

Le bassin versant Hamiz-Réghaïa présente un indice de compacité de 1,7, ce qui indique une forme allongée. Cette caractéristique signifie un temps de concentration et de ruissellement relativement long, et que les eaux de pluie prennent plus de temps pour s'écouler jusqu'à l'exutoire du bassin. Cette situation est confirmée par la forme du rectangle équivalent, où la longueur (L) est plus grande que sept fois la largeur (I).

7.2 Paramètres de relief :

L'influence du relief sur l'écoulement des eaux est un aspect essentiel à prendre en compte, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient en fonction de l'altitude (comme les précipitations et les températures) et de la morphologie du bassin. La topographie du bassin influence également la vitesse d'écoulement des eaux. Ainsi, il est important de caractériser le relief du bassin à l'aide d'indices et de paramètres spécifiques.

7.2.1 La courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est une représentation graphique qui permet d'obtenir une vision synthétique de la topographie et du relief du bassin versant. Cette courbe illustre la distribution de la surface du bassin en fonction de l'altitude. En d'autres termes, elle montre combien de pourcentage de la superficie totale du bassin se trouve au-dessus ou au-dessous de chaque altitude donnée.

Tableau 6 : répartition altimétrique d'altitudes du bassin versant de l'oued ElHamiz

Tranche d'altitude (m)	Centre de classe (m)	surface Ai (km ²)	%Ai	% Ai cumulé	Ai/Hi
0-200	100	175.14	42.79	100	17514
200-400	300	49.12	12	57.21	14736
400-600	500	85.5	20.89	45.2	42750
600-800	700	58.33	14.25	24.31	40831
800-1000	900	35.08	8.57	10.06	31572
1000-1200	1100	6.09	1.49	1.49	6699
		409.26			154102

La représentation graphique de la courbe hypsométrique du bassin de Hamiz-Réghaïamet en évidence une distribution inégale des altitudes dans la zone d'étude. Environ 50 % de la surface du bassin est située dans une fourchette d'altitudes allant de 0 à 450 mètres, ce qui indique une prédominance de terrains de basse altitude. En revanche, les altitudes supérieures à 300 mètres sont moins fréquentes, occupant une proportion plus réduite de la surface totale du bassin.

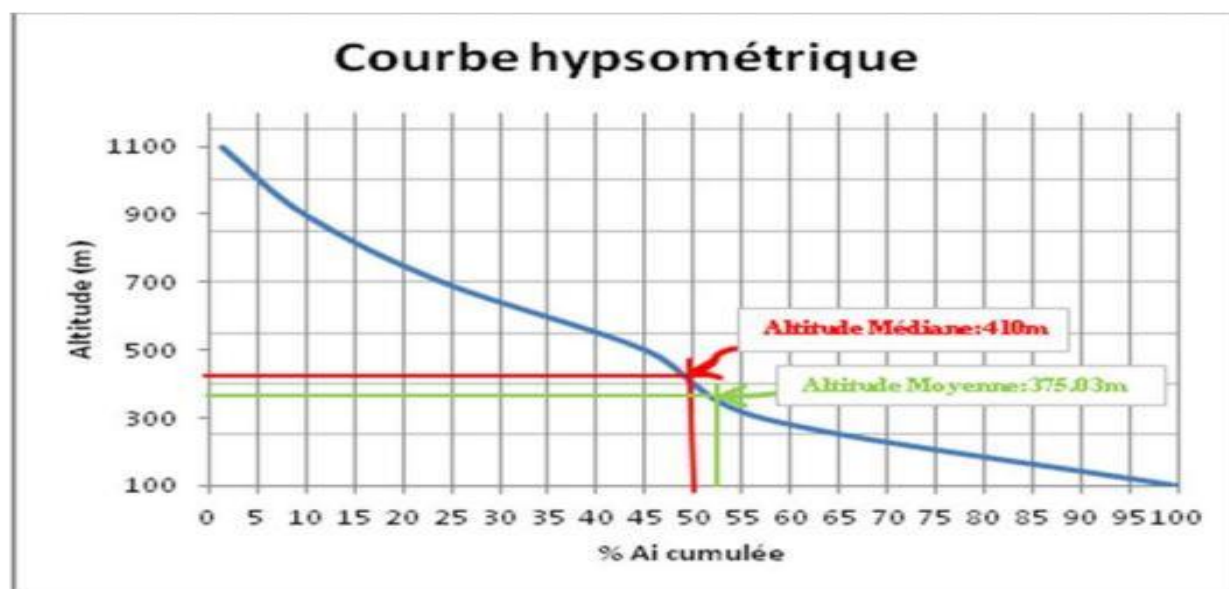


Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Hamiz-Réghaïa (BEHIRI nouara, 2010).

La courbe hypsométrique est un outil essentiel pour comprendre le relief du bassin versant. Elle permet de visualiser rapidement la distribution altitudinale du territoire, mettant en évidence les zones de haute ou de basse altitude. Dans le cas du bassin de Hamiz-Réghaïa, la prédominance des basses altitudes peut influencer les caractéristiques hydrologiques, notamment en favorisant l'écoulement des eaux vers les secteurs les plus bas.

7.2.2 Les altitudes caractéristiques :

Le tableau ci-dessous résume les différentes altitudes et l'indice de pente globale.

Tableau 7 : Les caractéristiques de relief de bassin versant du Hamiz-Reghaïa

Paramètres	Unité	Formule de calcul	valeur
Altitude max (H max)	m		1100
Altitude min (h min)	m		28
Altitude médiane (H med)	m		410
Altitude moyenne (H moy)	m	$H_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot H_i}{A}$	357.03
La dénivelée totale (Dt)	m	Hmax-Hmin	1072
Indice de pente globale (Ig)		$Ig = \frac{D}{L}$	19.88

Le sous-bassin versant Hamiz-Réghaïa de la plaine de Mitidja-est présente un relief relativement faible, favorisant ainsi une infiltration optimale des eaux dans le sol. Avec un indice de pente global indiquant des pentes douces

8. Conclusion

La plaine de la Mitidja, située dans le bassin d'Alger, est renommée pour sa fertilité exceptionnelle et sa variété de reliefs et de végétation. Cette région s'étend sur quatre wilayas : Alger, Blida, Tipaza et Boumerdès, dont Blida détient la part prédominante. Elle est délimitée au sud par l'Atlas Blidéen et au nord par le Sahel, formant une dépression allongée d'ouest (l'Oued Nador) en est (l'Oued Boudouaou). Les quatre principaux cours d'eau qui la traversent contribuent de manière significative à l'alimentation de l'aquifère local, faisant de cette formation aquifère l'une des plus importantes de la région d'Alger

CHAPITRE 3
CADRE GEOLOGIQUE,
HYDROGEOLOGIQUE ET
HYDROCHIMIQUE

CHAPITRE 3 : CADRE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE

1. Géologie :

Le secteur d'étude se situe à l'extrémité orientale de la plaine de la Mitidja, une zone caractérisée par une subsidence continue. Cette subsidence a entraîné une sédimentation active dans la région, avec des matériaux provenant principalement des reliefs de l'Atlas blidéen.

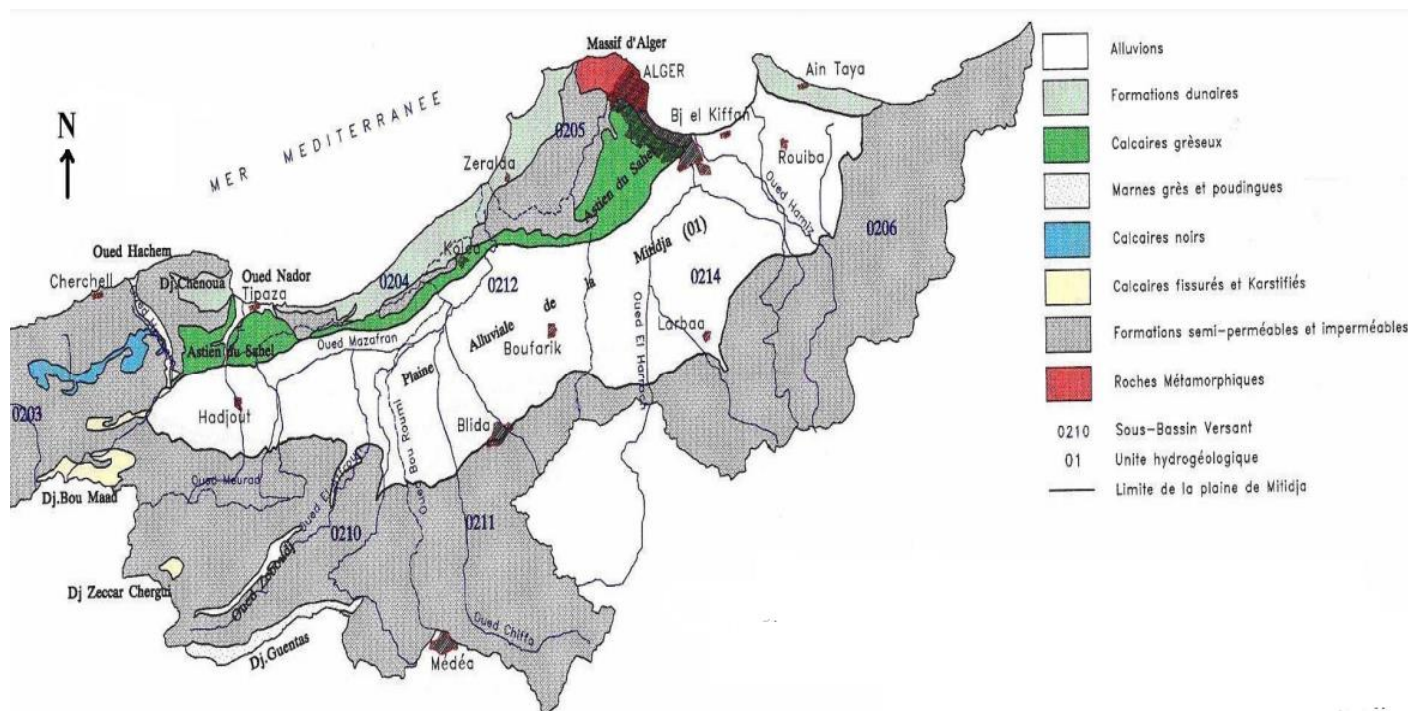


Figure 14 : Carte géologique de la Mitidja (Bennie et Partners, 1983)

2. Stratigraphie et lithostratigraphie :

La base de l'identification géologique de l'aquifère repose sur la connaissance des structures hydrogéologiques qui résultent de la disposition des différentes formations géologiques dans le sous-sol. Ces structures déterminent la configuration des réservoirs et jouent un rôle essentiel dans la circulation et l'accumulation des eaux souterraines.

Dans le cas de la Mitidja, les différentes étapes de son évolution géologique ont été bien étudiées depuis les travaux réalisés par L. Glangenau et A. Aymé en 1932. Ces études ont permis de mieux comprendre les différentes phases de formation des réservoirs aquifères dans la région

2.2 Miocène et formations anciennes dans la région de la Mitidja

Les formations géologiques plus anciennes, notamment celles du Miocène et celles antérieures à cette époque, jouent un rôle important dans le contexte géologique de la région de la Mitidja. Elles se situent sous le bassin de la Mitidja, principalement dans le cœur de l'anticlinal du Sahel et affleurent également à certains endroits de l'Atlas, le long de la bordure Sud du bassin.

2.2.1 Le Miocène :

Le Miocène est une période géologique qui affleure localement dans l'Atlas, spécifiquement au Sud de Khemis EL Khechna et à l'Est de l'Oued Réghaïa. Il est caractérisé par des couches de marnes d'une épaisseur d'environ 50 m, appartenant au Vindobonien, contenant des lentilles de calcaires et parfois des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien.

2.2.2 Formations géologiques plus anciennes :

Ces formations plus anciennes comprennent deux types de roches distincts :

A. Roches éruptives du Tertiaire :

Les roches éruptives du Tertiaire sont associées aux formations volcaniques, calcaires et conglomérats. Elles affleurent principalement sur le pourtour Sud-ouest de la plaine de la Mitidja, formant des reliefs particuliers dans cette région.

B. Roches métamorphiques :

Les roches métamorphiques sont constituées de gneiss, de schistes et de micaschistes. Elles se présentent sous forme de petits affleurements isolés au Nord de la région, notamment dans le massif d'Alger et au cap Matifou.

Ces formations géologiques plus anciennes, bien que situées en profondeur sous la plaine de la Mitidja, ont une influence significative sur la géologie et l'hydrogéologie de la région.

2.3 Le Pliocène :

Le Pliocène est représenté dans la région par deux formations géologiques distinctes, à savoir le Plaisancien et l'Astien, qui sont particulièrement bien développées dans la plaine de la Mitidja.

2.3.1 Le Plaisancien :

Le Plaisancien affleure principalement dans les collines du Sahel, au cœur d'un plissement anticlinal, dans les zones de Khemis EL Khechna et Réghaïa. Il constitue la formation Est du bassin de la Mitidja.

Le Plaisancien est caractérisé par une série uniforme de marnes grises ou bleues, parfois sableuses. Sa présence dans la région joue un rôle important dans la géologie et l'hydrogéologie locales.

2.3.2 L'Astien :

L'Astien est bien développé le long de la côte sud du Sahel, mais il est peu présent dans la bordure Sud de la Mitidja.

La formation de l'Astien présente un faciès varié associé à une sédimentation marine de haut fond. Elle est composée d'une série d'une épaisseur variant entre 100 et 130 mètres. Cette série commence par une couche glauconienne, puis se poursuit avec des molasses récifales ou sub-récifales, des marnes jaunes, ainsi qu'un faciès calcaire ou calcaro-gréseux.

À l'Est de Rouiba, l'Astien est situé à faible profondeur, et son épaisseur a été réduite par l'érosion

2.4 Pléistocène

2.4.1 Le Villafranchien :

Le Villafranchien, également connu sous le nom de "formation d'El Harrach", est une unité géologique caractérisée par des dépôts alluviaux plus récents. Bien qu'il soit présent en bordure sud du Sahel et à l'extrémité Ouest du bassin de la Mitidja, il est absent dans certaines zones, notamment autour de Rouiba.

La formation d'El Harrach se compose principalement d'argiles plastiques jaunes ou grises, parfois légèrement caillouteuses, et contenant des lentilles de graviers d'une épaisseur variant de 2 à 6 mètres. Son épaisseur moyenne au centre du bassin est estimée à environ 100 mètres, mais elle diminue progressivement en se dirigeant vers l'Atlas.

Cependant, il est à noter que ces argiles sont totalement absentes autour de Rouiba, ce qui peut avoir une incidence significative sur la géologie et l'hydrogéologie de cette zone spécifique.

2.4.2 Le Soltano-Tensifien :

La formation géologique du Soltano-Tensifien est prédominante dans toute la plaine de la Mitidja, s'étendant sur une épaisseur variant de 100 à 200 mètres. Cette épaisseur diminue progressivement en s'approchant des bordures de l'Atlas et de la baie d'Alger.

L'ensemble de cette formation présente des variations considérables de granulométrie, tant dans le sens horizontal que vertical. Elle se caractérise par une composition majoritairement constituée de matériaux alluviaux grossiers, tels que des graviers, des limons, des argiles et des galets.

2.4.3 Le Rharbien - Actuel :

La formation géologique du Rharbien - Actuel concerne une partie relativement restreinte du remplissage du bassin oriental de la Mitidja. Cette formation comprend plusieurs types de dépôts, qui sont les suivants :

- Dépôts de sables dunaires : Ces dépôts se concentrent principalement dans la région de Réghaïa et s'étendent sur une épaisseur de 20 à 40 mètres. Ils sont caractérisés par la présence de sables provenant de l'action des vents et de la dynamique des dunes.

- Dépôts des lits des oueds actuels : Cette catégorie de dépôts est constituée de sables et de graviers et se trouve dans les lits des cours d'eau actuels. Leur épaisseur est relativement faible, atteignant seulement quelques mètres.
- Dépôts de piémont de l'Atlas : Ces dépôts englobent divers éléments anguleux et des couches de graviers. Ils sont associés aux zones de piémont, où les matériaux charriés depuis les reliefs de l'Atlas se déposent progressivement.

Ces différentes formations géologiques reflètent l'évolution géomorphologique complexe de la région de la Mitidja orientale. Les dépôts de sables dunaires témoignent de l'activité éolienne passée, tandis que les dépôts des lits des oueds actuels indiquent les processus d'écoulement actuels des cours d'eau. Enfin, les dépôts de piémont de l'Atlas traduisent l'influence de l'érosion des montagnes environnantes sur la plaine de la Mitidja.

3. Evolution paléogéographique et tectonique :

La région du bassin de la Mitidja présente une histoire géologique qui remonte à l'Éocène, avec une individualisation en unité structurale qui se dessine à la fin de l'Astien. Au cours des âges géologiques suivants, plusieurs phénomènes ont contribué à façonner l'évolution paléogéographique et structurale de la Mitidja.

3.1 À l'Éocène :

Jusqu'à la fin de l'Oligocène, les formations géologiques anciennes ont été soumises à des processus de structuration, marqués par la formation d'écaillés et de plis complexes. Vers la fin du Lutécien, lors de la phase Priabonienne, l'Atlas connaît un soulèvement qui induit une évolution continentale.

3.2 Au Miocène :

Au Burdigalien, la mer occupe l'intégralité de la Mitidja, et les processus de sédimentation et de plissement s'intensifient, entraînant un début d'effondrement du bassin. Ces processus de plissement se poursuivent au Cartenien par des déformations cassantes. Vers la fin du Miocène, lors de la période Vindobien, la mer se retire totalement de la Mitidja. Cette régression généralisée est accompagnée par une phase tectonique en distension, favorisant l'émergence des roches éruptives.

3.3 Au Pliocène :

Le Pliocène est caractérisé par un cycle géologique qui débute par une transgression marine, marquée par une sédimentation composée principalement de matériaux marneux. Cette phase de transgression conduit à une cimentation des sédiments dans les marnes.

Par la suite, le cycle géologique se termine par une régression marine, accompagnée d'une émergence progressive des terrains. La régression entraîne le retrait progressif de la mer, laissant place à des conditions géologiques favorables à la formation de nouvelles couches de sédiments et à des processus de déformation tectonique.

3.4 Au Plaisancien :

Le Plaisancien correspond à une période de calme orogénique avec une sédimentation en mer profonde. À cette époque, la mer avance vers le Sud sans atteindre le pied de l'Atlas, qui est en constante surrection. Cette transgression se traduit par une sédimentation marneuse qui recouvre de manière discordante la formation du Miocène. Cet épisode est suivi par une sédimentation détritique comprenant des grès, des calcaires et des sables glauconieux de faible profondeur, marquant le début de l'Astien.

3.5 À la fin de l'Astien :

Une phase de plissement surélève l'Atlas Blidien, tandis que le synclinal s'enfonce, provoquant ainsi l'apparition du bombement anticlinal du Sahel. L'Atlas subit une érosion, dont les produits viennent se déposer dans le bassin subsident, marquant ainsi le début du remblaiement Villafranchien.

3.6 Au Quaternaire :

Pendant le Villafranchien, le bassin subsident continue de se remplir de marnes et de cailloutis, et s'approfondit. À ce mouvement d'enfoncement s'ajoutent des compressions latérales du relief et de la subsidence.

Ces phénomènes géologiques ont joué un rôle majeur dans l'évolution paléogéographique et structurale du bassin de la Mitidja. Les phases de transgression et de régression marines ont façonné les différentes couches de sédiments, tandis que les processus de plissement et d'érosion ont influencé la formation des reliefs actuels de la région.

3.7 Récapitulation des différents stades d'évolution de la Mitidja :

Le bassin de la Mitidja a connu une évolution géologique complexe au cours des ères tertiaire et quaternaire, marquée par des variations du niveau de la mer et des phénomènes de sédimentation, d'érosion et de plissement. Au cours du Miocène supérieur, le niveau marin a baissé, entraînant l'isolement de la Mitidja en tant qu'unité structurale distincte. Des roches volcaniques sont apparues en bordure du bassin pendant cette période.

Au Pliocène, le niveau marin a de nouveau fluctué, avec des périodes d'élévation et de baisse. Des dépôts de marnes en mer profonde se sont accumulés sur la surface d'érosion antérieure au Miocène, suivis de dépôts de grès et de calcaires en mer peu profonde. Des plissements continus des sédiments ont également été observés.

Pendant le Quaternaire, au Pléistocène-Villafranchien, le niveau de la mer a continué à fluctuer, mais avec une tendance générale à la baisse jusqu'à atteindre environ -50 m. Pendant cette période, le bassin de la Mitidja s'est isolé de la mer en raison de la formation de l'anticlinal du Sahel. D'épaisses couches d'argiles et de limons, avec des couches minces de graviers, se sont déposées dans un environnement fluvio-lacustre. Une intense érosion a entraîné le creusement de cluses dans l'anticlinal du Sahel, avec l'oued El Harrach devenant un affluent de l'oued Mazafran.

Au cours des périodes suivantes, le Tensifien, le Soltanien, et le Rharbien, le niveau de la mer a continué à baisser progressivement, et le bassin a été remblayé par des sédiments continentaux, formant des colluvions et des alluvions caillouteuses. Des dépôts de limons et d'argiles se sont accumulés dans les lacs peu profonds, créant des marécages. Le drainage était médiocre, et les oueds ont contribué à remblayer les cluses avec des sédiments fins.

Finalement, dans la période récente et actuelle, le niveau de la mer est proche de zéro, et le bassin a été le lieu de dépôts de dunes sableuses et de sédiments marins autour de la baie d'Alger. Les oueds ont creusé leurs lits actuels, contribuant à la configuration géomorphologique actuelle de la région. La complexité de l'évolution géologique de la Mitidja a façonné son paysage et a joué un rôle essentiel dans la formation des différentes formations géologiques présentes dans la région.

Tableau 8 : Lithostratigraphie Synthétique de la Mitidja-est

Système		Etage	lithologie	Epaisseur
quaternaire	Holocène	Actuel		20m
	Pléistocène	Flandrien	Limon argile	30m
		Rharbien	Sables consolidés a lumachelles	30m
		Soltano-Tensifien	Alternance d'argile et de gravier (formation de la Mitidja)	150m
		Calabrien villafranchien	Argile et cailloutis (formation d'El herache) 2 ^{em} substratum	100m
Tertiaire	quaternaire	Astien	Calcaire gréseux marne jeune, sable	100m
		Plaisancien	Marne a argile 1 ^{er} substratum	200m
	Miocène	Vindobonien	Marne a lentilles de calcaire	50m
		Burdigalien	Marne a lentilles de grès	

4. Hydrogéologie :

La plaine de la Mitidja est caractérisée par la présence de plusieurs aquifères, qui sont des formations géologiques capables de stocker et de transmettre de l'eau souterraine. Différentes études géophysiques et hydrogéologiques ont été menées pour mieux comprendre la géologie de la région et les relations entre les différentes unités géologiques.

Le remplissage du bassin de la Mitidja se compose de quatre unités géologiques principales, disposées de bas en haut :

- Un substratum imperméable constitué de séries marneuses. Cette couche imperméable limite la recharge des aquifères sous-jacents.
- L'aquifère de l'Astien, formé par un ensemble calcaire-sableux et gréseux. Il est situé sous les marnes jaunes semi-perméables d'El Harrach, sauf dans la partie Est den Rouibaoù il est en contact direct avec l'aquifère quaternaire.
- La formation d'El Harrach, constituée principalement d'argiles avec des niveaux de sable et de gravier par endroits. Cette formation sépare l'aquifère de l'Astien de l'aquifère quaternaire, sauf dans la zone de la "poche de Rouiba".
- Les alluvions de la Mitidja, qui forment un ensemble gravelo-sableux et constituent la nappe libre de la plaine. Cette nappe est principalement alimentée par les précipitations, l'infiltration des oueds El Harrach et Hamiz, ainsi que par le drainage provenant de l'aquifère de l'Astien.

L'objectif principal des études hydrogéologiques est d'identifier et de décrire ces différentes unités géologiques (figure 15) qui ont une importance cruciale du point de vue des ressources en eau de la plaine de la Mitidja sous-jacent.

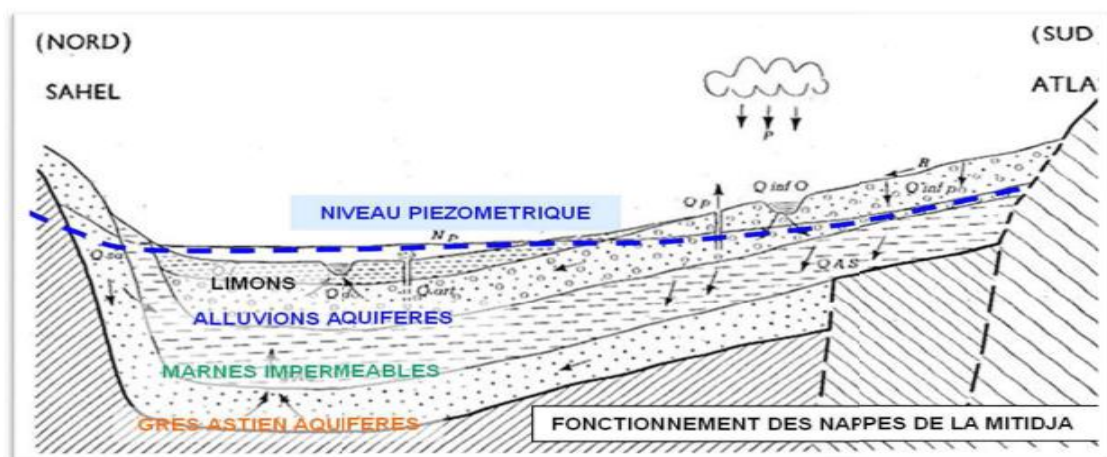


Figure 15 : fonctionnement des nappes de la Mitidja (M. EngalencGéohydraulique 1971)

4.1 Morphologie et structure des aquifères

4.1.1 Aquifère de l'Astien :

L'aquifère Astien s'étend sous la majeure partie du bassin alluvial et affleure principalement dans le Sahel. Il est situé entre un substratum marneux Plaisancien et la couverture épaisse de marnes jaunes d'El Harrach, à l'exception de la partie orientale de la Plaine où il est en contact direct avec l'aquifère alluvial.

4.1.2 Aquifère quaternaire :

L'aquifère quaternaire, aussi appelé aquifère de la Mitidja, repose sur les marnes jaunes, séparé de l'aquifère de l'Astien par cette couche imperméable, sauf à l'Est du Hamiz et Rouiba où il est en contact direct avec celui-ci. La nappe quaternaire s'étend sur l'ensemble du bassin de la Mitidja et se trouve dans des formations de graviers et de sables, plus ou moins consolidées et interstratifiées avec de l'argile. Cet aquifère est principalement alimenté par les précipitations, l'infiltration des oueds El Harrach et ses affluents Hamiz et Réghaïa, ainsi que par le drainage provenant de l'aquifère de l'Astien.

5. Piézométrie et hydrochimie :

La situation hydrogéologique de la baie d'Alger présente des paramètres distinctifs notables, accentués par deux limites naturelles clairement définies :

D'une part, une limite étanche au Sud-Ouest, s'étendant de Larbâa-Bougara à Larbâa-Meftah, exerce une influence significative en restreignant l'écoulement de la nappe souterraine.

D'autre part, une limite perméable au Sud-Est, située entre Meftah et Khemis El Khechna, se caractérise par un alignement marqué des courbes hydroisohypses, parallèles au contact géologique délimitant les alluvions de la Mitidja des formations calcaires du Djebel Zerouala.

La dynamique de l'eau dans la baie d'Alger, soumise à l'intrusion marine, a évolué au fil des années en raison de divers facteurs, notamment des projets d'irrigation et des conditions de sécheresse prévalant dans la région. Cette variation a engendré des changements substantiels dans la direction de l'écoulement souterrain, impactant directement les zones d'extraction d'eau comme Boueah et Hamiz .

Les cartes représentant le niveau de la nappe révèlent également une zone au Sud-Est, entre El Hamiz et Benzerga, où le niveau est relativement plus élevé. Cette élévation est attribuable à l'extraction intensive d'eau dans des champs tels que Bouriah et Hamiz.

L'analyse approfondie de la carte de 2015 a souligné des observations cruciales. Le niveau de l'eau décroît du Sud vers le Nord, indiquant un écoulement général en direction de la mer. Une zone où l'eau semble s'écouler en sens inverse, du Nord vers le Sud, a été identifiée près de Bordj El Kiffan, confirmant le phénomène d'intrusion marine. À l'Ouest, une zone de concentration d'eau a été observée à proximité des champs de captage de Haouchfelit, Baraki, Trois caves, Oued Adda et Stamboul.

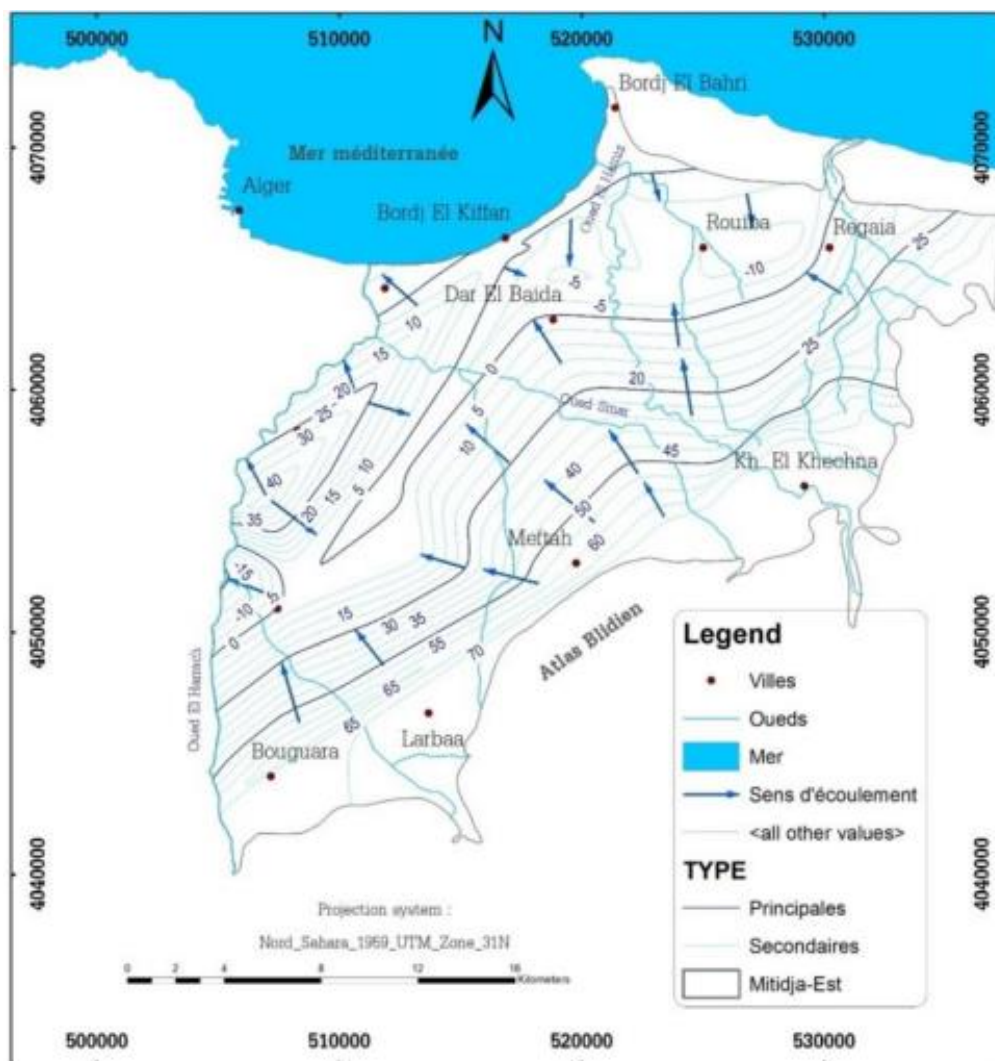


Figure 16 : Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja-Est, Compagne de Mai 2015(Zahouani ,2017).

Les résultats des analyses chimiques menées en 2016 par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) ont mis en lumière une prédominance du faciès chimique bicarbonaté calcique dans la baie d'Alger. Cette caractéristique résulte de la dissolution des terrains carbonatés de l'Atlas Blidéen, qui représente la zone de recharge de la nappe alluviale. L'identification de ce faciès chimique met en évidence l'influence directe de la géologie locale sur la composition de l'eau souterraine, soulignant ainsi la pertinence des caractéristiques géologiques dans la détermination des propriétés chimiques de la nappe.

Pour compléter cette analyse, la figure (17) offre une représentation graphique de la répartition géographique des points d'eau utilisés lors de la campagne hydrochimique menée par l'ANRH pendant la période de hautes eaux en 2016. Cette cartographie permet de visualiser la dispersion spatiale des points d'échantillonnage, offrant ainsi une perspective visuelle sur les zones spécifiques de prélèvement et leurs implications potentielles sur la

Tableau 9 : Concentrations des éléments chimiques dans la plaine de la Mitidja-Est (ANRH, 2016)

Pts d'eau	Mois	Ca2	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	CO 3	NO3	PH	CE (uc/cm)	Résidu sec	TH
W042-450	6	200	48	38	1	58	229	445	0	32	7.9	1519	979	70
W042-688	6	204	55	80	2	90	253	549	0	68	7.6	1871	1107	74
W021-893	6	238	37	176	10	324	40	634	0	24	7.5	2530	1557	75
W042-439	6	242	5	83	1	141	118	442	0	62	7.6	1805	1175	63
W042-1000	6	106	23	24	1	55	32	275	0	50	7.7	800	636	36
W042-1003	6	173	58	83	1	98	245	397	0	69	7.9	1740	1100	67
W042-1010	6	146	28	54	1	87	81	381	0	37	7.7	1422	825	48
W021-5	6	154	69	154	2	331	188	366	0	65	7.9	2330	1487	67
W021-192	6	77	118	102	1	249	176	275	0	95	7.8	1971	1464	68
W021-417	6	54	78	122	1	118	194	305	0	63	7.8	1682	1104	46
W021-894	6	65	111	160	3	283	234	305	0	65	7.8	2210	1382	63
W021-04212	10	7	11	75	7	54	0	183	0	0	8	530	302	6
W042-450	10	168	13	77	2	47	242	427	0	26	8.3	1275	881	47
W042-688	10	131	61	144	3	104	248	458	0	44	7.8	1580	1208	58
W021-893	10	223	23	228	13	302	166	534	0	27	8.1	2230	1485	65
W042-439	10	147	19	126	1	119	150	366	0	54	7.9	1472	849	45
W042-1000	10	107	24	38	1	39	145	214	0	45	7.8	824	590	37
W042-1003	10	137	13	133	2	113	213	336	0	78	7.8	1450	949	39
W021-04212	10	101	28	81	2	94	135	244	0	33	7.8	980	594	37
W021-5	10	223	38	130	3	297	206	259	0	79	8.2	1983	1140	72
W021-417	10	168	3	123	1	134	187	244	0	74	7.9	1312	831	43
W021-890	10	337	51	262	4	670	272	290	0	57	7.8	3245	1949	105

La conductivité électrique des eaux est un indicateur de la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Les valeurs de conductivité électrique varient entre 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 3245 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs élevées pourraient être associées aux zones de mélanges et aux zones potentiellement polluées. Elles peuvent également résulter du lessivage des terrains traversés. La circulation relativement lente des eaux dans l'encaissant favorise l'interaction chimique entre les eaux souterraines et les formations géologiques.

Le rapport $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--})$ est un indicateur crucial utilisé pour évaluer l'intrusion marine et la contamination potentielle des eaux souterraines par des sels évaporitiques. Son utilisation repose sur le principe que la présence accrue de chlorures par rapport aux bicarbonates et carbonates indique une possible contamination saline. Dans le contexte de notre étude, la confirmation de la contamination se produit lorsque ce rapport dépasse l'unité.

Dans notre cas spécifique, l'analyse de ce rapport révèle des résultats significatifs le long de la bande littorale, allant d'Est en Ouest. La détection d'un rapport supérieur à l'unité sur cette étendue confirme de manière explicite la progression des eaux salées sur une large bande, s'étendant de Stamboul (ex Bateau cassé) jusqu'à Bordj El Kiffan.

Ces conclusions proviennent d'une source fiable, l'article de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH 2016), et soulignent la présence avérée de l'intrusion marine dans la zone étudiée. Cette contamination, illustrée par le dépassement du seuil du rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{--})$, nécessite une attention particulière en matière de gestion des ressources en eau souterraine.

6. Conclusion :

La plaine de la Mitidja présente une structure en synclinal, remplie de sédiments alluvionnaires d'une épaisseur moyenne d'environ 200 mètres. Cet ensemble constitue la principale réserve d'eau souterraine de la région, exploitée principalement par pompage. La vocation agricole de cette plaine découle de la présence d'un sol d'une grande valeur agronomique. L'analyse piézométrique et hydrochimique a été essentielle pour identifier les principaux axes d'écoulement et la zone de décharge de l'aquifère quaternaire et l'avancement de l'intrusion marine.

CHAPITRE 4

LE MODELE CARTOGRAPHIQUE

GALDIT : ASPECT THEORIUE

CHAPITRE 4 : LE MODELE CARTOGRAPHIQUE GALDIT : ASPECT THEORIUE

1. Introduction :

L'analyse de la vulnérabilité d'un aquifère face à l'intrusion saline constitue un cas particulier, combinant à la fois la vulnérabilité spécifique et la vulnérabilité intrinsèque. En effet, outre les critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque, des critères spécifiques de salinisation doivent également être pris en compte. Ainsi, il s'agit d'une vulnérabilité spécifique liée à l'intrusion saline.

Dans le domaine des méthodes de cartographie à index pour évaluer la vulnérabilité des aquifères, la méthode GALDIT se distingue comme la seule méthode spécifiquement dédiée à l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers face à l'intrusion saline (Dorfliger et al., 2011). Cette approche unique offre une solution pertinente pour appréhender les enjeux liés à l'intrusion d'eau de mer dans les zones côtières et permet de cartographier les zones à risque de manière spécifique et adaptée.

En considérant ces éléments, la méthode GALDIT apparaît comme un outil crucial pour évaluer et comprendre les risques d'intrusion saline dans les aquifères côtiers. Son application permet de mieux appréhender la vulnérabilité de ces ressources en eau souterraine et de guider les prises de décisions en matière de gestion et de protection des ressources en eau dans les zones côtières. Ainsi, dans ce chapitre, nous présenterons en détail la méthode GALDIT et ses différents paramètres, afin de mieux comprendre son utilité et son application pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers face à l'intrusion saline

2. Présentation de la méthode de GALDIT :

La méthode GALDIT constitue une approche spécifique dédiée à la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers face au risque d'intrusion saline. Son développement initial a été réalisé par Chachadi et Lobo-Ferreira en 2001. Depuis, cette méthode a été mise en œuvre dans plusieurs régions côtières, notamment dans la région de Goa en Inde et d'Algarve au Portugal (Dorfliger N. et al., 2011).

Fondée sur six paramètres essentiels, la méthode GALDIT est structurée autour de l'acronyme "GALDIT", comprenant :

- G : type d'aquifère (**G**roundwater Occurrence) qui permet de distinguer les aquifères confinés des aquifères non confinés, en prenant en compte leur nature géologique.
- A : conductivité hydraulique de l'aquifère (**A**quiferHydraulicConductivity) représentant la perméabilité de la zone saturée, déterminant ainsi la capacité de l'aquifère à permettre l'écoulement de l'eau.
- L : hauteur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Height of the groundwater level above sea level) critère essentiel pour évaluer la position de la nappe par rapport au niveau marin.
- D : distance par rapport au rivage (**D**istance from the Shore) : jouant un rôle clé pour déterminer la proximité de l'aquifère par rapport à la mer.

- I : impact de l'intrusion saline présente dans la zone d'étude (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area) : permettant de quantifier l'étendue de l'intrusion d'eau de mer dans la région étudiée.
- T : épaisseur de la nappe phréatique (**T**hickness of the aquifer) : reflétant l'épaisseur de la zone saturée et influençant la capacité de stockage d'eau de l'aquifère.

Le principe fondamental de la méthode GALDIT repose sur trois éléments significatifs :

le poids (ou l'importance), le rang et la classe. Chaque paramètre GALDIT est évalué en tenant compte des autres paramètres, dans le but de déterminer leur rôle relatif dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères côtiers face à l'intrusion saline.

Le poids attribué à chaque paramètre varie de 1 à 4, les facteurs les plus importants étant valorisés avec un poids de 4, tandis que ceux ayant moins d'influence sur le processus d'intrusion saline reçoivent un poids de 1. Le rang, quant à lui, varie entre 2,5 et 10, et les valeurs élevées reflètent une forte vulnérabilité. Enfin, la classe montre la relation entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre, permettant ainsi d'affiner la cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers.

2.1 . Description des paramètres de la GALDIT :

2.1.1 Paramètre G (Type d'aquifère) :

Dans le contexte de la gestion des ressources en eau souterraine, l'étude de la vulnérabilité des aquifères côtiers face à l'intrusion saline est d'une importance capitale. Ces aquifères, situés dans des strates géologiques variées, peuvent être de nature confinée, non confinée ou semi-confinée par des limites géologiques. Chaque type d'aquifère présente des caractéristiques distinctes qui influencent leur sensibilité à l'intrusion d'eau de mer.

Parmi les différentes catégories d'aquifères, les aquifères non confinés se distinguent par l'absence d'une couche imperméable les recouvrant. Cette particularité les rend plus vulnérables par rapport aux aquifères confinés et semi-confinés, car ils sont directement exposés à la pression de l'eau de mer. Cependant, les aquifères non confinés ont également la capacité de libérer instantanément de l'eau dans les points de prélèvement lors du pompage. Ce phénomène entraîne la formation d'un cône de dépression autour du puits, favorisant ainsi le mouvement de l'eau de mer vers l'aquifère.

Dans ce contexte, il est primordial de mener une étude approfondie de la disposition et du type d'aquifère dans la zone d'étude afin de mieux évaluer le risque d'intrusion marine. L'un des paramètres essentiels de la méthode GALDIT, appelé "G" pour le type de l'aquifère, permet justement de classer les aquifères en fonction de leur nature géologique.

2.1.2 Paramètre A (La conductivité hydraulique de l'aquifère) :

La conductivité hydraulique de l'aquifère est un paramètre essentiel utilisé pour évaluer la facilité du matériau aquifère à permettre l'écoulement de l'eau. Elle représente le taux de courant d'eau dans la nappe aquifère et dépend de la communication des pores (porosité effective) dans les sédiments ou des fractures dans les roches consolidées. Ce paramètre joue

un rôle déterminant dans le mouvement de l'eau de mer vers l'intérieur des terres, car il influence la vitesse d'intrusion de l'eau salée.

Une conductivité hydraulique plus élevée indique une meilleure capacité de l'aquifère à transmettre l'eau, ce qui rendrait l'intrusion d'eau de mer plus significative. En cas de pompage intensif, une conductivité élevée entraînerait également un cône de dépression plus large autour du puits. Cependant, il est important de noter que certaines barrières hydrauliques, telles que des couches d'argile ou des digues imperméables parallèles à la côte, peuvent agir comme des obstacles à l'intrusion d'eau de mer vers la nappe.

2.1.3 Paramètre L (L'altitude de la nappe par rapport au niveau de la mer) :

Le paramètre L de la méthode GALDIT est défini comme l'altitude de la nappe par rapport au niveau de la mer. Cette caractéristique joue un rôle crucial dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion saline. En effet, l'altitude de la nappe permet de déterminer si celle-ci se trouve au-dessus ou en dessous du niveau moyen de la mer dans la zone d'étude.

Lorsque la nappe est située au-dessus du niveau de la mer, elle est considérée comme non affectée par l'intrusion marine. En revanche, si la nappe est en dessous du niveau de la mer, elle devient vulnérable à l'intrusion d'eau de mer. Ainsi, le paramètre L permet de cartographier les zones où la nappe phréatique présente des altitudes propices à l'intrusion saline, identifiant ainsi les zones potentiellement vulnérables.

La connaissance de l'altitude de la nappe par rapport au niveau de la mer est essentielle pour comprendre la dynamique de l'intrusion saline.

2.1.4 Paramètre D (La distance par rapport au rivage) :

L'impact de l'intrusion d'eau de mer diminue généralement à mesure que l'on s'éloigne du rivage vers l'intérieur des terres de manière perpendiculaire. Dans le cadre de la méthode GALDIT, ce paramètre est évalué en fonction de trois distances : 500 m, 750 m et 1000 m, mesurées perpendiculairement à la ligne de côte et aux cours d'eau.

Pour cette évaluation, une échelle de notation allant de 2.5 à 10 est utilisée. Les valeurs maximales (10) sont attribuées aux points situés à moins de 500 m du rivage, indiquant une forte vulnérabilité à l'intrusion saline. En revanche, les valeurs minimales (2.5) sont assignées aux points situés à plus de 1000 m du rivage, suggérant une moindre susceptibilité à l'intrusion marine dans ces zones plus éloignées.

Entre ces distances, les valeurs intermédiaires de 7.5 et 5 sont attribuées respectivement aux zones situées à une distance de 500 à 750 m et de 750 à 1000 m du rivage. Cela indique un degré de vulnérabilité modéré à l'intrusion saline pour ces zones.

La prise en compte de ce paramètre permet de mieux appréhender l'influence de la distance par rapport au rivage sur le risque d'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers.

2.1.5 Paramètre I (L'impact de l'intrusion saline présente dans la zone) :

La détermination de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion d'eau de mer requiert une approche méthodologique spécifique. À cet égard, Chachadi et Labo-Ferreira (2001) ont proposé une méthode qui s'appuie sur l'analyse du rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^-)$ en conjonction avec d'autres paramètres pertinents tel que le rapport chlorures/conductivité électrique ou le delta ionique. L'objectif principal de cette approche est de fournir une évaluation approfondie de la vulnérabilité des aquifères côtiers, permettant ainsi une gestion durable et éclairée des ressources en eau souterraine dans les régions côtières.

Le rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^-)$ est déterminé à partir des données d'analyse chimique de l'eau souterraine, où des concentrations élevées de chlorure (Cl^-) témoignent d'une intrusion significative d'eau de mer, tandis que des valeurs plus faibles suggèrent une intrusion marine moins prononcée. Ce rapport se révèle être un indicateur crucial pour quantifier l'ampleur de l'intrusion saline dans les nappes aquifères côtiers.

Le rapport de la concentration en chlorure et la conductivité électrique (Cl^-/Ce) indique une intrusion marine si ce, une valeur positive de ΔC indique la possible d'existence d'une intrusion marine. Dernier dépasse la valeur limite de 0,307.

Le delta ionique (ΔC) repose sur la comparaison entre la concentration de l'eau de mer et celle de l'eau souterraine de la nappe étudiée. Dans l'application, on utilise la composition chimique standard de l'eau de mer (tableau 10). En effet, une valeur positive de ΔC indique le possible d'existence d'une intrusion marine.

Tableau 10 : Composition chimique standard de l'eau de mer (Rodier, 2009).

Élément Chimique	Concentrations en g/l	Concentrations en mg/l
Calcium	0,418	418
Magnésium	1,330	1330
Sodium	11,035	11035
Potassium	0,397	397
Chlorures	19,841	19841
Sulfates	2,769	2769
Bicarbonates	0,146	146

2.1.6 Paramètre T (L'épaisseur de la nappe phréatique ou l'épaisseur saturée d'un aquifère) :

Le paramètre T, représentant l'épaisseur de la nappe phréatique ou l'épaisseur saturée d'un aquifère, joue un rôle crucial dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion d'eau de mer. L'épaisseur de la nappe aquifère est un indicateur essentiel de sa

capacité de stockage d'eau et de la distance verticale sur laquelle l'eau douce peut être soutenue au-dessus de la ligne de contact avec l'eau de mer. Plus cette épaisseur est grande, plus l'aquifère a la capacité de stocker une quantité considérable d'eau douce.

Une nappe d'eau épaisse peut fournir une barrière protectrice contre l'intrusion d'eau de mer en maintenant une distance suffisante entre la surface de l'eau douce et la zone d'infiltration d'eau de mer. En revanche, une nappe d'eau mince ou peu profonde peut faciliter l'intrusion d'eau de mer, car la zone d'interface entre l'eau douce et l'eau salée peut être plus proche de la surface, augmentant ainsi le risque de contamination saline.

Les équations suivantes permettent de déterminer la longueur de l'extension d'un biseau salé pour un aquifère captif ou libre : (Chachadi et al, 2005)

➤ **Aquifère libre** : $L = (K * B^2) / (2 * q * \delta)$ (1) (pour $L > B$)

Avec :

- K : conductivité hydraulique de l'aquifère.
- B : épaisseur de la zone saturée de l'aquifère.
- $\delta = (\rho \text{ eau douce} / \rho \text{ eau de mer} - \rho \text{ eau douce}) = 4$ (où ρ eau représente la densité de l'eau).

➤ **Aquifère captif** : $q = [(K * B^2) / (2 * L) * (1 + \delta) / \delta^2] - W * L / 2$ (2)

Si $W = 0$, alors :

➤ $q = [(K * B^2) / (2 * L) * (1 + \delta) / \delta^2]$

Et la longueur d'extension (L) est donnée par :

➤ $L = (K * B^2) / (q^2) * 0.0257$.

Avec :

- W : recharge naturelle de l'aquifère.

Il est important de noter que, en considérant des valeurs identiques de K (conductivité hydraulique) et B (épaisseur de la zone saturée) dans les deux équations, les longueurs calculées sont pratiquement identiques. Ces équations sont essentielles pour évaluer la propagation du biseau salé dans l'aquifère en fonction de ses caractéristiques spécifiques et de la recharge naturelle. Lorsque la recharge est nulle, l'intrusion d'eau de mer devient prédominante.

2.2 Méthodologie d'application :

Le principe d'attribution de la classe de vulnérabilité dans la méthode GALDIT repose sur trois composantes principales :

2.2.1 Pondération :

Chaque paramètre GALDIT se voit attribuer un poids qui reflète son importance relative dans le contexte de l'intrusion d'eau de mer. Ces poids varient de « 1 » pour une influence

faible à « 4 » pour une influence significative. Les poids permettent de mettre en évidence les paramètres les plus critiques dans l'évaluation de la vulnérabilité.

2.2.2 Notation (ou rang) :

Un rang est attribué à chaque paramètre en fonction de la valeur qu'il prend. Les valeurs de rang vont de 1 à 10, où une valeur plus élevée indique une vulnérabilité plus grande. Cette notation permet de quantifier la vulnérabilité de chaque paramètre individuellement.

2.2.3 Classification :

L'indice GALDIT, qui est utilisé pour déterminer la classe de vulnérabilité, est calculé comme une somme pondérée des notes de rang attribuées aux six paramètres. La formule utilisée pour le calcul de l'indice GALDIT est la suivante (Dorfliger et al., 2011) :

$$\text{Indice GALDIT} = (G * P_g) + (A * P_a) + (L * P_l) + (D * P_d) + (I * P_i) + (T * P_t)$$

Où :

- G, A, L, D, I, T : Les notes de rang attribuées respectivement aux paramètres G, A, L, D, I et T.
- P_g, P_a, P_l, P_d, P_i, P_t : Les poids attribués respectivement aux paramètres G, A, L, D, I et T.

Le résultat de l'indice GALDIT permet de classer chaque point d'étude en fonction de sa vulnérabilité à l'intrusion saline, allant du faible à élevé. Cette classification est essentielle pour une prise de décision éclairée concernant la protection des aquifères côtiers

Tableau 11 : Poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi et al, 2005)

Paramètre	Poids	Rangs			
		Très faible	Faible	Moyen	Elevé
		2.5	5	7.5	10
Type d'aquifère	1	Barrière imperméable	Semi captif	Libre	Captif
Conductivité hydraulique (m/j)	3	<5	05 - 10	10 - 40	>40
Altitude du plan d'eau (m)	4	>2	1.5 - 2	1 - 1.5	<1
Distance par rapport à la côte (m)	4	>1000	750 - 1000	500 - 750	<500
L'impact de l'état de l'intrusion saline	1	<1	1 - 1.5	1.5 - 2	>2
Epaisseur de la nappe	2	<5	5 - 7.5	7.5 - 10	>10

2.3 Classes de vulnérabilité relatives à l'index GALDIT

L'échelle des risques dans la méthode GALDIT est établie en fonction de l'indice GALDIT calculé pour chaque point d'étude. Cet indice reflète la vulnérabilité de l'aquifère à l'intrusion d'eau de mer, en prenant en compte les six paramètres GALDIT (G, A, L, D, I, T) et leurs poids respectifs (Pg, Pa, Pl, Pd, Pi, Pt).

L'échelle des risques est généralement divisée en plusieurs classes qui correspondent à différents niveaux de vulnérabilité

L'attribution des classes se fait en fonction des plages de valeurs de l'indice GALDIT. Par exemple :

- Indice GALDIT < seuil inférieur de la classe "Très Faible" : Très Faible
- Seuil inférieur de la classe "Très Faible" \leq Indice GALDIT < seuil inférieur de la classe "Faible" : Faible
- Seuil inférieur de la classe "Faible" \leq Indice GALDIT < seuil inférieur de la classe "Modéré" : Modéré
- Seuil inférieur de la classe "Modéré" \leq Indice GALDIT < seuil inférieur de la classe "Élevé" : Élevé
- Seuil inférieur de la classe "Élevé" \leq Indice GALDIT < seuil inférieur de la classe "Très Élevé" : Très Élevé
- Indice GALDIT \geq seuil inférieur de la classe "Très Élevé" : Très Élevé

Ces seuils sont définis en fonction du contexte spécifique de l'étude et peuvent varier en fonction des conditions locales et des objectifs de gestion. L'échelle des risques ainsi définie permet de communiquer efficacement la vulnérabilité de chaque point d'étude aux parties prenantes et de prendre des mesures adaptées pour la protection et la gestion durable des aquifères côtiers.

Tableau 12 : Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005)

Classe de vulnérabilité	Indice de GALDIT
Vulnérabilité forte	>7.5
Vulnérabilité moyenne	7.5-5.5
Vulnérabilité faible	2.5 - 5.5
Vulnérabilité très faible	< 2.5

3. Conclusion

En résumé, le chapitre consacré à la méthodologie revêt une importance cruciale dans le cadre de notre étude. Il sert de fondement méthodologique à l'exploration du phénomène de l'intrusion d'eau salée dans la baie d'Alger à l'aide du modèle GALDIT. Au sein de ce chapitre, nous avons minutieusement exposé et détaillé les six paramètres fondamentaux du modèle GALDIT. Nous avons également décrit en profondeur la manière dont ces paramètres seront appliqués, en incorporant les processus de pondération, de notation, et de classification. Ces éléments méthodologiques s'avèrent essentiels pour la suite de notre recherche, car ils orienteront notre analyse de l'intrusion d'eau salée dans la région. Les résultats obtenus grâce à cette méthodologie seront rigoureusement examinés et interprétés dans le chapitre subséquent

CHAPITRE 5

LE MODELE CARTOGRAPHIQUE
GALDIT : APPLICATION LA BAIE
D'ALGER

CHAPITRE V : LE MODELE CARTOGRAPHIQUE GALDIT : APPLICATION LA BAIE D'ALGER

1. Introduction

Dans ce chapitre, la modélisation cartographique est appliquée à la zone d'étude en s'appuyant sur la méthode GALDIT. Cette approche permet de déterminer la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja-est au phénomène de l'intrusion marine.

2. L'application de la méthode de GALDIT

2.1 Paramètre 1 : le type d'aquifère (G)

Les formations géologiques qui composent un aquifère peuvent être classées en tant qu'aquifères confinés, non confinés ou semi-confinés. Dans le cas de la baie d'Alger, l'aquifère est considéré libre. Dans ce contexte, le paramètre (G) de l'indice GALDIT est estimé à 7,5. Il est constant sur toute la zone d'étude (figure 18).

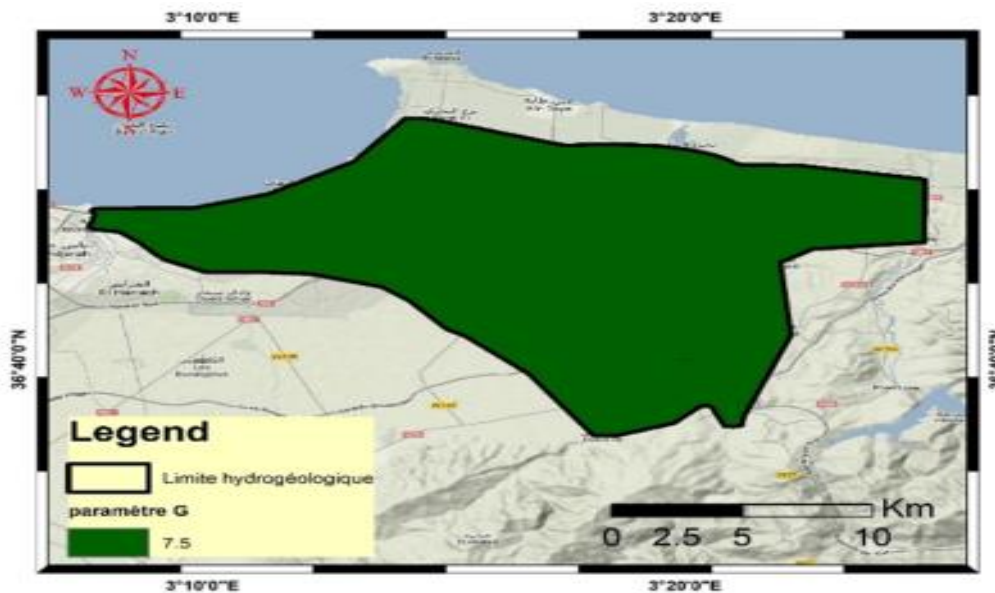


Figure 18 : Représentation du paramètre G de la Mitidja-est

2.2 Paramètre 2 : la conductivité hydraulique de l'aquifère (A)

Ce paramètre est employé pour évaluer la vitesse du flux d'eau à l'intérieur de la nappe aquifère. La conductivité hydraulique affecte la direction du mouvement de l'eau de mer vers les terres : une conductivité plus élevée entraînerait une intrusion plus notable de l'eau de mer

On a obtenu quatre classes selon la classification GALDIT (figure 19) :

Classe1 : La conductivité hydraulique de l'aquifère inférieur a 5 m/j avec un rang égal à 2.5 ce qui correspond à la classe très faible

Classe 2 : La conductivité hydraulique de l'aquifère varie entre (5-10 m/j) avec un rang égal à 5

Classe 3 : La conductivité hydraulique de l'aquifère varie entre (10-40 m/j) avec un rang variant entre (7.5-5.5)

Classe 4 : La conductivité hydraulique de l'aquifère est >40 avec un rang >7.5

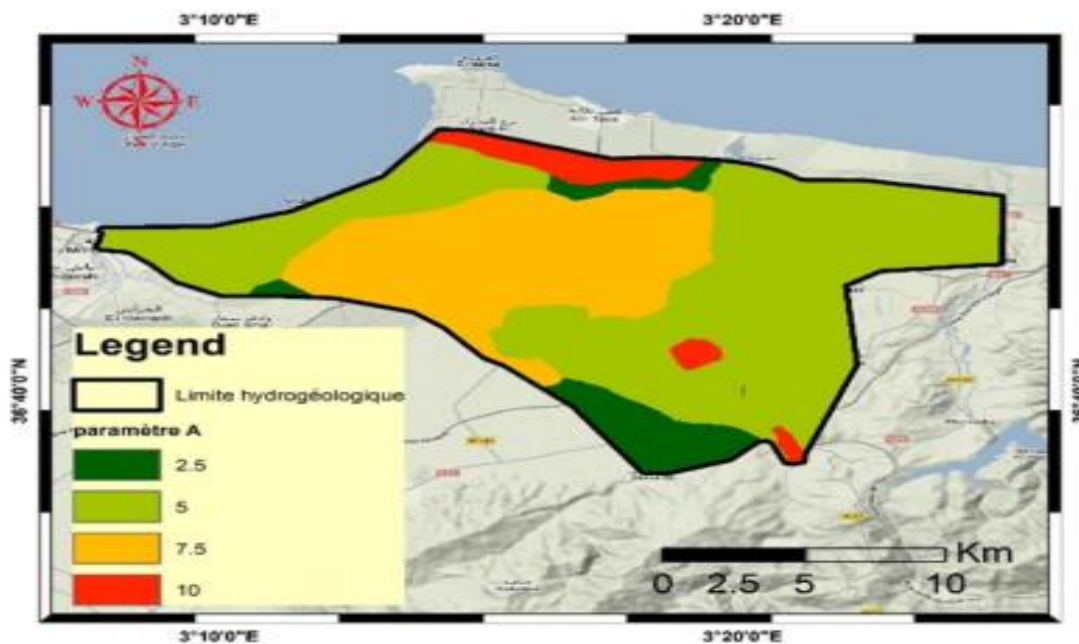


Figure 19 : Représentation du paramètre A de la Mitidja est

2.3 Paramètre 3 : altitude de la nappe(L)

Lorsqu'il s'agit d'estimer le paramètre (L), il est essentiel de prendre en compte la variation temporelle à long terme des niveaux de la nappe dans la région. En général, les valeurs les plus significatives sont celles qui concernent les niveaux d'eau les plus bas, situés en dessous du niveau de la mer, car ils indiquent la plus grande vulnérabilité potentielle à l'intrusion de l'eau de mer. Les catégories de notation (L) sont les suivantes : 10 pour les niveaux inférieurs à 1 mètre, 7,5 pour les niveaux de 1 à 1,5 mètres, 5 pour les niveaux de 1,5 à 2 mètres, et 2,5 pour les niveaux supérieurs à 2 mètres. L'application de cette classification a donné la répartition spatiale du paramètre L montré dans la figure 20.

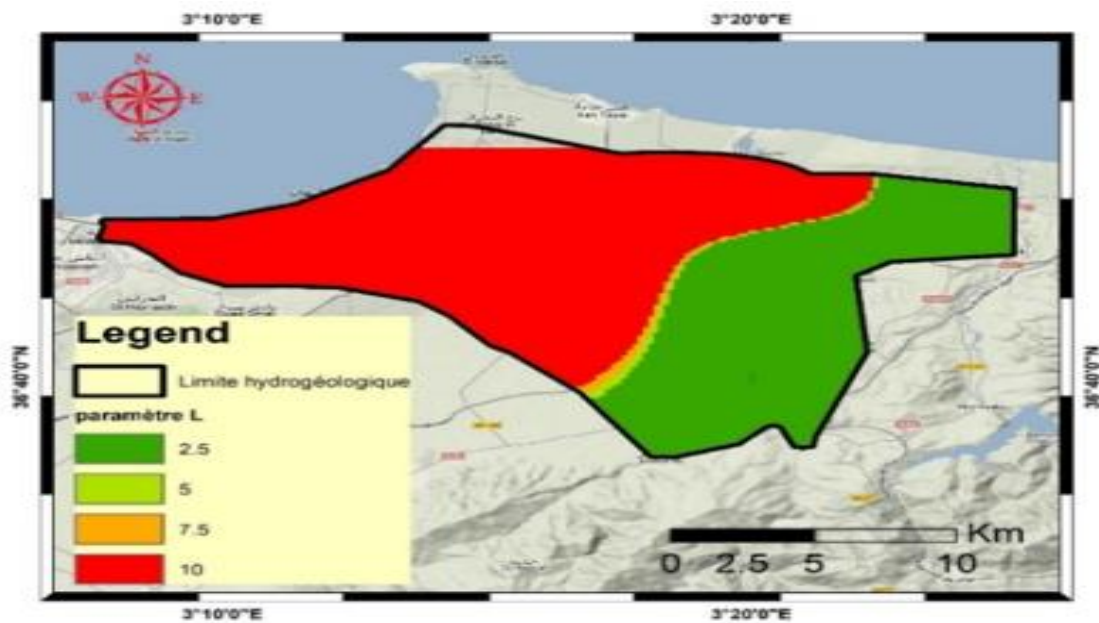


Figure 20 : Représentation du paramètre L de la Mitidja est

2.4 Paramètre 4 : distance de la côte (D)

On a obtenu quatre classes selon la classification GALDIT (figure 21) :

Classe 1 : La distance du point d'eau de la nappe est inférieure à 500 m avec un rang égal à 2.5. Elle occupe une bande littorale s'étendant dans une direction WSW-ENE, ce qui correspond à la classe de vulnérabilité très faible.

Classe 2 : La distance du point d'eau de la nappe varie entre 500 et 750 m avec un rang égal à 5. Elle correspond à la classe de vulnérabilité faible.

Classe 3 : La distance du point d'eau de la nappe varie entre 750 et 1000 m avec un rang égal à 7.5. Elle correspond à la classe de vulnérabilité moyenne.

Classe 4 : La distance du point d'eau de la nappe est supérieure à 1000 m avec un rang égal à 10. Elle la majeure partie de l'aquifère surtout la partie sud ce qui correspond à la classe de vulnérabilité Elevée.

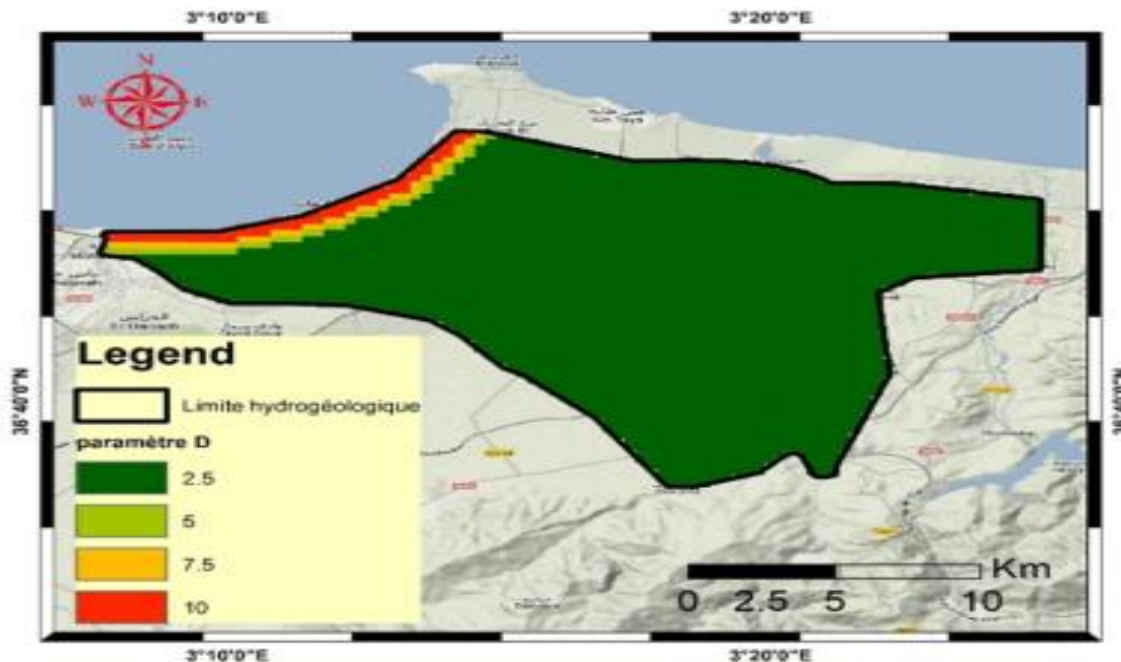


Figure 21 : Représentation du paramètre D de la Mitidja Est

2.5 Paramètre 5 :l'impact de l'intrusion saline (I)

On a obtenu les classes suivantes :

Classe 1 : Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont inférieurs à 1 avec un rang égal à 2.5.

Classe 2 : Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont varient entre 1 et 1.5 avec un rang égal à 5.

Classe 3 : Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont varient entre 1.5 et 2 avec un rang égal à 7.5.

Classe 4 : Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont varient entre 2 et 2.5 avec un rang égal à 10.

La répartition spatiale de ces classes est présentée dans la (figure 22).

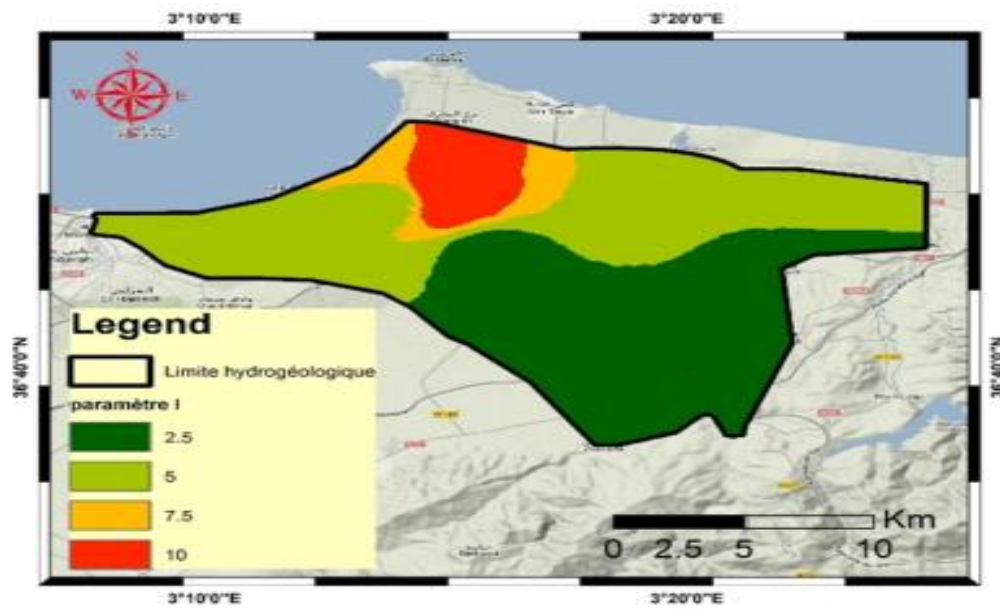


Figure 22 : Représentation du paramètre D de la Mitidja Est

2.6 Paramètre 6 : L'épaisseur de la nappe (T)

L'épaisseur saturée de l'aquifère est uniformément supérieure à 10 mètres, avec un rang de 10 pour l'ensemble de l'aquifère, à l'exception de quelques zones minoritaires (figure 23).

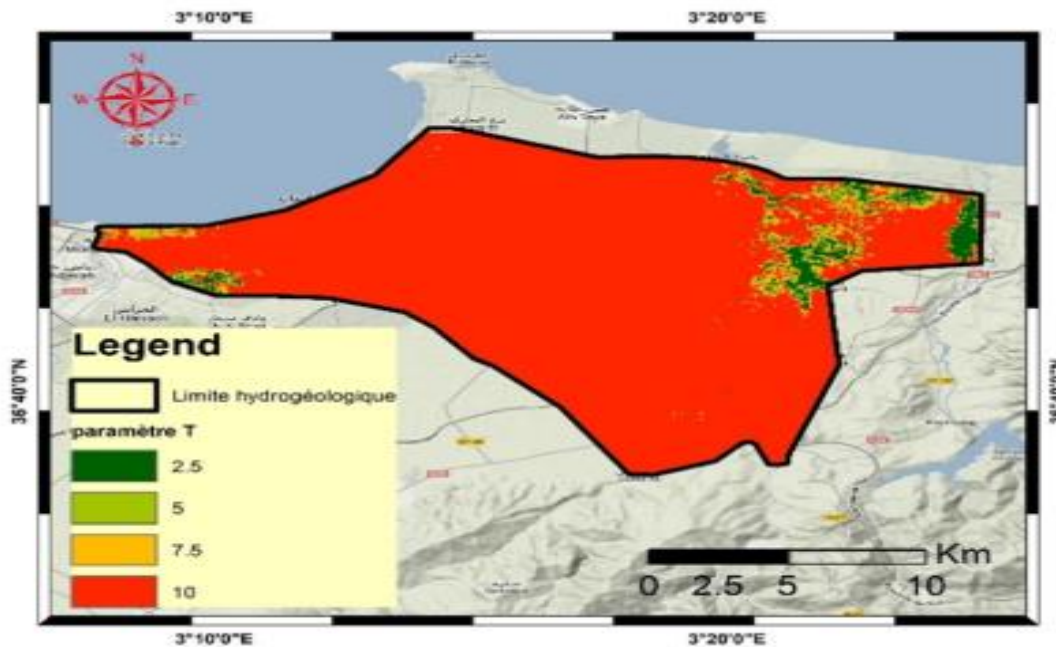


Figure 23 : Représentation du paramètre T de la Mitidja Est

2.7 Carte finale d'indice 'Indice GALDIT ' de vulnérabilité à la pollution

Pour établir la carte de l'indice GALDIT, on applique la formule suivante (Dorfliger et al. 2011) :

Indice GALDIT = (G * Pg) + (A * Pa) + (L * Pl) + (D * Pd) + (I * Pi) + (T * Pt). La spatialisation des valeurs d'indice GALDIT a permis de tracer la carte finale (figure 24).

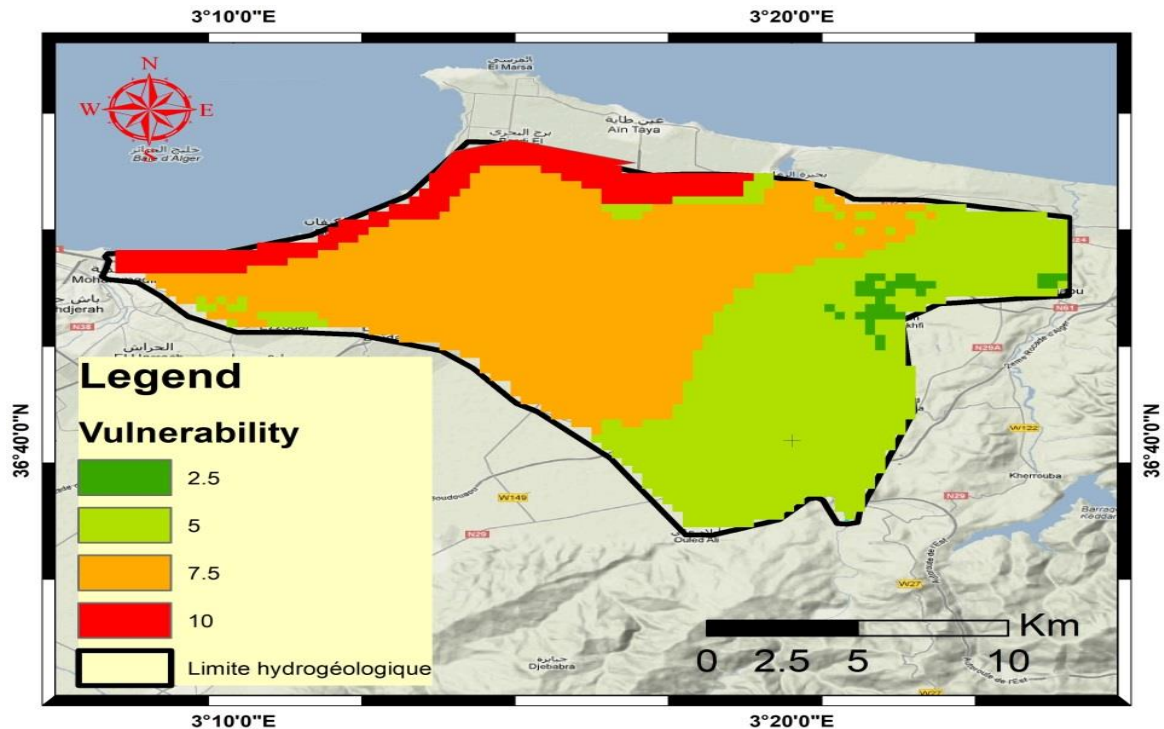


Figure 24 : Carte Vulnérabilité GALDIT de la Mitidja Est

La carte générée pour cette zone d'étude met en évidence une forte vulnérabilité dans les zones les plus proches de la côte, caractérisées par un indice GALDIT supérieur à 7,5. De plus, les zones entourant les champs de captage d'El Hamiz et de Rouiba présentent également une vulnérabilité moyenne.

À mesure que l'on s'éloigne de la côte, on observe une diminution de la vulnérabilité. Celle-ci passe d'un niveau fort (entre 5 et 7,5) à un niveau faible (entre 2,5 et 5), pour finalement atteindre un niveau très faible (moins de 2,5).

3. Conclusion

Afin de créer la carte de vulnérabilité de l'indice global GALDIT dans notre zone d'étude, qui se base sur les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques du système aquifère, nous avons réalisé une analyse minutieuse de chaque variable (G, A, L, D, I et T) couvrant l'ensemble de la zone. En superposant les différentes couches des paramètres spécifiés pour notre aquifère, et en effectuant le calcul de l'indice de vulnérabilité GALDIT, nous avons été en mesure de classer les zones en quatre catégories de vulnérabilité distinctes : forte,

moyenne, faible et très faible. Ce classement est déterminé en fonction de la valeur de l'indice GALDIT (IG), ce qui nous permet d'identifier les zones potentiellement exposées à une intrusion marine.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire offre une analyse complète de la problématique de l'intrusion marine dans la baie d'Alger, en mettant en évidence son importance en termes de gestion des ressources en eau souterraine. Les principales conclusions qui émergent de ce travail sont les suivantes :

L'exploitation anarchique des nappes côtières est à l'origine d'une baisse significative du niveau de la nappe, ce qui favorise l'intrusion marine. Ce phénomène a un impact majeur sur la santé humaine, l'agriculture et l'environnement.

La région de la baie d'Alger est particulièrement vulnérable à l'intrusion marine en raison de son climat méditerranéen, de ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques, ainsi que de la surexploitation des ressources en eau souterraine.

L'étude géologique a permis de caractériser deux nappes principales : la nappe de l'Astien et la nappe du Quaternaire. La surexploitation des nappes a entraîné un changement de direction de l'écoulement, favorisant l'intrusion marine.

La vulnérabilité des nappes à la pollution par l'eau de mer a été évaluée à l'aide du modèle GALDIT. La carte de vulnérabilité montre que la zone côtière est particulièrement vulnérable, tandis que l'intérieur de la plaine de la Mitidja Est affiche une vulnérabilité plus faible.

En conclusion, ce mémoire met en lumière l'importance de gérer de manière durable les ressources en eau souterraine dans la région de la baie d'Alger. Il souligne la nécessité de mettre en œuvre des mesures de protection adaptées pour prévenir la dégradation de la qualité des eaux souterraines et atténuer les effets de l'intrusion marine. Ce travail fournit également une méthodologie précieuse pour évaluer la vulnérabilité des nappes côtières à l'intrusion marine, ce qui peut être appliqué à d'autres régions confrontées à des problèmes similaires.

Recommandations

À la lumière des conclusions tirées de cette étude sur la vulnérabilité des nappes aquifères côtières à la pollution par intrusion saline dans la baie d'Alger, nous formulons les recommandations suivantes :

Renforcement de la surveillance hydrogéologique : Il est essentiel de maintenir et d'améliorer les réseaux de surveillance des niveaux d'eau souterraine, de qualité de l'eau, et d'intrusion marine dans la région de la baie d'Alger. Cela permettra une détection précoce des changements et une réponse rapide aux problèmes émergents.

Gestion intégrée des ressources en eau : Les gestionnaires des ressources en eau doivent adopter une approche intégrée pour gérer les eaux souterraines de manière durable. Cela implique une coordination entre les différentes parties prenantes, y compris les autorités locales, les chercheurs, et la société civile.

Sensibilisation du public : Les populations locales doivent être informées des enjeux liés à la qualité de l'eau souterraine et à la vulnérabilité des aquifères côtiers. Des campagnes de sensibilisation peuvent contribuer à réduire les activités humaines préjudiciables.

Recherche continue : Les efforts de recherche sur la vulnérabilité des aquifères côtiers devraient se poursuivre, notamment en utilisant des outils tels que le modèle GALDIT. Cela permettra une meilleure compréhension des mécanismes de salinisation et des impacts potentiels du changement climatique.

Gestion adaptative : Les politiques de gestion de l'eau devraient être flexibles et adaptatives pour faire face aux défis émergents. Cela pourrait inclure des ajustements dans la gestion des prélèvements d'eau et des barrières contre l'intrusion marine en fonction des conditions changeantes.

En mettant en œuvre ces recommandations, la région de la baie d'Alger peut améliorer la résilience de son aquifère côtier face à la pollution par intrusion saline, garantissant ainsi la disponibilité continue d'une ressource d'eau douce vitale pour les générations futures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adrian G. Luliana G. B. Saliha N. Mehdi K. (2012):** Application de la méthode GALDIT pour la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines : aquifère de la côte de Chaouia (Maroc)
- Arbaoui A. (2019) :** Approche géostatistique de la validation chimique de trois modèles d'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines, application à la Mitidja orientale.
- Berdja, F. (2001) :** Note préliminaire sur l'invasion marine au niveau de la baie d'Alger, ANRH (Alger).
- Bennie& Partners, (1983) :** Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger.
- Benziada, M. (1994) :** Etude hydrogéologique et hydrologique de la plaine de la Mitidja Est: Application d'un modèle mathématique « ASM » au bassin côtier algérois .Algérie.Thèse doctorat en science de la terre. USTHB
- Belaidi M, Rabehaoui H, Sadat M, (2006) :** Etat du réseau de surveillance des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja. Note Technique ANRH/ DRC Soumaa Décembre 2006
- Chachadi, A.G. and Lobo-Ferreira, J.P (2001):** Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion d'eau de mer des aquifères à l'aide de la méthode GALDIT. Actes de l'atelier sur la modélisation.
- Djoudar /Hallal Dabha. (1993) :** Etat actuel de l'invasion marine dans la baie d'Alger
- Makhlouf.BEHIRI nouara, (2010) :** Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de La baie d'Alger et son impact sur L'AEP (champs de captage du HAMIZ) et l'industrie (cham de Rouiba)
- MacDonald and Partners (1992) :** Classification du potentiel aquifère des grandes formations de Mitidja.
- Gueblalydia, (2022) :** Etude de l'intrusion marine par les profils de conductivité (Cas la Baie d'Alger)
- Sidi Moussa Mohamed Fouzi. (2006) :** Le phénomène d'intrusion marine de la nappe de la Mitidja dans la baie d'Alger (ANRH)
- Walid Rabehi, Mokhtar Guerfi and Habib Mahi, (2018) :** “Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger”
- Yahiaoui A, 2006 :** Etude de l'impact de l'intrusion marine par cartographie assistée par le SIG, de la baie d'Alger. Mémoire d'ingénieur, ENSH
- Zahouani, S. (2017) :** « Application du modèle GALDIT à l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (Cas de la nappe alluviale de la Mitidja-Est)