

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université SAAD DAHLAB-BLIDA Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



## MEMOIRE DE MASTER

Filière : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

**Thème :**

**Application de la méthode GALDIT combinée avec  
la géostatistique, Cas de la Mitidja EST**

Présenté par

**CHOUAT Hamza**

Devant le jury composé de :

M GUENDOZ A.

M<sup>me</sup> BENZINEB.

M KHELFI M.

Président

Examinatrice

Promoteur

Promotion 2023/2024

## **Remerciement**

*Je tiens remercier ALLAH tous puissant qui m'a donné la force pour achever cet objectif.*

*mon promoteur monsieur KHELFI Mohamed el-Amine pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ces précieux conseils et sa disponibilité et surtout pour son soutien tout le long de ce travail.*

*Je tiens à dresser mes vifs remerciements au membre de jury qui ont Accepté d'examiner mon travail de projet fin d'étude.*

*Enfin je remercier tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*Mes chers sœurs et frères, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*

*Mon ami (frère) HERNOUNE Zakaria qui m'a inspiré et soutenu tout au long de mon parcours universitaire. Votre amitié et votre confiance en moi ont été des forces motrices pour moi.*

*Mes deux frères ANDRIEU, Tarek et Nabil.*

*« Mes frères savent bien qu'ils oublierai pas, La mif sait bien : sans elle j'm'en irai pas »*

**QUE LA FAMILLE.**

*Hamza .*

## Résumé

Les régions côtières sont parmi les plus productives économiquement et les plus peuplées au monde, cela exerce une demande importante sur les ressources en eau, l'exploitation intensive des eaux souterraines dans les zones côtières avec les conditions climatiques non favorables à la recharge des nappes peut entraîner une intrusion marine, menaçant ainsi la qualité de ces eaux, C'est le cas de la nappe alluviale de la Mitidja EST. Dans ce contexte, cette étude a été réalisée afin d'évaluer la vulnérabilité à la pollution par la méthode GALDIT, basée sur des SIG conjugué avec l'approche géostatistique. La méthode GALDIT a permis de cartographier la zone de vulnérabilité moyenne occupe que (3.24 %) de la surface globale de la Mitidja Orientale représentée dans trois parties, la frange littorale (extension maximale de l'intrusion saline est d'environ 1,5 km à l'intérieur), aux rives de L'Oued el Harrach, et la partie nord-Est de Bordj El Bahri jusqu'à Reghaia (extension de l'intrusion saline est de l'ordre 310m à l'intérieur), et le reste de la plaine étant caractérisé par une vulnérabilité faible.

**Mots clé :** régions côtières, Mitidja EST, vulnérabilité, SIG, géostatistique, GALDIT, eaux souterraines.

## ملخص

تعد المناطق الساحلية من بين المناطق الأكثر إنتاجاً من الناحية الاقتصادية والأكثر كثافة سكانية في العالم، وهذا يضع طلباً كبيراً على الموارد المائية. ويمكن أن يؤدي الاستغلال المكثف للمياه الجوفية في المناطق الساحلية، إلى جانب الظروف المناخية غير المواتية لإعادة تغذية المياه الجوفية، إلى تسرب المياه البحرية، مما يهدد جودة هذه المياه، هذا هو الحال بالنسبة للمياه الجوفية في منطقة متيجة الشرقية، وفي هذا السياق، أجريت هذه الدراسة لتقييم قابلية التأثر بالتلوث باستخدام طريقة فالديت استناداً إلى نظم المعلومات الجغرافية مقترنة بنهج الإحصاء الجغرافي. وقد مكنت طريقة من رسم خريطة لمنطقة متوسطة قابلية التأثر التي تشغل فقط (3.24%) من المساحة الإجمالية للسهل الشرقي للمتيجة ممثلة في ثلاثة أجزاء، الحافة الساحلية (أقصى امتداد للتسرب البحري حوالي 1.5 كم إلى الداخل)، وضاف وادي الحراش، والجزء الشمالي الشرقي من برج البحري إلى الرغاية (امتداد التسرب الملحي حوالي 310 متر إلى الداخل) وباقي السهل يتميز بانخفاض قابلية التأثر.

**الكلمات المفتاحية:** مناطق الساحلية، متيجة الشرقية، فالديت، قابلية التأثر، نظام المعلومات الجغرافية، الإحصاء الجغرافي، المياه الجوفية.

## **Abstract**

Coastal regions are among the most economically productive and densely populated in the world, and this places considerable demand on water resources. Intensive groundwater exploitation in coastal areas, combined with climatic conditions that are not conducive to groundwater recharge, can lead to marine intrusion, threatening the quality of these waters, as in the case of the alluvial groundwater of the eastern Mitidja. In this context, this study was carried out to assess vulnerability to pollution using the GALDIT method, based on GIS combined with a geostatistical approach. The GALDIT method made it possible to map the area of average vulnerability occupying only (3.24 %) of the overall surface area of the Eastern Mitidja, represented in three parts: the coastal fringe (maximum extent of saline intrusion is around 1.5 km inland), the banks of the Oued el Harrach, and the north-eastern part from Bordj El Bahri to Reghaia (extent of saline intrusion is around 310 m inland), while the rest of the plain is characterised by low vulnerability.

**Keywords:** Coastal regions, the eastern Mitidja, vulnerability, GIS, GALDIT, geostatistical, groundwater,

---

## Table des matières

Résumé

ملخص

Abstract

Table des matières

Liste des Figure

Liste de tableaux

Introduction générale..... 1

### Chapitre I : recherche bibliographique

Introduction..... 3

I.1. Cycle global de l'eau ..... 3

I.2. Bilan hydrologique ..... 3

I.3. Hydrogéologie ..... 4

    I.3.1 Définition..... 4

    I.3.2 Bilan pour un bassin hydrogéologique ..... 5

I.4. Eaux souterraines ..... 5

    I.4.1. Classification des réservoirs en milieu poreux ..... 5

    I.4.2. Aquifères ..... 5

        4.2.1 Types d'aquifères (nappes)..... 5

    I.4.3. Recharge des nappes..... 6

        4.3.1 Recharge naturelle des nappes ..... 7

        4.3.2 Recharge artificielle des nappes ..... 7

    I.4.4. Temps de séjours et infiltration des eaux aux aquifères ..... 7

    I.4.5. Piézométrie des eaux souterraine ..... 7

        I.4.5.1 Variation temporelle des niveaux piézométriques : ..... 7

    I.4.6. Caractéristiques naturelles des eaux souterraines..... 8

I.5. Origine et sources de pollution des eaux souterraines..... 8

    I.5.1. Généralité sur la pollution ..... 8

        5.1.1 Pollution..... 8

---

5.1.2 Principaux types de polluants .....	8
I.5.2. Pollution des eaux souterraines .....	9
5.2.1 Pollution naturelle.....	9
5.2.2 Contamination anthropique.....	9
I.6. Intrusion marine.....	10
I.6.1. Définition.....	10
I.6.2. Relation eau douce/salée dans un aquifère côtier .....	10
I.6.3. Origines de l'intrusion marine en zone côtière.....	11
I.6.4. Sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle .....	12
I.6.5. Indicateurs de caractérisation de la salinité .....	13
I.6.6. Impact de l'intrusion marine .....	13
I.7. Cartographie et carte.....	14
I.7.1. Cartographie .....	14
I.7.2. Carte .....	14
7.2.1 Définition.....	14
7.2.2 Règles à respecter .....	14
7.2.3 Classification des cartes.....	14
I.8. L'informatique et la cartographie.....	15
I.8.1. Logiciels de cartographie .....	15
I.8.2. Systèmes d'Information Géographique (SIG) .....	15
I.8.3. Projection.....	15
8.3.1 Types de projections .....	16
8.3.2 Autres projections : (Projections cartographiques utilisées en Algérie).....	16
I.9. Analyse géostatistique et cartographique .....	17
I.9.1. Géostatistique .....	17
I.9.2. Vocabulaire essentiel de Géostatistique .....	17
9.2.1 Hypothèses de bases .....	17
I.9.3. Variogramme théorique et variogramme expérimental.....	18

9.3.1 Propriétés du variogramme .....	19
9.3.2 Modélisation du variogramme .....	19
9.3.3 Validation croisée .....	20
I.9.4. Krigeage .....	20
I.10. Vulnérabilité à la pollution .....	21
I.10.1. Notion de la vulnérabilité .....	21
I.10.2. Différents types de la vulnérabilité.....	21
I.10.3. Critères de vulnérabilité .....	21
I.10.4. Différents méthodes d'estimation la vulnérabilité .....	21
I.10.5. Exemples des méthodes pour évaluer la vulnérabilité à la pollution : .....	22
1) Méthode DRASTIC.....	22
2) Méthode PRAST .....	22
3) Méthode GALDIT .....	23
Conclusion .....	23

## **Chapitre II : présentation de la zone d'étude**

Introduction :.....	24
II.1. Situation géographique et administrative.....	24
II.2. Les unités Géomorphologiques.....	24
II.3. Caractéristiques des bassins versants .....	25
II.3.1 Caractéristiques morphométriques des bassins versants.....	25
II.3.2 Description des sous bassins .....	26
II.4. Hydrographie.....	27
II.5. Contexte Climatologique : .....	28
II.5.1 La pluviométrie .....	29
II.5.2. Températures.....	31
II.5.3 Diagramme ombrothermique .....	32
II.5.4 Indice d'aridité de Martonne « A » .....	32

II.6. Ressources en eau de la Mitidja orientale :.....	33
II.7. Contexte géologique : .....	35
Géologie de la plaine de Mitidja EST.....	35
II.8. Contexte hydrogéologique .....	36
II.8.1 L'aquifère de l'Astien : .....	37
II.8.2 L'aquifère quaternaire :.....	37
II.8.3 Les caractéristiques hydrodynamiques : .....	37
II.9. Aspects socio-économiques de la Mitidja.....	37
II.9.1 Population .....	38
II.9.2 Végétation et agriculture .....	38
II.9.3 Industrie.....	38
II.9.4 Couvert végétal .....	38
Conclusion : .....	39

### **Chapitre III : approche géostatistique et cartographie**

Introduction.....	40
III.1 Méthode de GALDIT.....	40
III.1.1. Généralité sur la méthode de GALDIT.....	40
III.1.2. Paramètres de GALDIT .....	40
III.1.3. Indice de GALDIT .....	41
III.1.4. Classification des aquifères : .....	42
III.1.5. Carte de l'indice de vulnérabilité GALDIT :.....	43
III.2. Logiciels utilisés .....	43
III.3. Paramètres statistiques période basse eau (histogrammes).....	44
III.4. Application de l'approche géostatistique.....	46
III.4.1. Semi-variogrammes expérimentaux (SEV) .....	46
III.4.2. Modélisation des semi-variogramme expérimentaux (SVE).....	48
III.5. Résultats et discussion (résultats du krigeage) .....	49



---

III.5.1. Carte du type de l'aquifère (G) .....	49
III.5.2. Carte de la conductivité hydraulique (A).....	50
III.5.3. Carte de la Profondeur du plan d'eau (L) : .....	51
III.5.4. Carte de la distance à la côte ou (D) : .....	52
III.5.5. Carte de l'impact d'intrusions marine existante (I) :.....	53
III.5.6. Carte de l'épaisseur de l'aquifère (T) : .....	54
III.5.7. Carte de l'indice de vulnérabilité GALDIT : .....	55
Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>57</b>

---

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Composante du cycle hydrologique.....	3
<b>Figure I.2</b> : Vue schématique du bilan hydrique à trois échelles Interdépendantes... ..	4
<b>Figure I.3</b> : Aquifères à nappe libre et captive.....	6
<b>Figure I.4</b> : Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'intrusion saline.....	11
<b>Figure I.5</b> : Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline.....	12
<b>Figure I.6</b> : la projection UTM et Lambert en Algérie.....	16
<b>Figure I.7</b> : Propriétés du variogramme.....	19
<b>Figure II.1</b> : Situation géographique de la Mitidja oriental.....	25
<b>Figure II.2</b> : Carte topographique de la Mitidja Est.....	26
<b>Figure II.3</b> : Réseau hydrographique de la Mitidja oriental.....	27
<b>Figure II.4</b> : Carte des postes pluviométriques de la Mitidja Est.....	29
<b>Figure II.5</b> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles, (1985-2015)... ..	30
<b>Figure II.6</b> : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (1985 – 2015).....	30
<b>Figure II.7</b> : Variation des températures moyennes mensuelles la station de Dar El Beida (1985-2015).....	31
<b>Figure II.8</b> : courbe ombrothermique de station Dar El Beida (1985-2015).....	32
<b>Figure II.9</b> : Barrage d'EL Hamiz (ANBT. 2019).....	33
<b>Figure II.10</b> : Carte des ressources en eau de la Mitidja Est.....	34
<b>Figure II.11</b> : Carte géologique de la Mitidja-Est.....	36
<b>Figure III.1</b> : Etapes pour produire une carte de la vulnérabilité à l'intrusion marine.....	43
<b>Figure III.2</b> : Histogramme des profondeurs du plan d'eau (période BE, année 2019).....	44
<b>Figure III.3</b> : Histogramme de la conductivité hydraulique (periode BE, année 2019).....	44
<b>Figure III.4</b> : Histogramme de l'impact de l'intrusion marine periode BE (année 2019).....	45
<b>Figure III.5</b> : Histogramme de l'épaisseur de la couche d'aquifère période BE (année 2019).....	45
<b>Figure III.6</b> : SEV de niveau piézométrique, période BE (année 2019).....	46
<b>Figure III.7</b> : SEV de la conductivité, période BE (année 2019).....	46
<b>Figure III.8</b> : SEV de l'épaisseur de la couche d'aquifère, période BE (année 2019).....	47
<b>Figure III.9</b> : SEV de l'impact de l'intrusion marine, période BE (Année 2019).....	47
<b>Figure III.10</b> : Carte du paramètre <b>G</b> , type l'aquifère de la Mitidja EST.....	49
<b>Figure III.11</b> : Carte du paramètre <b>A</b> , conductivité hydraulique.....	50

---

<b>Figure III.12</b> : Carte du paramètre <b>L</b> , la Profondeur du plan d'eau.....	51
<b>Figure III.13</b> : Carte du paramètre <b>D</b> , distance à la côte.....	52
<b>Figure III.14</b> : Carte du paramètre <b>I</b> : L'impact de l'intrusion saline.....	53
<b>Figure III.15</b> : Carte du paramètre <b>T</b> : l'épaisseur de la nappe phréatique.....	54
<b>Figure III.16</b> : Indice de GALDIT de l'aquifère de la Mitidja EST.....	55

### Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Classification des eaux en fonction leur TDS.....	13
<b>Tableau II.1</b> : Caractéristiques des sous bassins versants.....	26
<b>Tableau II.2</b> : Stations pluviométriques de la Mitidja Est.....	28
<b>Tableau II.3</b> : Précipitations moyennes mensuelles de Mitidja Est (1985-2015).....	29
<b>Tableau II.4</b> : Variation de la température à la station de Dar El Beida (1985 à 2015).....	31
<b>Tableau II.5</b> : précipitations et température moyenne mensuelles à la station de Dar el Beida, période (1985-2015).....	32
<b>Tableau II.7</b> : Indice d'aridité (station du Hamiz).....	32
<b>Tableau II.6</b> : Classification des indices de Martonne.....	33
<b>Tableau II.8</b> : Points d'eau utilisés à notre étude (ANRH).....	34
<b>Tableau III.1</b> : Poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi et al, 2005).....	42
<b>Tableau III.2</b> : Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005).....	42
<b>Tableau III.3</b> : Modélisation des semi-variogrammes expérimentaux.....	48

---

## **Introduction générale**

Les eaux souterraines constituent un élément considérable du cycle hydrogéologique, Elles représentent 98 % des réserves d'eau douce non gelée de la planète, L'exploitation des eaux souterraines présente des avantages économiques significatifs.

Tout d'abord L'eau souterraine est généralement de meilleures qualités que l'eau de surface, en raison du pouvoir épurateur du sol ou bien le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de grande qualité, avec notamment de très faibles teneurs en micro-organismes et autres substances en suspension, ce qui en fait une ressource précieuse pour l'alimentation des populations (eau potable), Ces eaux sont largement utilisées dans l'agriculture et l'industrie et à la productivité et le développement urbain. (Fetter. 2018)

En temps normal, l'exploitation des nappes génère un rabattement qui est récupéré par sa recharge naturelle, mais vu la situation actuelle, L'utilisation mondiale de l'eau augmente en raison de la croissance démographique et du développement industriel, ainsi que les changements récents dans les modes d'utilisation des terres et de l'eau. Dans les régions où l'eau de surface seule peut ne pas répondre à la demande en eau ou la gestion des eaux de surface n'est pas bien développée, il devient impossible d'équilibrer le système. ([Sen, 2014](#)).

Les régions côtières sont parmi les plus productives économiquement et les plus peuplées au monde, cela exerce une demande importante sur les ressources en eau, l'exploitation intensive des aquifère sa engendré un rabattement critique qui a créé à son tour une différence de charge hydraulique entre les eaux douces et les eaux salées. Cette différence de charge a provoqué l'avancer des eaux de mer vers l'aquifère côtier, on observe le phénomène appelé « intrusion marine », C'est le cas de la Mitidja Est.

La nappe alluviale de la Mitidja Orientale qui est située au Nord de l'Algérie, sa position géographique stratégique littorale, elle est en contact direct avec la mer dans certaines secteur, caractériser par une longue période de sécheresse combinée à une surexploitation intensive de la nappe par de nombreux forages entraînant une baisse importante de niveau piézométrique, le développement urbain, industriel et agricole intensif de la région, contribuant à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines. Des analyses physico-chimiques récentes confirment une pollution saline de la nappe, avec des conductivités élevées près de la côte.

D'après ces facteurs la nappe alluviale de la Mitidja orientale est peut-être vulnérable à la pollution saline.

Notre travaille doivent répondre aux préoccupations suivantes :

Est-ce que la nappe alluviale de la Mitidja Est est confrontée à phénomène de l'intrusion marine, et vulnérable à la pollution ? et comment évaluer la vulnérabilité de ses eaux souterraines ?

Cette étude s'inscrit dans le but de bien comprendre le phénomène de l'intrusion marine et la cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale de la Mitidja Est face à la pollution marine en utilisant la méthode GALDIT combiné avec la géostatistique par SIG, nous avons eu recours à l'utilisation des données physico-chimiques et des niveaux piézométriques d'années 2019 pour la période des basses eaux.

Pour ce faire, notre travail s'organise comme suit :

- Chapitre II (recherche bibliographique) ; un aperçu théorique sur les eaux souterraines et les pollutions qui peuvent présenter dans les nappes et ses origines et la vulnérabilité à la pollution de ces nappes, le phénomène de l'intrusion marine, la cartographie et les systèmes d'informations géographiques et la modélisation par l'approche géostatistique.
- Chapitre II (présentation de la zone d'étude) ; nous présentons des généralités sur la zone d'étude, relatives à la situation géographique, aux caractéristiques socio-économiques de la région, à la climatologie, la géologie et l'hydrogéologie, ressources en eau.
- Chapitre III (approche géostatistique et cartographie) :
- Conclusion ; une synthèse des principaux résultats obtenus, et donnée quelques recommandations.

## Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons des eaux souterraines et leurs caractéristique naturelles et généralement les types de pollution auxquels ces eaux exposées, et particulièrement le phénomène de l'intrusion marine dans les zones côtières, la cartographie et les systèmes d'informations géographiques et la modélisation par l'approche géostatistique. Qui nous permet d'étudier ce phénomène et faire des cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution, nous verrons quelques exemples des méthodes pour évaluer la vulnérabilité à la pollution.

### I.1. Cycle global de l'eau

La circulation de l'eau à la surface de la terre ou cycle global de l'eau, assure les échanges entre les quantités d'eau stockées sous trois états, vapeur, solide (glaces) et liquide. Le déplacement des particules sous deux états principaux, vapeur et liquide, à la surface de la terre, constitue le cycle global de l'eau (Castany. 1998).

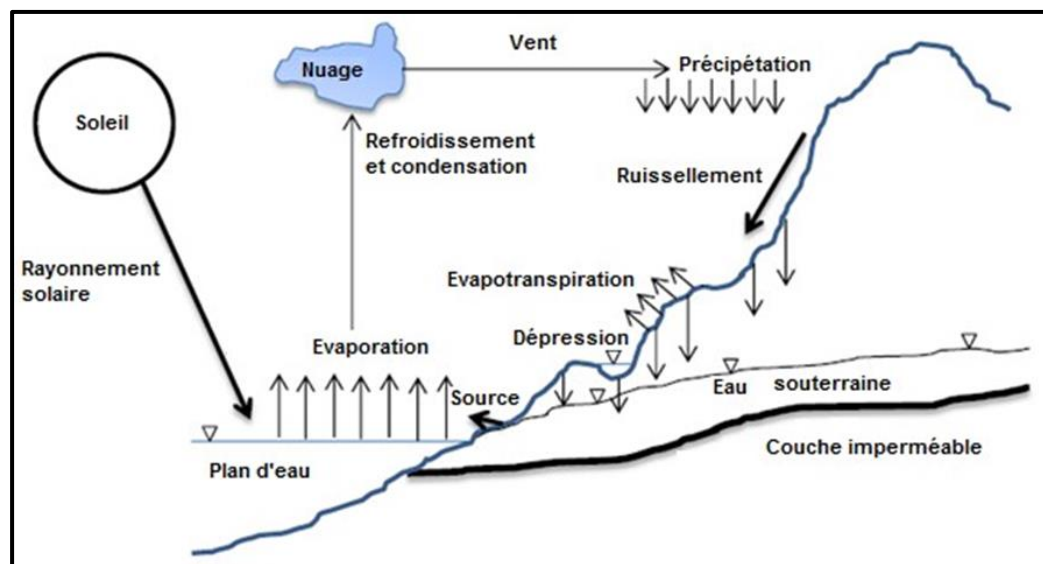


Figure I.1 : Composante du cycle hydrologique (Şen, 2014).

### I.2. Bilan hydrologique

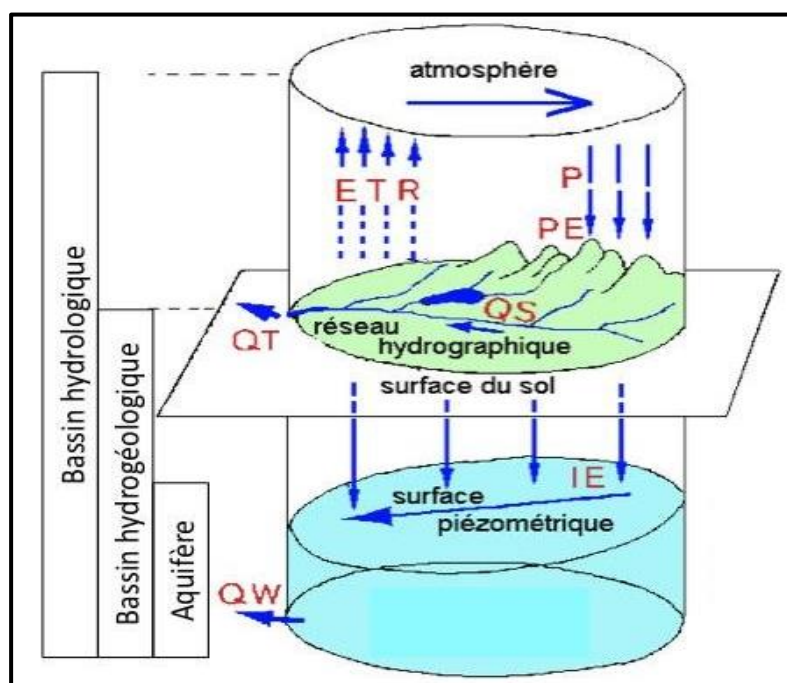
Le bilan hydrologique fournit un moyen quantitatif pour évaluer le cycle hydrologique. Cette équation fondamentale est une simple expression de la loi de conservation de la masse, Il définit la balance comptable des entrées, égales au débit moyen des apports, et des sorties, représentés par le débit moyen des écoulements. Il se réfère à un domaine délimité (le système hydrologique) et à une durée moyenne précise (les apports doivent être mesurés sur les mêmes périodes de temps que les quantités de sorties. Il est éventuellement tenu compte de la variation du stock d'eau ou différence

de réserve (changements dans le stockage) (Castany. 1998 ; Fetter. 2018). Il peut s'exprimer :  $\text{Entrée} = \text{Sortie} \pm \text{changements dans le stockage}$ . Les apports à un système hydrologique peuvent comprendre (1) les précipitations ; (2) l'apport d'eau de surface, y compris le ruissellement et l'écoulement de surface ; (3) apport d'eaux souterraines provenant de l'extérieur de la zone ;

Les sorties (déficit) peuvent comprendre (1) l'évapotranspiration ; (2) évaporation des eaux de surface ; (3) ruissellement des eaux de surface ; (4) écoulement des eaux souterraines.

L'équation hydrologique peut être appliquée à des systèmes de toute taille ; le cycle de l'eau peut s'aborder à l'échelle du globe, mais aussi à celle des unités géographiques ou structurales qui forment les systèmes hydrologiques, Trois domaines d'espaces interdépendants, emboîtés, peuvent être circonscrits. Ils identifient trois systèmes hydrologiques (Castany. 1998).

- Le bassin hydrologique ;
- Le bassin hydrogéologique ou des eaux souterraines ;
- L'aquifère avec sa nappe d'eau souterraine.



**Figure I.2 :** Vue schématique du bilan hydrique à trois échelles Interdépendantes (Castany, 1998).

### I.3. Hydrogéologie

#### I.3.1 Définition

La partie de l'hydrologie qui traite de l'occurrence, du mouvement et de la qualité de l'eau sous la surface de la terre, les études sur les eaux de surface ou souterraines nécessitent des connaissances hydrologiques de base pour l'évaluation des précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, le

---

ruissellement, l'écoulement souterrain et leurs aspects de modélisation pour leurs applications pratiques (Sen, 2014).

### **I.3.2 Bilan pour un bassin hydrogéologique**

Dans l'aquifère, le débit des apports est l'infiltration efficace, (IE). La sortie est représentée par le débit de l'écoulement souterrain ( $Q_w$ ), souvent augmenté des débits des prélèvements ( $Q_{ex}$ ) (Castany. 1998).

## **I.4. Eaux souterraines**

Les eaux souterraines sont l'une des composantes les plus importantes du cycle hydrologique. L'eau est stockée dans le sous-sol dans les espaces interstitiels entre les grains, dans les fractures ou dans les cavités de dissolution (roches calcaires et dolomie). Elle est définie dans son sens le plus large comme l'eau contenue dans la zone de saturation. L'eau qui remplit les ouvertures (poreuse, fissure, fracture, cavités de dissolution) des formations géologiques (sol, alluvions et roches) est appelée eau souterraine. Elle provient des précipitations et du processus d'infiltration. Les eaux souterraines sont la principale source d'eau douce, en particulier pour les régions arides et semi-arides (Sen 2014), (Lencastre 1996).

### **I.4.1. Classification des réservoirs en milieu poreux**

Les eaux souterraines sont présentes dans de nombreux types de formations géologiques. La quantification des problèmes liés aux eaux souterraines nécessite une classification plus poussée des réservoirs. Sur la base des propriétés de transmission et de stockage, les formations géologiques en milieu poreux sont généralement classées en quatre unités hydrogéologiques : Aquifères, Aquitards, Aquicludes, Aquifuges. (Todd et Mays 2005)

### **I.4.2. Aquifères**

L'aquifère (du latin aqua fere : porter l'eau). Un aquifère est une formation qui contient de matériaux perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable, cela implique une capacité à stocker et à transmettre l'eau ; les grès, les graviers et les sables sont considérés comme un exemple typique.

Une nappe est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Degrémont 2005), (Gilli E. et al, 2008).

### **4.2.1 Types d'aquifères (nappes)**

La base de l'aquifère, appelé substratum, est constituée par une formation hydrogéologique imperméable. Par contre sa limite supérieure est de trois types (Castany 1998).



### a) Aquifère à nappe libre

L'aquifère se nomme nappe libre lorsque son niveau supérieur est en contact avec l'atmosphère et fluctue librement au gré du climat.

### b) Aquifère à nappe captive

Une nappe peut être captive (confinée) si elle est emprisonnée entre deux couches de terrains imperméables (figure I.3), les nappes de ce type sont les plus fréquentes et généralement les plus profondes ; il y règne une certaine pression. La surface piézométrique d'un aquifère captif est une surface imaginaire coïncidant avec le niveau de pression hydrostatique de l'eau dans l'aquifère (Castany 1998).

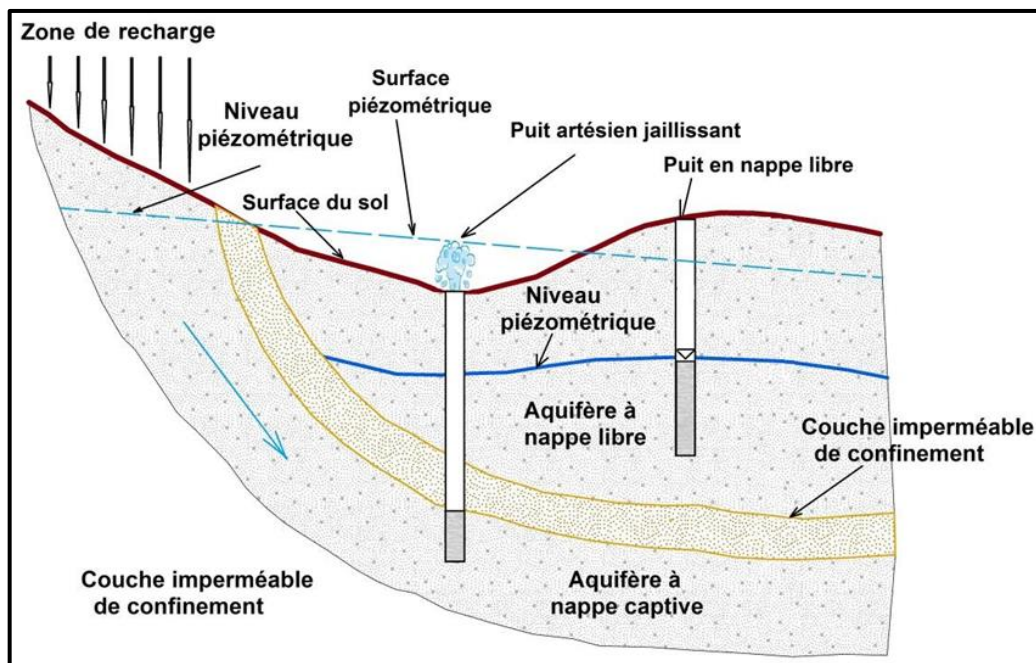


Figure I.3 : Aquifères à nappe libre et captive (Todd et Mays 2005).

### c) Aquifère à nappe semi-captive

La configuration géologique est similaire à celle d'un aquifère captif avec une couche de confinement semi-perméable supérieure ou inférieure. La couche semi-perméable transmet l'eau d'un aquifère à l'autre en fonction de la différence de charge hydraulique verticale. (Şen 2014).

### I.4.3. Recharge des nappes

Plusieurs éléments influencent la recharge des nappes, tels que la fluctuation spatiotemporelle des facteurs hydrométéorologiques (comme les précipitations et la température), la lithologie, la topographie et la géologie souterraine (comme la capacité d'infiltration), ainsi que l'intervention de l'homme. (Şen 2014).

### 4.3.1 Recharge naturelle des nappes

En règle générale, la répartition spatiale et temporelle des précipitations assure le renouvellement naturel des nappes phréatiques. L'efficacité de l'infiltration correspond à la quantité d'eau qui parvient réellement à la nappe. Elle correspond à la quantité des précipitations efficaces (précipitation - évapotranspiration réelle) qui alimente les ruissellements qui alimentent le réseau hydrographique sous forme de surface. L'infiltration des eaux superficielles et l'échange entre les aquifères sont d'autres sources de recharge naturelle. (Şen 2014 ; Todd et Mays 2005).

### 4.3.2 Recharge artificielle des nappes

Elle est définie comme l'accroissement du déplacement naturel des eaux de surface dans les formations souterraines. Différentes techniques ont été mises au point, comme l'épandage d'eau de crues sur de vastes espaces, les bassins d'infiltration, l'injection d'eau dans les puits et les forages., etc (Meddi et al. 2015 ; Asano 2016).

### I.4.4. Temps de séjours et infiltration des eaux aux aquifères

Il dépend de l'épaisseur de la zone non saturée et de sa conductivité hydraulique verticale que l'eau d'infiltration se déplace. Il est possible que la recharge soit retardée en présence de couches de matériaux à faible perméabilité, comme des limons et des argiles. Le temps nécessaire pour que les eaux d'infiltration atteignent la nappe. Dans les régions arides, où la recharge est rare et que la nappe est profonde, il peut prendre des années pour que l'eau traverse la zone non saturée. (Burkart et Kolpin 1993).

### I.4.5. Piézométrie des eaux souterraine

Pour une surveillance continue des eaux souterraines, les piézomètres et les puits d'observation doivent être situés à des emplacements appropriés (Şen 2014).

Les cartes des niveaux piézométriques d'un aquifère libre et de la surface piézométrique d'un aquifère captif sont des outils de base de l'interprétation hydrogéologique. Ces cartes peuvent être représentées sous forme de cartes de contour avec des lignes d'égale altitude (Gilli et al. 2008).

#### I.4.5.1 Variation temporelle des niveaux piézométriques :

- **Variation interannuelle :** Les variations interannuelles des niveaux des eaux souterraines sont celles qui s'étendent sur des périodes de plusieurs années ou plus. Des séries alternées d'années humides et sèches, au cours desquelles les précipitations sont supérieures ou inférieures à la moyenne, produiront des fluctuations de niveaux d'eau sur de longues périodes. (Todd et Mays 2005).
- **Variation saisonnière :** Les aquifères présentent une fluctuation saisonnière des niveaux d'eau due aux cycles de précipitation et d'irrigation. Les niveaux les plus élevés surviennent après les

saisons pluvieuses, tandis que les plus bas se produisent après la saison sèche, en fonction de la recharge, du pompage et du type d'aquifère. (Todd et Mays 2005).

#### **I.4.6. Caractéristiques naturelles des eaux souterraines**

La composition naturelle des eaux souterraines reflète la composition originale de l'eau de recharge, la composition minérale du milieu souterrain et le climat, les modifications de la composition commencent lors de l'infiltration dans le sol. Les changements au cours du passage des eaux souterraines à travers les unités rocheuses dépendent beaucoup des constituants solubles présents dans ces formations rocheuses, des voies d'écoulement des eaux souterraines et de sa vitesse de déplacement (temps de séjour). (Margat et Van der Gun 2013).

Les principales espèces inorganiques qui constituent la qualité globale des eaux souterraines sont :

✓ **Les cations majeurs :**

Le calcium  $\text{Ca}^{2+}$ , le magnésium  $\text{Mg}^{2+}$ , le sodium  $\text{Na}^+$  et le potassium  $\text{K}^+$ ,

✓ **Les ions majeurs :**

Le chlore  $\text{Cl}^-$ , sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$ , carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$  et bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$ .

Les mesures sur le terrain du pH, de la température et de la conductivité électrique ~~spécifique~~ sont généralement effectuées au moment du prélèvement des échantillons. D'autres ions naturels qui peuvent être présents en concentrations de 0,1 mg/l à 10 mg/l comprennent le fer, le nitrate, le fluorure, le strontium et le bore. Le fer et le nitrate sont généralement inclus dans les études de la chimie de l'eau, le fluorure, le strontium et le bore étant moins fréquemment rapportés (Fetter, 2018).

### **I.5. Origine et sources de pollution des eaux souterraines**

#### **I.5.1. Généralité sur la pollution**

##### **5.1.1 Pollution**

La pollution est la dégradation d'un écosystème par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou perturber de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes (Es Saouini H. 2015).

##### **5.1.2 Principaux types de polluants**

Une grande variété de matériaux trouvés dans les eaux souterraines comme des polluants, les produits chimiques organiques synthétiques, les hydrocarbures, les ions inorganiques, les agents pathogènes et les radionucléides font partie de ces éléments. La majorité de ces substances se décomposent dans l'eau à différents degrés. Certains des composés organiques ne sont pas

entièrement solubles et se présenteront à la fois sous forme dissoute et sous forme de phase non aqueuse insoluble, qui peut également se déplacer à travers le sol (Fetter et al. 2017).

- ❖ **Polluants physiques** : Les trois principaux agents physiques de la pollution sont : la chaleur, le transport de matière solides en suspension et la radioactivité,
- ❖ **Polluants chimiques** : L'eau, par son pouvoir dissolvant élevé, dissout les substances rejetées par l'activité humaine. Les polluants chimiques sont nombreux et d'origines diverses : sels minéraux dissous, métaux lourds, pesticides, détergents et hydrocarbures. Les métaux lourds, les pesticides et les détergents constituent les micropolluants (Castany 1998).
- ❖ **Polluants organiques (contaminants microbiens)** : Les contaminants microbiens, tels que les virus et les bactéries, peuvent pénétrer dans l'eau à partir des stations d'épuration des eaux usées, des fosses septiques souterraines, des exploitations d'élevage agricole et même des espèces vivantes à l'état sauvage, Les contaminants microbiens les plus préoccupants dans l'eau potable sont généralement d'origine fécale (S. Zhang et al. 2003).
- ❖ **Contaminants émergent CE.**
- ❖ **Polluants organiques persistants (POP)** : produits chimiques organiques récalcitrants qui résistent à la dégradation, se bio-accumulent, ont un effet toxicologique nocif connu et ont un potentiel de propagation et de persistance dans l'environnement (Wu et al. 2021).

### I.5.2. Pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines se produit si la charge de contaminants du sous-sol, générés par les émissions d'origine humaine (déversement de déchets, les rejets et fuites) est mal contrôlée, et dépasse la capacité d'atténuation naturelle des sols et couches sous-jacents. Les profils de sous-sol naturels atténuent activement de nombreux polluants de l'eau, et ont longtemps été considérés comme potentiellement efficaces pour l'élimination sûre des excréments humains et des eaux usées domestiques (Vaessen V. et Brentführer R. 2015).

#### 5.2.1 Pollution naturelle

- ❖ **Dissolution et altération** : Les minéraux dissous sont présents dans les eaux souterraines par le biais du lessivage naturel des roches et du sol.
- ❖ Matière organique naturelle.
- ❖ Détérioration d'origine naturelle de la qualité de l'eau souterraine.

#### 5.2.2 Contamination anthropique

La pollution de l'eau souterraine est provoquée par les rejets des activités domestiques et urbaines, agricoles ou industrielles, dont l'eau est le véhicule de transport et de dissémination idéal

### Types de pollution

- ❖ **Pollution diffuse** : est la pollution des eaux souterraines due à un surplus d'engrais et de pesticides utilisés dans l'agriculture intensive, La pollution diffuse peut également résulter de la pollution atmosphérique transmise par les précipitations, notamment sous forme de pluies acides. (Todd et Mays 2005 ; Margat et Van der Gun 2013).
- ❖ **Pollution locale (ponctuelle et linéaire)** : Cela a de nombreuses sources potentielles, souvent liées aux dysfonctionnements ou à des accidents dans des installations industrielles ou publics. Les exemples sont les décharges de déchets mal isolées, le stockage souterrain inadéquat de substances dangereuses (hydrocarbures), les accidents industriels, les fuites des réseaux d'assainissement et les pertes des pipelines. (Castany 1998).

## I.6. Intrusion marine

### I.6.1. Définition

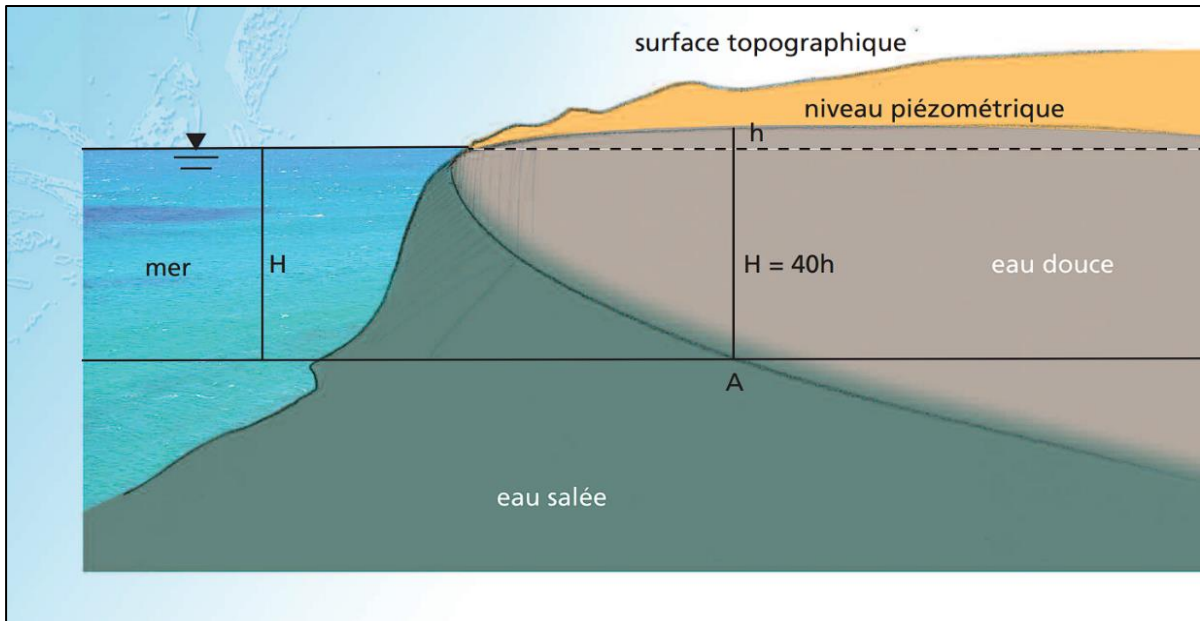
L'eau douce stockée dans les aquifères côtiers est particulièrement sensible à la dégradation due à la proximité de l'eau de mer, en association avec les demandes en eau intensives qui accompagnent les fortes densités de population des zones côtières. En dépit de la perturbation liée à l'activité humaine et dans un aquifère côtier, l'eau douce en provenance de l'infiltration des précipitations constitue une nappe s'écoulant vers la mer qui surmonte une masse d'eau salée affectant la forme d'un biseau pénétrant à l'intérieur des terres. La transition entre eau douce et eau salée s'effectue relativement brusquement sur une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres. Généralement l'eau douce, plus légère que la mer, flotte sur l'eau de mer avec un contact incliné assimilé à un plan, l'interface, dont la position est liée à la différence de densité des deux milieux, 1 pour l'eau douce et environ 1,025 pour l'eau de mer. (Dörfliger.N, Augeard.B ,2013).

### I.6.2. Relation eau douce/salée dans un aquifère côtier

La compréhension du processus de l'intrusion d'eau de mer est essentielle pour la gestion et la conservation des ressources des aquifères côtiers, donc il est important de comprendre l'interaction existante entre l'eau de mer et l'eau douce, et contrôler l'intrusion d'eau salée afin de développer une exploitation optimale des eaux souterraines L'existence et l'évolution spatio-temporelle de la zone de transition dépendent à la fois des facteurs hydrodynamiques et géométriques suivants, (Ledoux, 1986) ;

- Les fluctuations naturelles à la fois du niveau de la nappe (variations saisonnières) et du niveau marin (marées) qui provoquent un mélange des eaux douces et marines par déplacement de l'interface.
- La différence de densité entre les deux liquides qui tend à maintenir le sel en profondeur.
- La porosité et la perméabilité de l'aquifère côtier.

- La géométrie de l'aquifère.
- Le débit de la nappe.



**Figure I.4** : Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'intrusion saline (Ghyben-Herzberg) in (Dörfliger.N, Augeard.B ,2013).

### I.6.3. Origines de l'intrusion marine en zone côtière

#### 1. Le facteur anthropique :

Le facteur humain concerne l'exploitation excessive d'un aquifère. Le principe d'intrusion saline a été décrit par Ghyben et Herz berg, La position de l'interface eau douce/eau salée peut être estimée en considérant les rapports de la masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée. L'interface se situe sous le niveau de la mer (Figure I.4), à une profondeur égale à quarante fois l'élévation du niveau de la nappe par l'équation de Ghyben-Herzberg (à l'équilibre le poids de la colonne d'eau douce est égal au poids de la colonne d'eau de mer). (Dörfliger, 2013).

$$H = h \frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \approx 40h$$

$\rho_2$  : la masse volumique de l'eau salée (1,025g/cm<sup>3</sup>) ;

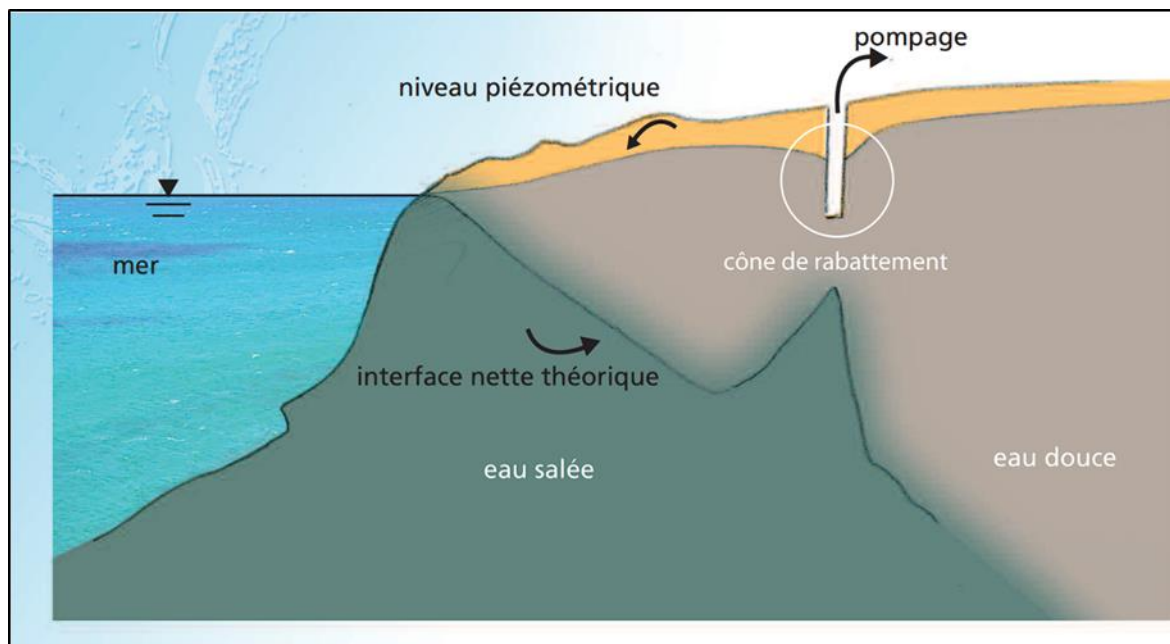
$\rho_1$  : la masse volumique de l'eau douce (1g/cm<sup>3</sup>) ;

h : la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer ;

H : la hauteur de l'interface.

Dans le cas d'une surexploitation par pompage dans un aquifère côtier, un cône de rabattement se forme au niveau de la surface de la nappe, qui modifie l'interface entre l'eau douce et l'eau salée.

Selon le principe de Ghyben-Herzberg, un rabattement d'un mètre provoqué par un pompage entraîne une remontée de l'eau salée de quarante mètres.



**Figure I.5 :** Coupe schématique perpendiculaire au littoral montrant l'influence d'un pompage sur l'intrusion saline selon le schéma de Ghyben Herzberg (extrait de Frissant et al. 2005).

## 2. Changement climatique :

Le changement climatique peut affecter les aquifères littoraux en modifiant le niveau marin ainsi que la distribution spatio-temporelle des précipitations efficaces constituant la recharge des réservoirs souterrains. Les impacts potentiels sur les ressources en eau souterraine des aquifères côtiers peuvent être : une modification des intrusions salines et une migration dans des proportions variables de l'interface eau douce /eau salée due à une remontée du niveau marin, une modification de la recharge des aquifères due à une variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'évapotranspiration ainsi que du volume d'eau douce et de la répartition d'eau douce dans les aquifères. (Werner et Simmons, 2009).

### I.6.4. Sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle

La sensibilité des aquifères côtiers à l'échelle métropolitaine vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle a été estimée à partir des informations sur la nature des formations géologiques rencontrées, notamment leur perméabilité (informations issues de la base de données des systèmes aquifères – BDLISA). (Dörfliger.N, Augeard.B ,2013).

Les cinq classes de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline d'origine naturelle utilisées dans l'étude :

- **Sensibilité faible** : cette classe regroupe les entités de nature imperméable. Ces formations non aquifères sont en général des couches argileuses pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacent ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.
- **Sensibilité faible à moyenne** : les entités de nature semi-perméable comprises dans cette classe sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation d'eau restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables.
- **Sensibilité moyenne** : les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élever, peuvent correspondre à des aquifères sédimentaires ou à des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.
- **Sensibilité variable – karstique** : les aquifères karstiques de cette classe sont caractérisés par une forte hétérogénéité de la distribution des vides et des fissures ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace. Du fait des variations du niveau moyen des mers par rapport au continent au cours des temps géologiques, des conduits peuvent être présents à plusieurs dizaines de mètres sous le niveau marin actuel.
- **Sensibilité forte-avérée** : cette classe comprend les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière. Ces secteurs sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre. (Dörfliger.N, Augéard.B ,2013).

#### I.6.5. Indicateurs de caractérisation de la salinité

La salinité qui est le total des solides dissous (TDS : total dissolved solids) dans l'eau, les différentes classifications ont été développées pour définir le degré de salinité de l'eau :

**Tableau I.1** : Classification des eaux en fonction leur TDS

Catégorie d'eau	TDS (mg/l)
Eau fraîche	<1000
Eau saumâtre	1000-10000
Eau salée	10000-100.000
Saumure	>100.000

#### I.6.6. Impact de l'intrusion marine

L'impact de l'intrusion marine peut être significatif sur l'environnement et les ressources en eau, les eaux souterraines peuvent affectées par une salinité accrue, ce qui peut rendre les eaux non potables pour les activités humains et pour l'irrigation, de plus, l'intrusion marine peut entraîner une dégradation des sols due à l'utilisation d'eau contaminées pour l'irrigation.



---

## I.7. Cartographie et carte

### I.7.1. Cartographie

La cartographie a pour but la représentation de la terre ou d'une autre planète sous une forme géométrique et graphique grâce à la conception, la préparation et la réalisation de cartes. La cartographie est à la fois une science, un art et une technique. Et pour l'efficacité de la représentation cartographique Bertin.J affirme que « l'efficacité du message sera d'autant plus grande que le nombre d'images (superposées ou séparées) et leur complexité seront réduites et que la lecture pourra être faite au niveau de l'ensemble ». (Zanin.C et Trémélo.T.M, 2003).

### I.7.2. Carte

#### 7.2.1 Définition

La carte est un outil de communication par l'image dans la mesure où le concepteur a su prendre en compte les lois de la perception visuelle, du pouvoir séparateur de l'œil, des contrastes de couleurs, et les règles typographiques concernant les écritures, Retenons deux définitions de la carte :

- Selon F. Joly, « une carte est une représentation géométrique, plane, simplifiée et conventionnelle de tout ou partie de la surface terrestre et cela dans un rapport de similitude convenable qu'on appelle échelle ».
- La carte est un dessin réduit et à plat du Monde ou d'une portion du Monde. Elle peut-être aussi et d'autre part une représentation sur un fond de carte Géographique, d'un phénomène quelconque concret ou abstrait. (Anson & Ormeling, 2002).

#### 7.2.2 Règles à respecter

- Être rigoureux avec la collecte et le traitement des données.
- Le traitement graphique doit être judicieux.
- Une carte doit être lisible (nette et économique).
- Une carte doit être complète (Le contenu de la carte, L'orientation, L'échelle, Un cadre, Une légende, Un titre, Les coordonnées, La date, La nomenclature.).

#### 7.2.3 Classification des cartes

Le champ d'application de la cartographie est très large, le nombre de thème possible étant infini. Afin d'étudier les phénomènes susceptibles d'être cartographier (Anson & Ormeling, 2002). Ces représentations planes peuvent être classées en deux grands ensembles :

- Les cartes géographiques
- Les cartes topographiques

---

## **I.8. L'informatique et la cartographie**

La cartographie par ordinateur se différencie de la cartographie traditionnelle par le fait qu'elle permette le traitement le plus complexe d'une masse d'informations et la production de collections importantes de cartes. Pour que ce type de cartographie atteigne une efficacité maximale il est évident qu'il faut centraliser l'information disponible dans le cadre d'une banque de données. Pour le cartographe néophyte, la cartographie par ordinateur soulève un flot de questions, car celle-ci possède son jargon, ses méthodes et ses spécialistes. (Maillard. A, 1972).

### **I.8.1. Logiciels de cartographie**

Les logiciels de cartographie sont complets et permettent de numériser ou digitaliser, c'est-à-dire enregistrer des fonds de carte. Ils créent, structurent et gèrent les bases de données cartographiques. Ils offrent ainsi toutes les fonctionnalités de rassemblement, de classement et de traitements mathématiques des données à cartographier. Ils traduisent les données (chiffrées ou non) en un langage cartographique constitué de figures géométriques, de trames, de symboles, de diagrammes, de couleurs..., puis ils permettent d'habiller la carte avec une légende, un titre, un cadre, etc.

### **I.8.2. Systèmes d'Information Géographique (SIG)**

Un S.I.G. Est l'ensemble des structures, des méthodes, des outils et des données constituées pour rendre compte des phénomènes localisés dans un espace spécifique et faciliter les décisions à prendre sur cet espace. (Joliveau.T).

Cette définition insiste sur le fait essentiel que les S.I.G. sont des systèmes incluant à côté des outils matériels et logiciels, d'autres composantes tout aussi fondamentales : les structures, les méthodes et les données. Beaucoup de personnes assimilent un SIG à un logiciel alors que ce n'est que l'une des composantes d'un ensemble incluant le matériel, l'immatériel, les acteurs, les objets et l'environnement, l'espace et la spatialité. Le logiciel offre les fonctions utiles à l'exploitation d'un SIG. L'usage courant du système d'information géographique est la représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives géométriques : points, des vecteurs (arcs), des polygones ou des maillages (raster). Le domaine d'appartenance de ce type de systèmes d'information est celui des sciences de l'information géographique. (Zeroili. D et al, 2012).

### **I.8.3. Projection**

L'objectif des projections cartographiques est d'obtenir une représentation plane du modèle ellipsoïdal de la surface de la Terre, une projection (appelée aussi transformation plane). La représentation sur un plan (carte) d'une surface sphérique (tout ou partie de la surface terrestre) approchée par un ellipsoïde n'est pas sans contraintes (Jean,2005).

### 8.3.1 Types de projections

Projections cylindriques ; Projections coniques ; Projections azimutales.

### 8.3.2 Autres projections : (Projections cartographiques utilisées en Algérie)

Il existe encore d'autres types de projection mais leurs utilisations en cartographie sont beaucoup plus spécifiques, voire difficiles, que celles des trois grandes familles qui viennent d'être exposées (Hager et al., 1989) :

- **Projection Lambert** : C'est une projection conforme, conique utilisée pour la cartographie de l'Algérie au 1/50 000 de 1943 à 1960. Un quadrillage kilométrique de couleur rouge appelé "corroyage Lambert " délimitant un carrée de 1 km de côté afin d'identifier les détails planimétriques et altimétriques. Dans le but de minimiser les déformations (altérations linéaires), (Rezak ,2014) l'Algérie a été découpée en deux zones (Figure I.6) :
  - Une projection appelée "Lambert Nord" qui couvre le nord de l'Algérie.
  - Une projection appelée "Lambert Sud" qui couvre le sud de l'Algérie.
- **Représentation cartographique UTM (Universel Transverse Mercator)** : La projection de Mercator dispose des caractéristiques suivantes : Elle divise le monde en 60 fuseaux, (numéroté de 1 à 60), chaque zone couvre 6° de longitude. C'est une projection cylindrique, transverse conforme, c'est-à-dire elle conserve les angles. L'Algérie s'étale de l'Ouest à l'Est sur quatre fuseaux : le 29, 30, 31 et 32 soit de 9° à l'Ouest du méridien d'origine et à 12° à l'Est du méridien d'origine. (Daouadi, 2015), (Darteyre, 2008).

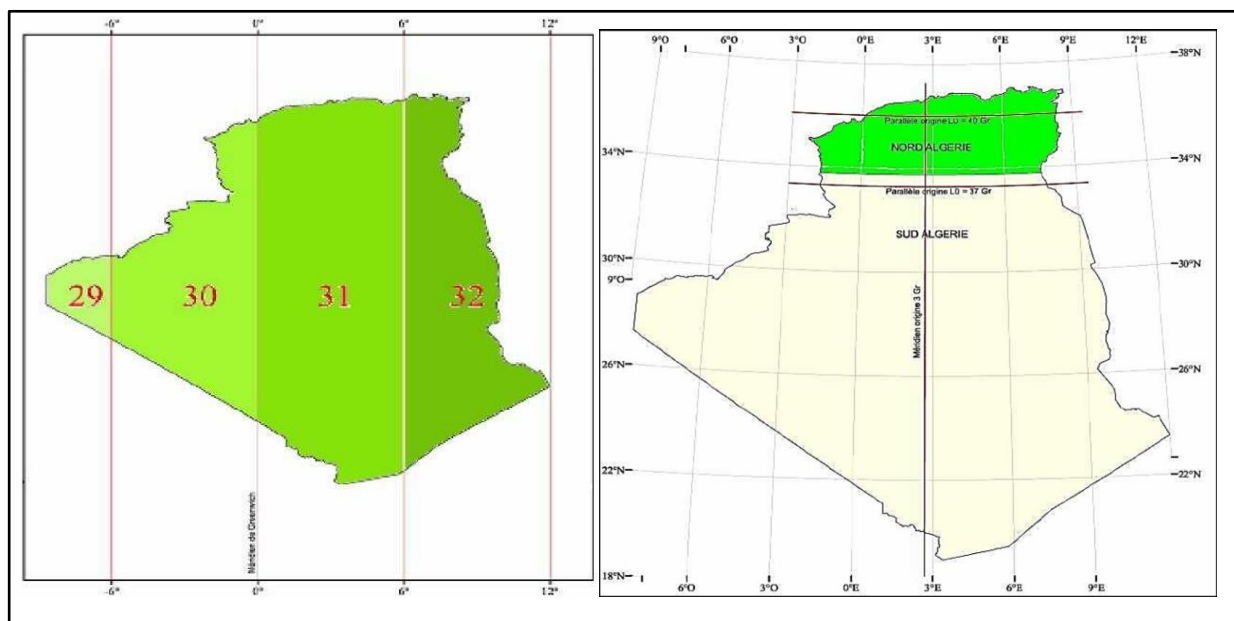


Figure I.6 : la projection UTM et Lambert en Algérie (Rezak ,2014).

## I.9. Analyse géostatistique et cartographique

### I.9.1. Géostatistique

La géostatistique est une application de la théorie des fonctions aléatoires à des données localisées dans un espace géographique. Elle étudie les phénomènes naturels répartis dans l'espace (Phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps (Minéralisation, pollution, propriété physique). En statistiques spatiales, les données sont collectées en des lieux dont on a relevé la position géographique dans le but d'utiliser cette information spatiale dans la modélisation statistique. En particulier, on cherche à modéliser ce que l'expérience courante nous enseigne : deux données proches géographiquement tendent à être similaires en valeur. (Guillot.G, 2004). Cette modélisation nous permettra de réaliser des prédictions spatiales, en intégrant explicitement cette dépendance spatiale dans les calculs. On classe habituellement les statistiques spatiales en trois grands domaines lorsque :

- Les données sont échantillonnées irrégulièrement mais peuvent en principe être mesurées en tout point d'un domaine continu, c'est le domaine habituel de la géostatistique.
- Par leur nature même, les données sont liées à un réseau.
- Les coordonnées qui portent l'information principale.

### I.9.2. Vocabulaire essentiel de Géostatistique

#### 9.2.1 Hypothèses de bases

Une fonction aléatoire  $Z(s)$  est caractérisée par sa loi spatiale  $F$ . Elle correspond à la loi de probabilité conjointe de  $(Z(s_1), Z(s_2), Z(s_3), \dots, Z(s_n))$ .

$$F(v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) = P \{ (Z(s_1) < v_1), (Z(s_2) < v_2, \dots, (Z(s_n) < v_n) \}$$

Or cette fonction est très complexe par l'infinité des combinaisons possibles. Nous n'allons donc pas pouvoir estimer la fonction de distribution conjointe. La géostatistique linéaire se limite à la fonction de distribution d'ordre un  $F(v)$  et d'ordre deux  $F_{Z(s_i), Z(s_j)}(v_i, v_j)$ .

- a. Stationnarité du second ordre :** Une fonction aléatoire  $Z(s)$  est stationnaire du 2<sup>ème</sup> ordre quand l'espérance mathématique existe et ne dépend pas du point  $(s)$  et que la covariance entre chaque paire  $(Z(s+h), Z(s))$  existe et ne dépend que de  $h$  (distance).
- b. Hypothèse intrinsèque :** On dit qu'une fonction aléatoire  $Z(s)$  est intrinsèque quand ses accroissements  $Z(s+h)-Z(s)$  sont stationnaires d'ordre 2. C'est-à-dire que
  - L'espérance des écarts est zéro ;
  - La variance des écarts ne dépend que de  $h$ .

Cette hypothèse permet de dire que la variabilité entre les valeurs prises en deux points différents ne dépend que de  $h$  (la distance entre ces points).

### I.9.3. Variogramme théorique et variogramme expérimental

Le variogramme est défini pour toute fonction aléatoire intrinsèque et dépendant uniquement de l'inter distance  $h$ , alors que la fonction de covariance ne l'est que pour le cas d'une fonction Aléatoire stationnaire d'ordre 2. De plus, l'estimation du variogramme n'est pas biaisée par la Moyenne, au contraire de la covariance.

D'après Cressie (1993), la nature n'est pas entièrement imprévisible. Deux observations situées l'une près de l'autre devraient en moyenne se ressembler davantage que deux observations éloignées. La différence entre les valeurs prises par deux variables aléatoires est  $Z(s)-Z(s+h)$ . C'est également une variable aléatoire dont on peut calculer la variance. Cette variance devrait être plus petite lorsque les points sont rapprochés (les valeurs se ressemblent plus en moyenne) et plus grande lorsque les points sont éloignés. On appelle variogramme la demi-variance de cette différence.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(s+h) - Z(s))$$

L'outil mesure la variabilité spatiale, c'est-à-dire la dissemblance entre les valeurs en fonction de leurs séparations. Il décrit la continuité spatiale de la variable régionalisée.

➤ Le variogramme théorique sert d'une part à l'analyse structurale du phénomène étudié (effet de pépite, portée, existence de palier,...) et d'autre part à aborder certains problèmes de variabilité spatiale et d'estimation. En principe, pour estimer le variogramme théorique  $\gamma(h)$  à partir des données disponibles, on utilise la formule suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(s+h) - Z(s)) = \frac{1}{2} E \left[ (Z(s+h) - Z(s))^2 \right] = C(0) - C(h)$$

Avec  $C(0) = \text{var}(Z(s))$  et  $C(h) = \text{cov}(Z(s+h), Z(s))$

Remarque :

- Un variogramme peut se calculer non seulement pour une distance donnée mais aussi pour direction  $\theta$  donnée  $\gamma_\theta(h)$ .
- La covariance mesure la ressemblance entre les valeurs en fonction de leur éloignement alors que le variogramme mesure la dissemblance entre les valeurs en fonction de leur éloignement.
- Le variogramme réel d'une fonction aléatoire est généralement inconnu, mais il peut être évalué à partir des données d'échantillonnages.

- Le variogramme expérimental étant obtenu, on détermine le variogramme théorique qui s'ajuste le mieux aux points du variogramme expérimental. On le calcule à l'aide de :

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(s_i + h) - Z(s_i)]^2$$

$N(h)$  est le nombre de paires dans la classe de distance  $h$ .

### 9.3.1 Propriétés du variogramme

Le variogramme est une fonction de  $h$ , croissante et souvent caractérisé par trois paramètres :

- l'Effet pépite :  $C_0$
- le Palier :  $C+C_0$
- la Portée :  $a$

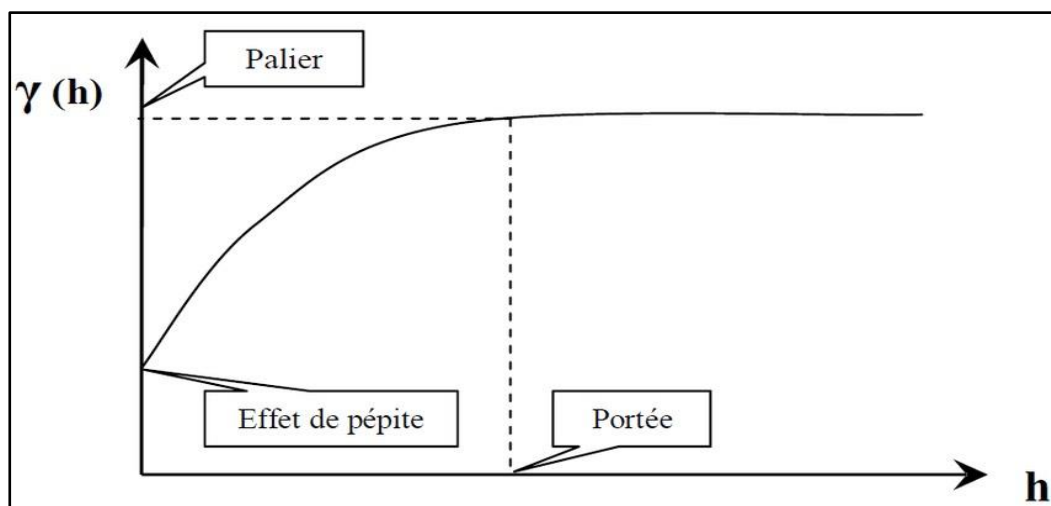


Figure I.7 : Propriétés du variogramme (Belhouadjeb 2018).

- L'effet de pépite : le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut abrupt à l'origine (effet de pépite), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches.
- Le palier : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée ;
- La portée : distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle. (Arnaud et Emery 2000, p.126), (Journel et Huijbergts, 1978)

### 9.3.2 Modélisation du variogramme

Le variogramme expérimental n'est pas défini partout, notamment aux distances  $h$  pour lesquelles il n'existe pas de pair de points de mesures. Ainsi lui est-il ajusté une fonction mathématique appelée modèle de variogramme. (Goovaerts, P, 1997) recommande d'utiliser des modèles éprouvés ou des modèles construits à partir de modèles éprouvés. Les types de modèles courants sont :

- **Linéaire** :  $\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C}{a}h & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$
- **Sphérique** :  $\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$
- **Gaussien** :  $\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right)$
- **Exponentiel** :  $\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right)$

### 9.3.3 Validation croisée

Une pratique intéressante pour valider le modèle de variogramme et consiste à effectuer une validation croisée, cette dernière consiste à enlever un nombre de points Parmi les points échantillonnés, pour faire la validation des méthodes de krigeage Ces points ne sont pas introduits dans le calcul des variogrammes et d'estimation par krigeage, mais ils sont, pour toutes les variables confondues, estimés en leurs localisations à partir d'autres points mesurés, ce qui permet de comparer les valeurs de variables mesurées  $Y(\cdot)$  à celles estimés  $Y^*(\cdot)$ . (Cressie. 1993)

Les critères retenus pour cette validation sont :

- La moyenne des erreurs standardisées (MES) : elle doit être proche de zéro pour qu'il n'y ait ni surestimation, ni sous-estimation systématique.
- La variance des erreurs standardisées (VES) : Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque sa valeur est proche de 1.

### 1.9.4. Krigeage

Le principal objectif de la géostatistique est la prédiction spatiale, encore appelée krigeage, consistant à prédire une variable régionalisée d'intérêt sur un domaine d'étude, à partir des données observées à certains emplacements. Le krigeage repose fondamentalement sur la modélisation et l'estimation de la structure de dépendance spatiale. La description de cette dernière se fait couramment à l'aide d'outils statistiques tels que le variogramme ou la covariance, calculés sur l'ensemble du domaine d'intérêt et sous une hypothèse de stationnarité.

Seule la méthode d'interpolation par krigeage repose sur une méthode statistique satisfaisante et permet d'obtenir la vraie variance d'estimation. (Laborde, 2000). Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. (Cressie. 1993)

---

## **I.10. Vulnérabilité à la pollution**

### **I.10.1. Notion de la vulnérabilité**

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions, selon les caractéristiques du milieu, Margat (1968) a introduit le concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination pour la première fois. La vulnérabilité des eaux souterraine à la pollution s'exprime par la sensibilité de nappe aux différents agents pollueurs exposés à la surface du sol avec des degrés de l'accessibilité à la nappe dépendant que de paramètres physicochimiques. (BARRES, 1994).

### **I.10.2. Différents types de la vulnérabilité**

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité :

- 1. Vulnérabilité intrinsèque :** Est utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.
- 2. Vulnérabilité spécifique :** Est utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants.

La vulnérabilité spécifique prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque. (Schnebelen.2002) Il est essentiel de distinguer les deux types de vulnérabilité car, en général, elles ne se situent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être perçue comme inchangée dans le temps, ce qui rend difficile leur distinction. L'évolution de la vulnérabilité spécifique liée aux polluants éventuels est constante et ne se limite à un instant précis. (Muet F et Vier E .2011, B.R.G.M 2008).

### **I.10.3. Critères de vulnérabilité**

Une nappe peut être vulnérable en raison de divers facteurs, tels que sa nature et sa concentration, ainsi que son temps de transfert. Les caractéristiques du sol, de la zone saturée et de la zone non saturée sont prises en considération pour évaluer le comportement des polluants. (B.R.G.M 2008).

### **I.10.4. Différents méthodes d'estimation la vulnérabilité**

Différentes approches de cartographie de la vulnérabilité ont été créées et mise en œuvre. On a décrit et évalué plusieurs techniques de cartographie de la vulnérabilité. La vulnérabilité peut être évaluée en fonction de différents critères, allant des modèles les plus complexes qui prennent en considération les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée. (SUAIS M.F et al 1990).



On peut classer ces méthodes de vulnérabilité en trois catégories principales :

- A. Méthodes statistiques :** elles reposent sur une variable qui varie en fonction de la quantité de contaminant présent ou de la probabilité de contamination. Ces approches incluent des informations sur la répartition des contaminants dans la zone d'étude et offrent des informations sur les probabilités de contamination dans cette zone. (SUAIS M.F et al 1990).
- B. Modèles de simulation :** ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert de contaminants. (Schnebelen.2002)
- C. Méthodes de cartographies à index :** elles se basent sur la superposition de cartes de divers paramètres caractérisant l'aquifère (critères de vulnérabilité), en donnant une note numérique à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen des outils de traitement multicritères et sous SIG. La représentation du degré de vulnérabilité en classes (intervalles de valeurs) permet une visualisation rapide concernant une zone donnée, et la comparaison aisée de la vulnérabilité de différentes zones.

#### **I.10.5. Exemples des méthodes pour évaluer la vulnérabilité à la pollution :**

##### **1) Méthode DRASTIC**

Développée en 1987 aux Etats-Unis par la NWWA (Natural Water Well Association), c'est une méthode, standardisée, d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant et qui prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines (Djoudar ,2003).

La méthode DRASTIC est basée sur l'estimation de 7 paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère ; **[D]** : Profondeur de la surface de la nappe (Depth). **[R]** : Recharge nette. **[A]** : Nature lithologique de l'Aquifère. **[S]** : Sol (granulométrie et faciès).

**[T]** : Topographie des terrains. **[I]** : Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur).

**[C]** : Conductivité hydraulique (perméabilité).

$$\text{Inice DRASTIC} = (\mathbf{Dc} \times \mathbf{Dp}) + (\mathbf{Rc} \times \mathbf{Rp}) + (\mathbf{Ac} \times \mathbf{Ap}) + (\mathbf{Sc} \times \mathbf{Sp}) + (\mathbf{Tc} \times \mathbf{Tp}) + (\mathbf{Ic} \times \mathbf{Ip}) + (\mathbf{Cc} \times \mathbf{Cp})$$

P = le poids du paramètre c'est un facteur de pondération (allant de 1 à 5).

C = côte du paramètre considéré.

##### **2) Méthode PRAST**

La méthodologie PRAST est une version simplifiée de la méthode DRASTIC. Elle consiste en un remplacement des trois paramètres (D), (C) et (I), difficile à acquérir ou à quantifier, par un seul paramètre qui est le pouvoir épurateur vertical (P) définie par Rehse (1977) in (Djoudar ,2003).

Le pouvoir épurateur du sol et celui de la zone non saturée, sont importants pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes. Ils jouent un rôle particulièrement déterminant vis-à-vis des problèmes d'assainissement individuel, de pollution par les décharges et les épandages. L'indice PRAST général correspond à la somme modérée de cinq indices partiels relatifs aux cinq paramètres PRAST. (Djoudar et Khelfi. 2019).

$$\text{Indice PRAST} = (\text{Pc.Pp}) + (\text{Rc.Rp}) + (\text{Ac.Ap}) + (\text{Sc.Sp}) + (\text{Tc.Tp})$$

C = côte du paramètre considéré ; P = poids relatif du paramètre considéré.

### 3) Méthode GALDIT

C'est la méthode que nous utiliserons pour le sujet de notre étude, La méthode GALDIT a été développée pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN" (Michaud et al. 2003) et dont l'objectif était de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine (Chachadi et Labo-Ferreira, 2005). Cette méthode se base sur les caractéristiques hydrogéologiques (profondeur du plan d'eau, épaisseur de l'aquifère), morphologiques (distance à la côte), hydrodynamiques (conductivité hydraulique) et hydrochimiques (impact des intrusions marines). Le processus de calcul de l'indice GALDIT prend en considération le poids relatif assigné à chaque paramètre. Il varie de 1 à 4, La variabilité des conditions hydrogéologiques et l'effet cumulé des deux aspects. La multiplication des paramètres du modèle permet de définir l'indice GALDIT de vulnérabilité, GALDIT permet de cartographie la vulnérabilité des aquifères côtières, offrant aussi une évaluation précise des risques potentiels d'intrusion saline dans ces aquifères, Nous verrons en détail les paramètres et les classes de cette méthode dans le chapitre III.

### Conclusion

Les eaux souterraines représentent généralement une excellente source d'approvisionnement en eau potable, les aquifères littoraux sont donc en contact avec l'eau salée d'origine marine, ces derniers sont séparés par la différence de densité entre l'eau douce et l'eau salé, ce qui les rend vulnérable au phénomène de l'intrusion marine, on utilise des méthodes de protection des eaux souterraines, basées sur les cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution. À l'aide de la géostatistique et les systèmes d'information géographique, nous appliquons les méthodes d'estimation pour l'objectif de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine.

**Introduction :**

La description de la situation de la zone d'étude, nous permettra d'assurer une bonne prise en charge, et de mener à bien notre travail. Pour cela, nous nous intéressons aux aspects suivants : l'aspect géographique et géomorphologique des bassins versants, le réseau hydrographie, le climat, les ressources en eaux, la géologie et l'hydrogéologie de la Mitidja Est.

**II.1. Situation géographique et administrative**

La Mitidja est la plus grande plaine du sub-littoral d'Algérie, elle s'étend sur une longueur de 100 km et une largeur allant de 5 à 20 km. Sa superficie totale est voisine de 140 000ha.

La plaine de Mitidja est divisée en deux :

- La Mitidja de l'Est ou basse Mitidja, qui est la zone qui fait l'objet de notre étude.
- La Mitidja de l'ouest ou haute Mitidja.

**La Mitidja Orientale**

Située au Sud-est de la ville d'Alger selon une orientation NE-SW, la plaine de Mitidja-Est couvre de 500 Km<sup>2</sup>. Elle s'étale de l'Oued Réghaïa à l'Est jusqu'à l'Oued El Harrach à l'Ouest et repose entre les collines du Sahel au Nord et le bloc montagneux atlasique au Sud.

Du point de vue topographique, Au centre de la plaine, l'altitude est de l'ordre de 30 m.

Du point de vue administratif, la Mitidja orientale englobe trois Wilayas : Alger à l'Ouest, Boumerdes à l'Est et Blida au Sud-ouest.

**II.2. Les unités Géomorphologiques**

La plaine de la Mitidja orientale présente une grande uniformité géomorphologique. La nature subsidence de cette unité est à l'origine de ce phénomène, on peut définir les unités géomorphologiques suivantes :

- Le Sahel est une structure plissée orientée est-ouest, d'altitude maximale 250 mètres à l'ouest d'Alger et 60 mètres au nord de Reghaïa, qui s'étend tout le long du littoral algérois, à l'exception d'une section érodée en bordure de la baie d'Alger.
- La plaine de la Mitidja.
- L'Atlas Blidéen est un massif montagneux atteignant 1600 mètres d'altitude, orienté NE-SW, bordant la plaine de la Mitidja au sud. Il présente des pentes abruptes et il est la source de plusieurs cours d'eau qui sillonnent la Mitidja.

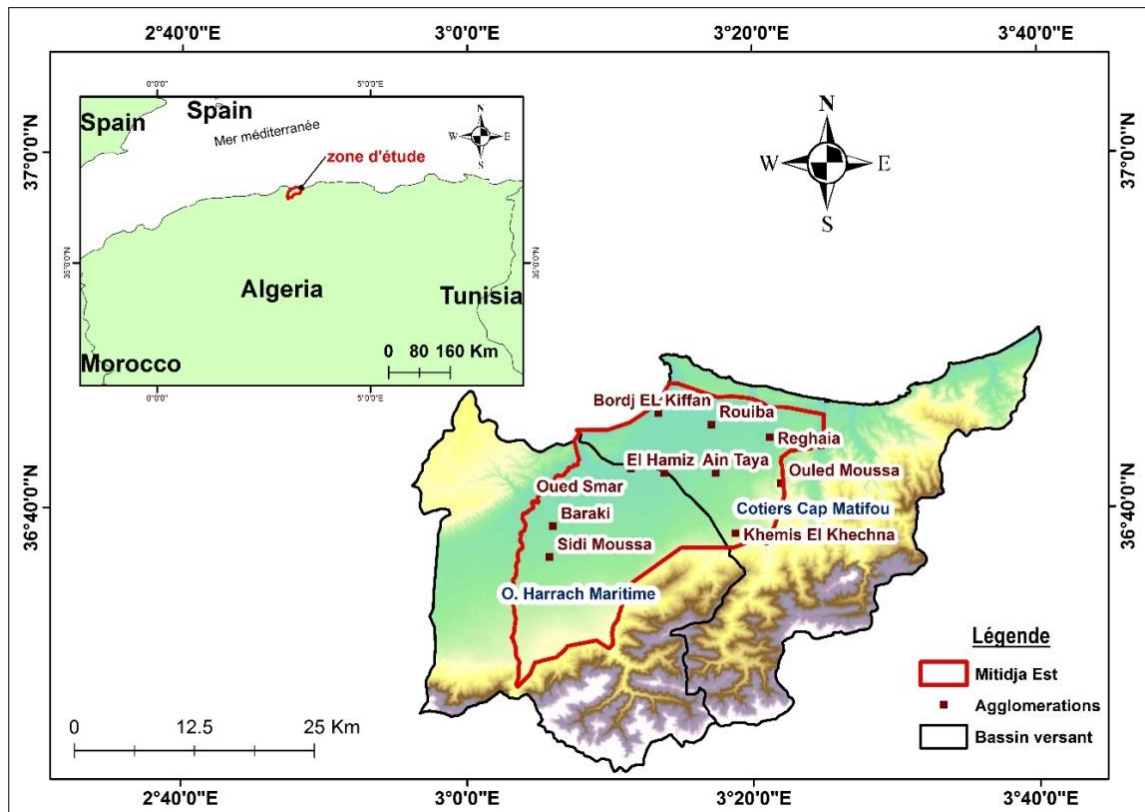


Figure II.1 : Situation géographique de la Mitidja orientale.

### II.3. Caractéristiques des bassins versants

#### II.3.1 Caractéristiques morphométriques des bassins versants

La Mitidja Orientale fait partie du grand bassin versant des Côtiers Algérois codés (02) par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H). Il regroupe deux sous bassins versant Oued

El-Harrach Maritime codé 02-14 et Côtier Cap Matifou codé 02-06 (figure II.2).

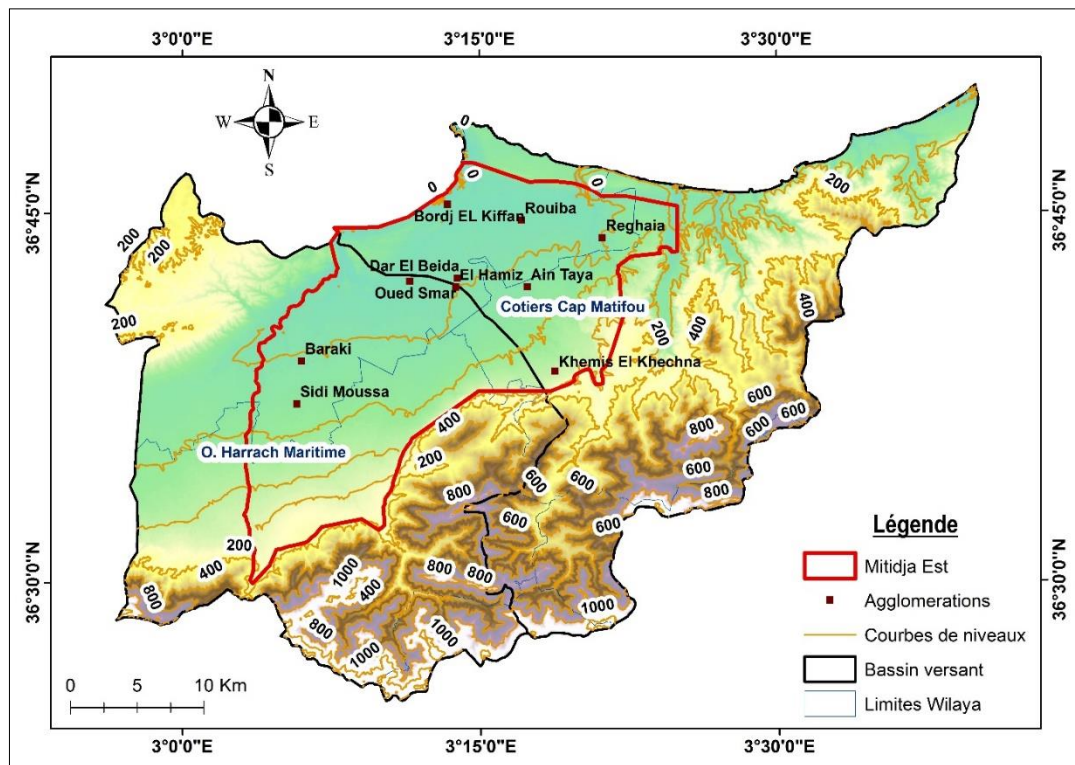


Figure II.2 : Carte topographique de la Mitidja Est.

Tableau II.1 : Caractéristiques des sous bassins versants.

Caractéristiques	BV	O.Harrach Maritime	Côtiers Cap Matifou
A(Km <sup>2</sup> )	Côtiers Algérois	846.788	785.336
P(Km)		151.38	190.59
Kc		1,457	1.904
Forme		Allongé	Allongé
L (Km)		62.04	86.18
I (Km)		13.65	9.11
Altitude maximale (m)		1258	1121
Altitude minimale (m)		0	0
Altitude moyenne (m)		240	227
Pente moyenne BV I <sub>m</sub> (%)		15.3	17.5

### II.3.2 Description des sous bassins

- **Le SBV d'Oued Harrach maritime**, se situe à l'ouest de notre zone d'étude, il représente 6.87% (845,79 Km<sup>2</sup>) de la superficie totale du bassin Côtiers Algérois. Sa forme est allongée vue (Kc=1.457). Drainé par Oued El Harrach qui a une longueur de (45,2 Km). Les altitudes

maximales et minimales sont respectivement (1258- 0 m) avec une moyenne d'altitude de 240 m, la pente moyenne est modérée, elle est de l'ordre de 15,3 %.

- **Le SBV Côtiers Cap Matifou**, se situe à l'est de notre zone d'étude, il représente 6.37% (785,34 Km<sup>2</sup>) de la superficie totale du bassin Côtiers Algérois. Sa forme est allongée avec un (Kc=1.904). Ce SBV est drainé par Oued El Hamiz qui a une longueur de (49.802 Km), avec des altitudes maximales et minimales qui sont respectivement (1121- 0 m) et une moyenne d'altitude de 227 m, sa pente moyenne est modérée, elle est de l'ordre de 17,5 %.

#### II.4. Hydrographie

La plaine de la Mitidja orientale est d'une superficie de 510 km<sup>2</sup>. Elle fait partie des deux sous bassins principaux qui sont :

- Le bassin de l'Oued El Harrach d'une superficie de 1236,28 km<sup>2</sup>  
Avec un périmètre de 188,17 km.
- Le bassin de l'Oued El Hamiz. Il occupe une superficie de 283,21 km<sup>2</sup>  
Et se délimite par un périmètre est de 102,11 km, situé à l'Est de la plaine.
- Le bassin de Réghaïa est intégré dans le bassin du Hamiz vue sa faible superficie.

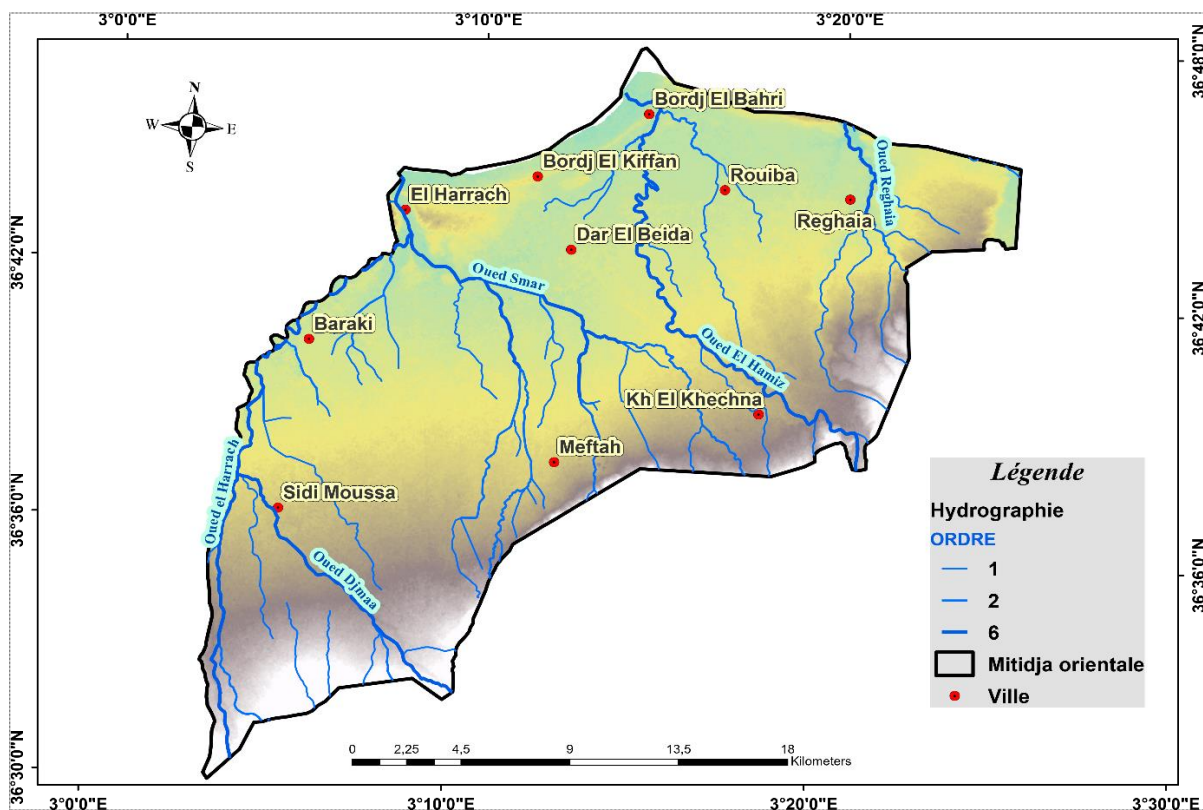


Figure II.3 : Réseau hydrographique de la Mitidja orientale.

Le réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja orientale est principalement représenté par trois oueds principaux : Oued El Harrach Oued Hamiz et Oued Réghaïa (Figure II.3) Ces derniers la traversent perpendiculairement selon des directions méridiennes, avec plusieurs plans d'eau naturels ou artificiels comme le lac Réghaïa et le barrage de Hamiz.

- Oued El Harrach : (45,2 km) il prend naissance dans les monts de Tablât. Cet oued est dévié Plusieurs fois. Actuellement il traverse la plaine du sud au nord pour s'infléchir vers le N.E au pied du sahel jusqu'à la cluse d'El Harrach.
- Oued El Hamiz : (49,8 km) dont les affluents sont l'oued Arbattache, l'oued sekhine. Cet oued qui Prend une direction N.O à partir de Fondouk jusqu'à Hamadi se redresse jusqu'au Sahel Pour se jeter dans la mer au sud de cap Matifou (Bordj El Bahri).
- Oued Réghaïa : (7,4 km) cet oued est considéré comme un oued secondaire.

### II.5. Contexte Climatologique :

Le climat de la Mitidja est méditerranéen, avec deux périodes distinctes : l'hiver frais et humide, et l'été chaud et sec, La plaine de la Mitidja Est compte de nombreux postes d'observations pluviométriques qui sont codés par l'(ANRH).

**Tableau II.2** : Stations pluviométriques de la Mitidja Est.

Code	Coordonnées Géographiques		Z (m)
	X	Y	
20607	529669.194	4056313.825	91
20611	520540.266	4063435.881	20
20614	525196.909	4065851.833	20
20627	526171.061	4055470.479	69
20629	529468.791	4056837.050	79
20632	531024.418	4066024.960	18
21401	512797.084	4049061.844	72
20403	514291.731	4046784.119	102
21409	513693.179	4063607.104	24
21434	513968.623	4046783.588	100
21443	512726.807	4062896.892	17

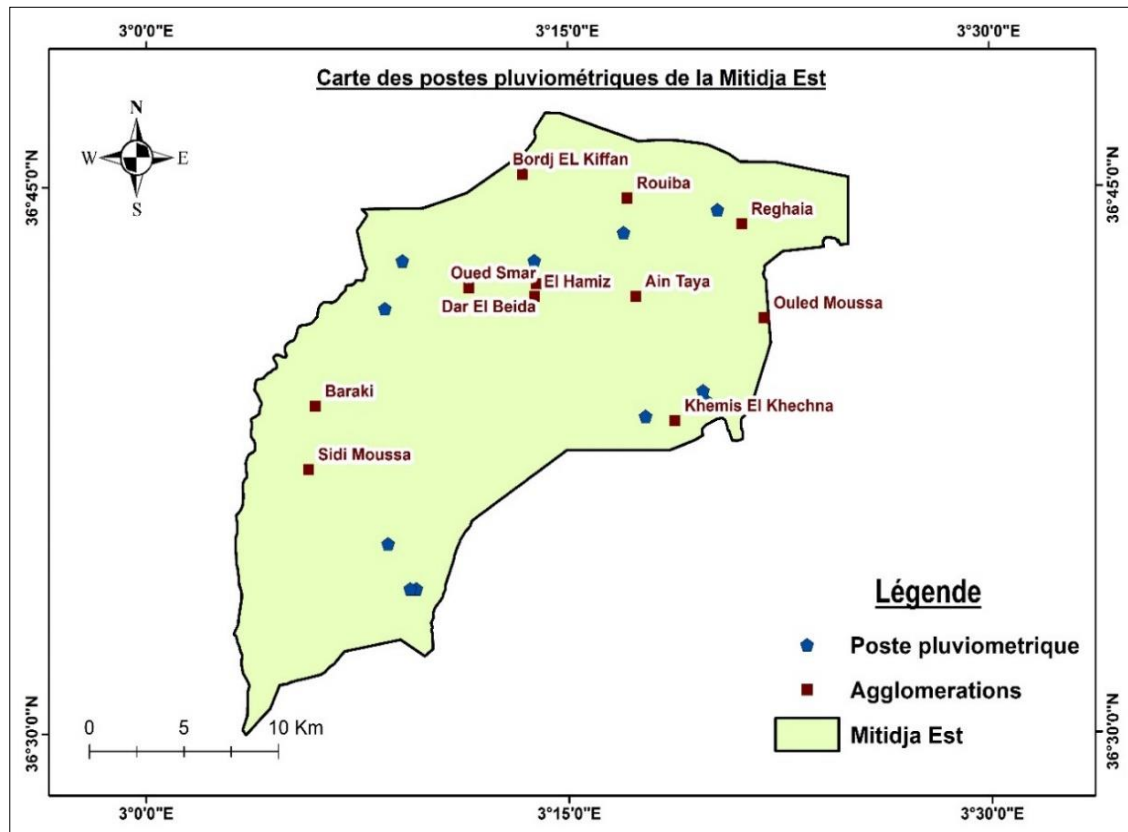


Figure II.4 : Carte des postes pluviométriques de la Mitidja Est.

### II.5.1 La pluviométrie

Afin de décrire les caractéristiques climatiques principales de la zone d'étude, nous nous appuyons sur les données disponibles, mesurées à trois stations réparties de manière plus ou moins homogène dans tous les sous-bassins versants de la plaine, sur une période de 30 ans (1985-2015).

➤ **Précipitations moyennes mensuelles :**

Tableau II.3 : Précipitations moyennes mensuelles de Mitidja Est (1985-2015), (ANRH).

	Sept	Oct	Nov	Dec	janv	fev	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout
<b>BARAKI</b>	30,1	50,1	98,2	93,7	80,4	72,8	55,2	54,7	34,1	9,5	4,6	7,1
<b>REGHAIA</b>	28,2	47,4	100,5	90	78,1	77,2	55,1	52,6	42,7	9,5	2,1	5,1
<b>HAMIZ</b>	32,5	57,9	102,7	103,9	93,5	94,5	72,6	75,4	51,1	9,5	2,4	5,6



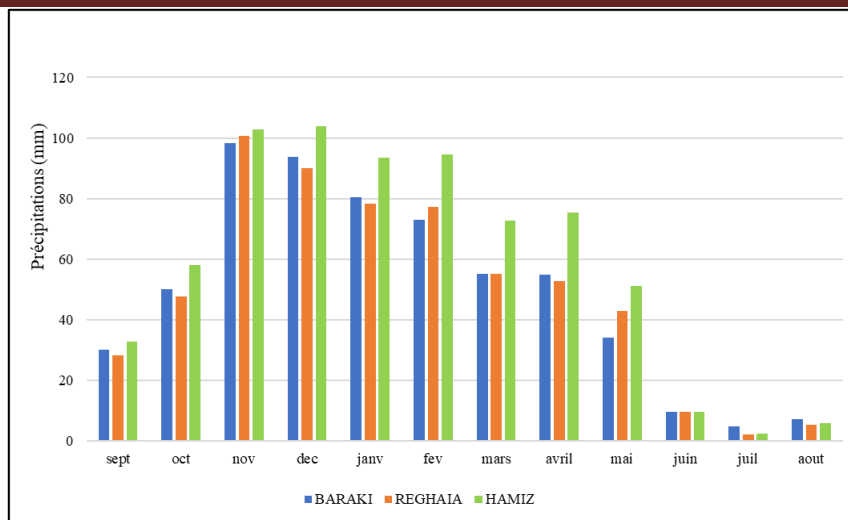


Figure II.5 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles, (1985-2015).

L’histogramme des précipitations mensuelles aux stations de Baraki, Hamiz barrage et Réghaïa, de 1985 à 2015, montrent deux périodes contrastées :

- La première, pluvieuse, s’étale d’octobre à avril, avec un maximum de 103,91 mm au mois de décembre pour la station de Hamiz barrage.
- La seconde, relativement sèche, s’étale de mai à septembre, avec un minimum de 2,01 mm au mois de juillet pour la station de Réghaïa.

Conformément à la variation des pluies en fonction de l’altitude, la station Hamiz barrage, reçoit une pluviométrie nettement supérieure (130m) à celles des stations de Baraki et de Réghaïa, situées à des altitudes moins élevées (20m et 25 m).

➤ **Précipitations annuelles :**

La pluviométrie moyenne annuelle : Baraki 599,7mm, Réghaïa 589,1mm, Hamiz 702,1mm.

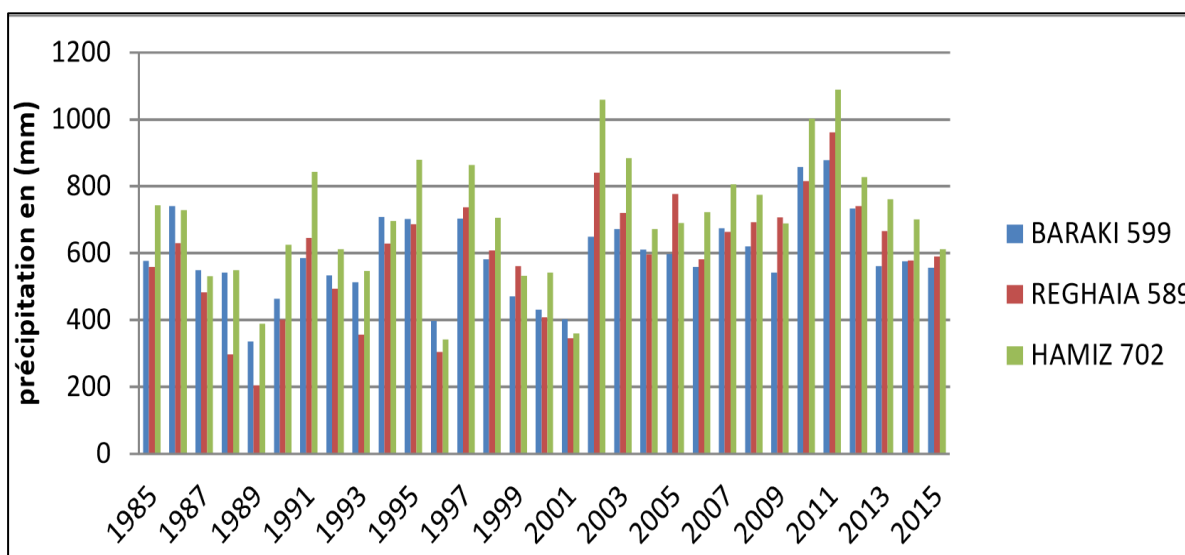


Figure II.6 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles (1985 – 2015).

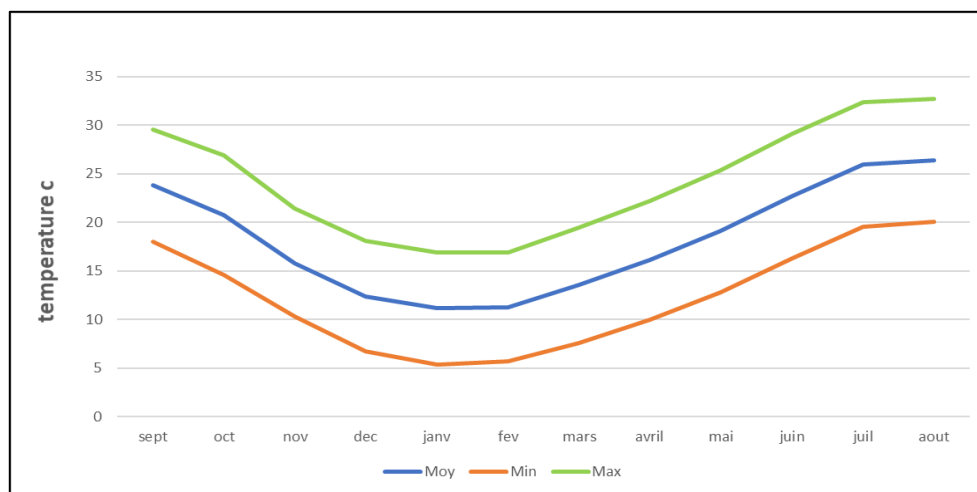
Dans l'ensemble, la répartition des précipitations dans les trois stations présente un régime pluviométrique similaire (fig. précéd.). Les différentes stations enregistrent une moyenne annuelle de pluviométrie d'environ 600 mm. La station de Hamiz barrage a enregistré une valeur maximale de 1099 mm sur la période 2011 - 2012. La station de Réghaïa enregistre une valeur minimale d'environ 203 mm en 1989/1990, étant la saison la moins pluvieuse de la période 1985 - 2015.

### II.5.2. Températures

Le tableau suivant montre les données relevées moyens mensuels des températures ont été enregistrés sur une période de 30 ans, (1985 à 2015), par la station de Dar el Beida.

**Tableau II.4 :** Variation de la température à la station de Dar El Beida (1985 à 2015), (ANRH).

	Sept	oct	nov	dec	janv	fev	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Aout	ANNUEL
<b>Max</b>	29,6	26,9	21,4	18,1	16,9	16,9	19,5	22,2	25,4	29,1	32,4	32,7	<b>24,3</b>
<b>Min</b>	18	14,6	10,3	6,7	5,4	5,7	7,6	10	12,8	16,3	19,6	20,1	<b>12,3</b>
<b>Moy</b>	23,8	20,8	15,8	12,4	11,2	11,3	13,6	16,1	19,1	22,7	26	26,4	<b>18,3</b>



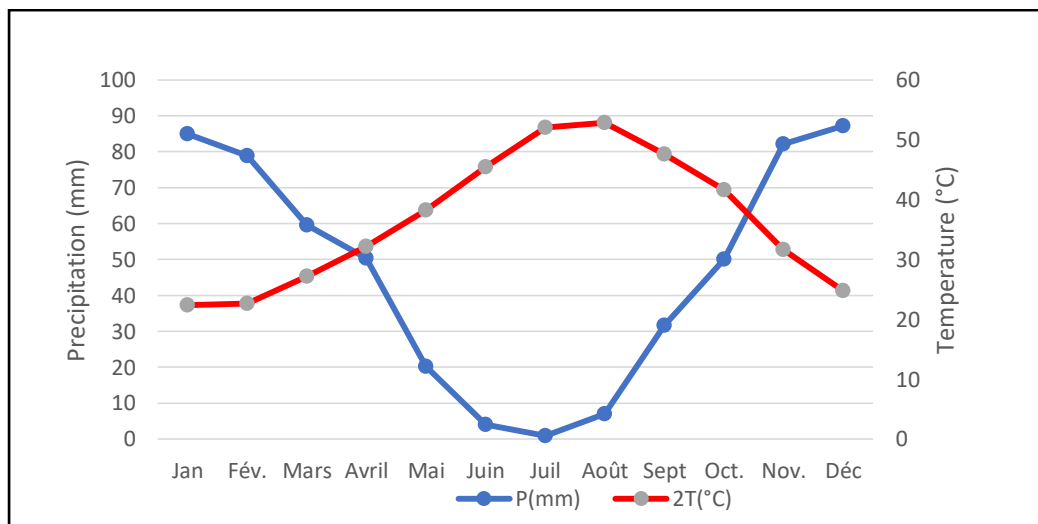
**Figure II.7 :** Variation des températures moyennes mensuelles la station de Dar El Beida (1985-2015).

La courbe de variation des températures moyennes mensuelles montre que, les faibles valeurs sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où on remarque que le mois le plus froid est le mois de janvier, avec une température de l'ordre de 11,2 °C. Par contre, les fortes valeurs caractérisent les mois de juin, juillet et août où on remarque que le mois le plus chaud est le mois d'août, avec une température de l'ordre de 26,4 °C.

**II.5.3 Diagramme ombrothermique**

**Tableau II.5 :** précipitations et température moyenne mensuelles à la station de Dar el Beida, période (1985-2015), (ANRH)

	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc
<b>P(mm)</b>	84,9	78,8	59,6	50,3	20,2	3,9	0,9	6,94	31,6	50,1	82,1	87,1
<b>T(°C)</b>	11,2	11,3	13,6	16,1	19,1	22,7	26	26,4	23,8	20,8	15,8	12,4
<b>2T(°C)</b>	22,4	22,6	27,2	32,2	38,2	45,4	52	52,8	47,6	41,6	31,6	24,8



**Figure II.8 :** courbe ombrothermique de station Dar El Beida (1985-2015).

A partir du diagramme Ombrothermique (figure II.8), on constate que l'année hydrologique de la zone d'étude est caractérisée par deux saisons bien distinctes :

- Une période humide qui s'étale du mois De Novembre jusqu'au mois de Mai, cette dernière se caractérise par une précipitation importante et une baisse de température.
- Une période sèche qui s'étend du mois Juin jusqu'au mois de septembre, elle se caractérise par l'augmentation de la température et la diminution de la précipitation.

**II.5.4 Indice d'aridité de Martonne « A »**

Cet indice s'exprime par la formule suivante :  $I \text{ (annuel)} = \frac{P}{(10 + T)}$

**Tableau II.7 :** Indice d'aridité (station du Hamiz).

Station	P (mm)	T(°C)	A
<b>Hamiz</b>	702,10	18,2	24,83

**Tableau II.6 :** Classification des indices de Martonne.

Indice	Type de climat
[0-5]	Hyper-aride
[5-10]	Aride
[10-20]	Semi-arid
[20-30]	Sub-humide
[30-60]	Humide
> 60	Hyper-humide

Selon cette classification et d'après le résultat de l'Indice d'aridité (A), notre région d'étude est caractérisée par un climat tempéré, subhumide.

## II.6. Ressources en eau de la Mitidja orientale :

Les principales ressources en eau superficielles exploitées actuellement dans la Mitidja Est sont constituées par les barrages suivants :

- ❖ Barrage de Keddara ;
- ❖ La digue de Reghaïa ;
- ❖ Barrage d'El Hamiz : Le barrage Hamiz est situé dans la commune de l'Arbatache, Khmis El Khechna, Wilaya de Boumerdes à 6 kms de Fondouk, 25 kms de la mer et 35 kms de la ville d'Alger. Il se situe dans le bassin versant de l'Oued Lekhal dans la vallée de l'oued Reghaïa et couvert une superficie de 220km<sup>2</sup> environ de terre riche et fertile. Ce barrage a une capacité de 15,53 millions de m<sup>3</sup> à la cote de la retenue normale. (ANBT. 2019).

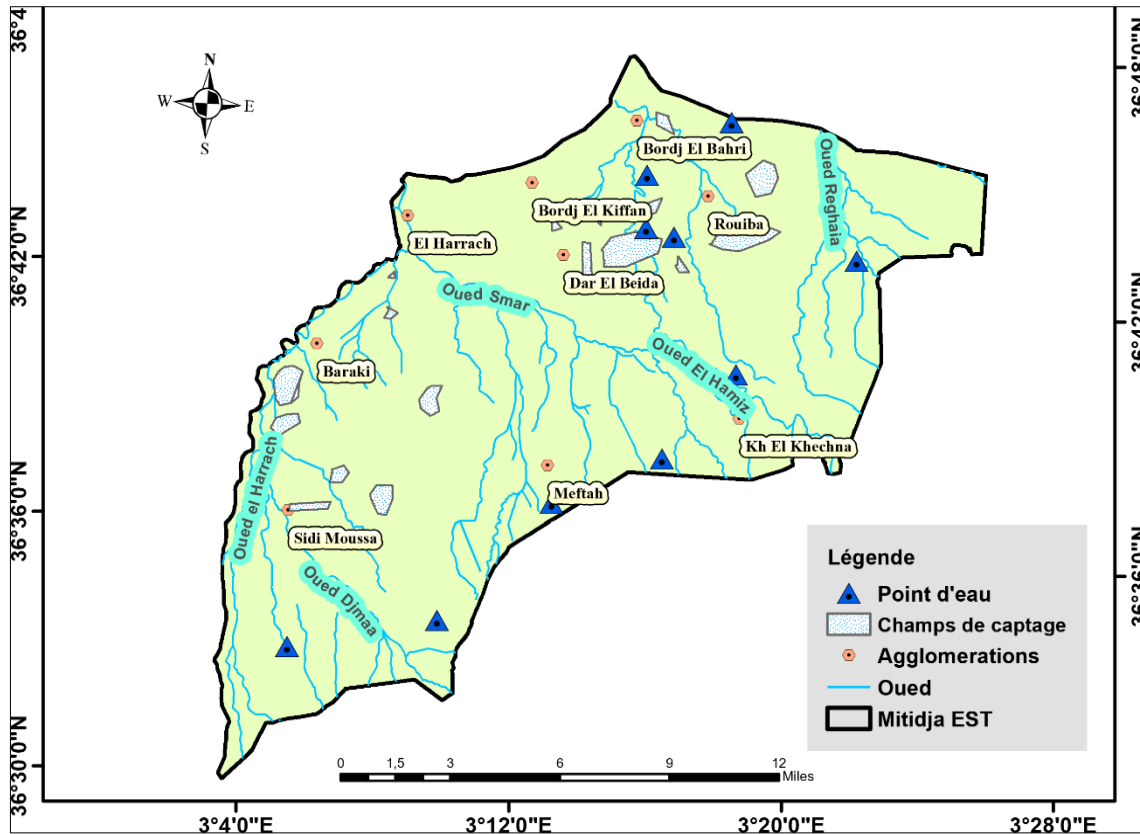


**Figure II.9 :** Barrage d'EL Hamiz (ANBT. 2019).

La mobilisation de la ressource en eau souterraine de la plaine de la Mitidja Est se fait par les principaux champs de captage : Baraki, Haouch Flit, Hamiz, Boureah, O.Adda, Haouch Bel Abess.

**Tableau II.8 : Points d'eau utilisés à notre étude (ANRH)**

Code	Point d'eau	X	Y	Z (m)
E007-4600	W042-688	553 650	374 620	48
E007-9644	W042-1000	534 770	361 500	103
E007-9647	W042-1003	541 270	363 070	102
E007-4598	W042-450	550 650	370 750	85
E007-9637	W042-439	545 950	368 500	88
E008-4212	W021-04212	550 550	380 450	19
E008-4211	W021-04211	549300	380 750	21
E008-4590	W021-417	558 620	379 920	34
E008-4583	W021-5	552 750	385 600	25
E008-4593	W021-890	549 200	383 070	13



**Figure II.10 : Carte des ressources en eau de la Mitidja Est.**

## II.7. Contexte géologique :

La plaine de la Mitidja est l'un des bassins néogènes de l'Algérie qui a fait l'objet de plusieurs études géologiques. Les plus connus sont essentiellement les travaux de Glangeaud et Aymé (1935) et Glangeaud (1932).

### Géologie de la plaine de Mitidja EST

#### 1. Miocène et roches plus anciennes :

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

- **Les formations plus anciennes** (rhyolites et andésites)
- **Le Miocène** : Il est représenté par des marnes du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires (L. Glangeaud, Aymé, 1952).

#### 2. Dépôts pliocènes :

- **Le Plaisancien** : Formé principalement de marnes bleues et localement de bancs de grès faiblement glauconieux (L. Glangeaud, Aymé, 1952).
- **L'Astien** : L'Astien montre une lithologie variée composée de calcaires ou de calcaires sableux, grès, argiles calcaires de couleur jaune et des calcaires à faciès récifal ou subrécifal.

**3. Villafranchien (Calabriens)** : (la formation d'El Harrach) Cette formation est constituée par une séquence relativement uniforme d'argiles plastiques jaunes ou grises localement, légèrement caillouteuses, contenant un petit nombre de lentilles de graviers de 2 à 6 m d'épaisseur, la formation d'El Harrach, en raison de la présence de graviers, a été confondue avec les formations alluviales sus-jacentes qui sont essentiellement caillouteuses. (Binnie & Partners .1981).

**4. Soltanien – Tensiftien (Tyrrhénien)** : (formation de Mitidja), Cette formation est composée principalement d'alluvions grossières (graviers, galets, limons et argiles en quantités variables).

**5. Rharbien (Flandrien)** : Il est représenté par le « dépôts récents » Ce sont des sables meubles éoliens ou des sables dunaires, des graviers et des couches fossilifères consolidées ou cimentées.

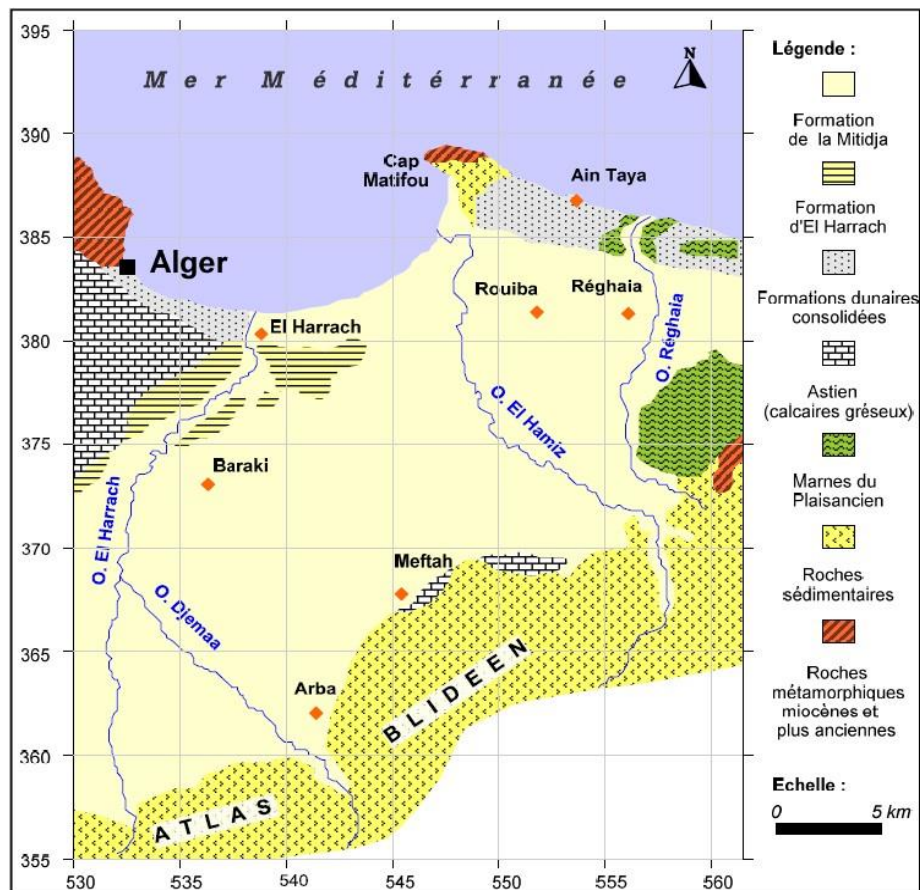


Figure II.11 : Carte géologique de la Mitidja-Est (MacDonald et Partners, 1983)  
In (Djouidar et Khelfi. 2019).

## II.8. Contexte hydrogéologique

Mitidja est une zone de subsidence continue. Cette dernière a donné naissance à une sédimentation active dont les éléments proviennent des reliefs de l'Atlas Blidéen. A la fin du Pliocène et au Quaternaire, deux réservoirs aquifères se sont individualisés. Il s'agit de :

- L'Astien formé par des calcaires et grès d'origine continentale.
- La formation quaternaire composée principalement d'alluvions grossières (graviers, galets, limons et argiles en quantités variables).

Ces deux réservoirs sont séparés dans toute la plaine par les marnes jaunes semipermeables de la formation d'El Harrach (Villafranchien) sauf au niveau de la poche de Rouiba où les deux aquifères

sont en contact. Ces deux aquifères reposent sur un substratum imperméable, généralement constitué par les marnes grises et bleues du Plaisancien. (Djoudar et Khelfi. 2019).

### **II.8.1 L'aquifère de l'Astien :**

Ce terrain argilo-gréseux-calcaire est constitué de cet aquifère qui s'étend sur toute la plaine. Il s'étend de 100 à 130 mètres d'épaisseur et se trouve enfoui à 250 ou 300 mètres. Dans les collines du Sahel et parfois dans les contreforts de l'Atlas (région de Meftah), Cet aquifère restreint se trouve entre les argiles de Plaisance et du Miocène ainsi que l'argile jaune villafranchienne, où la première constitue la base imperméable tandis que la seconde constitue le toit semi-séparé. La principale source d'alimentation d'Astien est l'infiltration des eaux pluviales dans les régions exposées et le drainage des limons de la Mitidja à travers les argiles semi-perméables d'El Harrach (Drouiche A., 2012).

### **II.8.2 L'aquifère quaternaire :**

La majorité des formations de cet aquifère sont constituées de graviers et de galets, qui se mêlent à des limons et des argiles, et couvrent l'ensemble de la plaine. Les alluvions ont un âge quaternaire (soltano-tensifien inférieur) et sont situées sur les marnes jaunes d'El Harrach. L'aquifère a une épaisseur moyenne d'environ 100 à 150 mètres sur une grande partie de la plaine. Cet aquifère est ouvert sur toute sa superficie, à l'exception du bas Mazafran où il se retrouve submergé par les limons d'âge Rhabien. Il s'alimente essentiellement par, L'infiltration de précipitation sur toute l'étendue, L'infiltration à travers des cours d'eau particulièrement dans leurs cours amont. (Binnie et al., 1983).

### **II.8.3 Les caractéristiques hydrodynamiques :**

La nappe alluviale est libre et présente de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

Dans la partie orientale de la plaine (Hamiz, Rouiba), l'aquifère se trouve en contact direct avec l'Astien. (Djoudar et Khelfi. 2019).

La transmissivité de l'aquifère est comprise entre  $1.10^{-4}$  et  $2.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s. (SOGREAH, 2008). Souvent, elles atteignent des valeurs très importantes, surtout dans la partie Est, où les grands oueds déposent les matériaux grossiers relativement résistants. Alors pour une meilleure connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère étudié, les travaux de recherche de (Toubal, 1998), ont permis de mettre en exergue deux zones d'intérêt hydrogéologique :

- La première zone : se localise au niveau du Hamiz avec des transmissivités qui varient entre  $1,7.10^{-2}$  et  $2,3 .10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.



- La deuxième zone : se situe au niveau du bassin d'El Harrach avec des transmissivités qui varient entre  $0,4.10^{-2}$  et  $3.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

## II.9. Aspects socio-économiques de la Mitidja

L'eau joue un rôle essentiel dans le cycle économique et le développement du pays. Afin de répondre aux besoins en eau pour diverses utilisations, la nappe de la Mitidja-est est constamment sollicitée en raison de la croissance constante de la population et des centres urbains. Au fil des dernières décennies, cette demande croissante a entraîné une diminution significative du niveau des eaux souterraines dans la Mitidja, notamment à Larbaa, les Eucalyptus et El Hamiz. (Drouiche A.,2012).

### II.9.1 Population

La plaine traverse successivement les wilayas de Blida, d'Alger et de Boumerdès, d'ouest en est. Plusieurs villes se trouvent sur les rives de la Mitidja. La majorité de ces centres urbains ont vu le jour pendant la période de colonisation française afin de réguler les exploitations agricoles et de garantir les biens et services nécessaires.

### II.9.2 Végétation et agriculture

Depuis la période coloniale à ce jour, la Mitidja-est est connue par ses activités agricoles, sous un climat méditerranéen, un relief relativement plat et un sol relativement homogène. La Mitidja-est possède une plaine fertile très convenable au développement de l'agriculture, on trouve les cultures céréalières (orge et blé), les cultures maraichères, les agrumes, et l'arboriculture, auxquelles s'ajoute l'élevage ovin, bovin, caprin, la cuniculture, l'apiculture, etc. Ces activités ont favorisé l'augmentation de la demande en eau dans la région.

### II.9.3 Industrie

La Mitidja orientale dispose d'un tissu industriel relativement bien développé sous forme de zones d'activités, La zone industrielle Rouïba-Reghaïa est l'une des plus importants pôles industriels de l'Algérie, située à l'est d'Alger, abrite 79 entreprises sur une superficie de 784 hectares. Parmi ces entreprises, 163 sont des sociétés privées implantées dans cette zone, occupant 156 hectares. Elles opèrent principalement dans les secteurs des industries pharmaceutiques, chimiques et agroalimentaires.

### II.9.4 Couvert végétal

Elle a un impact significatif sur le fonctionnement hydrologique du bassin. Le ruissellement superficiel est influencé de manière mécanique, en plus d'influencer l'évapotranspiration et donc le

bilan hydrologique du bassin. En raison de sa topographie et de sa fertilité, la plaine de la Mitidja est une zone agricole extrêmement productive. L'arboriculture et les cultures maraîchères sont les activités agricoles les plus courantes. La végétation, en tant que facteur de croissance des enfants, a été quasiment complètement détruite par une exploitation intensive, à tel point qu'elle n'est plus présente aujourd'hui. Toutefois, les vestiges de cette végétation naturelle se trouvent uniquement dans les forêts de Reghaia et le bois de Boulogne au Sud de la ville de l'Arbaa. La majorité de cette végétation est composée d'une combinaison de chêne-vert et de vastes bosquets de maquis méditerranéen. La présence de cette végétation naturelle jouait un rôle essentiel dans la transformation des sols.

**Conclusion :**

La Mitidja orientale, Située au Sud-est de la ville d'Alger selon une orientation NE-SW, la plaine de Mitidja-Est couvre plus de 500 Km<sup>2</sup>, est incluse dans le bassin versant côtier algérois codé (02) dans le répertoire de ANRH. Le réseau hydrographique de la plaine de la Mitidja orientale est principalement représenté par trois oueds principaux, Oued El Harrach Oued Hamiz et Oued Réghaïa.

Le climat de la Mitidja-EST est méditerranéen, avec deux périodes distinctes : l'hiver frais et humide, et l'été chaud et sec. Elle est caractérisée par une température modérée, Les données pluviométriques sont recueillies au niveau de 03 stations réparties de façon plus ou moins homogène sur l'ensemble des sous bassins versants de la plaine. Les différentes stations enregistrent une moyenne annuelle de pluviométrie d'environ 600 mm.

Les principales ressources en eau superficielles exploitées actuellement dans la Mitidja Est sont constituées par les barrages (le barrage d'El Hamiz, le barrage de Keddara, la digue de Reghaia.) et pour les ressources en eau souterraine de la plaine de la Mitidja Est se fait par les principaux champs de captage : Baraki, Haouch Flit, Hamiz, Boueah, O.Adda, Haouch Bel Abess.

La Mitidja est une zone de subsidence continue. Cette dernière a donné naissance à une sédimentation active dont les éléments proviennent des reliefs de l'Atlas Blidéen. Les principaux évènements géologiques, ont contribué à la formation de deux réservoirs aquifères principaux ; L'Astien, formé par des calcaires et grès d'origine continentale. Et Les alluvions grossières du quaternaire (graviers, galets, limons et argiles en quantités variables).

## Introduction

Après avoir présenté notre zone d'étude et décrit les fondements mathématiques de l'approche géostatistique et les méthodes d'interpolation spatiale.

Dans ce chapitre, nous présentons l'utilisation de la méthode GALDIT pour évaluer la vulnérabilité des réseaux souterrains face à l'intrusion marine. Elle est développée par Chachadi et Lobo Ferreira en 2001 et spécifique pour les aquifères côtiers, Le calcul de l'indice IG est basé sur six paramètres: le type d'aquifère, la conductivité hydraulique, la profondeur de la nappe, la distance par rapport au rivage, l'impact de l'intrusion saline ( $Cl^-/CO_3^{2-}$ ) et l'épaisseur de la nappe phréatique. Cet indice est la somme de produit de tous les paramètres en déterminant le rôle relatif de chaque paramètre.

### III.1 Méthode de GALDIT

#### III.1.1. Généralité sur la méthode de GALDIT

GALDIT est une méthodologie d'indexation de vulnérabilité qui utilise des intervalles, des classes et des poids développés comme un outil préliminaire de prise de décision pour prédire les eaux souterraines sujettes à l'intrusion d'eau de mer, est un système de classement numérique pour évaluer le potentiel d'intrusion de l'eau de mer dans les milieux hydrogéologiques (chaque environnement hydrogéologique).

Elle a été initialement développée par (Chachadi et labo – Ferreira, 2001) dans le cadre du projet Euro-indien COASTIN (programme Inco-DEV du 4<sup>ème</sup> PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de GOA en Inde et d'Algarve au Portugal. (Zaarour, 2017). (Djoudar et Khelfi. 2019).

#### III.1.2. Paramètres de GALDIT

GALDIT est une approche de cartographie à index simple d'utilisation, L'indice de GALDIT représente des paramètres mesurables pour lesquels des données sont généralement disponibles.

La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion marine potentielle :

- G** : Type d'aquifère ;
- A** : Conductivité hydraulique de la couche aquifère ;
- L** : Profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer ;
- D** : Distance à la côte ;
- I** : Impact de l'intrusion d'eau de mer ;

**T** : Épaisseur de la couche aquifère.

L'acronyme **GALDIT** est formé à partir de lettres des six paramètres pour faciliter la référence. Ces paramètres, combinés, comprennent les exigences de base nécessaires pour évaluer le potentiel général d'intrusion de l'eau de mer de chaque environnement hydrogéologique (Labo– Ferreira et al., 2005). (Djoudar et Khelfi. 2019).

### III.1.3. Indice de GALDIT

Le système contient deux critères importants : les poids, les rangs :

- **Pondération** : un poids est attribué à chacun des six paramètres en considération de son importance relative par rapport à l'intrusion saline. Un poids allant typiquement de 1 (influence faible moindre) à 4 (grande influence).
- **Notation (ou rang)** : une valeur de 2,5 à 10 est attribuée à chaque paramètre en fonction des attribuées (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande) par exemple les valeurs attribuées sont obtenues à partir de tables de correspondance entre les caractéristiques hydrogéologiques locales et la valeur du paramètre. (Nadjib, 2014). (Djoudar et Khelfi. 2019).

Le calcul de l'indice GALDIT est basé sur six paramètres, Il est défini par la formule suivante :

$$\text{Indice GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 P_i R_i}{\sum_{i=1}^6 P_i}$$

Avec :

$P_i$  : est le poids à accorder (1 à 4) à chaque paramètre  $i$  ;

$R_i$  : est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10).

**Tableau III.1** : Poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi et al, 2005) in (Djoudar et Khelfi, 2019).

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
Profondeur de 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 (m)	2	<5	5 - 7.5	7.5 - 10	>10

#### III.1.4. Classification des aquifères :

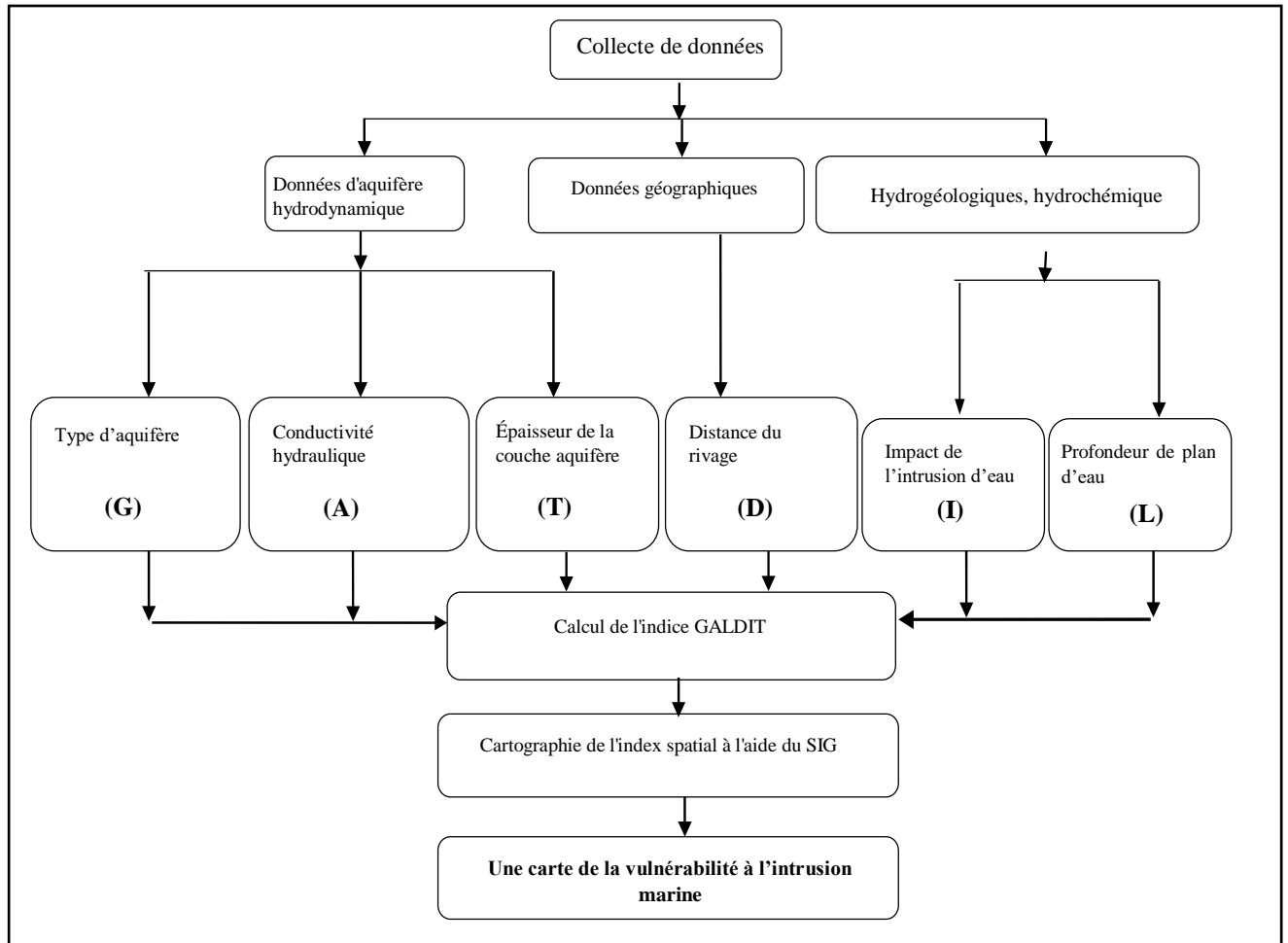
La classification des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion marine est déterminée par un indice de vulnérabilité final correspondant à la somme pondérée et normée des notes de rang attribuées aux six paramètres (**Indice-GALDIT**), Pour raisons de lisibilité de la carte les résultats sont classés selon les 3 classes principales proposé par (Chachadi et al, 2005).

**Tableau III.2** : Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005)

Classe du vulnérabilité	Indice GALDIT
Vulnérabilité forte	> 7.5
Vulnérabilité moyenne	5 - 7.5
Vulnérabilité faible	< 5

**III.1.5. Carte de l'indice de vulnérabilité GALDIT :**

Les valeurs des différents paramètres pris en considération sont intégrées dans un SIG (système d'information géographique) qui permet de spatialiser les différentes informations sous forme de couches. La superposition des couches à l'aide du SIG permet de produire une carte de la vulnérabilité à l'intrusion marine.



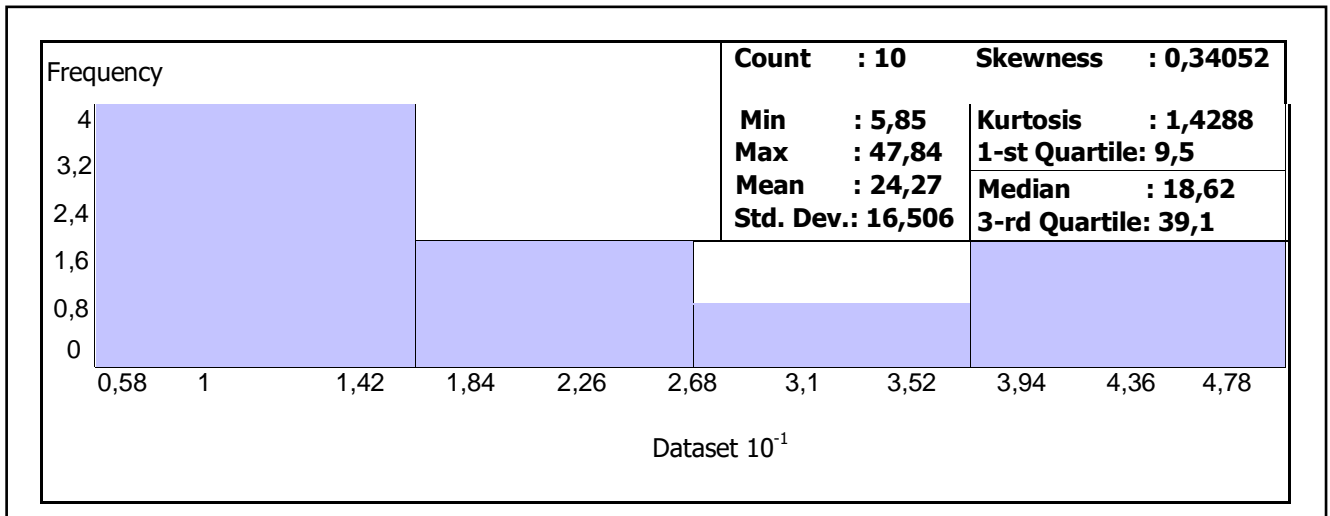
**Figure III.1 :** Etapes pour produire une carte de la vulnérabilité à l'intrusion marine.

**III.2. Logiciels utilisés**

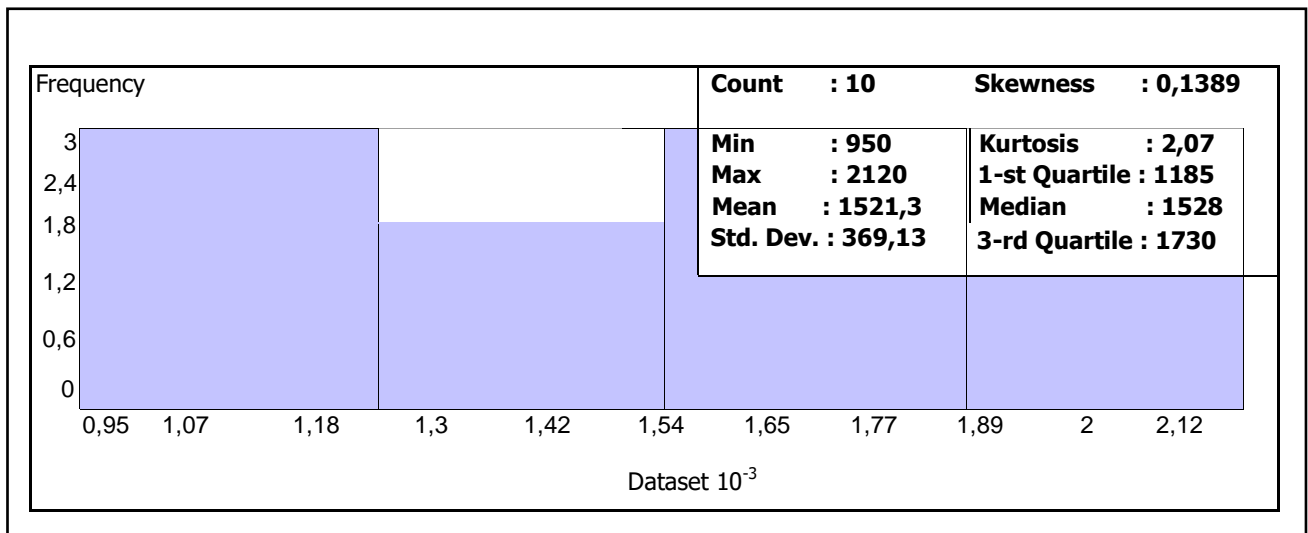
Les logiciels utilisés pour étudier la vulnérabilité de la plaine de Mitidja EST ont été ArcGis version 10.4. Les applications intégrées à ArcGIS Desktop sont ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. Ces trois applications permettent d'accomplir toutes les tâches SIG, de la plus basique à la plus complexe.

**III.3. Paramètres statistiques période basse eau (histogrammes)**

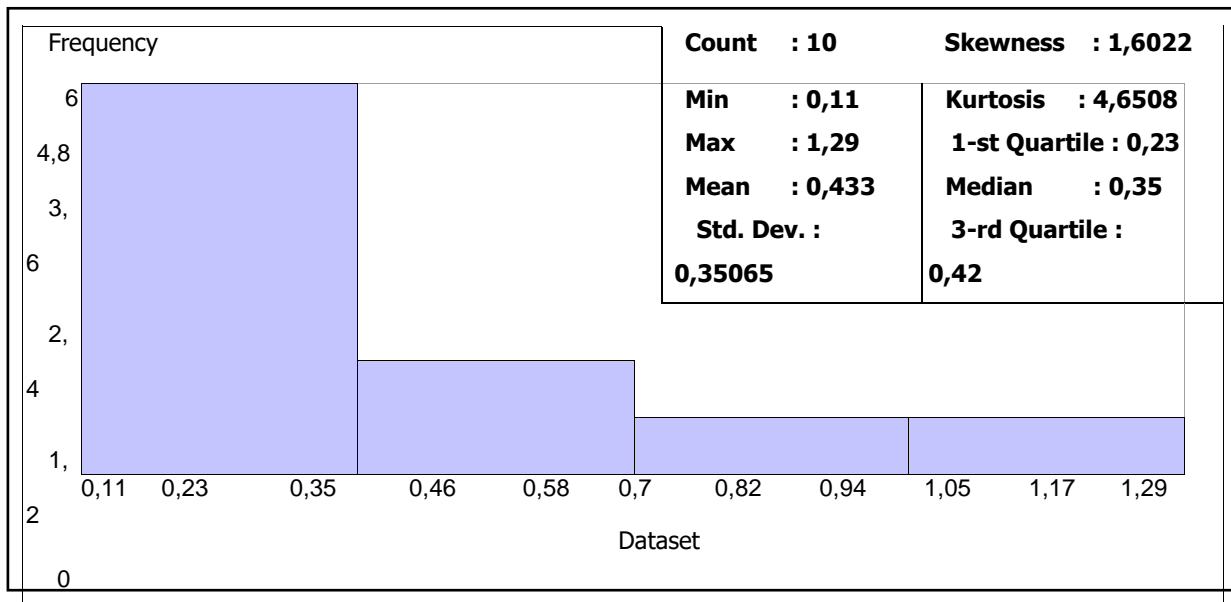
L’histogramme pour représenter la distribution de la variable et mettre en évidence leur caractéristiques statistiques.



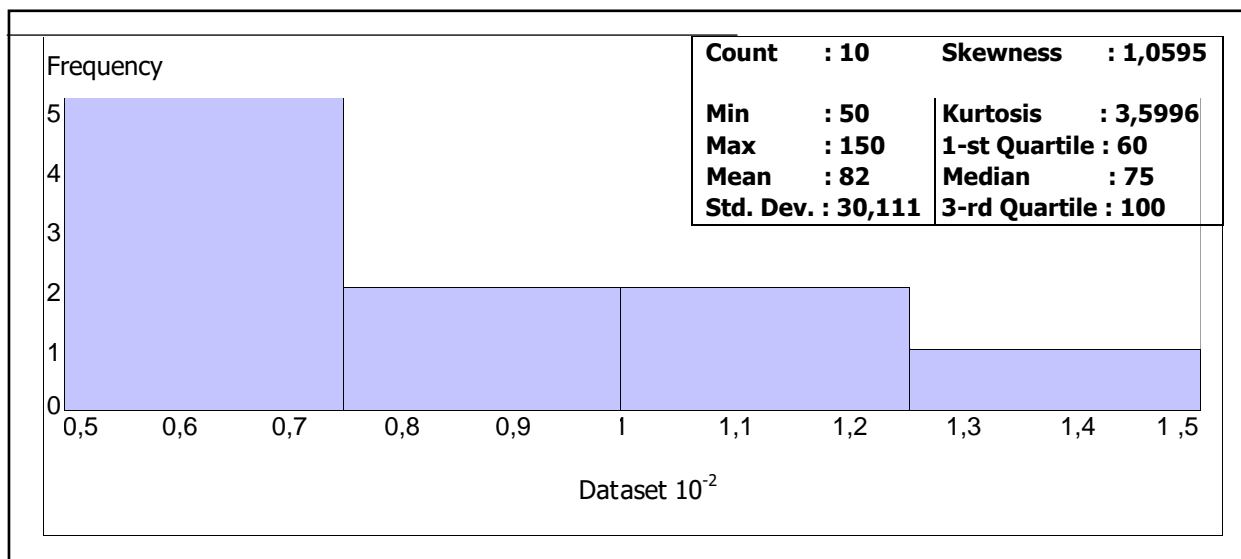
**Figure III.2** : Histogramme des profondeurs du plan d’eau (période BE, année 2019).



**Figure III.3** : Histogramme de la conductivité hydraulique (periode BE, année 2019).



**Figure III.4** : Histogramme de l’impact de l’intrusion marine periode BE (année 2019).



**Figure III.5** : Histogramme de l’épaisseur de la couche d’aquifère période BE (année 2019).

Le nombre de points d’eau utilisé pour construire ces histogrammes est de 10 points d’eau pour la période des basses eaux (année 2019), tous les histogrammes montrent la distribution de fréquence (4 classes) pour un ensemble de données.

Pour la Profondeur du plan d’eau, La valeur minimale (5,85 m) et maximale (47,84 m) dont la moyenne est de l’ordre de 24.27 m. et pour la conductivité la valeur minimale (950  $\mu$ /cm) et



maximale (2120  $\mu\text{/cm}$ ) dont la moyenne est de l'ordre de 1521,30  $\mu\text{/cm}$ . Les distributions présentent une dissymétrie, elles s'écartent d'une loi gaussienne.

Et pour les données de l'impact d'intrusion marine la valeur minimale (0,11) et maximale (1,29) dont la moyenne est de l'ordre de 0,433. La valeur minimale (50m) et maximale (150m) dont la moyenne est de l'ordre de 82m pour les données de variable l'épaisseur de la couche saturée, selon le coefficient d'asymétrie (skewness) les distribution sont positivement asymétriques.

### III.4. Application de l'approche géostatistique

Afin d'avoir une meilleure appréciation des valeurs de la vulnérabilité, l'approche géostatistique a été utilisée pour les paramètres GALDIT. Pour cela, la zone d'étude, la Mitidja EST, a été discrétisée en mailles carrées de 100\*100 mètres dont le nombre est de 49369 mailles sur une superficie de 500 Km<sup>2</sup>.

#### III.4.1. Semi-variogrammes expérimentaux (SEV)

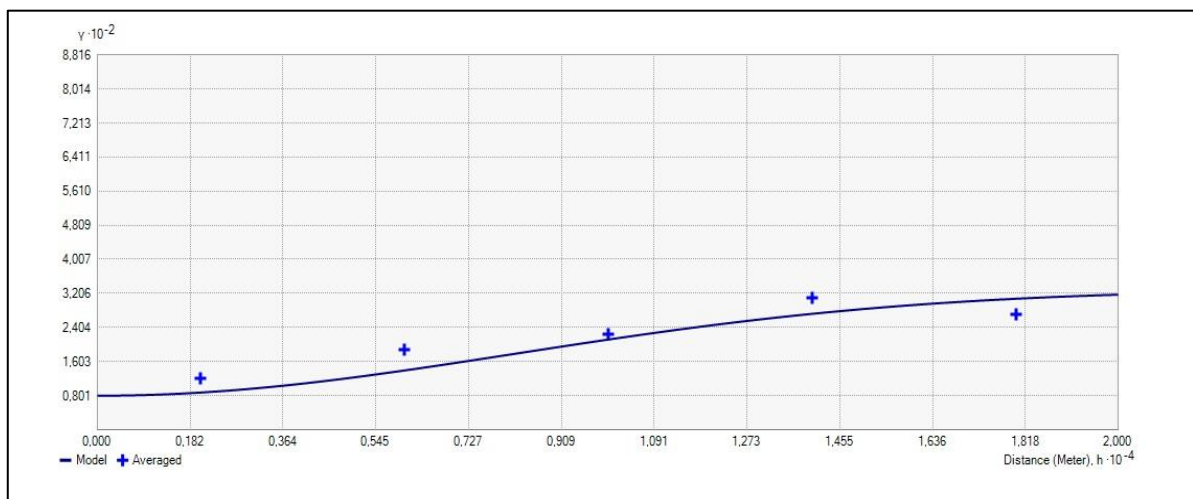


Figure III.6 : SEV de niveau piézométrique, période BE (année 2019).

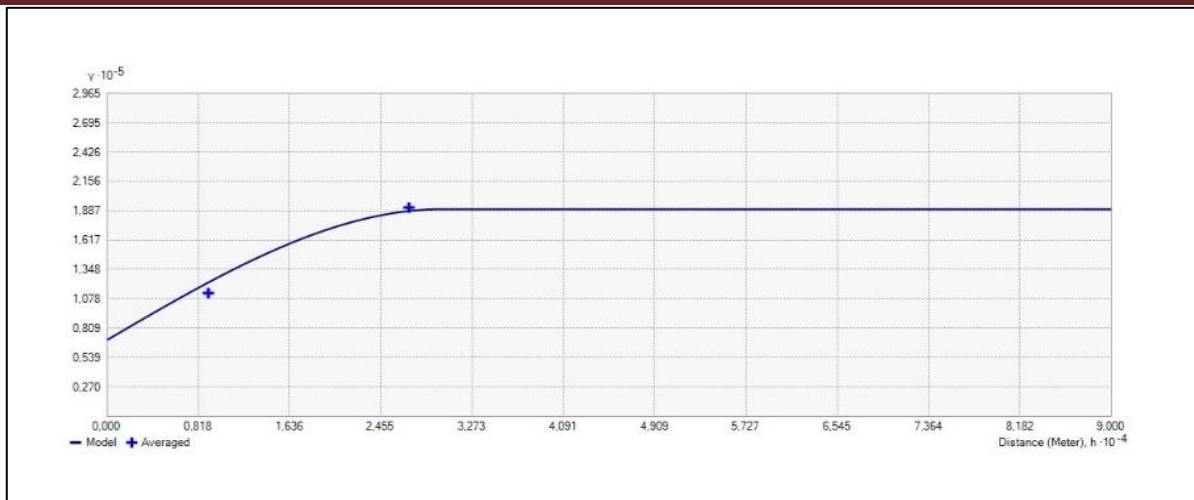


Figure III.7 : SEV de la conductivité, période BE (année 2019).

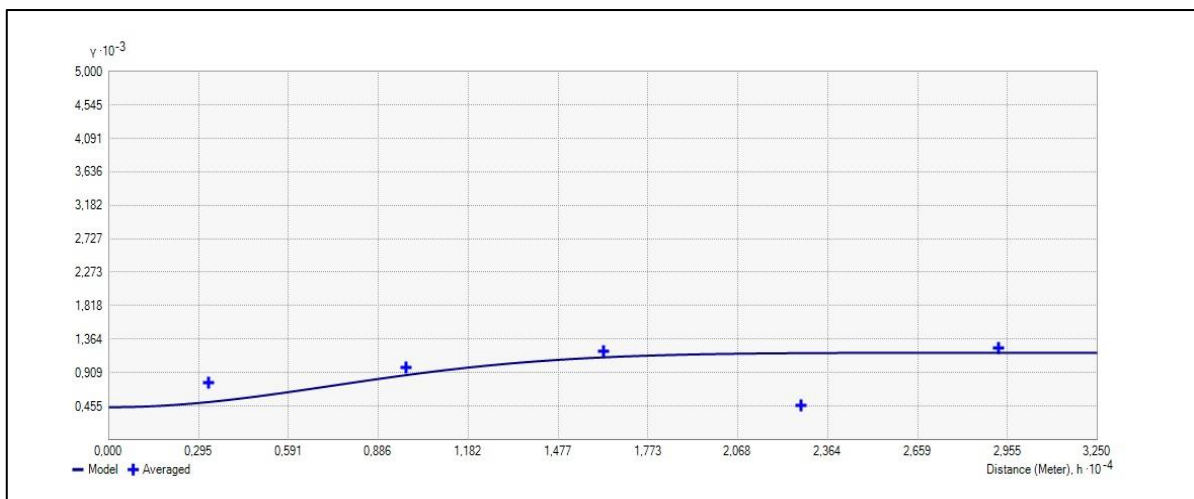


Figure III.8 : SEV de l'épaisseur de la couche d'aquifère, période BE (année 2019).

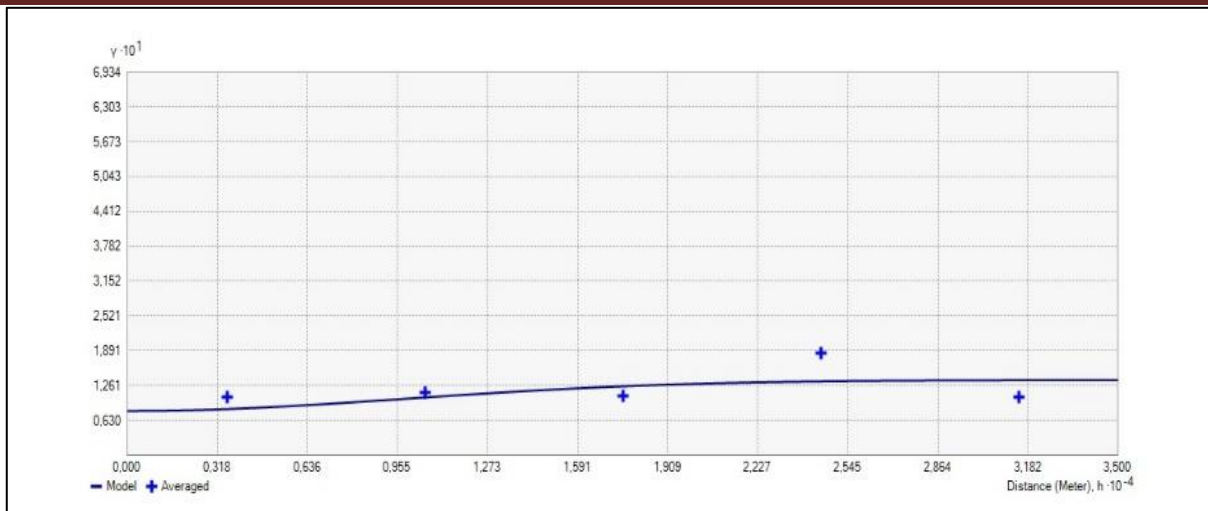


Figure III.9 : SEV de l'impact de l'intrusion marine, période BE (Année 2019).

Le semi-variogramme omnidirectionnel est un outil géostatistique utilisé pour analyser la variabilité spatiale d'un phénomène en considérant toutes les directions de façon équivalente, Il représente la demi-variance de la différence entre les valeurs d'un attribut mesurées à des points séparés par une distance h, dans notre cas c'est le cas du variogramme omnidirectionnel sans considération de direction.

### III.4.2. Modélisation des semi-variogramme expérimentaux (SVE)

Tableau III.3 : Modélisation des semi-variogrammes expérimentaux.

Variables	Semi-Variogramme Experimentale Omnidirectionnel (ESV)		Type de structure		Portée	Variance	Validation croisée	
	Pas de distance (m)	Nombre de pas de distance					MES	VES
conductivité (m/j)	18000	5	1	Effet de pépité	-	70000	0.004	1.07
			2	sphérique	30000	120000		
Profondeur de plan d'eau (m)	4000	5	1	Effet de pépité	-	80	0.01	0.95
			2	Gaussienne	20000	250		

L'épaisseur de la couche d'aquifère (m)	6500	5	1	Effet de pépité	-	440	0.04	1.02
			2	Gaussienne	17950	740		
Impact de l'intrusion marine	7000	5	1	Effet de pépité	-	0.08	0.01	0.93
			2	Gaussienne	24000	0.56		

Le tableau III.3 illustre, le type de la structure, la portée en mètre, les modèles adaptés à ces semi-variogrammes expérimentaux, le résultat montre une variabilité gaussienne bien structurée pour les variables, la profondeur de plan d'eau, L'épaisseur de la couche d'aquifère et l'impact de l'intrusion marine et une variabilité sphérique pour la conductivité, et la validation croisée pour vérifier la robustesse des modèles deux modèles gaussien et sphérique. La moyenne des erreurs standardisées (MES) très proche de zéro et une variance des erreurs standardisées (VES) très proche de l'unité, ce qui implique que les modèles retenus sont robustes. En raison du comportement directionnel erratique des SVE, donc ils sont tous calculés dans le cas d'isotropie

- Le semi-variogramme expérimentale omnidirectionnel (SVE) de l'impact de l'intrusion marine est calculés avec 05 pas de 7000 m.
- Le SVE de niveau piézométrique est calculés avec 05 pas de 18000 m.
- Le SVE de la conductivité hydraulique est calculés avec 05 pas de 4000 m.
- Le SVE de L'épaisseur de la couche d'aquifère est calculés avec 05 pas de 6500 m.

### III.5. Résultats et discussion (résultats du krigeage)

#### III.5.1. Carte du type de l'aquifère (G)

Le degré d'avancement de l'eau de mer dans la nappe est influencé par le paramètre G type d'aquifère. Généralement les eaux souterraines se circulent dans des couches géologiques et celles-ci peuvent être confinées (captives), non confinées (libres), ou semi confinées (semi captives). Par exemple un aquifère captif Celui-ci se trouve sous un aquitard (couche de confinement très imperméable) est plus vulnérable du fait de l'existence de cônes de dépression plus grands et de l'expulsion immédiate d'eau des puits lors des pompages ; dans ce cas la valeur du rang est le plus élevée (10), comparé à l'aquifère semi confiné. La semi-captivité maintenant la pression hydraulique au minimum, à cause des pertes associées à des aquifères adjacents, le protège donc de cette pollution marine.

Dans notre zone d'étude, l'aquifère est de type libre (non confiné) dans toute la zone d'étude une, sous des conditions naturelles, sera plus affectée par l'intrusion de l'eau de mer, De ce fait l'aquifère libre souvent très sollicité par des pompages intensifs est beaucoup plus exposé à l'intrusion marine, elle correspond au poids 1 et de rang 7.5 selon le Tableau III.1 le paramètre (G) GALDIT est représenté sur la Figure III.10

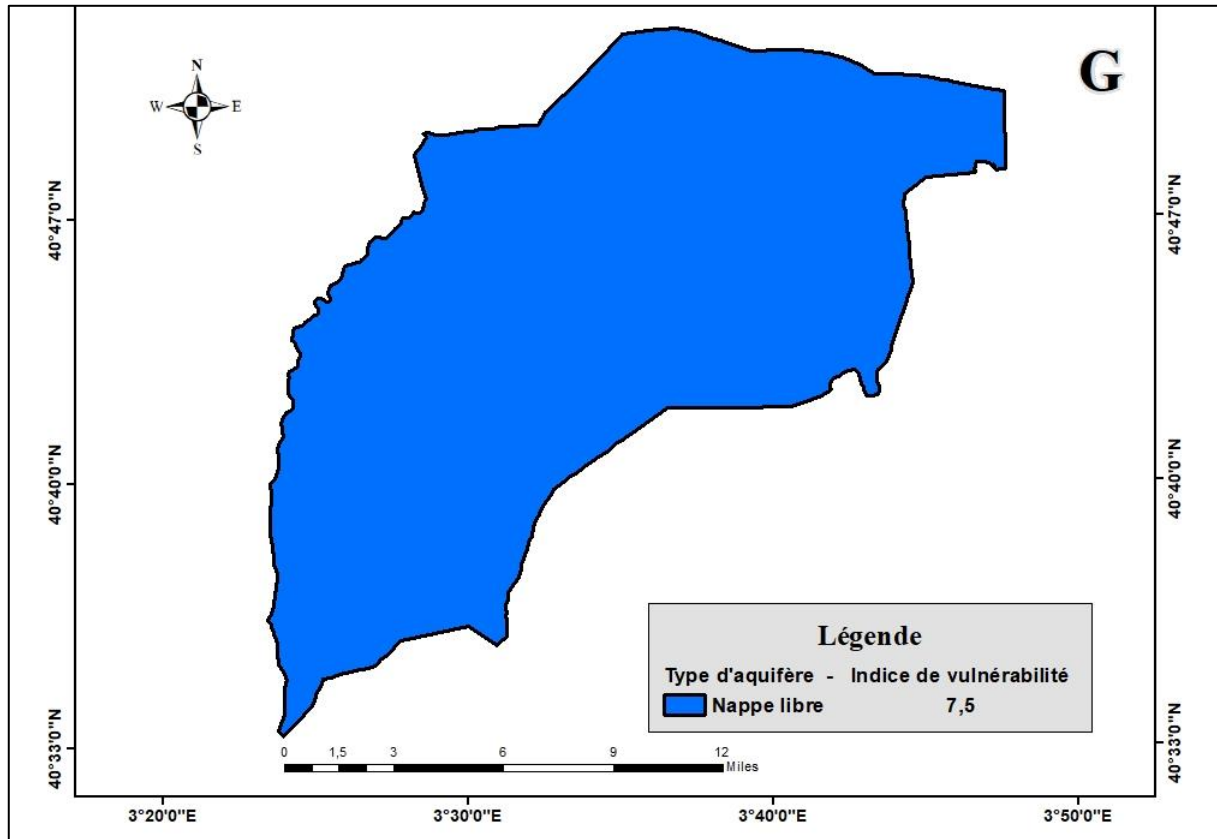


Figure III.10 : carte du paramètre G, type l'aquifère de la Mitidja EST.

### III.5.2. Carte de la conductivité hydraulique (A)

La conductivité hydraulique ou la perméabilité se réfère à la capacité de l'aquifère à transmettre de l'eau, et par conséquent elle commande la vitesse et le devenir des contaminants.

Les valeurs de la conductivité hydraulique sont contrôlées par les propriétés de la nappe, Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité  $k$  défini par la loi de Darcy.

Le mouvement de l'eau de mer vers la terre est influencé par la conductivité hydraulique : pour une conductivité plus élevée, l'intrusion de l'eau de mer serait plus significative.

La carte de la conductivité hydraulique a été établie par l'interpolation des données de conductivité de l'aquifère de la Mitidja EST. Les valeurs de la conductivité varieraient de 0,95 à 2,21 m/jour. La conductivité hydraulique de l'aquifère est faible dans la toute l'aquifère ( $< 5$  m/j) ce qui correspond à une très faible vulnérabilité et à un rang égal à 2.5.

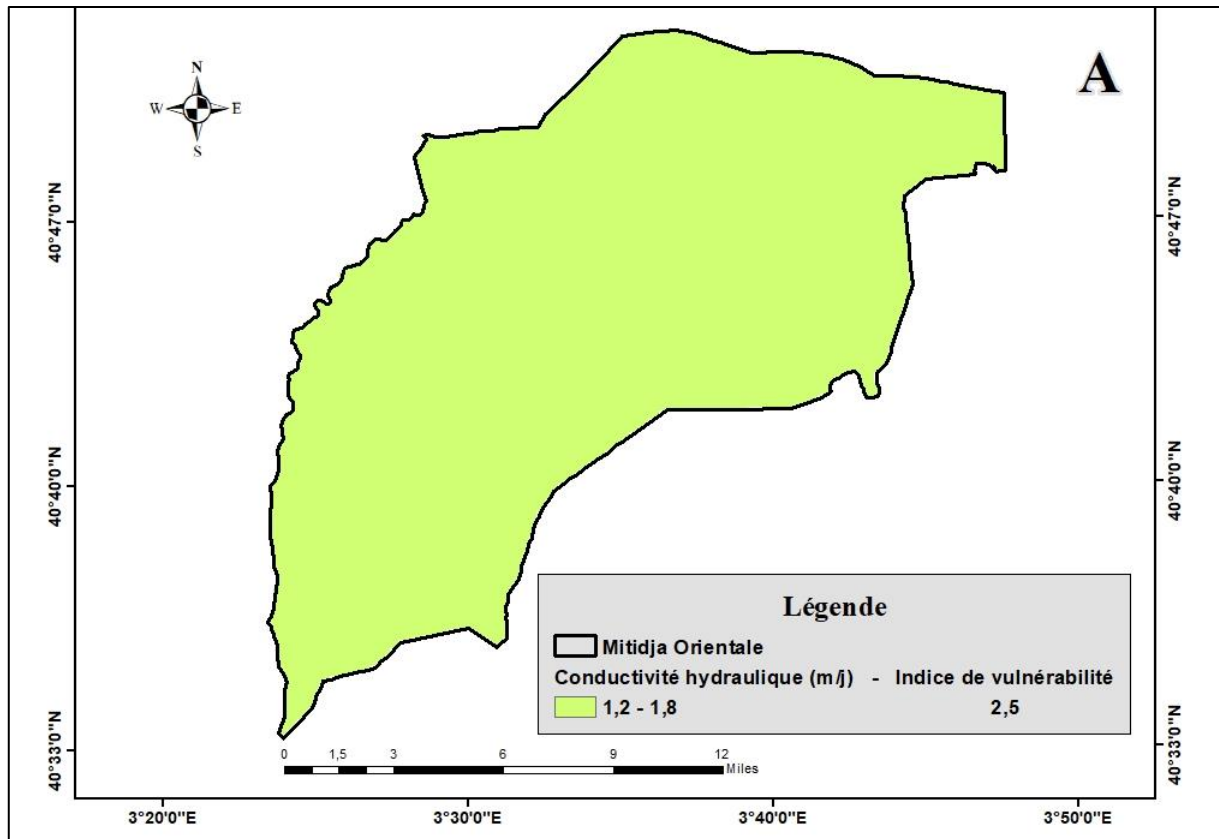


Figure III.11 : Carte du paramètre A, conductivité hydraulique.

### III.5.3. Carte de la Profondeur du plan d'eau (L) :

Le niveau des eaux souterraines par rapport à l'altitude moyenne de la mer est un facteur très important (poids maximal de 4) dans l'évaluation de l'intrusion d'eau de mer. En générale les valeurs qui concernent les cotes minimales d'eau en dessous du niveau de la mer restent les plus significatives, car elles fourniraient la plus forte vulnérabilité possible à cette intrusion d'eau marine. Concernant la zone de Mitidja EST, nous avons utilisé les données relatives à la période de campagne piézométrique du période de basse eau (années 2019).

Les profondeurs d'eau souterraine par rapport au niveau de la mer de notre zone d'étude varieraient de 5,8m à 47,8m. De ce fait la carte obtenue comporte une seule classe de vulnérabilité très faible avec un rang de 2.5 sur toute la superficie étudiée.

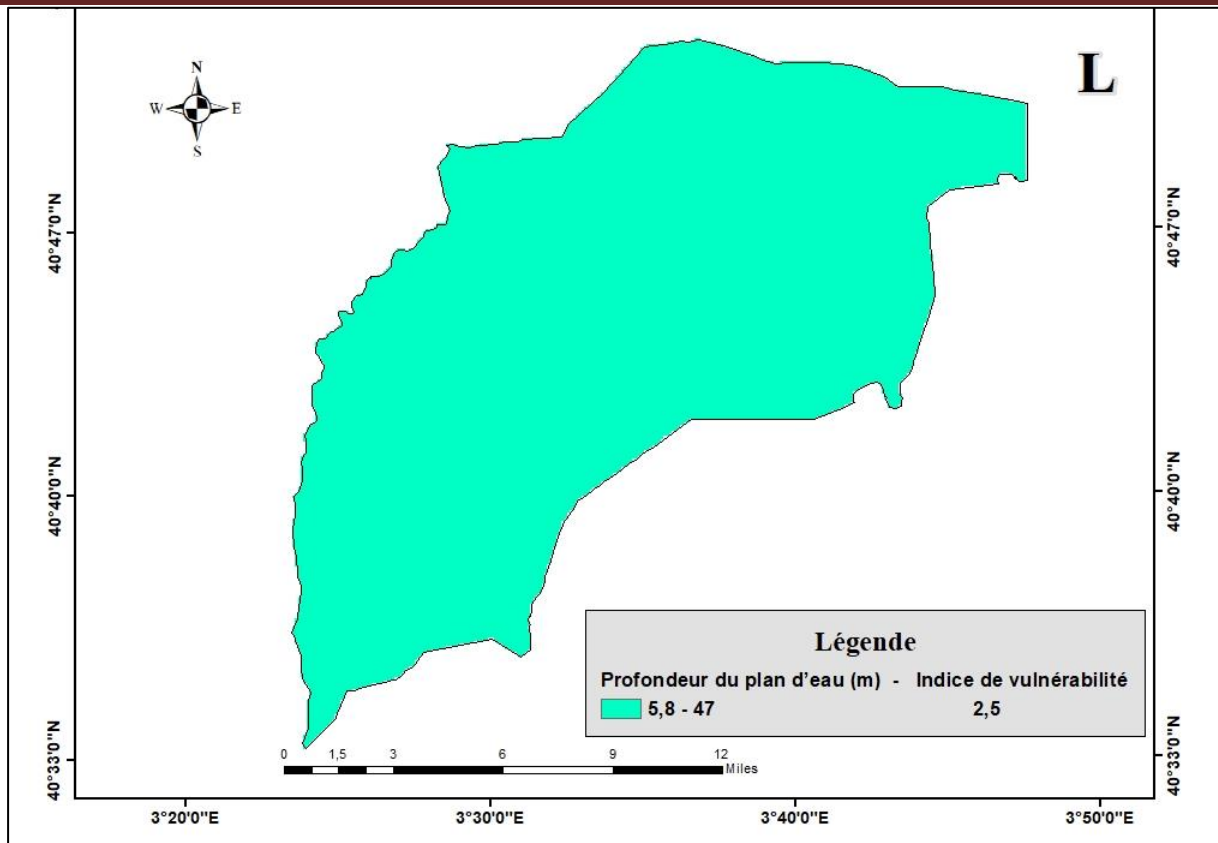


Figure III.12 : Carte du paramètre L, la Profondeur du plan d'eau.

**III.5.4. Carte de la distance à la côte ou (D) :**

La distance de l'aquifère par rapport à la mer est aussi un critère important de la vulnérabilité (poids maximal de 4), Ce paramètre a été estimé suivant quatre distances perpendiculaires à la ligne de côte, mais les rangs changent, à (<500 m) avec un rang de 10 il s'agit d'une classe élevée, (500-750 m) avec un rang de 7.5 c'est une classe moyenne, (750-1000 m) avec un rang de 5 c'est une classe faible et à (>1000 m) avec un rang de 2,5 il s'agit d'une classe très faible.

La carte du paramètre (D) de l'aquifère du Mitidja EST met en évidence quatre plages de vulnérabilité. Au Nord les plages, de très forte et forte vulnérabilité avec un rang respectivement de l'ordre de 10 et 7.5, ensuite la plage de moyenne vulnérabilité avec un rang de l'ordre de 5, la plage de faible vulnérabilité avec un rang de 2.5 occupe le reste de la superficie restante de la zone d'étude.

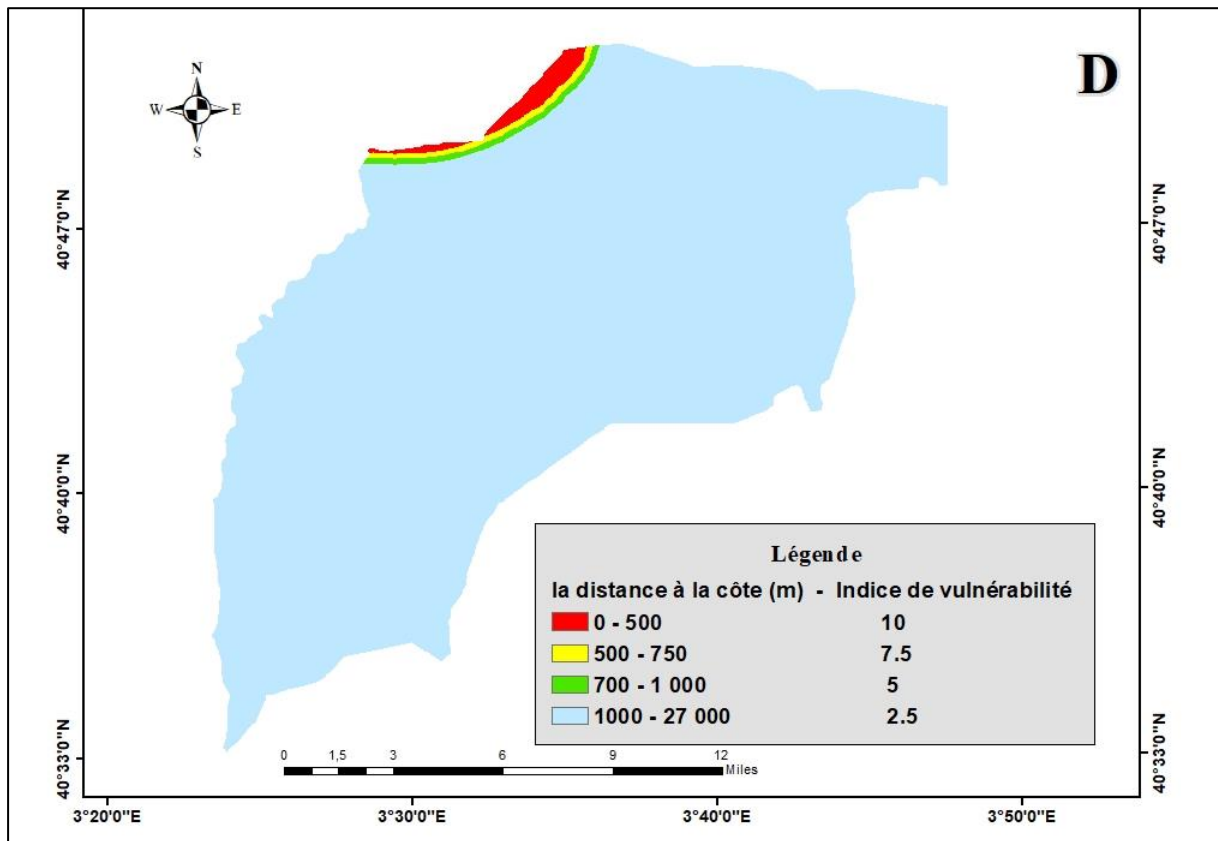


Figure III.13 : Carte du paramètre D, distance à la côte.

### III.5.5. Carte de l'impact d'intrusions marine existante (I) :

Dans cette méthode, il est proposé d'utiliser le ratio  $Cl^- / (HCO_3^{-1} + CO_3^{-2})$  comme critère d'évaluation de l'intrusion saline dans l'aquifère côtier. L'ion chlorure ( $Cl^-$ ) est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines alors que c'est l'inverse pour le bicarbonate ( $HCO_3^{-1} + CO_3^{-2}$ ). Si le ratio est supérieur à 2 ppm, une note maximale de 10 est attribuée au paramètre I. Un ratio inférieur à 1 montre que l'intrusion saline est très faible.

Peut être utilisé uniquement si des données chimiques des eaux souterraines sont disponibles, Le calcul de ce dernier s'est basé sur les analyses chimiques des basses eaux 2019 fournies par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Blida). Dans ce travail nous



considérons les valeurs de  $\text{CO}_3^{-2}$  comme nulle en raison de leur faible contribution dans Le ratio chlorure/Bicarbonate.

Les valeurs du rapport  $\text{Cl}^- / (\text{HCO}_3^{-1} + \text{CO}_3^{-2})$  de l'aquifère sont très faibles ( $< 1 \text{ ppm}$ ) dans toute la zone d'étude, les valeurs varieraient de 0.22 à 0.7, ce qui correspond une vulnérabilité très faible (Rang = 2.5).

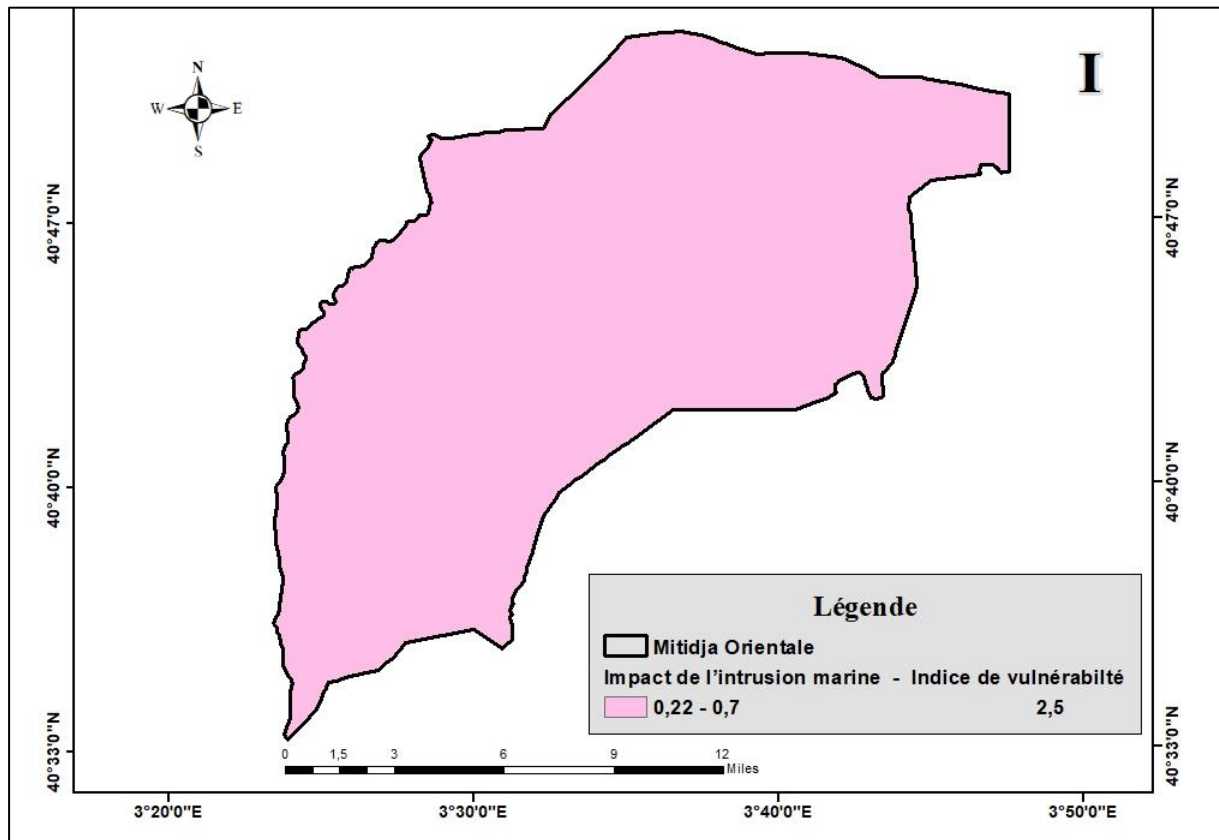


Figure III.14 : Carte du paramètre I : L'impact de l'intrusion saline.

### III.5.6. Carte de l'épaisseur de l'aquifère (T) :

L'épaisseur de l'aquifère ou de la zone saturée d'un aquifère libre joue un rôle important dans l'extension et de l'ampleur de l'intrusion saline en zones côtières. Il a été clairement démontré que plus l'épaisseur de l'aquifère est importante, plus l'extension de l'intrusion saline devrait être élevée et inversement.

Les valeurs de l'épaisseur saturée de l'aquifère libre du Mitidja EST sont toutes supérieures à 10 m l'épaisseur saturée comprise entre 50 et 150 m. La valeur moyenne est de l'ordre de 82 m donc on attribue le rang le plus élevé (10) pour la totalité de l'aquifère.

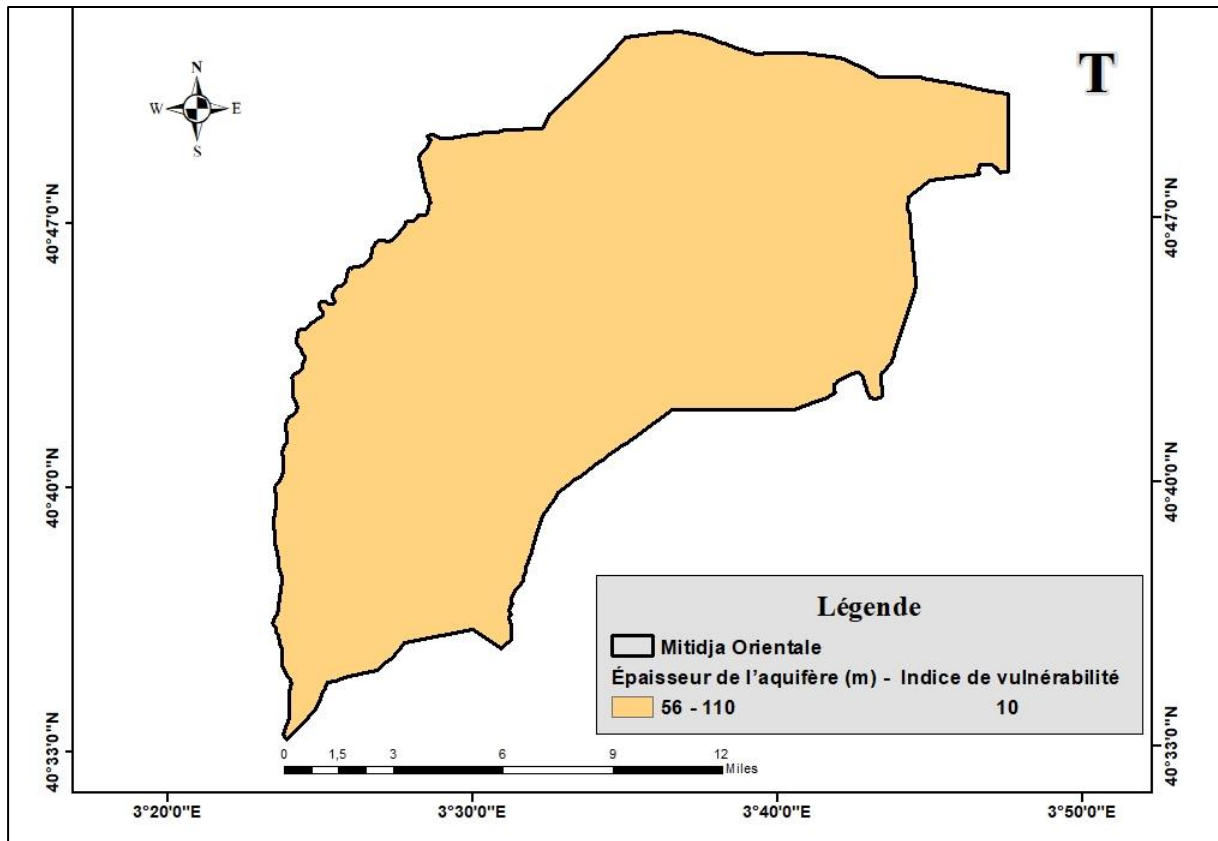


Figure III.15 : Carte du paramètre T : l'épaisseur de la nappe phréatique.

### III.5.7. Carte de l'indice de vulnérabilité GALDIT :

Le calcul de l'indice GALDIT et la superposition des différentes couches d'information moyennant le logiciel ArcGIS (par l'outil « Extraction de valeurs multiples vers des points » et « points vers raster ») à permet d'obtenir la carte de vulnérabilité (2019) qui identifie les zones susceptibles significativement d'être affectée par l'intrusion marine.

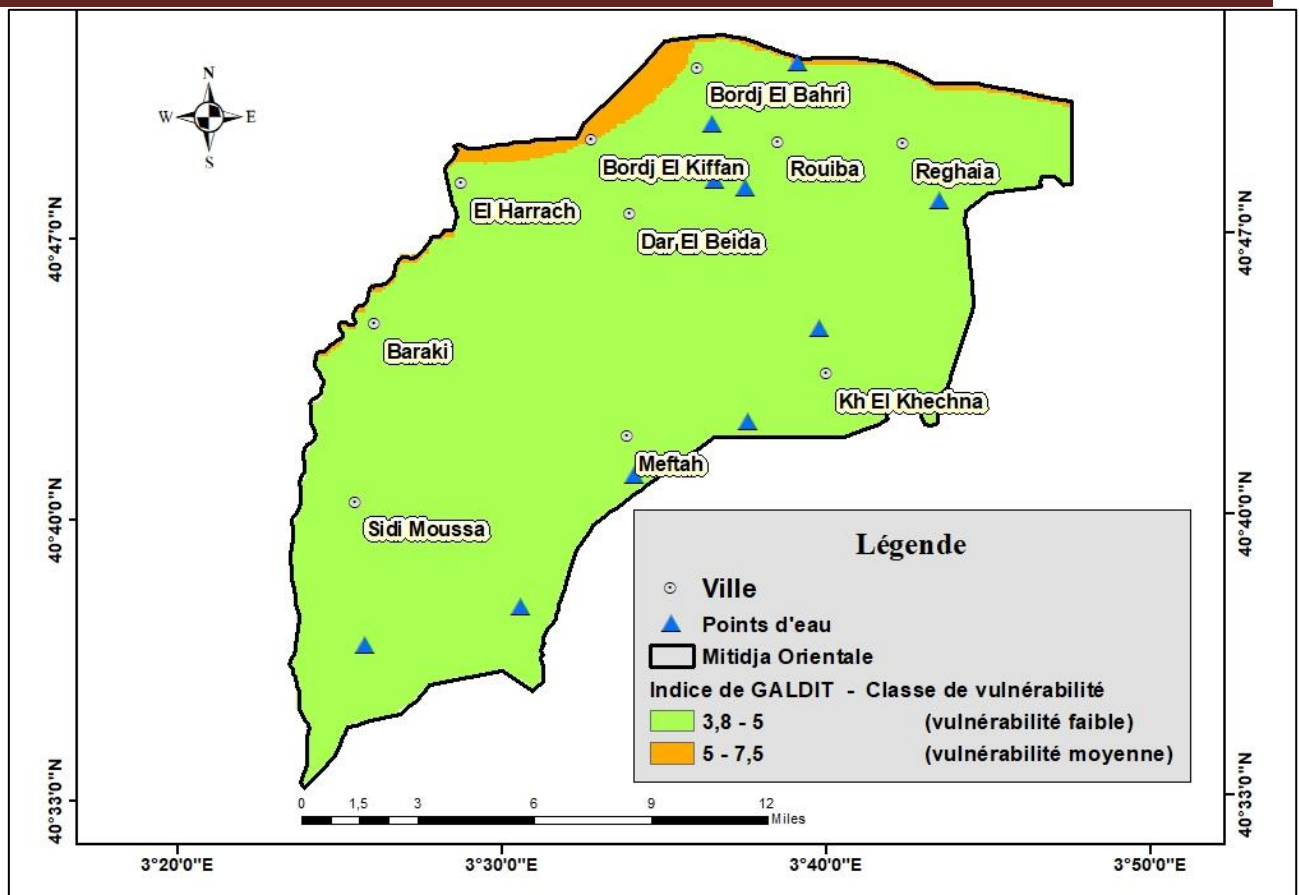


Figure III.16 : Indice de GALDIT de l'aquifère de la Mitidja EST.

La carte obtenue pour la période des basses eaux, fait ressortir deux zones de vulnérabilité :

**Zone à vulnérabilité moyenne :** elle représente 3.24 % de la surface totale caractérise la frange littorale avec une distance entre (470 Mètres et 1502 Mètres) vers l'intérieur dans la zone de rivage (Bordj el kiffan, el harrach) et de l'ordre de 310 m vers l'intérieur dans la zone littorale de Nord-Est, et une zone à vulnérabilité moyenne des eaux souterraines à la pollution est observée au les rives de l'oued El Harrach sur une longueur de 9,3 km.

**Zone à vulnérabilité faible :** elle englobe une zone plus importante en superficie (96,76 % de la surface totale)

### Conclusion

La méthode des variables régionalisées a été employée dans ce chapitre pour interpoler les données (conductivité hydraulique, Profondeur du plan d'eau, épaisseur de l'aquifère et l'impact des intrusion marine), Le processus de krigeage a été précédé par l'estimation des fonctions variographiques, qui prendront en compte à la fois la géométrie des données, les caractéristiques de la régionalisation et la précision de notre estimation, Ainsi, il convient de noter que la qualité de

l'estimation et l'évaluation de sa précision sont basées sur les modèles variographiques employés, La recherche d'un modèle adéquat est assez complexe et demande une certaine expérience ou de nombreux essais. Il ne peut y avoir automatisation de cette procédure, Selon les résultats, cette méthode fournit des modèles bien structurés pour les semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels choisis, et leurs qualités sont vérifiées à l'aide de la validation croisée. La qualité des modèles est satisfaisante, car la moyenne des erreurs standardisées (MES) est proche de zéro et la variance des erreurs standardisées (VES) très proche de l'unité,

## **Conclusion générale**

Les ressources en eau de Mitidja EST proviennent principalement des eaux souterraines de la nappe alluviale, cette nappe libre est très sollicitée pour alimenter la population en eau potable, l'agriculture et l'industrie, Cette aquifère côtière est menacé par une surexploitation qui provoqué une baisse importante du niveau piézométrique, ce qui a engendré le phénomène de l'intrusion marine qui a affecté le mécanisme hydrogéologique, l'environnement et l'agriculture.

Le but principal de cette étude est de déterminer et cartographier la vulnérabilité de l'aquifère de la Mitidja EST face à l'intrusion marine, L'interpolation des données qui sont les six paramètres de la méthode GALDIT a été réalisée, en utilisant la méthode des variables régionalisées, appelée krigeage. Ceci est précédé par l'estimation des fonctions variographiques qui prennent en compte à la fois la géométrie des données, les caractéristiques de la régionalisation et la précision de l'estimation.

La superposition des différentes couches des paramètres définis et le calcul de l'indice de GALDIT dans un système d'information géographique permettent d'identifier les régions sensibles et susceptibles d'être affectées par une intrusion saline à l'aide des données d'entrée de observations dans 10 points d'eau pour la période des basses eaux (année 2019) répartis sur toute la superficie de la zone d'étude.

La carte de l'indice GALDIT obtenue a mis en évidence deux zones de vulnérabilité, faible et moyenne, La zone de moyenne vulnérabilité avec un indice GALDIT supérieure à 5 (5 - 7,5) occupe que 3.24 % de la surface globale de la Mitidja Orientale représentée dans trois parties de la plaine :

- la frange littorale de El Harrache, Bordj El Kiffan avec une extension maximale de l'intrusion saline est d'environ 1,5 km à l'intérieur de la plaine, ce qui s'explique par les petites distances à la côte (0m – 1000m) et par la nature du sol, c'est une zone caractérisée par des argiles, des marnes, des sables argileux et marnes graveleuses, le ratio chlorure/Bicarbonate qui représente des valeurs dans la partie de nord plus élevées que les zones de sud, et Cette vulnérabilité moyenne est expliquée aussi par l'exploitation anarchique de l'aquifère côtier Dans les champs de captage dans cette zone et l'extraction d'un volume d'eau de la nappe supérieur à la recharge provoqué une baisse importante du niveau piézométrique accentue l'intrusion d'eaux marines,
- La partie nord-Est (de Bordj El Bahri jusqu'à Reghaia) est moins touchée avec une extension de l'intrusion saline est de l'ordre 310m à l'intérieur, le facteur en commun entre les deux parties (nord-Est, les franges littorale) est les grandes valeurs d'épaisseur (50m, 70m),

- Une zone à vulnérabilité moyenne des eaux souterraines à la pollution est observée aux rives de l'oued El Harrach sur une longueur de 9,3 km, origines de cette pollution sont les rejets industriels des zones de Baba Ali et Gué de Constantine, Baraki, Oued S'mar et El Harrach qui déversent leurs effluents chimiques dans le fleuve et les eaux usées urbaines des quartiers traversés par l'oued.

La zone de faible vulnérabilité elle englobe une zone plus importante en superficie 96,76 % de la Mitidja Orientale (occupe le reste de la superficie), avec un indice GALDIT inférieur à 5 qui s'explique par la faible influence de certains paramètres GALDIT à savoir D (Distance par rapport à la côte) et I (Impact de l'intrusion saline),

Les méthodes de protection des eaux souterraines, basées sur les cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution, permettent de caractériser les zones les plus touchées, Le but de la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est de présenter les différents degrés de protection offerte par les différentes lithologies permet aux organismes intéressés d'assurer une gestion durable de la ressource en eau souterraine.

### **Recommandations et perspectives**

- Surveillance piézométrique et hydrochimique : il est essentiel de mettre en place un réseau de surveillance pour suivre en continu l'évolution du niveau piézométrique et de la qualité des eaux souterraines de la nappe, cela permet d'identifier précocement les zones à risque d'intrusion marine comme les zones avec une faible vulnérabilité (Dar el Beida, Hamiz).
- Gestion durable des prélèvements : il faut réguler et rationaliser les prélèvements, en limitant les pompages près de la côte et en favorisant des techniques d'irrigation économes en eau,
- Recharge artificielle : la recharge artificielle de la nappe par des oueds ou des eaux usées traitées peut permettre de maintenir un niveau piézométrique suffisant pour contrer l'intrusion marine, comme l'installation des seuils d'infiltration, en permettant une infiltration adéquate des eaux de surface pour maintenir l'équilibre hydrique des nappes.
- Cartographie des entreprises industrielles pour identifier celles qui ne respectent pas les normes environnementales et proposition des solutions durables pour le traitement des effluents industriels, adapté à la nature de la pollution et de la source des eaux usées.
- Envoi de mises en demeure aux unités industrielles polluantes pour les inciter à se doter de mini-stations d'épuration avant les rejets dans l'oued el Harrach.

**Références bibliographiques**

- Anson, R. W. and Ormeling, F., J., 2002: Basic Cartography for students and technicians (Vol 2). Butterworth & Heinemann, Oxford, Royaume Uni. ISBN 978-0750649964.
- Arnaud, M., Emery, X., 2000. Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris.
- Asano, T. (2016). Artificial recharge of groundwater. California: Elsevier.
- Belhouadjeb A & Abdelhalim, Toaiba & Blel, Azouzi. (2018). La régionalisation stochastique des paramètres hydrochimiques dans le cadre d'un sig : cas des nitrates dans la région d'ain oussera. 26. 283-288.
- Belkerir H. et Debbou F. 2015. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution de la commune d'aokas par la méthode EPIK. Mémoire de fin d'étude en sciences de l'environnement. Université de bejaia, p. 3.
- Bertin J. (1977), « La graphique et traitement graphique de l'information », éditions FLAMMARION, Paris, 278 p.
- BRGM. Analyse de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraine autour des sites BASOL du bassin Adour. 2008. rapport final: Garonne.
- Burkart, M. R., & Kolpin, D. W. (1993). Hydrologic and land-use factors associated with herbicides and nitrate in near-surface aquifers. Journal of environmental quality, 22(4).
- Castany, G. (1998). Hydrogéologie : principes et méthodes : 2e cycle : Dunod. Fetter, C. W. (2018). Applied Hydrogeology: Fourth Edition: Waveland Press.
- Chachadi A. G. and João Paulo Lobo Ferreira, 2005: Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 –GALDIT Indicators Description. The fourth Inter-Celtic Colloquium on hydrology and Management of Water Resources. Guimarães, Portugal, july 11-14.
- Clarke K C (1990) Analytical and Computer Cartography. Prentice-Hall, Englewood Cliffs New Jersey.
- Cressie, N.E., 1993. Statistics for Spatial Data, revised edition. ed. Wiley & Sons Inc., New York.
- Daouadi A., 2015 Ajustement d'un réseau géodésique étendu en utilisant le fuseau étendu de la projection UTM. Mémoire d'ingénieur d'état, Centre des Techniques Spatiales (CTS, ex.CNTS) - Arzew, 17 mars 2015.
- Darteyre JP, (2008), Cours de cartographie, école nationale des sciences géographiques
- Degrémont, S. (2005). Mémento technique de l'eau, 10 ème édition. Paris, France : Lavoisier.
- Djoudar/Hallal D, 2003 : Vulnérabilité et protection des régions côtières. Application aux alluvions de la Mitidja Orientale. Mémoire de magistère, IST/USTHB/Alger ,180p.
- Drouiche A. (2012) : Contribution à l'étude de la vulnérabilité spécifique à la pollution par les éléments en traces métallique et les hydrocarbures : cas de la nappe d'eau souterraine de la Mitidja-est.
- Enmoussa A., Wafik A., Abdsamad N. & Khrmouch S. (2023). Nouvelle Approche d'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-Plio-

- Es Saouini H. 2015. Vulnérabilité a la pollution des eaux souterraines : aspect dynamique et application à l'aquifère de r'mel (larache, Maroc). Thèse doctorat : Spécialité : Hydrogéologie, Université Abdelmalek Assaadi. Maroc, pp.19-20.
- Fetter, C. W., Boving, T., & Kreamer, D. (2017). Contaminant hydrogeology: Waveland Press.
- Frissant N. René- Corailc. Coll. BonnierJ . 2005. Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion ; etat se connaissances et synthèse des données disponible (rapport BRGM)
- Frissant N., René-CorailC., Coll. Bonnier J.et De LaTorreY. 2005.Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR,64p., 27ill.,4tabl. (Rapport BRGM).
- Ghyben, W.B.1888.Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift Kon.Inst. Ing., pages8–22.
- Gilli, E., Mangan, C., & Mudry, J. (2008). Hydrogéologie : objet, méthodes, applications.
- Glangeaud, A., 1952. Etude géologique de la région littorale d'Alger. Bull. Serv. Carte. Géol. Algérie., 2ème série, n°8, 2 tomes.
- Glangeaud, L, (1952). Histoire géologique de la province d'Alger. IV congrès géologique international. Monographie région d'Alger. ANRH d'Alger. 148
- GloverRE. 1959.The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. Journal of Geophysical Research64(4): 457–459.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation, Applied geostatistics series. Oxford University Press, New York ; Oxford.
- Guillot, G., 2004. Introduction à la géostatistique. Institut National Agronomique de Paris-Grignon.
- Hager, J. W., J. F. Behensky, and B.W. Drew (1989), The universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS). Tech. Rep. TM 8358.2,
- Hallal, Dahbia & Mohamed El Amine, Khelfi & Zahouani, Sadek. (2020). Approche géostatistique de l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la Mitidja Orientale : Application de trois modèles DRASTIC, PRAST et GALDIT.
- Herzberg, A.1901.Die Wasserverzorgung einiger Nordseebaden. Z. Gasbeleucht. Wasserverzorg., (44) :815–819,824–844
- Joliveau T., 1996 - Gérer l'environnement avec les S.I.G. Mais qu'est-ce qu'un S.I.G. ? Rev. Géogr. Lyon, 71/2: 101-110.
- Joly, F., 1990. Pour une cartographie de l'érosion. Soil Technology. Vol. 3, p.209-220. Cremlingen.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J.,1978. Mining Geostatistics. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Laborde, J, P., 2000. Eléments d'hydrologie De Surface. L'Université de Nice - Sophia Antipolis, Edition Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S), pp 8-137.
- Ledoux, E. 1986. Modèles mathématiques en hydrogéologie. Paris : Centre d'informatique géologique. Ecole Nat. Mines, 1986.
- Lencastre, A. (1996). Hydraulique générale. Eyrolles
- Maillard. A, 1972. Informatique appliquée par ordinateur, Cah. O.R.S.T.O.M., sér.Sci.
- Margat J. 1968 (vulnérabilité des nappes d'eau souterraines a la pollution) département de hydrogéologie 45 Orleans.
- Margat, J., & Van der Gun, J. (2013). Groundwater around the world: a geographic synopsis: Crc Press.



- Meddi, M., Boufekane, A., Meddi, H., Saidi, H., Chebah, M., & Moumtaz, R. (2015). Recharge artificielle de la nappe de la Mitidja ; Rapport général du projet PNR. Blida, Algérie : Ecole nationale Supérieure d'Hydraulique.
- Muet F, Vier E. Stratégies de protection de ressources karstique utilisées pour l'eau potable, Corse. 2011, Guide pratique Agence de l'eau Rhone Méditerranée.
- Nathalie Dörfliger, Bénédicte Augéard. Quels outils pour caractériser l'intrusion saline et l'impact potentiel du niveau marin sur les aquifères littoraux. 2013. fihal-02936895f
- Quatenaire du Bassin du Tadla (Maroc). European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 49.
- Rezak Salima, « Hydrologie algérienne : synthèse des apports de crues sur SIG », Thèse de Doctorat en science, sous la direction de Errih Mohamed et Jean Pierre LABORDE, Oran, Université des sciences et de la technologie « Mohamed Boudiaf », 2014, 173 p.
- Schnebelen N., PLATEL J.P., LE NINDRE Y.M., BAUDRY D et al. Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5, Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Opération sectorielle. 2002, Rapport BRGM/RP51178-FR.
- Şen, Z. (2014). Practical and applied hydrogeology: Elsevier.
- Sogreah, 2008. Prospection géophysique de la plaine de la Mitidja- CGG (1967) Modèle Mathématique de la plaine de la Mitidja-Mission4.
- Suais M.F. Vinaterjm.BARATA. Vulnérabilité des aquifères des critères cartographie pertinents.1990, R 30890RHA4S90.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). Groundwater hydrology, Third Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Toubal, A-C., 1998 : Apport de la géophysique à l'étude des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger. Thèse de Doctorat d'état. IST/USTHB/Bab Ezzouar, 226p.
- Vaessen V. et Brentführer R. 2015. L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap, Net, RAOB, et IGRAC. p. 8.
- Wu, A., Zhao, X., Wang, J., Tang, Z., Zhao, T., Niu, L., et al. (2021). Application of solidphase extraction based on magnetic nanoparticle adsorbents for the analysis of selected persistent organic pollutants in environmental water, 51(1), 44-112.
- Zanin. C., Trémélo, T, M., 2003. Cartographie thématique, savoir-faire une carte, aide à la conception d'une carte thématique univariée, Ed. Belin, Coll. Sup Géographie, Paris.
- Zeroili, D., Bord, j, P., Ait Moussa, A., 2012. L'apport des systèmes d'information géographique dans la gestion urbaine, Maroc.
- Zhang, S., Howard, K., Otto, C., Ritchie, V., Sililo, O. T., & Appleyard, S. (2003). Sources, types, characteristics and investigation of urban groundwater pollutants. In D. N. Lerner (Ed.), Urban Groundwater Pollution (pp. 71-126). TOKYO: CRC Press.