

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA 1**

**Faculté de technologie**

**Département des sciences de l'Eau et Environnement**



## **MEMOIRE DE MASTER**

**Filière : Hydraulique**

**Spécialité : Ressources Hydrauliques**

Thème :

**Approche géostatistique pour la cartographie des nitrates (cas de Mitidja Est)**

Présenté par

**HAMANI Mohammed Ilias**

Devant le jury composé de :

M. GUEDNDOUZ Abdelhamid	Professeur, U, de Blida	Président
M. BOUZERIA Housseyn	MCB, U, de Blida	Examineur
M. KHELFI Mohamed El-Amine	MCB, U, de Blida	Promoteur

Promotion 2020/2021

## ملخص:

يعد تلوث المياه الجوفية بالنترات مشكلة عالمية، تميز المناطق الحضرية التي تشكل قابلية للتأثر بخطر التلوث، والتي تعود أصولها الرئيسية إلى الأنشطة الزراعية والصناعية.

في هذه الدراسة، تم أخذ عينة من منطقة متيجة شرق خلال فترتين (المياه المنخفضة والعالية) ولمدة عامين بفارق 10 سنوات (2006 و2016)، من أجل إجراء تحليل مكاني-زمني لمحتويات النترات ومنسوب المياه.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه خلال فترة المياه المرتفعة في عامي 2006 و2016، كان أكثر من 72% من نقاط المياه ملوثة. وينطبق الشيء نفسه على فترة المياه المنخفضة، حيث نلاحظ أن أكثر من 54% في عام 2006 وأكثر من 81% في عام 2016 من نقاط المياه التي تم تحليلها تحتوي على تركيزات نترات أعلى من 50 ملغ / لتر.

وصل انخفاض منسوب المياه الجوفية بين عامي 2006 و2016 إلى ما يقرب من 23 مترًا في المياه المنخفضة و26 مترًا في المياه العالية (مثال حالة البئر الارتوازي F1003) يفسر هذا الانخفاض في منسوب المياه الجوفية بالاستغلال المفرط في المنطقة من خلال الضخ المكثف للسقي وإمدادات مياه الشرب.

تم إجراء التحليل الجيوإحصائي باتباع عدة خطوات قبل إنشاء الخرائط النهائية. في الممارسة العملية، يوضح لنا شبه المخطط احادي الاتجاه ما إذا كان هناك المزيد من الاتجاهات المستمرة مقارنة بالمتغيرات التي تمت دراستها.

باختصار، النتائج التي تم الحصول عليها هي أنصاف المتغيرات التجريبية وكذلك النماذج الملائمة لكل متغير (تركيز النترات ومستويات المياه الجوفية).

## Résumé :

La pollution des eaux souterraines de la nappe alluviale par les nitrates est une problématique mondiale, caractérisant les zones urbaines qui présentent une vulnérabilité au risque de contamination, qui a pour principales origines les activités agricoles et l'industrielles. Dans cette étude, un échantillonnage a été effectué sur la région de la Mitidja Est, durant deux périodes (basses et hautes eaux) et pour deux années avec un écart de 10 ans (2006 et 2016), afin de faire une analyse spatio – temporelle des teneurs en nitrates et de la profondeur de la nappe. Les résultats obtenus montrent que durant la période des hautes eaux de 2006 et 2016, plus de 72% de points d'eau contaminée. De même pour la période des basses eaux, où on note que plus de 54% en 2006 et plus de 81% en 2016 des points d'eau analysés présentent des concentration en nitrates supérieure à 50 mg/l. Le rabattement de la nappe entre 2006 et 2016, atteint environ 23 m en basses eaux et 26 m en hautes eaux (ex. cas du forage F1003). Cette baisse du niveau de la nappe est expliquée par une surexploitation des eaux souterraines dans la région à travers des pompages intensifs pour l'irrigation et l'alimentation en eaux potable. L'analyse géostatistique a été réalisée suivant plusieurs étapes

avant d'établir les cartes krigées finales. En pratique, les semi – variogrammes omnidirectionnels nous montre s'il existe plus de directions continues par rapport aux variables étudiées. En résumé, les résultats obtenus des semi – variogrammes expérimentaux ainsi que les modèles ajustés pour chaque variable (concentration en nitrates et niveaux piézométriques) sont robustes.

### **Abstract:**

The groundwater nitrates pollution is a global issue, characterizing urban areas that are vulnerable to the risk of contamination, the main origins of which are agricultural and industrial activities.

In this study, a sampling was carried out on the region of Mitidja Est, during two periods (low and high water) and for two years with a gap of 10 years (2006 and 2016), in order to make a spatio-temporal analysis of nitrate contents and the depth of the water table.

The results show that during the high water period of 2006 and 2016, more than 72% of water points were contaminated. The same goes for the low water period, where we note that more than 54% in 2006 and more than 81% in 2016 of the water points analyzed have nitrate concentrations greater than 50 mg/l.

The lowering of the water table between 2006 and 2016 reached approximately 23 m in low water and 26 m in high water (eg: case of drilling F1003). This drop in the water table is explained by an overexploitation of groundwater in the region through intensive pumping for irrigation and drinking water supply.

The geostatistical analysis was carried out in several stages before establishing the final maps. In practice, the omnidirectional semivariogram shows us whether there are more continuous directions with respect to the variables studied.

In summary, the results are obtained the experimental semivariograms as well as the models fitted for each variable (nitrate concentration and piezometric levels).

---

# ***REMERCIEMENT***

---

*En tout premier lieu, je remercie dieu qui m'a donné la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés et achever mes études. Je remercie fortement mon promoteur : **Mr KHELFI Mohamed El-Amine** de m'avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener bien ce travail.*

*Par la même occasion je remercie :*

*Les membres du jury*

*- Mr GUENDOOUZ Abdelhamid*

*- Mr BOUZERIA Housseyn*

*Pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail*

*Mes remerciements vont également à : ma mère, mon père, mon frères et mes deux sœurs.*

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Hamani Mohamed Ilias  
Juillet 2021*

*Hamani*

---

# **DÉDICACE**

---

*Je tien tout d'abord à dédier ce modeste travail à mes très chers parent Mme FATIMA et Mr RABIE pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leurs prières et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que je réussisse tous le long de ma vie et mes études.*

*Je le dédie également à mes deux sœurs AMIRA et la petite WISSAM et à mon frère CHEMS EDDINE.*

*Sans oublier mes collègues et amis de la graduation promotion 2021 ainsi qu'à tous qui connaissent ma personne de près ou de loin.*

*Hamani Mohamed Ilias  
Juillet 2021*

*Hamani*

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre 01 : Recherche Bibliographique.

Introduction .....	2
1.1 La géostatistique .....	2
1.2 Aperçu historique sur la géostatistique.....	2
1.3 Théorie des variables régionalisées concepts et méthodes .....	3
1.3.1 Quelques points vocabulaires .....	3
1.3.2 Distribution monovariante.....	4
1.3.3 Répartition spatiale.....	4
1.3.4 Nuée variographique .....	4
1.3.5 Fonctions aléatoires .....	5
1.4 Hypothèses de bases .....	5
1.4.1 Stationnarité du second ordre .....	5
1.4.2 Hypothèse intrinsèque .....	5
1.5 Variogramme théorique et variogramme expérimental.....	6
1.5.1 Propriétés du variogramme .....	7
1.5.2 Modélisation du variogramme .....	8
1.5.3 Validation croisée.....	8
1.5.4 Isotropie et anisotropie .....	9
1.5.5 Cas multivarié (variogrammes croisés).....	9
1.5.6 Krigeage .....	9
1.6 Cartographie .....	10
1.6.1 Cartes et cartographie.....	10
1.6.1.1 Aperçu sur l'histoire de la cartographie .....	10
1.6.1.2 Idée de cartographie.....	12
1.6.1.3 Carte.....	13
1.6.1.4 Règles à respecter .....	14
1.6.1.5 Informatique et la cartographie.....	16
1.6.1.6 Système d'information géographique (S.I.G.).....	18
1.6.1.7 Travaux sur la cartographie et la géostatistique .....	19
1.7 Origine de la pollution .....	20
1.7.1 Origine domestique .....	20
1.7.2 Origine agricole.....	21

1.7.3	Origine urbaine et routière .....	21
1.7.4	La pollution minérale .....	21
1.7.4.1	Composés azotés.....	21
1.7.4.2	Métaux .....	22
1.7.5	La pollution organique .....	22
1.7.5.1	Produits de dégradation de la matière vivante.....	22
1.7.5.2	Hydrocarbures .....	22
1.7.5.3	Substances de synthèse.....	22
1.7.6	La pollution microbiologique.....	23
	Conclusion .....	23

## **Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude.**

	Introduction .....	24
2.1	Géographie et géomorphologie .....	24
2.2	Caractéristiques des bassins versants .....	26
2.2.1	Caractéristiques morphométriques des bassins versants.....	26
2.2.2	Description des sous bassins .....	27
2.3	Hydrographie .....	27
2.4	Climat et pluviométrie.....	28
2.5	Ressources en eau de la Mitidja Est .....	30
2.5.1	Station de traitement des eaux usées de Réghaia .....	31
2.6	Géologie et hydrogéologie.....	34
2.7	Le couvert végétal .....	35
2.8	Aspects socio économiques.....	35
	Conclusion .....	35

## **Chapitre 03 : Analyse Géostatistique et Cartographie.**

	Introduction .....	36
3.1	Application de l'approche .....	36
3.1.1	Paramètres statistiques des années 2006 et 2016 (Piézométrie et Nitrates).....	36
3.1.2	L'évolution des nitrates et la piézométrie .....	41
3.1.2.1	Evolution des niveaux piézométriques .....	41
3.1.2.2	Evolution des Nitrates .....	41
3.1.2.3	Relation entre la contamination par les nitrates et l'évolution de la nappe ....	42
3.1.2.4	Evolution des nitrates dans le puits P021-5 (E008-48583) .....	43

3.1.3	Isotropie anisotropie .....	44
3.1.3.1	Variogrammes de surface .....	44
3.1.4	Variogrammes expérimentaux .....	46
3.1.5	Modélisation des semi-variogramme expérimentaux SVE.....	50
3.1.6	Estimation et résultats du krigeage.....	51
	Conclusion.....	56

### **Conclusion générale**



## Liste des figures

### Chapitre 01 : Recherche Bibliographique.

<b>Figure 1.1</b> : Propriétés du variogramme.....	07
--	----

### Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude.

<b>Figure 2.1</b> : Carte de la situation géographique de la Mitidja Est .....	24
--	----

<b>Figure 2.2</b> : Carte topographique de la Mitidja Est .....	25
---	----

<b>Figure 2.3</b> : Carte du réseau hydrographique de la Mitidja Est .....	27
--	----

<b>Figure 2.4</b> : Carte des postes pluviométriques de la Mitidja Est. ....	28
--	----

<b>Figure 2.5</b> : Carte des ressources en eau de la Mitidja Est .....	32
---	----

<b>Figure 2.6</b> : Carte géologique de la Mitidja Est.....	34
---	----

### Chapitre 03 : Analyse Géostatistique et Cartographie.

<b>Figure 3.1</b> : Histogrammes des niveaux piézométriques des périodes BE et HE de l'année 2006.....	36
--	----

<b>Figure 3.2</b> : Histogrammes des Nitrates des périodes BE et HE de l'année 2006.....	37
--	----

<b>Figure 3.3</b> : Histogrammes des niveaux piézométriques des périodes BE et HE de l'année 2016.....	38
--	----

<b>Figure 3.4</b> : Histogrammes des Nitrates des périodes BE et HE de l'année 2016.....	39
--	----

<b>Figure 3.5</b> : Evolution des niveaux piézométriques pour 2006 et 2016 (a : BE2006 BE2016, b : HE2006 HE2016).....	40
--	----

<b>Figure 3.6</b> : Evolution des Nitrates pour 2006 et 2016 (a : BE2006 BE2016, b : HE2006 HE2016).....	41
--	----

<b>Figure 3.7</b> : Relation entre la contamination par les nitrates et l'évolution de la nappe (a : BE2006, b : HE2006, c : BE2016, d : HE2016).....	42
---	----

<b>Figure 3.8</b> : Evolution des nitrates dans le puits P021-5 (E008-48583) (a : BE 1986-2016, b : HE du 1985 à 2016).....	43
---	----

<b>Figure 3.9</b> : Variogrammes de surface des NP et Nitrates, période BE et HE de l'année 2006.....	43
---	----

<b>Figure 3.10</b> : Variogrammes de surface des NP et Nitrates, période BE et HE de l'année 2016.....	44
--	----

<b>Figure 3.11</b> : Variogrammes expérimentaux des niveaux piézométriques ( <b>a</b> : période BE 2006, <b>b</b> : période HE 2006).....	45
<b>Figure 3.12</b> : Variogrammes expérimentaux des niveaux piézométriques ( <b>c</b> : période BE 2016, <b>d</b> : période HE 2016).....	46
<b>Figure 3.13</b> : Variogrammes expérimentaux des Nitrates ( <b>e</b> : période BE 2006, <b>f</b> : période HE 2006).....	47
<b>Figure 3.14</b> : Variogrammes expérimentaux des Nitrates ( <b>g</b> : période BE 2016, <b>h</b> : période HE 2016).....	48
<b>Figure 3.15</b> : Carte des NP de la Mitidja Est, période BE de l'année 2006.....	52
<b>Figure 3.16</b> : Carte des NP de la Mitidja Est, période HE de l'année 2006.....	52
<b>Figure 3.17</b> : Carte des NP de la Mitidja Est, période BE de l'année 2016.....	53
<b>Figure 3.18</b> : Carte des NP de la Mitidja Est, période HE de l'année 2016.....	53
<b>Figure 3.19</b> : Carte des nitrates de la Mitidja Est période BE de l'année 2006.....	54
<b>Figure 3.20</b> : Carte des nitrates de la Mitidja Est période HE de l'année 2006.....	54
<b>Figure 3.21</b> : Carte des nitrates de la Mitidja Est période BE de l'année 2016.....	55
<b>Figure 3.22</b> : Carte des nitrates de la Mitidja Est période HE de l'année 2016.....	55

## Liste des tableaux

### Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude.

<b>Tableau 2.1</b> : caractéristiques des sous bassins versants .....	25
<b>Tableau 2.2</b> : Stations pluviométriques de la Mitidja Est.....	28
<b>Tableau 2.3</b> : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	29
<b>Tableau 2.4</b> : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour la plaine de la Mitidja Est (1971-2016).....	29
<b>Tableau 2.4</b> : Les points d'eau (ANRH, 2016).....	30

### Chapitre 03 : Analyse Géostatistique et Cartographie.

<b>Tableau 3.1</b> : Modélisation des semi-variogrammes expérimentaux.....	49
--	----

### Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle limitée, nécessaire à la vie et aux systèmes écologiques, et essentielle pour le développement économique et social, d'où l'obligation de préserver cette ressource surtout en Algérie après la sécheresse remarquée ces dernières années, la mauvaise gestion, la surexploitation et la pollution des différentes sources.

La pollution des eaux souterraines par les nitrates et la diminution de niveau d'eau de la nappe ce sont parmi les problèmes fréquents rencontrés dans notre pays, et qui fait l'objet d'un suivi par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) depuis plus d'une décennie, à travers des contrôles de la qualité des eaux dans les puits et les forages dans la plaine de Mitidja. C'est ainsi qu'ils ont observé des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dépassant nettement les normes recommandées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) (50 mg/l).

C'est dans ce contexte s'inscrit notre étude, il s'agit de l'application de l'approche géostatistique pour la cartographie des nitrates ; cas de la Mitidja Est. L'objectif principal de l'étude est d'établir les modèles géostatistiques et les cartes d'évolution des nitrates et des niveaux piézométriques des deux périodes (basses et hautes eaux) des deux années (2006 et 2016), ces dernières nous permettant de localiser les régions présentant des teneurs en nitrates supérieures à 50 mg/l et de voir l'origine de cette pollution.

Pour atteindre cet objectif, ce travail consiste en trois chapitres qui sont articulés de la manière suivante :

Chapitre 01 (recherche bibliographique) ; un aperçu théorique sur la modélisation par l'approche géostatistique, la cartographie et les systèmes d'informations géographiques, les pollutions qui peuvent présenter dans les nappes et ses origines ainsi une synthèse de leurs récentes évolutions.

Chapitre 02 (présentation de la zone d'étude) ; situation, pluviométrie, relief, hydrographie, réseau des mesures, ressources en eau et la géologie.

Chapitre 03 (analyse géostatistique et cartographie) ; une régionalisation par interpolation géostatistique du niveau piézométrique et la teneur en nitrates.

En conclusion, une synthèse des principaux résultats obtenus, et donnée quelques recommandations.

# CHAPITRE 01

## Introduction

La variation d'un polluant dans un endroit et les niveaux piézométriques dans les nappes sont généralement présentées sous forme des courbes ou des cartes, ces dernières sont des outils d'utilisation courante pour l'implantation de certains ouvrages hydrauliques comme les forages, ainsi pour savoir l'origine de la baisse ou l'augmentation du niveau d'eau dans les nappes, l'origine de la pollution pour la traiter et la rendre à la norme mondiale.

Dans notre cas le polluant est le nitrate, l'objectif de notre travail est de cartographier l'évolution des nitrates et les niveaux piézométriques dans la plaine de la Mitidja Est en utilisant les méthodes géostatistiques.

Donc dans ce chapitre on va définir la géostatistique, son histoire, comment l'utiliser pour modéliser et estimer l'évolution des nitrates et les niveaux piézométriques, ainsi on va voir les différents polluants qui peuvent se présenter dans les nappes et ses origines.

### 1.1 La géostatistique

En statistiques spatiales, les données sont collectées en des lieux dont on prend 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. Cette modélisation nous permettra de réaliser des prédictions spatiales. On classe les variables spatiales en domaines, qui correspondent à des types de données distincts. Lorsque les données sont échantillonnées irrégulièrement mais peuvent être en principe mesurées en tout point d'un domaine continu (ex. les teneurs en matière organique dans un champ agricole). Enfin, lorsque ce sont les coordonnées qui portent l'information principale (positions des arbres dans une forêt, points d'impact de la foudre dans une région, etc.), on parle de processus de points. Les frontières entre ces domaines ne sont pas toujours aussi nettes. Plus généralement, dans les phénomènes naturels, les corrélations diminuent et la variabilité augmente avec la distance. (Guillot. G, 2004).

### 1.2 Aperçu historique sur la géostatistique

La géostatistique est née dans le contexte très particulier de l'estimation des réserves des gisements miniers. Matheron. G, 1965 a posé les fondations dans l'ouvrage « Les variables régionalisées et leurs estimations ». Il s'agissait d'une contribution pionnière et très originale

en statistiques appliquées. Il a posé un cadre théorique et méthodologique répondant à deux difficultés majeures :

- Comment définir un cadre statistique cohérent pour étudier un phénomène sans répétition,
- Comment prendre en compte les corrélations spatiales existant entre des données récoltées sur un événement unique.

Les années 1965 à 1985 ont essentiellement été des années de consolidation et de diffusion auprès des utilisateurs de ces concepts principalement (les géologues, mais également en halieutique, en sciences du sol et en sciences de l'environnement), tout en restant en marge de la communauté statistique. De ce contexte minier est resté un vocabulaire assez spécifique : krigeage, effet de pépite, effet de support, etc. En 1989 est paru « Estimating and Choosing » un livre de réflexion épistémologique sur la place de la modélisation probabiliste en géoscience. A partir des années 1980, la géostatistique a été redécouverte par les statisticiens, notamment américains. Le livre « Statistics for Spatial Data » de Noël Cressie a marqué l'ancrage définitif de la géostatistique et a entraîné sa pleine reconnaissance par la communauté statistique. Les recherches les plus récentes dans ce domaine concernent les pratiques des tests, la modélisation spatio-temporelle, la géostatistique multivariée, la géostatistique sur les réseaux (Allard. D, 2012).

### **1.3 Théorie des variables régionalisées concepts et méthodes**

#### **1.3.1 Quelques points vocabulaires**

En général un jeu de données spatiales se présente sous la forme d'une liste de valeurs numériques  $z = (z_1, \dots, z_n)$  (la variable) et des coordonnées des sites  $(s_1, \dots, s_n)$  auxquelles la variable a été mesurée ou estimée. Quand on réalise une mesure physique, cette dernière est associée à une longueur, une surface ou un volume élémentaire. Par exemple, on peut mesurer la pluie avec un pluviomètre qui donne la hauteur d'eau tombée sur une surface d'environ 400 cm<sup>2</sup>. Ces longueurs, surfaces, volumes, élémentaires constituent ce que l'on appelle le support de la mesure. Une mesure réalisée à un support spatial donné peut être réalisée à différents supports temporels. Par exemple, on peut mesurer la pluie avec un pluviographe pendant une journée et en déduire la pluie moyenne sur la journée ou la pluie maximale sur la journée. Il s'agit de deux variables distinctes qui auront des propriétés géostatistiques très différentes. Lorsqu'on cherche à déduire les propriétés statistiques d'une variable à un certain support à

partir de cette même variable à un autre support, on dit qu'on réalise un changement de support. Il ne faut pas confondre la notion de support avec la notion d'échelle qui désigne quelque chose de beaucoup plus vague selon le contexte. Il s'agit de la taille du domaine étudié ou du support temporel de la mesure.

### 1.3.2 Distribution monovariante

Avant d'envisager quoi que ce soit, il est bon de représenter l'histogramme de variable ( $Z$ ), qui permet d'évaluer à quel point la distribution s'écarte d'une loi gaussienne. Beaucoup de méthodes atteignent une efficacité maximale lorsque la distribution de ( $Z$ ) est celle d'un vecteur gaussien, ce qui suppose entre autres que la distribution marginale soit gaussienne. L'écart au caractère gaussien peut se manifester par :

- une dissymétrie, une accumulation de valeurs en un ou en plusieurs points.
- un ensemble borné de valeurs possibles.

### 1.3.3 Répartition spatiale

Cette inspection très partielle de la distribution de  $z$  doit être complétée par une étude de la répartition spatiale des valeurs de  $z$ . On peut le faire en traçant un « symbol plot » dans lequel on représente pour chaque site un symbole (croix, étoile, cercle) dont la taille est proportionnelle à la valeur observée  $z$ . L'examen de ce « symbol plot » permet de détecter la présence de variations systématiques dans les données.

### 1.3.4 Nuée variographique

A ce stade, on ne s'est pas encore préoccupé de l'éventuelle dépendance entre les données. C'est ce que l'on fait en construisant ce que l'on appelle la nuée variographique. Il s'agit du nuage de points formés par les couples  $(S_i - S_j)$ ,  $(Z_i - Z_j)$ . Les paires de valeurs de  $Z$  mesurées en des sites géographiquement proches ont tendance à être plus similaires que celle mesurées en des sites éloignés. C'est ce genre de comportement qui fait qu'on doit rejeter l'hypothèse d'indépendance entre les données.

### 1.3.5 Fonctions aléatoires

La question qui se pose maintenant est de modéliser la distribution statistique de l'échantillon  $Z_1, \dots, Z_n$ . Il suffit de spécifier une fonction de répartition commune toutes les variables aléatoires de l'échantillon. Il est plus difficile, parce qu'en toute généralité, il faudrait spécifier comment est distribué chaque  $Z_i$ , chaque couple  $(Z_i, z_j)$ , chaque triplet etc.

---



Mais il se trouve que l'on peut décrire la distribution spatiale d'un échantillon de manière assez précise dans le cas où la distribution statistique de la variable présente une forme d'invariance par translation dans l'espace. Pour préciser cette notion, il sera commode de pouvoir faire référence à des valeurs de la variable en tout point de l'espace. Notons  $Z(s)$  la valeur de notre variable (mesurée ou non) au point de coordonnées  $(s)$ . Comme  $Z_1, \dots, Z_n$ , cette grandeur est une réalisation d'une variable aléatoire. On définit ainsi en tout point  $(s)$  une variable aléatoire  $Z(s)$ . On dit que  $Z$  est une fonction aléatoire.

## 1.4 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  $F(Z(s_i), Z(s_j) | v_i, v_j)$ .

### 1.4.1 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).

### 1.4.2 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). Toute fonction aléatoire stationnaire d'ordre deux est également intrinsèque (la réciproque est fausse). Autrement dit, l'hypothèse de stationnarité intrinsèque est moins restrictive que la stationnarité du second ordre. L'hypothèse intrinsèque ne requiert pas de connaître l'espérance ni sa covariance de la variable aléatoire. La fonction la plus utilisée en géostatistique pour décrire la continuité spatiale est le variogramme. La continuité spatiale est réalisée lorsque les valeurs prises entre deux sites proches l'un de l'autre sont similaires.

## 1.5 Variogramme théorique et variogramme expérimental

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.

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

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 est défini comme :

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

$$\text{Avec } C(0) = \text{var}(Z(s)) \text{ et } C(h) = \text{cov}(Z(s+h), Z(s)) \quad (\text{I.3})$$

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.
- Dans l'hypothèse de stationnarité d'ordre 2, covariance et variogramme existent et sont liés par la relation  $\gamma(h)=C(0)-C(h)$ . Dans l'hypothèse intrinsèque, seul le variogramme existe. C'est pourquoi il est généralement préféré à la covariance pour décrire et interpréter la structure spatiale du phénomène étudié.
- Le variogramme réel d'une fonction aléatoire est généralement inconnu, mais il peut être évalué à partir des données d'échantillonnages. On obtient ainsi le variogramme expérimental.

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z(s_i+h) - Z(s_i)]^2 \quad (\text{I.4})$$

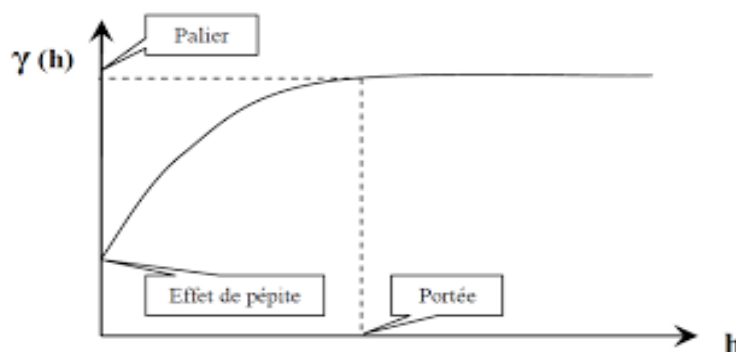
$N(h)$  est le nombre de paires dans la classe de distance  $h$ .

Z (si) est la variable (Nitrates et Piézométrie) au point de mesure (point d'eau).

### 1.5.1 Propriétés du variogramme

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

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



**Figure 1.1** : Propriétés du variogramme.

#### Remarque :

- Plus la fonction croît, moins les observations se ressemblent ;
- L'effet de pépité : 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 pépité), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines ;
- 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 (Journel et Huijbergts, 1978) ;
- Inversement, si un variogramme est non borné, il ne possède ni portée, ni palier. La variance de la fonction n'est pas définie.
- Arnaud et Emery (2000, p.126) affirment que le variogramme expérimental n'est pas fiable pour des distances supérieures à la moitié du diamètre du champ D.

### 1.5.2 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 :  $\gamma(h) = C_0 + C \left( 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right)$

### 1.5.3 Validation croisée

Une pratique intéressante pour valider le modèle de variogramme et consiste à effectuer une validation croisée. Le principe est d'éliminer à tour de rôle chaque observation et de l'estimer à l'aide de ses voisins. En chaque point, on obtient donc une valeur vraie et une valeur estimée que l'on peut comparer pour déterminer si le modèle fournit des estimations se comportant comme prévu. Plus précisément, soit  $Z_i^*$  l'estimation obtenue par krigeage au point "i". On peut définir un résidu  $e_i = Z_i - Z_i^*$  et un résidu normalisé  $n_i = e_i / \sigma$ . Un modèle et adéquat devraient fournir : la distribution des erreurs standardisées est gaussienne avec une moyenne des erreurs standardisées (MES) proche de zéro et une variance des erreurs standardisées (VES) égale à l'unité.

### 1.5.4 Isotropie et anisotropie

Le variogramme ne dépend que de  $h$ , c'est-à-dire le vecteur de déplacement entre les points  $S$  et  $S+h$ . Ce vecteur contient de l'information sur la distance entre ces deux points, par l'intermédiaire de sa norme, ainsi que sur l'orientation de  $h$ . Si le variogramme ne dépend en fait que de la norme de  $h$ , il est dit isotrope. S'il dépend aussi de la direction ( $\theta$ ) du vecteur de translation, il est dit anisotrope. Rappelons que la norme euclidienne d'un vecteur :

$$h = (s_i, s_j) \text{ est } |h| = \sqrt{s_i^2 + s_j^2} \quad (\text{I.6})$$

Bien qu'il existe une très grande variété d'anisotropie, la plupart des ouvrages de géostatistique montrent uniquement comment modéliser les anisotropies géométriques. Les caractéristiques de l'anisotropie géométrique sont :

- Les variogrammes des différentes directions ont le même palier et même effet pépite mais des portées différentes.
- Les portées maximales et minimales s'observent selon deux directions orthogonales.

### 1.5.5 Cas multivarié (variogrammes croisés)

Un des avantages des méthodes géostatistique était de pouvoir inclure dans le modèle d'interpolation des variables auxiliaires qui apportent de l'information sur la variable cible. Pour décrire la structure de dépendance entre la variable cible et les covariables, il convient de calculer le variogramme croisé. Soit  $Z_p$  la variable principale et  $Z_q$  la variable secondaire, alors :

$$\widetilde{\gamma}_{pq}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_1^{N(h)} [Z_p(s_i) - Z_p(s_i + h)][Z_q(s_i) - Z_q(s_i + h)] \quad (I.7)$$

L'analyse du variogramme croisé se fait de la même façon que celle du variogramme simple. C'est-à-dire que l'on relève ses propriétés (effet de pépite, palier, porté, amplitude) et on y ajuste une fonction.

### 1.5.6 Krigeage

Le krigeage est un interpolateur exact et optimal, la valeur estimée sur un point de mesure est égale à la valeur du point de mesure, il minimise la variance sur l'erreur d'estimation (Laborde, 2000). Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. Il est possible d'améliorer les estimations obtenues par krigeage en ajoutant à la variable à estimer, l'information fournie par d'autres variables (variables secondaires ou auxiliaires).

C'est une méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance. Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental.

## 1.6 Cartographie

Une carte est une représentation géométrique généralement plane, simplifiée et conventionnelle, de toute la surface terrestre ou d'une partie, dans un rapport de similitude

convenable. La cartographie réunit l'ensemble des études et des techniques qui permettent à l'homme de se représenter l'espace sur lequel il exerce une activité politique, économique ou scientifique.

### **1.6.1 Cartes et cartographie**

#### **1.6.1.1 Aperçu sur l'histoire de la cartographie**

L'histoire de la cartographie est le reflet des connaissances techniques nécessaires à l'établissement de cartes, de l'antiquité à nos jours. Dans l'antiquité le grec Ptolémée vers 150 après Jésus Christ, prépare une carte générale du monde connu avec des cartes secondaires qui fournissent des noms de fleuves, de peuples, de villes ou de promontoires dont la localisation est basée sur une réflexion scientifique dont la réalisation pratique est incertaine.

Au XI<sup>e</sup> siècle, l'église représente le monde de façon cosmogonique, les cartes en T. Jérusalem est au centre, seules existent l'Europe, l'Afrique et l'Asie, entourés d'un océan. Ces représentations sont directement inspirées des connaissances de la période biblique. Ce type de cartes ne servait pas à se repérer. Elles étaient un support à la réflexion philosophique et religieuse. Les premières représentations cartographiques naissent au XII<sup>e</sup> siècle. La Table de Peutinger sert alors d'itinéraire entre plusieurs villes, de façon linéaire.

Vers la fin du XIII<sup>e</sup> siècle, un nouveau type de carte apparut, le portulan, très utile aux marins. Il représentait les ports de commerce, les amers, les îles et les abris etc., mais l'intérieur des côtes restait vierge.

En 1553, la première carte de France est dressée par Oronce Fyné. Elle témoigne de la volonté du pouvoir politique de marquer sa présence sur le territoire, de s'affirmer, de se construire des limites, des frontières, pour aménager son territoire, entre autres par la fiscalité et la consolidation des marchés économiques internes. À la même époque, apparaissent les premiers plans terriers, ancêtres du cadastre actuel (Yann, C, 2001).

À l'époque moderne, les cartes se veulent une reproduction fidèle d'un paysage, d'une portion de l'espace terrestre, tous les éléments constitutifs d'un paysage sont représentés selon des conventions, avec des symboles. Chaque élément est représenté à l'échelle de la réalité, les éléments trop petits en surface plane sont remplacés par des symboles d'une taille proportionnelle à leur importance relative (noms des villes de plus en plus grands selon leur population ou leur fonction administrative).

Au XVI<sup>e</sup> siècle apparaît à Dieppe (France) une importante école de cartographie, menée par Pierre Desceliers, celle-ci permet la réalisation de nombreuses cartes et mappemondes, basés à la fois sur les portulans des marins portugais et sur les dernières connaissances acquises par l'exploration du Canada à laquelle les marins dieppois participaient activement. Ensuite, la cartographie progressera de plus en plus, par la mise au point de nouvelles techniques et par la volonté des pouvoirs politiques de maîtriser leurs territoires, en témoigne le soutien que recevaient les missions cartographiques des toutes puissantes sociétés géographiques de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Jégou.L et Buosi.J, 2007).

En France, la première carte générale du territoire fut dressée par la famille Cassini au XVIII<sup>e</sup> siècle, à l'échelle d'une ligne pour cent toises, autrement dit une échelle de 1/86 400. Cette carte constituait pour l'époque une véritable innovation et une avancée technique décisive. Elle est la première carte à s'appuyer sur une triangulation géodésique dont l'établissement prit plus de cinquante ans. Les quatre générations de Cassini se succédèrent pour achever ce travail. Cette carte, encore dénommée carte de Cassini ou carte de l'académie, est toujours consultée de nos jours par les chercheurs (géographes, historiens, etc.). Le travail des Cassini laissa même son empreinte sur le terrain, on trouve encore aujourd'hui des toponymes dits signal de Cassini, qui montrent les lieux où s'effectuèrent les mesures de l'époque. Ces points de repère correspondent aux sommets des quelque mille triangles qui formaient le géodésique de la carte de Cassini.

En 1808, Napoléon décida l'établissement d'une carte destinée à remplacer celle de Cassini, sa mise en œuvre se fera entre 1817 et 1866, essayant plusieurs échelles différentes. C'est une carte à l'usage des militaires, la carte de l'état-major, à l'échelle du 1/80 000. Cette désormais célèbre carte d'état-major fut levée et dessinée par le dépôt de la guerre, devenu ensuite le service géographique de l'armée, et remplacé plus tard par l'institut géographique national (IGN).

Dès le début de la première guerre mondiale (1914-1918), les difficultés de lecture à cette échelle amenèrent l'état-major à réaliser une carte au 1/50 000, plus commode, sur laquelle apparaît un quadrillage kilométrique très pratique sur le terrain. C'est sur la base de cette carte au 1/50 000 que sera créée la carte au 1/25 000 de l'IGN, appelée aujourd'hui carte de voyage, mais que les Français ont appelé longtemps, par habitude, carte d'état-major (Plumejeaud. C et al, 2012).

### 1.6.1.2 Idée de 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.

C'est une science, car ses bases sont mathématiques, notamment en ce qui concerne la détermination de la forme et des dimensions de la terre puis le report de la surface courbe de la terre sur un plan (la carte) grâce au système des projections et enfin l'établissement d'un canevas planimétrique et altimétrique. L'enjeu est la précision et la fiabilité de la carte.

C'est un art, car en tant que mode d'expression graphique, la carte doit présenter des qualités de forme (esthétique et didactique grâce à la clarté du trait, à son expressivité et sa lisibilité) afin d'exploiter au mieux les capacités visuelles du lecteur. Cela exige de la part du concepteur et du réalisateur des choix dans la représentation.

C'est enfin une technique, car elle nécessite d'amont en aval, l'emploi d'instruments dont les progrès ont bouleversé toute la filière cartographique (photographies aériennes, satellites, ordinateurs, impression, etc.).

Donc, la définition de la cartographie suppose que la représentation de la terre s'accomplit grâce à un ensemble de techniques et de méthodes (Poidevin. D, 2010).

L'efficacité de la représentation cartographique réside dans le temps nécessaire pour mémoriser correctement l'information qui veut être transmise. Le choix de l'image à transmettre doit donc se faire avant tout en fonction du public visé. Quel que soit ce public, plus l'image est simple, plus le message est facile à mémoriser. Le langage visuel est spécifique, car il est inverse du langage écrit ou parlé, l'œil perçoit d'abord un ensemble, il généralise puis cherche le détail. Enfin, il s'agit d'un système spatial où trois variables sont mises en relation, les deux dimensions orthogonales qui définissent le plan et les phénomènes représentés qui apparaissent comme des taches. Les images doivent résumer sous une forme immédiatement perceptible les données essentielles de l'information. Bertin. J in (Zanin et al, 2003) assure que « l'efficacité du message sera d'autant plus grande que le nombre d'images et leur complexité seront réduites et que la lecture pourra être faite au niveau de l'ensemble ». La question essentielle reste donc de savoir ce qu'il faut communiquer et comment ? (Zanin. C et Trémélo.T. M, 2003).



### 1.6.1.3 Carte

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. Cette représentation est faite sur papier ou sur un autre support tel que le verre, le bois ou un écran d'ordinateur. Elle est conçue à la main ou par une machine. Les distances sur la carte sont toujours dans le même rapport que sur le terrain, selon F. Joly in (Poidevin. D, 2010). La notion de carte n'est pas à confondre avec celle de plan qui représente un espace restreint. On parle de plan de maison, de quartier voire de ville mais jamais de plan d'un pays ou d'une région.

De cette définition se dégagent cinq grands principes dont les conséquences pratiques guident ou devraient guider le travail de tout cartographe, professionnel ou non.

- la carte est un document visuel. Ceci explique que la conception et la réalisation d'une carte doivent respecter des règles simples mais rigoureuses.
- La carte matérialise le passage de la sphère terrestre à un plan. Ce passage est réalisé grâce au procédé des projections.
- Une carte n'a pas pour objectif de représenter l'espace en vraie grandeur, au contraire, le but est d'obtenir un document maniable (l'échelle
- la réduction impose une série d'opérations graphiques que l'on regroupe sous le nom générique de généralisation et qui visent à choisir les objets à représenter et à remplacer leurs formes observées sur le terrain par des figurés conventionnels.
- le cartographe utilise un langage cartographique, qui possède sa propre grammaire.

La carte est différenciée par deux grands types, d'une part les cartes de base appelées également cartes générales issues de la cartographie mathématique et d'autre part les cartes spéciales. Dès le XVIIe siècle, l'homme a cartographié la terre dans un but moins restrictif que celui de représenter la topographie des pays et de décrire la terre. Les cartes sont devenues des instruments de connaissance, de décision, de prévision et de planification au service des états. Sont donc apparues des cartes spécialisées aujourd'hui communément appelées cartes thématiques (Poidevin. D, 2010).

#### 1.6.1.4 Règles à respecter

Pour concevoir une carte sans erreurs, il peut paraître subjectif voire prétentieux d'affirmer qu'une carte puisse être de meilleure qualité qu'une autre. Quels sont en effet les critères permettant de juger en toute impartialité de la valeur d'une carte ? Ou, posé d'un point de vue pédagogique, quelles sont les erreurs à éviter pour concevoir une carte de qualité ? De l'amont à l'aval du processus de la conception et de la réalisation d'une carte, il est possible d'identifier cinq erreurs majeures :

- le manque de soin et de précision dans la collecte et le traitement des données,
- une utilisation incorrecte du langage cartographique,
- la réalisation d'une carte surchargée ou illisible,
- la réalisation d'une carte incomplète,
- la réalisation d'une carte à lire.

On peut s'étonner de ne pas trouver dans cette énumération d'erreurs, le fait de réaliser une carte mal présentée ou peu soignée. Cela renvoie donc au critère de l'esthétique. Le problème est que l'esthétique est un critère subjectif puis tributaire des moyens techniques mis en œuvre et enfin relatif au type de carte en question. Dans tous les cas, en tant que concepteur d'une image, le cartographe expérimenté n'est pas à l'abri d'une faute de goût tandis qu'une carte esthétiquement très réussie n'est pas forcément dénuée d'erreurs. Il est donc difficile voire impossible de fixer des limites en matière d'élégance de présentation. Le manque de soin apporté à la réalisation d'une carte n'est pas à proprement parlé une erreur mais plutôt une maladresse dont les conséquences sont forcément nuisibles au résultat final. Même le cartographe le plus averti est susceptible de commettre des maladresses mais les erreurs sont plus graves, car elles résultent d'un non-respect des règles de base d'où l'importance d'observer exactement les « quatre commandements » suivants :

- Etre rigoureux avec la collecte et le traitement des données ;

Toutes les cartes sont le résultat d'observations et la transcription graphique de données quantitatives ou qualitatives. Une carte topographique par exemple est l'aboutissement de travaux de géodésie, de planimétrie, de topographie, etc. Trop nombreuses pour être directement cartographiées, les données doivent faire l'objet de traitements (mathématiques, graphiques, statistiques et fréquemment d'une mise en classes). Quoiqu'il en soit, si le cartographe représente des données fausses à cause de sources douteuses, d'oublis ou de mauvais traitements statistiques par exemple, la carte

sera elle-même faussée et les conséquences peuvent être graves notamment pour les cartes d'aide à la décision. Le lecteur a très peu de chances de détecter ce type d'erreurs sauf s'il a accès à d'autres sources d'informations.

- Le traitement graphique doit être judicieux ;

L'erreur la plus communément répandue tient à la représentation graphique des données. La quasi absence de conventions en cartographie pourrait laisser penser que tout est possible. En théorie, oui, mais la vision humaine a ses propriétés, si le cartographe n'a pas respecté les règles du langage cartographique, la carte devient fautive et illisible et de toute façon improductive.

- Une carte doit être lisible (nette et économique) ;

L'un des apports majeurs de la carte est de contribuer à saisir immédiatement une problématique. A la différence d'un tableau ou d'un texte, une carte est capable d'associer, de simplifier et de synthétiser les composantes d'un phénomène géographique. Ces qualités apparaissent si le message est net et concis.

- Une carte doit être complète ;

Toute carte devrait posséder les éléments indispensables à sa présentation et à sa compréhension. Selon le type de carte, certains de ces éléments sont optionnels mais la plupart sont obligatoires.

- Le contenu de la carte : C'est le seul élément dont on n'a jamais déploré l'absence,
- L'orientation : orienter un fond de carte est loin d'être inutile surtout lorsque l'on travaille à grande échelle ou sur des fonds de carte dont les contours sont peu connus. On oriente avec le Nord.
- L'échelle : elle devrait toujours être présente, quelle que soit la carte. Elle permet d'évaluer les dimensions du territoire cartographié. On peut la donner sous forme numérique (1/5000, 1/10000 ...) mais on préférera une échelle graphique, car elle offre une plus grande commodité d'emploi.
- Un cadre : aujourd'hui, un simple trait fin noir suffit pour matérialiser le cadre. Il se place à une distance moyenne d'un centimètre du bord de la feuille.
- Une légende : élément essentiel de la carte, elle définit les symboles employés sur la carte. Sans elle, aucune compréhension n'est possible. De la rigueur de la légende dépend en grande partie la rigueur de la carte.

- Un titre : également obligatoire, contient le moins de mots possibles, il doit être visible, écrit en capitales.
- Les coordonnées : latitude et longitude, sont utiles pour les cartes à petite échelle, souvent en dehors du cadre
- La date : elle est obligatoire. Sans date, on ne peut contrôler le degré d'ancienneté de l'information, ce qui est capital pour l'information géographique en perpétuelle évolution.
- La nomenclature : elle est l'ensemble des noms de lieux ou de faits géographiques écrits sur le fond de carte. Elle est nécessaire sur les cartes de localisation pour lesquelles la liste des noms de lieux constitue une base. Elle sera toujours sobre afin de ne pas nuire au message de la carte. Le cartographe a le choix de jouer sur la forme, la taille, la valeur et la couleur des lettres.

Au final, le problème de la carte à lire souligne combien l'expression cartographique procède de la physiologie de notre œil. Si le concepteur et réalisateur de cartes n'admet pas cette évidence, alors ses cartes, ses images seront toujours illisibles (Bouron, P. 2005).

#### **1.6.1.5 Informatique et la cartographie**

L'informatique, c'est l'ensemble des disciplines, techniques et moyens reliés au traitement de l'information par les ordinateurs. Elle a connu un développement spectaculaire au cours des deux dernières décennies. Il est rare actuellement qu'une discipline scientifique ou humaine ne fasse pas appel à l'informatique. Quand on pense « ordinateur » on pense à sa capacité formidable de calcul et de mémoire lui permettant de résoudre en espace de quelques minutes des problèmes dont la résolution par des procédés traditionnels aurait pris la vie entière d'un mathématicien. L'apparition de l'informatique dans le domaine de la cartographie est déjà ancienne puisque les premières cartes par ordinateur datent du début des années 60. Néanmoins, à cette époque, la technologie encore balbutiante et surtout les obstacles financiers empêchaient l'expansion de la cartographie par ordinateur qui ne concernait qu'un noyau de spécialistes. Depuis, elle s'est perfectionnée sans cesse si bien qu'aujourd'hui, concevoir une carte sur ordinateur est en passe de devenir un acte aussi ordinaire qu'utiliser un traitement de texte. Cette évolution a bouleversé toute la filière cartographique.

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.

Une banque de données n'est rien d'autre qu'une quantité d'informations groupées selon certaines règles qui permettent l'accès automatique à n'importe quelle donnée, la comparaison de l'une par rapport à l'autre et enfin de connaître le comportement dans le temps et l'espace d'une donnée particulière ou d'un groupe de données.

Il importe que chaque donnée soit accompagnée de ses coordonnées géographiques et chronologiques en vue de sa localisation précise dans l'espace et le temps. Un autre avantage de cette technique est de pouvoir tester à l'avance, avant la prise de décision, les modifications que l'application des recommandations d'un plan d'aménagement urbain ou régional pourrait entraîner (Maillard. A, 1972).

Le vocable cartographie assistée par ordinateur a le mérite d'être clair mais ses initiales étaient déjà utilisées par conception assistée par ordinateur, discipline qui fait référence aux traitements graphiques en général. L'expression cartographie automatique est souvent utilisée pour qualifier toute la chaîne de fabrication d'une carte. On obtient donc au final une carte automatique. Il est vrai que l'ordinateur entraîne une automatisation de toutes les étapes de la réalisation d'une carte, tracé du fond de carte, traitement des données, dessin, légende automatique, impression, etc. Mais cette expression de cartographie automatique est abusive tant le rôle du cartographe reste fondamental à tous les stades de l'élaboration de la carte, choix du sujet, des objectifs, des traitements statistiques, de l'échelle, entrée des données, retouche d'images, etc. Le jour où l'ordinateur pourra prendre en charge, sans intervention du cartographe, la création d'une carte est encore loin (Maillard. A, 1972).

### Les 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, une couleur de fond, etc. Enfin, les logiciels de cartographie

---

effectuent des analyses spatiales très raffinées (intersections, sélection d'objets selon divers critères, calculs d'itinéraires, d'isochrones, analyses factorielles, etc.).

#### **1.6.1.6 Système d'information géographique (S.I.G.)**

Un système d'information géographique (SIG) est un système permettant de créer, d'organiser et de présenter des données numériques spatialement référencées, autrement dit géoréférencées, ainsi que de produire des plans et des cartes. D'après Joliveau.T, un S.I.G. est l'ensemble des structures, des méthodes, des outils et des données constituées pour rendre compte des phénomènes localisées dans un espace spécifique et faciliter les décisions à prendre sur cet espace.

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). À ces primitives sont associées des informations attributaires telles que la nature (route, voie ferrée, forêt, etc.) ou toute autre information contextuelle (nombre d'habitants, type ou superficie d'une commune par ex.). Le domaine d'appartenance de ce type de systèmes d'information est celui des sciences de l'information géographique. Le logiciel SIG le plus connu est fourni par la société Google « Google Earth » pour le grand public et sa version professionnelle « Google Earth Pro ». C'est grâce aux logiciels de Google que les SIG sont en train de se démocratiser (Zeroili. D et al, 2012).

#### **1.6.1.7 Travaux sur la cartographie et la géostatistique**

L'Algérie est l'un des pays du monde, confronté aux phénomènes de crues et d'inondations. Ces phénomènes ont provoqué des catastrophes destructrices et ont occasionné d'importants dégâts matériels et humains à l'instar des inondations de Bab-El Oued-Alger (2001) et de Ghardaïa (2008), ceci s'explique par la présence d'une forte urbanisation au plus près des cours d'eau et l'absence d'instruments d'urbanisme qui réglementent l'occupation du sol et définissent les espaces non constructibles, donc les personnes oublient la dangerosité

de l'oued et s'installent dans son lit majeur. Dans ce contexte, Astite. W. S et al (2012) achevant un travail qui consiste à la réalisation d'une carte des zones inondables au moyen d'une modélisation hydrologique et hydraulique à l'échelle du bassin hydrographique de oued El Harrach (Alger) pour déterminer et délimiter les zones d'aléa et de vulnérabilités aux inondations. Puis intégrer ces zones à risque dans les plans de gestion et d'aménagement des territoires. Cette méthode peut servir de base à l'élaboration d'un plan de prévention des inondations pour la gestion et la planification de l'urbanisation.

La région d'Errachidia située dans la zone sud atlasique du Maroc, est confrontée à d'énormes difficultés alliant rareté et faible qualité de l'eau suite aux périodes de sécheresse sévère qui l'ont affectée durant ces dernières décennies, et dont les conséquences écologiques sont considérables, comme l'atteste le recul du domaine irrigué (Palmeraie) sous l'action de la désertification. Donc il s'avère nécessaire de surveiller les ressources naturelles disponibles en vue de leur gestion rationnelle et durable. Dans ce contexte la télédétection est un outil performant d'acquisition d'informations nécessaires à la surveillance et à la gestion des ressources naturelles, sur une large échelle spatio-temporelle. D'où la nécessité de suivre et de comprendre la dynamique des unités d'occupation du sol, afin d'aider à la prise de décision et pour une gestion durable de ces ressources. Abba. M et al (2012) réalisant une étude dans un objectif de connaître et cartographier l'évolution de la palmeraie dans cette région. Une analyse combinant modèle numérique du terrain naturelle (MNT) et images satellitaires servira à la production des supports cartographiques utiles à l'étude de la dynamique aux fins de prises de décision. Il ressort de manière globale une tendance généralisée à une dégradation des ressources végétales sous l'effet conjugué de l'action, urbanisation et les conditions climatiques.

Le risque d'érosion est un des problèmes majeurs de l'utilisation agro-pastorale des campagnes. Souvent discret, mais insidieux, ce risque d'érosion peut prendre, en certaines circonstances ou se conjuguent des raisons climatiques, lithologiques, anthropiques, des proportions alarmantes pour l'occupation humaine et pour l'économie des états. Dans cette profession Joly. F (1999) traite le sujet de l'érosion dans le bassin Afrique du Nord et fait une analyse cartographique qui découle d'observations et de mesures directes sur le terrain. Ces observations sont complétées par des analyses en laboratoire, plus la télédétection (photographies aériennes) qui était un facteur essentiel dans cette étude.

Dans un contexte de changements climatiques, et face aux différentes inondations observées ces dernières années en milieu urbain, la quantification des risques hydro-climatiques à

---

l'échelle régionale est un sujet d'intérêt majeur. L'établissement d'un lien statistique entre les intensités (ou les hauteurs) de pluies intenses et la récurrence de ces événements permet de déterminer la dimension des ouvrages en fonction d'un niveau de risque (ou de service) préalablement défini. Elles constituent aujourd'hui, un outil de premier plan pour divers utilisateurs. Ce travail porte sur l'étude des pluies maximales annuelles (SMA), enregistrées sur 49 stations au centre de l'Algérie. L'objectif de ce travail est de déterminer les estimateurs que sont les courbes « Intensité-durée-Fréquence » (IDF) et de régionaliser l'exposant climatique. Différentes durées allant de 15 min à 24 heures, sont étudiées. Les méthodes d'interpolations géostatistiques qui s'appuient sur une modélisation probabiliste sont utilisées. Il s'agit de réaliser des cartes indiquant la répartition spatiale de l'exposant climatique, par le biais de cokrigage collocalisé (CoKC) qui est un interpolateur exact et optimal. (Khelfi et al, 2017)

## **1.7 Origine de la pollution**

Plusieurs pays du monde y comprennent l'Algérie souffrent des problèmes de pollution d'eau de nappes, et ça revient principalement aux activités de l'homme et leurs habitudes, secondairement à des causes naturelles et accidentelles, suivant l'origine des substances polluantes, on peut distinguer :

### **1.7.1 Origine domestique**

Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergentes, solvants, antibiotiques, micro-organismes...). Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçu ou mal dimensionné, les stations d'épurations urbaines surchargées... Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme libèrent également des lixiviats riches en polluants. (Faurie.C et al, 2003)

### **1.7.2 Origine agricole**

La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps ; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, l'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines. Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur la surface cultivée, soit par rejet dans des puits perdus, des gouffres et bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert.

---



L'épandage des boues de stations d'épuration pose problème par leur charge possible en métaux lourds et germes, en plus de leur richesse en azote résiduelle après culture. (Faurie.C et al, 2003)

### **1.7.3 Origine urbaine et routière**

Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules...). En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées, due au mauvais état des réseaux, au raccordement défectueux, et au surcharge ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration. L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...). Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe. (Faurie.C et al, 2003)

### **1.7.4 La pollution minérale**

#### **1.7.4.1 Composés azotés**

L'eau d'une nappe ne contient naturellement pas de composés azotés, ils proviennent de la décomposition de la matière vivante par les micro-organismes et sont minéralisés en azote gazeux. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe, cet azote se trouve sous forme de nitrates et d'ammonium, les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. Pour la nappe de la craie, on estime qu'il faut quelques dizaines d'années pour qu'ils passent du sol à la nappe. Leur origine est principalement agricole, la pollution engendrée est diffuse, ils sont le résultat de :

- Un excès de matières organiques végétales en décomposition sur le sol et dans le sol après la récolte, ou après un déboisement.
- Un épandage d'engrais azotés en quantité supérieure aux besoins des plantes cultivées, comme engrais chimiques (nitrates de potasse, ...) et organiques (fumier, lisier...). (Normand.B et al, 2000).

#### **1.7.4.2 Métaux**

La pollution par composés métalliques est généralement d'origine industrielle mais elle peut également provenir de la lixiviation des déchets solides ménagers. Des métaux ne produisent que des inconvénients d'aspect ou de goût (Fer, zinc, manganèse...), l'eau doit être

traitée pour être potable, ou utilisée en l'état pour d'autres usages. Les métaux lourds, comme le Mercure, le Cadmium, le Plomb et le Chrome, sont toxiques et rendent l'eau inutilisable pour l'usage domestique et l'agriculture. (Guillemin.C et Roux.J.C, 2001).

### **1.7.5 La pollution organique**

#### **1.7.5.1 Produits de dégradation de la matière vivante**

La décomposition de la matière organique par les micro-organismes libère des nitrites, nitrates, ammonium, méthane et hydrogène sulfuré ; la matière organique résiduelle persistant dans l'eau constitue un milieu favorable au développement des germes qui peuvent être pathogènes. La présence de matière organique dans l'eau d'une nappe indique généralement une pollution ponctuelle proche du captage, sauf dans le cas des milieux fissurés où l'origine peut être plus lointaine ; c'est un facteur de déclassement de l'eau. (Grelaude.G, 1999).

#### **1.7.5.2 Hydrocarbures**

La contamination de la nappe est généralement accidentelle (fuite de cuve d'essence, rupture de canalisation...). Les hydrocarbures légers, non miscibles à l'eau, s'étendent à la surface de la nappe ; ils confèrent à l'eau un goût caractéristique même à très faible teneur qui la rend imbuvable. Le traitement de la nappe se fait par pompage du polluant. Les hydrocarbures lourds se rassemblent à la base de la nappe ; ils se diffusent faiblement. (Ballerini et al, 1998).

#### **1.7.5.3 Substances de synthèse**

Détergents les détergents sont en général biodégradés dans le sol ou adsorbés sur les argiles. Certains atteignent la nappe à partir des puits ou à partir des rivières polluées dans les nappes alluviales, leur toxicité est faible mais en tant que produits mouillants ils favorisent la dispersion d'autres produits indésirables comme les pesticides (Ballerini et al, 1998).

##### **- Pesticides**

Ces produits, généralement peu solubles, sont associés à des mouillants qui favorisent leur dispersion. Ils sont en partie métabolisés ou retenus dans le sol et dans la zone non saturée. Leur transfert à la nappe est faible, même en région agricole, on trouve principalement dans l'eau les traces de deux herbicides, l'atrazine et la simazine, employés à forte dose dans les cultures de maïs (Renard. S, 2002).

##### **- Phtalates**

Très employés comme plastifiants dans la production d'objets en PVC souple. Le plus utilisé reste le DEHP (di (2-éthylhexyl) phtalate), en raison notamment de son très bon rapport qualité-prix, même si la place qu'il occupe sur le marché est en diminution. Le risque de

toxicité directe paraît faible pour l'écosystème aquatique du fait de sa faible solubilité dans l'eau. Des effets perturbateurs ont été observés sur des poissons (Levet.D, 2008).

- **Solvants**

Les propriétés chimiques de ces composés très volatils (pollution de l'air), très fluides et très solubles dans l'eau font qu'ils migrent rapidement sans dégradation vers les nappes d'eau souterraines. En revanche, ils subsistent peu de temps dans les eaux superficielles. Quelques exemples de molécules : perchloréthylène, chloroforme, chlorure de méthylène. Leur biodégradabilité est généralement faible ; ils ont une forte persistance et se bioaccumulent. Même si la toxicité est très variable d'un solvant à un autre, tous peuvent être à l'origine d'intoxications. Les effets sont neurologiques et cancérigènes sur le foie et le sang (Levet.D, 2008).

### **1.7.6 La pollution microbiologique**

Les micro-organismes sont peu nombreux dans les eaux de nappe du fait des conditions généralement anaérobies et des faibles quantités de nutriments disponibles. Le transfert de matière organique dans la nappe favorise leur prolifération. Les milieux fissurés, surtout karstiques, présentent des conditions favorables à la survie et à la multiplication des germes : pénétration facile de matière organique, conditions aérobies, pas de filtration. Les germes pathogènes sont généralement associés aux coliformes et streptocoques fécaux, la présence de ces derniers indique une pollution par les eaux vannes, les eaux de station d'épuration, les rejets d'élevages industriels... (Kankou.M, 2004).

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons défini la géostatistique et la méthode d'utilisation pour atteindre à notre objectif, comme on a défini la cartographie et les règles principales pour établir des cartes justes, ainsi on a vu les différentes pollutions des nappes et leurs origines.

# **CHAPITRE 02**

## 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.

### 2.1 Géographie et géomorphologie

La plaine de la Mitidja est la plus importante plaine sublittorale de l'Algérie. Elle couvre une superficie de 1450 km<sup>2</sup>. Elle est orientée parallèlement au relief côtier, est de faible pente vers le Sahel et vers la mer, l'altitude moyenne est de 50 m.

Elle est limitée à l'ouest par l'oued Nador et à l'est par l'oued Boudouaou, et par la mer méditerranéenne au nord et l'Atlas Blidéen au Sud. On distingue deux zones dans la plaine de la Mitidja :

- La Mitidja Est ou Basse Mitidja. (faisant l'objet de l'étude).
- La Mitidja Ouest ou Haute Mitidja.

La Mitidja Est, est limitée par la mer méditerranéenne au Nord, l'Atlas Blidéen au Sud, Oued Reghaïa à l'Est et oued El Harrach à l'Ouest, elle est d'une superficie totale de 592.93 km<sup>2</sup>.

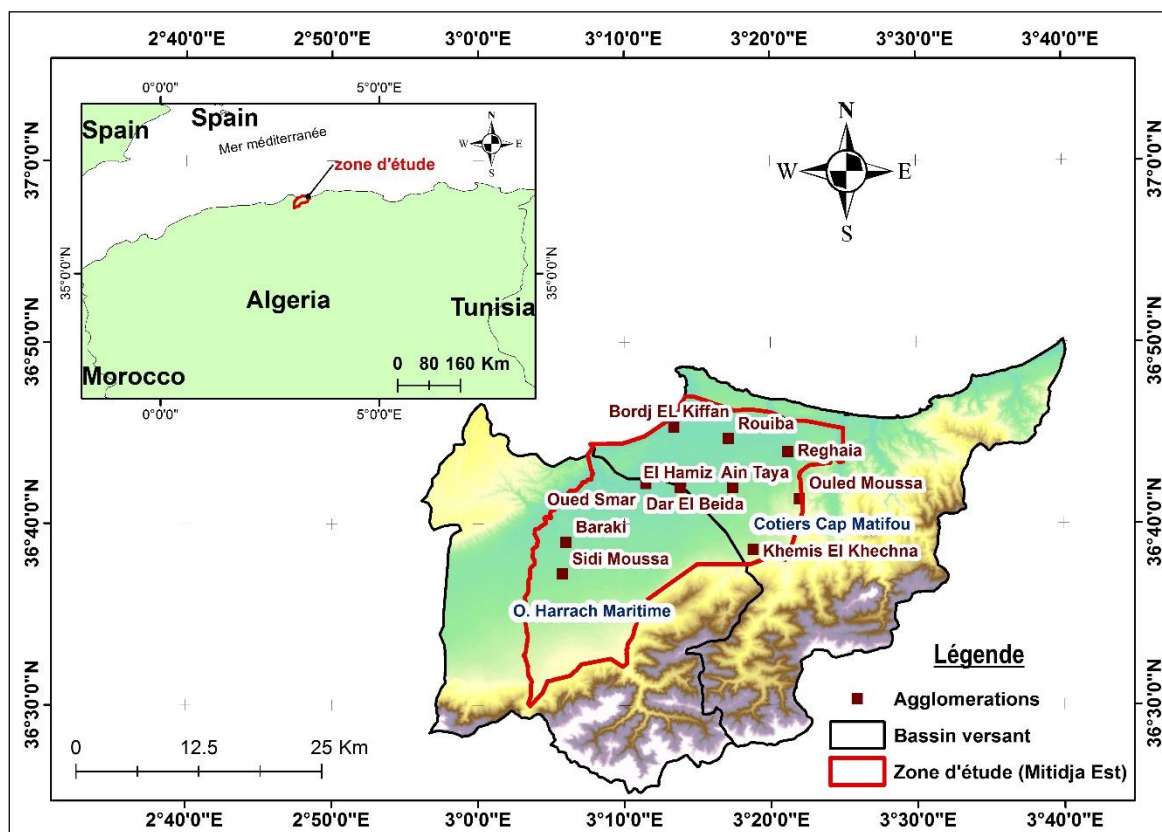


Figure 2.1 : Carte de la situation géographique de la Mitidja Est.

## 2.2 Caractéristiques des bassins versants

### 2.2.1 Caractéristiques morphométriques des bassins versants

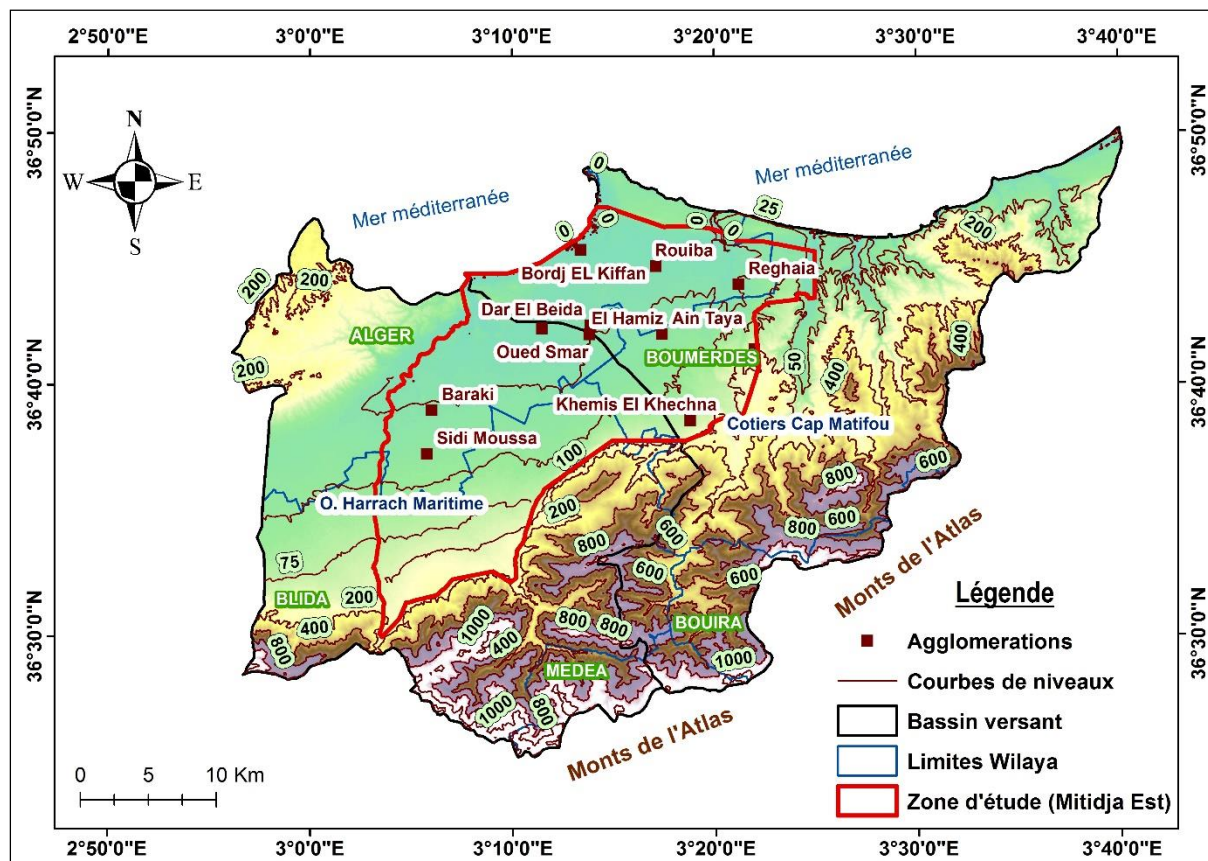


Figure 2.2 : Carte topographique de la Mitidja Est.

Notre zone d'étude se trouve entre les deux sous bassins versant (SBV) codifiés par l'ANRH, Oued el Harrach Maritime (0214) et Côtiers Cap Matifou (0206). Le tableau 2.1 montre les caractéristiques morphométriques de ces bassins versants.

Tableau 2.1 : 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

### 2.2.2 Description des sous bassins

Le SBV de 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 allongé vue ( $K_c=1.457$ ). 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 allongé avec un ( $K_c=1.904$ ). Ce SBV est drainé par Oued El Hamiz qui a une longueur de (49.8 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 %.

## 2.3 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 (figure 3.3) et qui sont :

- Le bassin de l'oued El-Harrach (02-14) : Sa superficie est de 1236,28 km<sup>2</sup> son périmètre est de 188.17 km.
- Le bassin de l'oued Hamiz (02-06) : il occupe une superficie de 283,21km<sup>2</sup>, son périmètre est de 102.11 km. situé à l'est de la plaine. Vu la faible superficie du bassin de Reghaia, il est regroupé dans le bassin du Hamiz

Le réseau hydrographique de la plaine de la (Mitidja Est) est principalement représenté par trois oueds principaux : Oued El Harrach (45.2 km), Oued Hamiz (49.8) et Oued Réghaia (7.4 km). Ces derniers traversent la plaine perpendiculairement selon des directions méridiennes, avec plusieurs plans d'eau naturels ou artificiels comme le lac de Réghaia et le barrage d'El Hamiz.



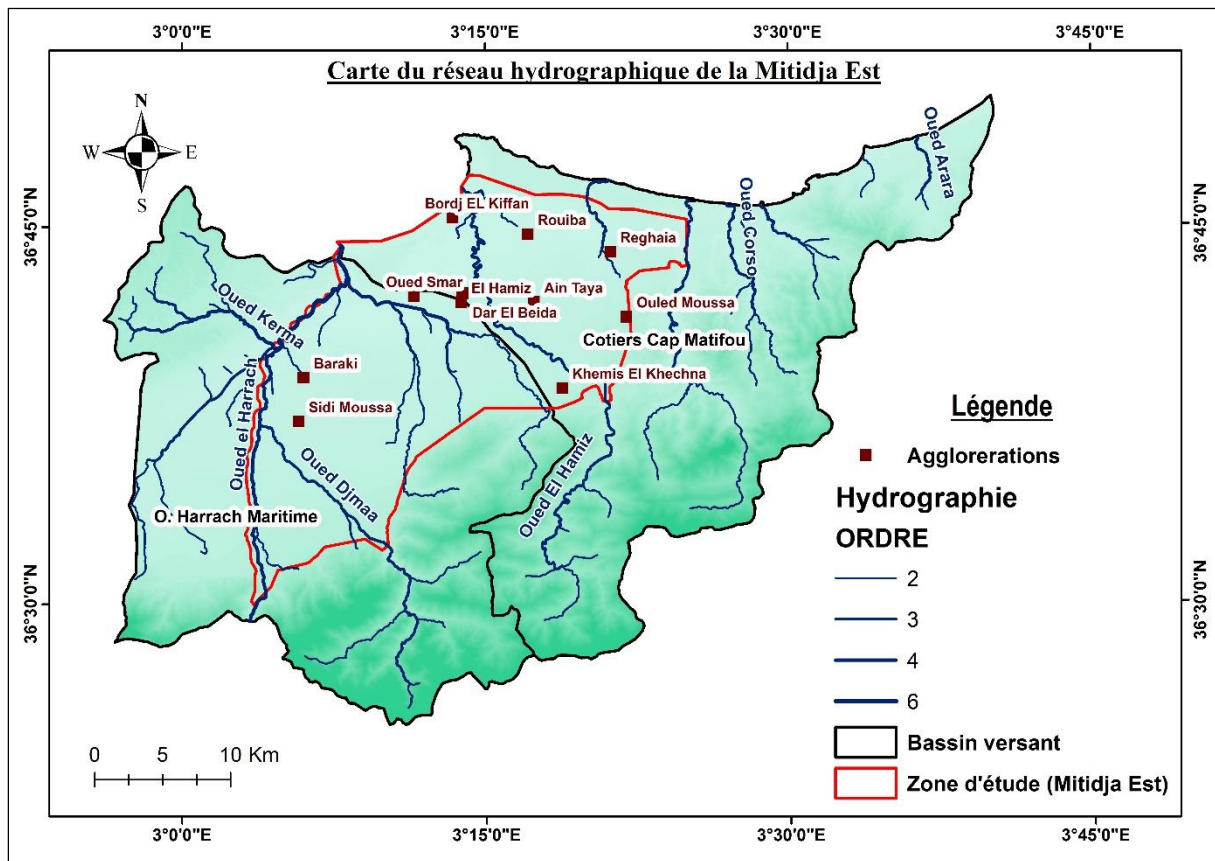


Figure 2.3 : Carte du réseau hydrographique de la Mitidja Est.

## 2.4 Climat et pluviométrie

Le climat de la Mitidja Est est de type méditerranéen subhumide à deux saisons distinctes : une saison froide et humide située généralement entre septembre et mai, et une saison chaude et sèche qui va du juin à aout. L'été est chaud, le printemps et l'automne peu marqués, l'hiver relativement doux.



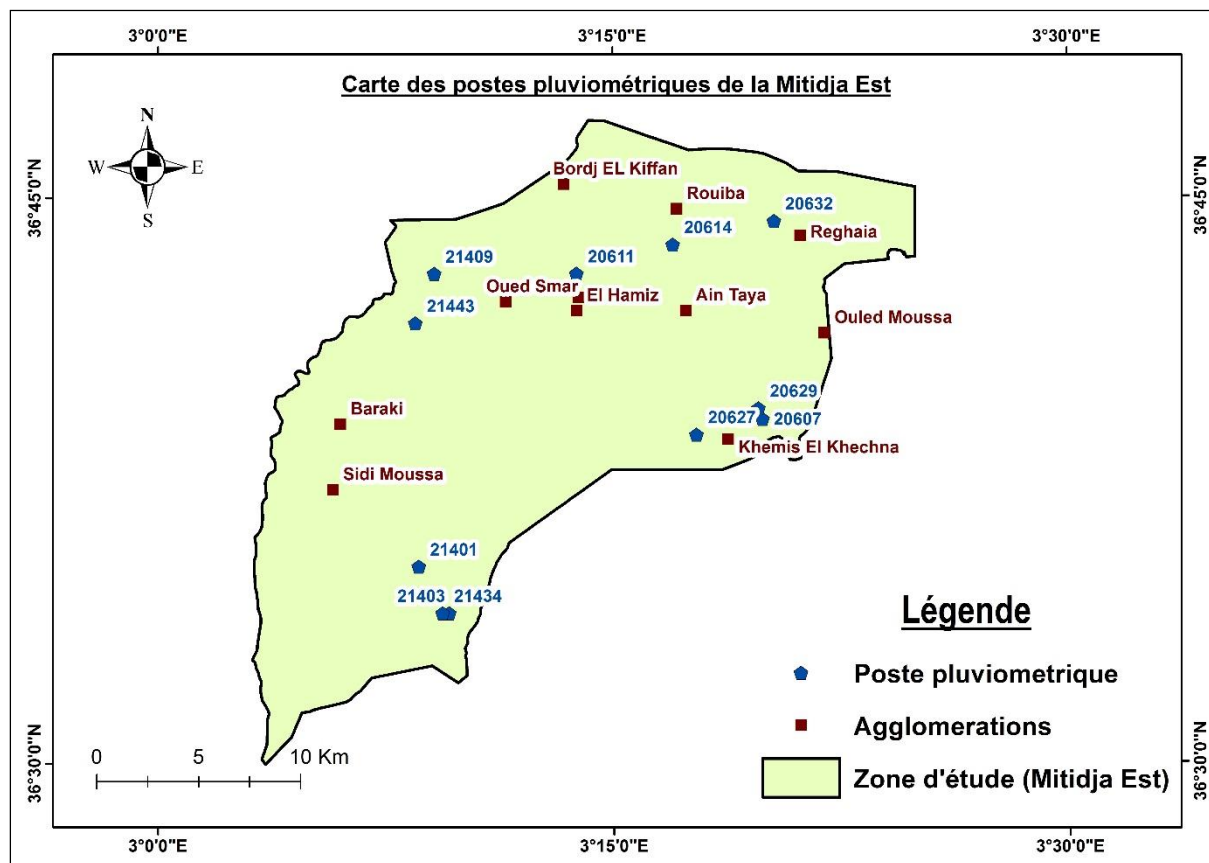


Figure 2.4 : Carte des postes pluviométriques de la Mitidja Est.

La plaine de la Mitidja Est compte de nombreux postes d'observations pluviométriques avec des lacunes mensuelles et annuelles (ANRH). Le tableau 2.2 présente les stations pluviométriques.

Tableau 2.2 : Stations pluviométriques de la Mitidja Est.

Code	Coordonnées Géographiques		Z (m)	Période d'observation	
	X	Y		Début	Fin
20607	3.331944	36.651944	91	1971	2016
20611	3.23	36.716389	20		
20614	3.282222	36.738056	20		
20627	3.292778	36.644444	69		
20629	3.329722	36.656667	79		
20632	3.3475	36.739444	18		
21401	3.143056	36.586944	72		
20403	3.159722	36.566389	102		
21409	3.153333	36.718056	24		
21434	3.156111	36.566389	100		
21443	3.1425	36.711667	17		

Les données pluviométriques sont recueillies au niveau de 05 stations réparties de façon plus ou moins homogène sur l'ensemble des sous bassins versants de la plaine.

Les précipitations sont irrégulières et variant entre 500 et 700 mm à l'échelle annuelle. Ces dernières sont représentées par les cinq stations sur le tableau 2.4.

**Tableau 2.3 : Caractéristiques des stations pluviométriques.**

Stations	Code ANRH	Coordonnées Lambert		Altitudes
		X	Y	
Baraki	21421	535050	376500	20
Larbaa	21403	541950	362950	100
Dar EL Beida	20611	547400	379600	24
Hamiz (Barrage)	20602	558600	367400	130
Réghaia	20632	557800	382200	20

**Tableau 2.4 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour la plaine de la Mitidja Est (1971-2016).**

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
<b>Hamiz barrage</b>	33.5	64.9	94.76	123.84	101.98	76.51	74.1	67.72	48.9	8.6	2.9	4.25	701.96
<b>Réghaia</b>	26.6	53	98.4	102.67	80.01	61.92	54.6	47.95	42.9	7.7	2.37	3.25	581.37
<b>Dar el Bida</b>	28.24	63.36	89.16	99.56	78.6	68.52	58.48	54.55	43.68	8.6	3.48	7.67	603.96
<b>Larbaa</b>	28.6	51.73	84.98	119.49	100.66	71.37	68.34	61.12	46.06	7.94	2.78	4.06	647.13
<b>Baraki</b>	27.3	51.3	92.02	101	84.43	61.58	50.05	50.9	33	7.83	4.81	6.56	570.78

Source : ANRH DRC Blida

La plaine de Mitidja Est, est caractérisée par une température modérée. Les mois les plus froids sont : Janvier et Février, où la température moyenne minimale varie entre 5°C et 6°C ; les mois les plus chauds sont : Juin, Juillet, et Août, où la température moyenne maximale varie entre 27°C et 31°C. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle estimée à 887.6 mm (Barrage Hamiz, ANRH).

## 2.5 Ressources en eau de la Mitidja Est

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

- le barrage d'El Hamiz
- le barrage de Keddara
- la digue de Reghaia.

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. Quant à La ressource en eau souterraine renouvelable annuelle, elle est évaluée en moyenne à 260 Mm<sup>3</sup>, variant de 100 Mm<sup>3</sup> en année sèche à 555 Mm<sup>3</sup> en année humide (période 1929 - 2004) (ENERGOPROJEKT, 2011).

### 2.5.1 Station de traitement des eaux usées de Réghaia

Selon la Seaal, la STEP actuelle de Reghaia a une capacité épuratoire de 400 000 Eq.Hab, pour un débit moyen théorique de 80.000 m<sup>3</sup>/j. La station a été construite en 2 étapes. La première tranche, consistant en un traitement primaire des effluents, a été mise en service en 1997. La seconde tranche, mise en service en 2008, a complété le traitement par une filière biologique et un traitement tertiaire.

Une extension est prévue pour porter la capacité de traitement de la STEP à 900.000 Eq.Hab. Il est important de noter que la station reçoit actuellement un effluent qui est 67% du temps au-delà des valeurs de dimensionnement de la station.

Cette station a reçu en moyenne 62.300 m<sup>3</sup>/jour en 2013 et produit 10.400 tonnes de boues à 33.2 % de siccité. Les performances de traitement permettent de garantir une conformité du rejet supérieur à 92% sur 2013 et un rendement d'élimination de la pollution supérieur à 92%. Ces chiffres révèlent une très bonne performance de la station en considérant le fait que l'effluent d'entrée dépasse la capacité nominale de la STEP en termes de pollution à traiter.

Le tableau 2.4 regroupe les noms et les coordonnées des points d'eau utilisés dans cette étude.

**Tableau 2.4** : Les points d'eau (ANRH, 2016).

Point d'eau	Nom	X	Y	Z
puits	P021-4	552500	383150	15.25
puits	P021-5	552750	385600	25.47
puits	P021-193	555700	382600	17.653
puits	P021-346	556412	385180	23.08
puits	P021-417	558620	379920	37.03
forage	P021-891	550350	381650	18.03
puits	P021-892	556500	384350	10.04
forage	P021-893	547900	382900	14.04
puits	P021-894	557900	384670	2.32
piézomètre	P021-PZ 1 HZ	549300	380750	25.705
piézomètre	P021-PZ 2 HZ	550550	380450	27.347
puits	P041-1427B	501480	365760	58.744
forage	P041-1761	505900	368420	35.46

Suit du tableau 2.4

forage	P041-1765	510000	362600	50.83
forage	P041-1766	512500	363550	74.72
forage	P041-1768	502750	360850	41.84
piézomètre	P041/PZ 23-MZ I	509750	368750	16.947
piézomètre	P041/PZ 24-MZ I	511150	368300	15.749
piézomètre	P041/PZ 6-BL I	511850	361900	66.7
piézomètre	P041/PZ 7-BL I	510050	361450	62.3
piézomètre	P041/PZ 8-BL I	512050	360200	71.7
piézomètre	P041/PZ1 O,alleug	507250	365800	21.308
piézomètre	P041/PZ3 Ben khelil	512350	366250	15.988
piézomètre	P041/PZ5 Boufarik	519200	365950	36.849
piézomètre	P041/PZ6 Tessala,M	519500	369500	35.467
puits	P042-439	545950	368500	65.03
puits	P042-450	550650	370750	78.48
puits	P042-688	553650	374620	48.88
piézomètre	P041/PZ 49	530575	360502	89.976
piézomètre	P041/PZ 50	529867	360486	86.726
forage	P042-997	539200	373150	30.7
forage	P042-998	539800	376820	16.51
forage	P042-999	533750	361100	95.78
forage	P042-1000	534770	361500	106.53
forage	P042-1003	541270	363070	103.46
puits	P042-1008	550650	375600	35.713
forage	P042-1010	534900	367700	45.91
forage	P042-f4 Oed Adda	538460	373920	27
piézomètre	P042/PZ4 Eucalyptus	540550	369600	51.199
piézomètre	P042/PZ9 Baraki	533800	371750	79.247
piézomètre	P042/PZ10 Sidi moussa	534900	369250	45.244
piézomètre	P041/PZ 51	531635	361399	87.701
puits	P062-251	488600	352230	87.701
puits	P062-332	496120	352200	100

Suite du tableau 2.4

forage	P062-333	493720	353500	86.95
forage	P062-335	491200	355640	72.85
forage	P062-336	493800	355600	75.29
piézomètre	P062/PZ 2 El affroun	493300	359500	64.519
forage	P063-245B	503600	353800	84.84
puits	P063-470	500470	354670	82.57
puits	P063-591	519800	358800	120.19
puits	P063-593	504500	349450	126.48
puits	P063-594	503950	352600	93.21
forage	P063-595	503750	358120	56.19
forage	P063-596	507200	357150	102.919
piézomètre	P063/PZ 1-BL II	504150	355700	78.031
piézomètre	P063/PZ 2-BL II	504400	356500	83.707
piézomètre	P063/PZ 3-BL II	503500	356950	65.49
piézomètre	P063/PZ 8 Guérouaou	516400	357800	153.749

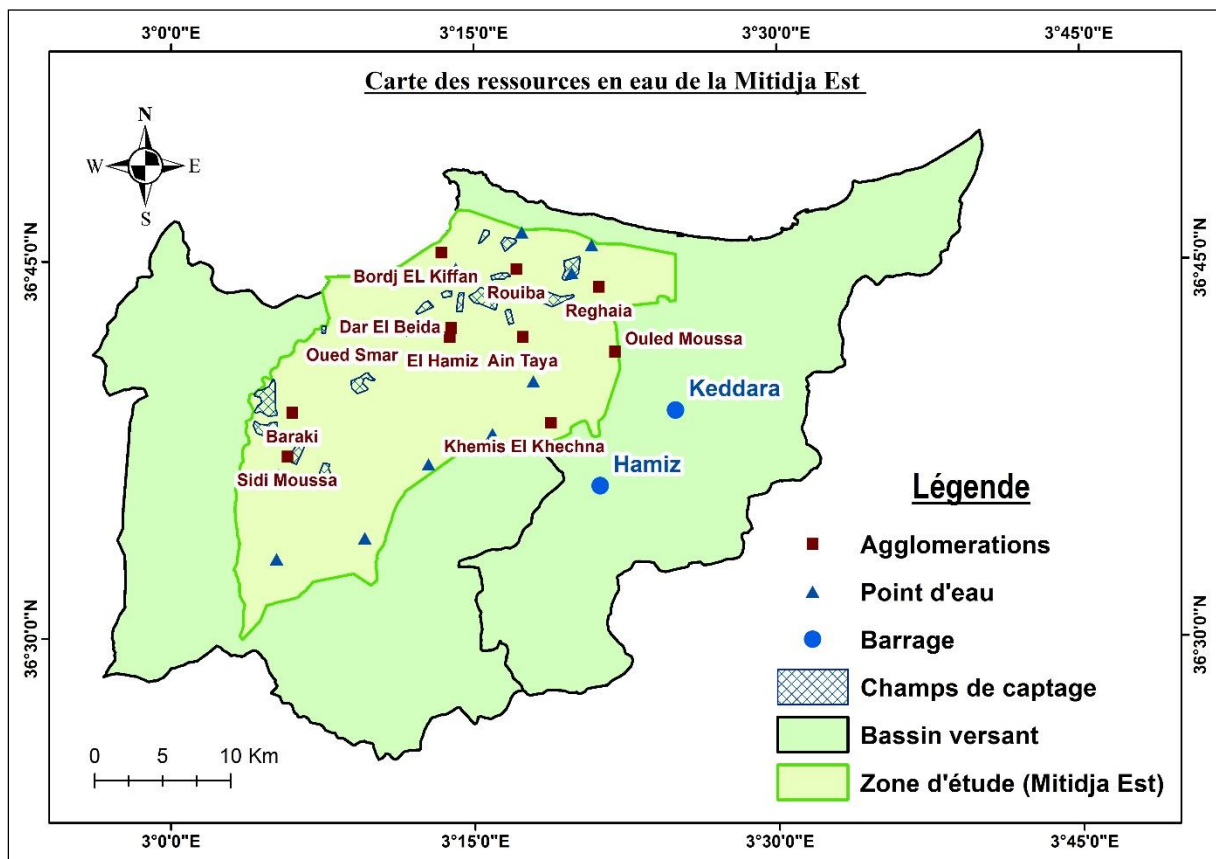


Figure 2.5 : Carte des ressources en eau de la Mitidja Est.

## 2.6 Géologie et hydrogéologie

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 événements géologiques, ont contribué à la formation de deux réservoirs aquifères principaux :

- L'Astien, formé par des calcaires et grès d'origine continentale.
- Les alluvions grossières du quaternaire (graviers, galets, limons et argiles en quantités variables) dont l'épaisseur est en moyenne de 200 m.

Ces deux réservoirs sont séparés sur presque toute la surface de la plaine par des marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach (le Villafranchien) sauf à l'Est de l'oued El Hamiz au niveau de la poche de Rouiba, les deux aquifères sont en contact.

La formation d'El Harrach atteint son épaisseur maximale de 200 m dans la partie occidentale du bassin (Soltano - Tensiftien) au Pliocène supérieur (Djouidar, 2014).

Du point de vue hydrogéologique, 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.

Dans le cadre de la présente étude, nous étudierons seulement la nappe alluviale quaternaire dont nous disposons de données, car l'aquifère Astien est très peu sollicité et étudié.

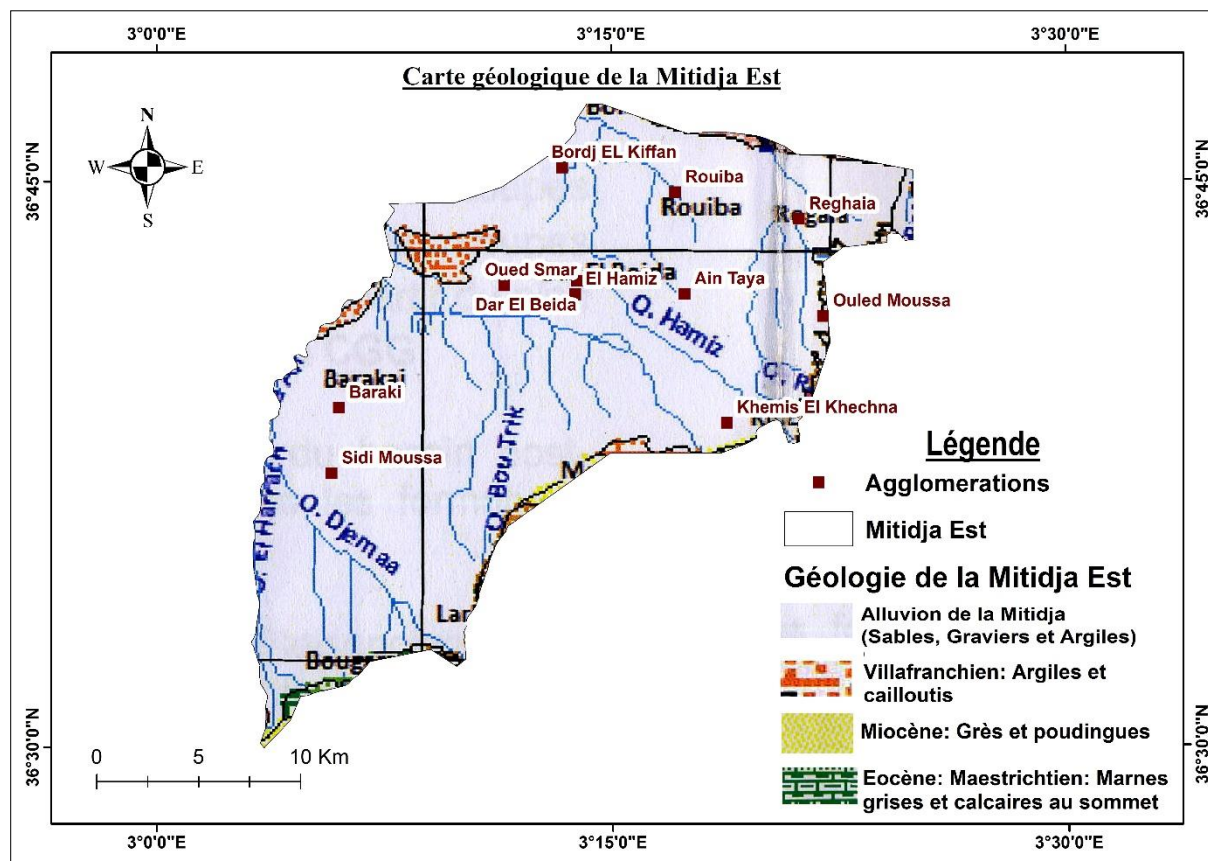


Figure 2.6 : Carte géologique de la Mitidja Est.

## 2.7 Le couvert végétal

Il joue un rôle important dans le comportement hydrologique de la plaine de la Mitidja. Il a une influence mécanique sur le ruissellement superficiel et il conditionne l'évapotranspiration et par la suite le bilan hydrique. La plaine de la Mitidja est une région agricole avec une diversité, en raison de sa topographie et de sa fertilité, on y trouve des vignes, des agrumes, les cultures annuelles et saisonnières.

## 2.8 Aspects socio-économiques

La plaine de la Mitidja Est, est une zone à vocation agricole, concentrée dans la bande côtière. Les activités maraichères sont les plus répandues, particulièrement l'agriculture favorisée par les conditions climatiques et un relief plat. Tout comme l'agriculture, l'industrie utilise de grande quantité d'eau. La région est l'une des plus importants pôles industriels d'Alger. La majorité des activités industrielles sont regroupées à Rouiba, EI-Harrach, Oued

Smar et Réghaïa. La population totale dans la plaine était de deux millions d'habitants en 1998 avec une densité de 60 hab/km<sup>2</sup>. Les principaux pôles de concentration sont : Rouiba, Réghaïa, Bab Ezzouar, Dar El Beida et El Harrach.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons représenté notre zone d'étude (Mitidja Est), connaître la situation géographique et la géomorphologie de la région, l'hydrographie, le climat et la pluviométrie, les différentes ressources en eau, la géologique et l'hydrogéologie, le couvert végétale et l'aspect socio-économiques, ces différentes informations ont été présenté sous formes de cartes.



# CHAPITRE 03

## Introduction

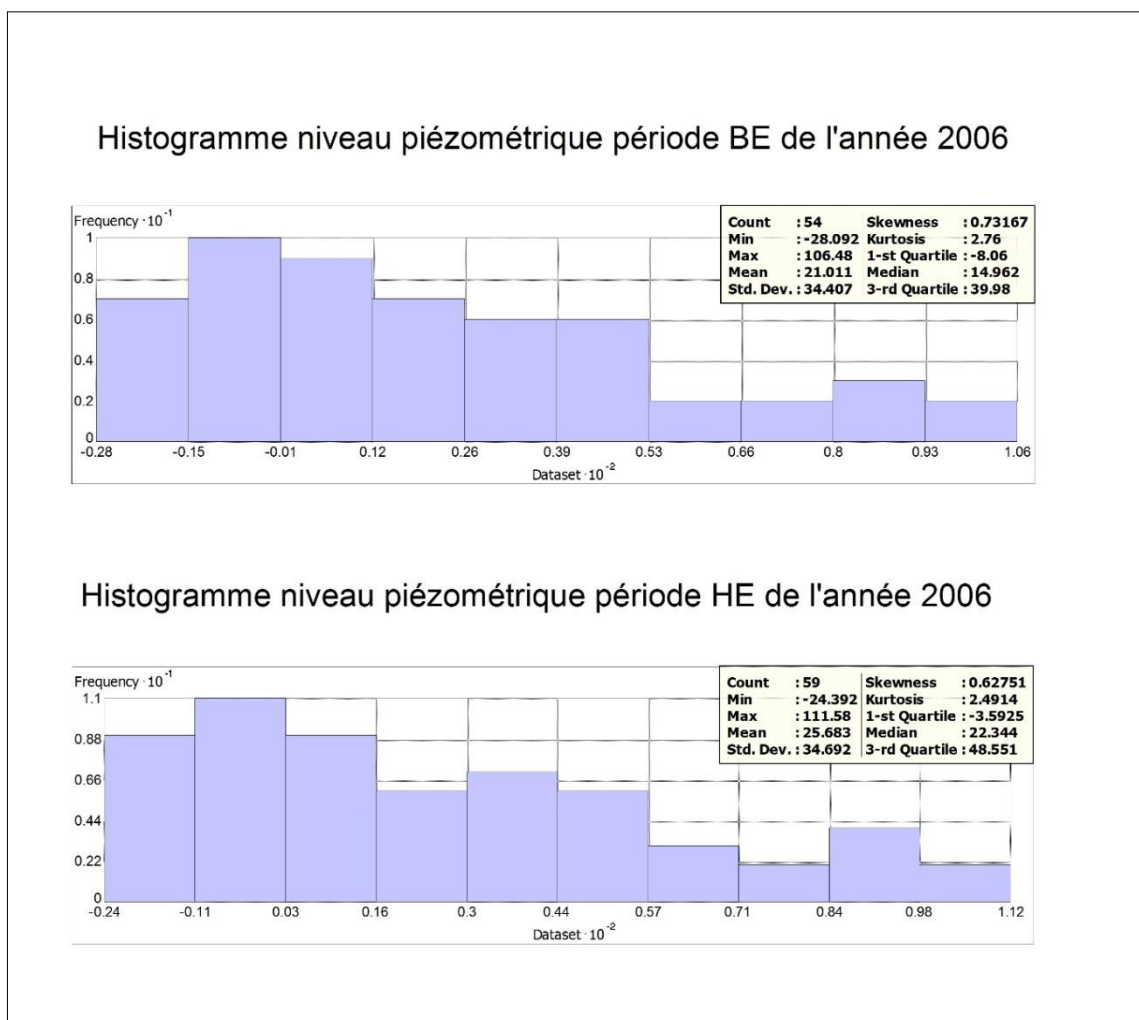
Après avoir présenté notre zone d'étude et décrit les fondements mathématiques de l'approche géostatistique et les méthodes d'interpolation spatiale, nous nous intéressons, dans ce chapitre, de les appliquer sur notre cas concret.

Le but final de ce travail est d'établir des cartes d'évolution des nitrates et les niveaux piézométriques dans la Mitidja Est, deux années ont été prises en compte (2006 et 2016) avec deux périodes basses et hautes eaux pour chaque année, en appliquant une méthode d'interpolation (krigeage), afin de savoir l'origine de cette pollution et le degré de contamination et les causes principales du baisse de niveau de la nappe.

### 3.1 Application de l'approche

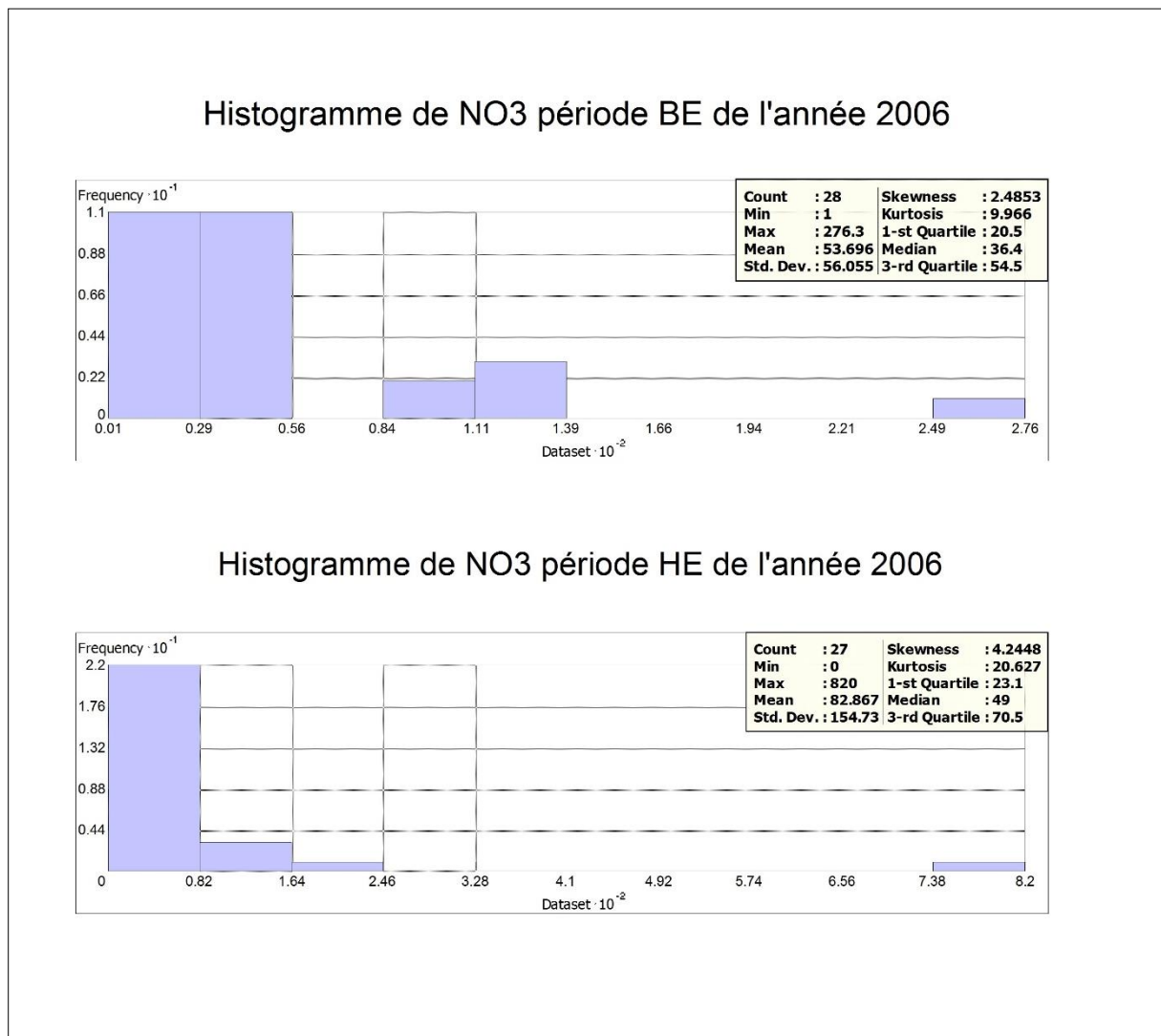
#### 3.1.1 Paramètres statistiques des années 2006 et 2016 (Piézométrie et Nitrates)

##### - Histogrammes



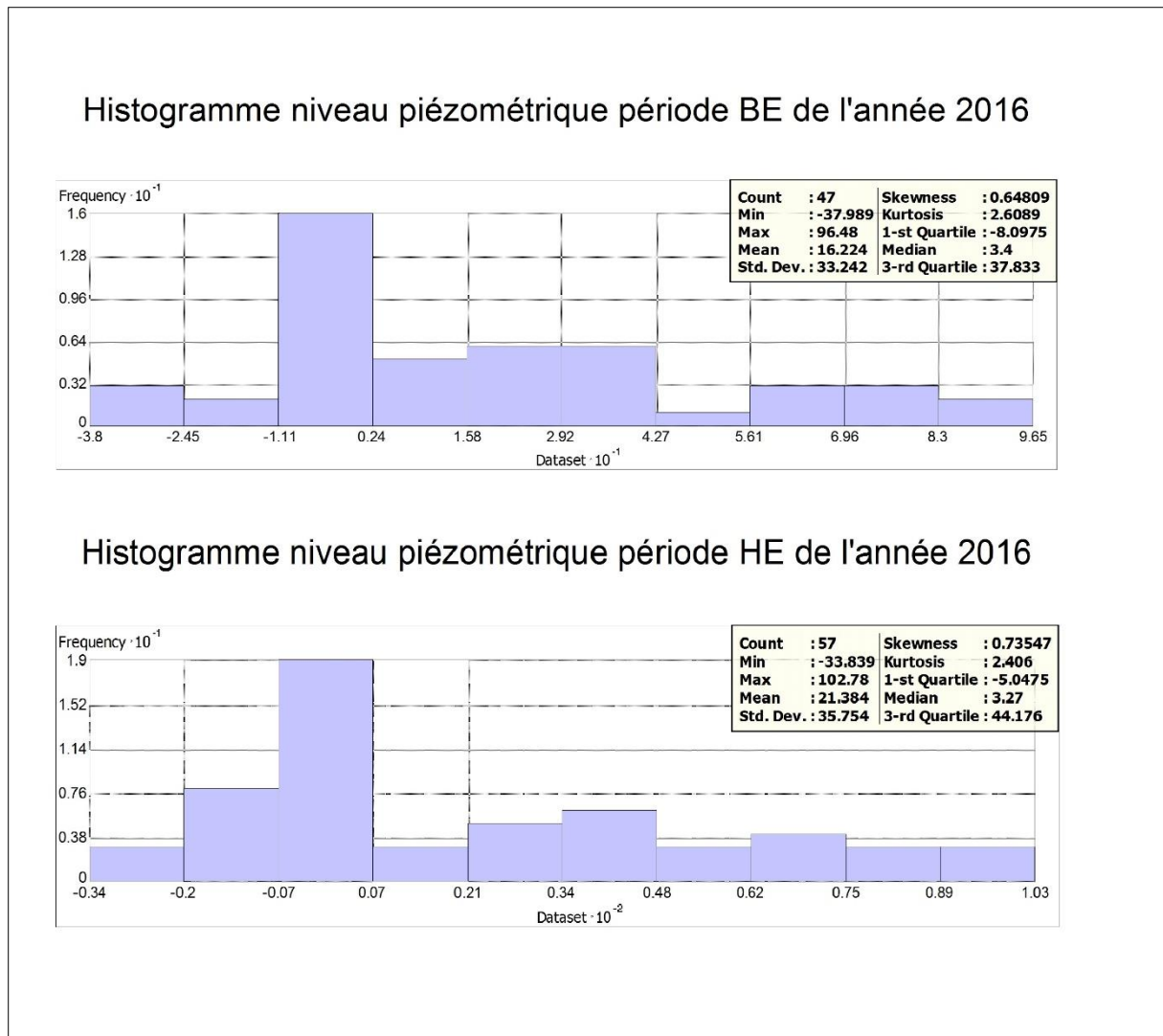
**Figure 3.1** : Histogrammes des niveaux piézométriques des périodes BE et HE de l'année 2006.

- Le nombre de points d'eau utilisé pour construire ces deux histogrammes est de 54 points pour la période des basses eaux et 59 pour les hautes eaux, les valeurs minimales et maximales des périodes des basses eaux et hautes eaux sont respectivement (-28 m, -24 m) et (105.48 m, 111.58 m) dont la moyenne est de l'ordre de 21.011 m et 25.683 m par ordre. Les distributions présentent une dissymétrie, elles s'écartent d'une loi gaussienne.



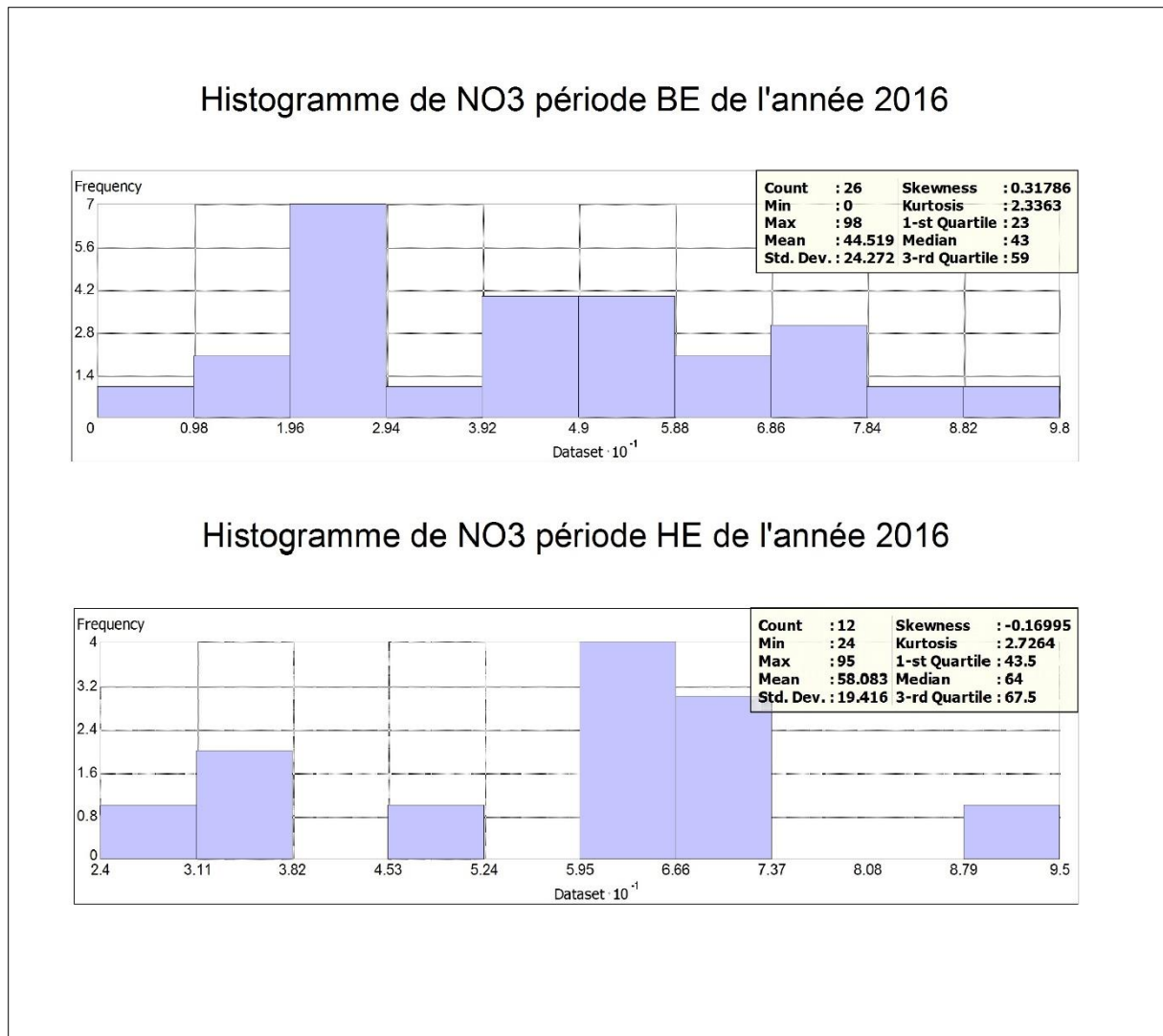
**Figure 3.2 :** Histogrammes des Nitrates des périodes BE et HE de l'année 2006.

- Le nombre de points d'eau utilisé pour construire ces deux histogrammes est de 28 points pour la période des basses eaux et 27 pour la période des hautes eaux, les valeurs minimales et maximales des périodes des basses eaux et hautes eaux sont respectivement (1 mg/l, 0 mg/l) et (276.3 mg/l, 820 mg/l) dont les moyennes sont de 53.7 mg/l et 82.9 mg/l par ordre. Les distributions ne sont pas gaussiennes.



**Figure 3.3** : Histogrammes des niveaux piézométriques des périodes BE et HE de l'année 2016

- Le nombre de points d'eau utilisé pour construire ces deux histogrammes est de 47 points pour la période des basses eaux et 57 pour la période des hautes eaux, les valeurs minimales et maximales des périodes des basses eaux et hautes eaux sont respectivement (-37.989 m, -33.839 m) et (96.48 m, 102.78 m) dont les moyennes sont de 16.2 m et 21.4 m par ordre. Les distributions présentent une symétrie donc, elles sont gaussiennes.



**Figure 3.4 :** Histogrammes des Nitrates des périodes BE et HE de l'année 2016

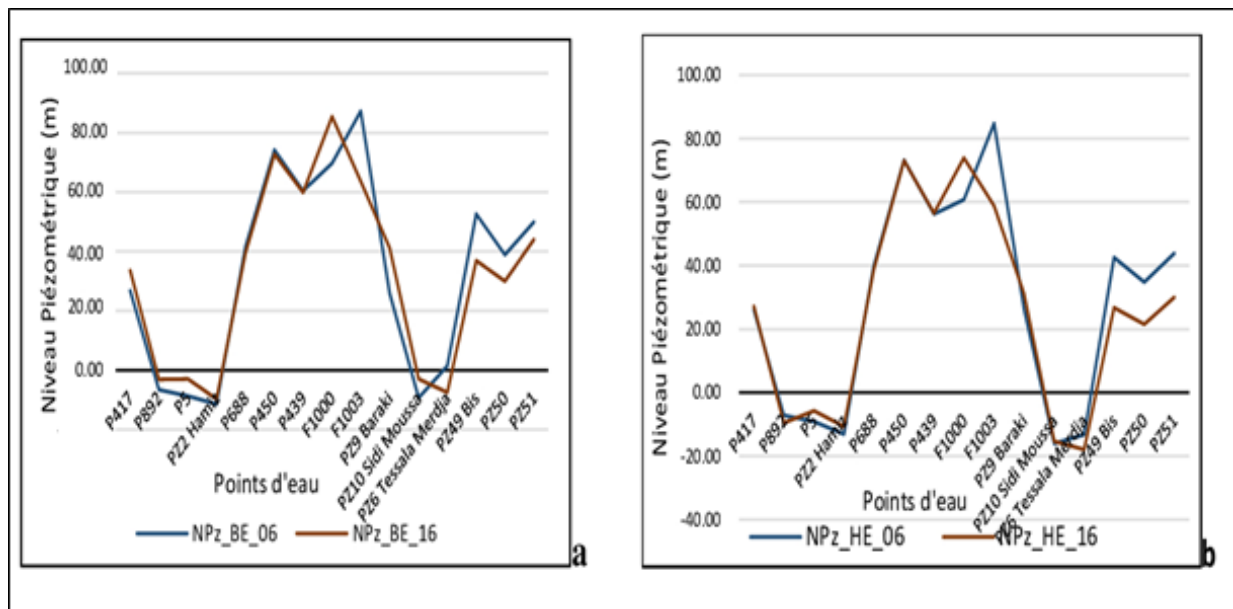
- Le nombre de points d'eau utilisé pour construire ces deux histogrammes est de 26 points pour la période des basses eaux et 24 pour la période des hautes eaux, les valeurs minimales et maximales pour les périodes des basses eaux et hautes eaux sont respectivement (0 mg/l, 24 mg/l) et (98 mg/l, 95 mg/l) dont la moyenne est de 44.52 mg/l et 58.1 mg/l par ordre. Les distributions présentent une symétrie elles sont gaussiennes.

### 3.1.2 L'évolution des nitrates et la piézométrie

#### 3.1.2.1 Evolution des niveaux piézométriques

Sachant que le niveau de la nappe dépend particulièrement, de la situation des ouvrages par rapport à leur état et aux grands champs de captage ainsi que le cycle hydrologique (Djoudar 2014), un suivi de l'évolution de la profondeur de la nappe (niveau piézométrique) dans le temps a été effectué pour les deux années d'études 2006 et 2016 en basses et hautes eaux.

Les résultats montrent un rabattement de la nappe entre 2006 et 2016, pouvant atteindre environ les 23 m en basses eaux et 26 m en hautes eaux (exemple cas du forage F1003), qui peut être expliqué par une surexploitation des eaux souterraines dans cette zone à travers des pompages intensifs pour l'irrigation et l'AEP.



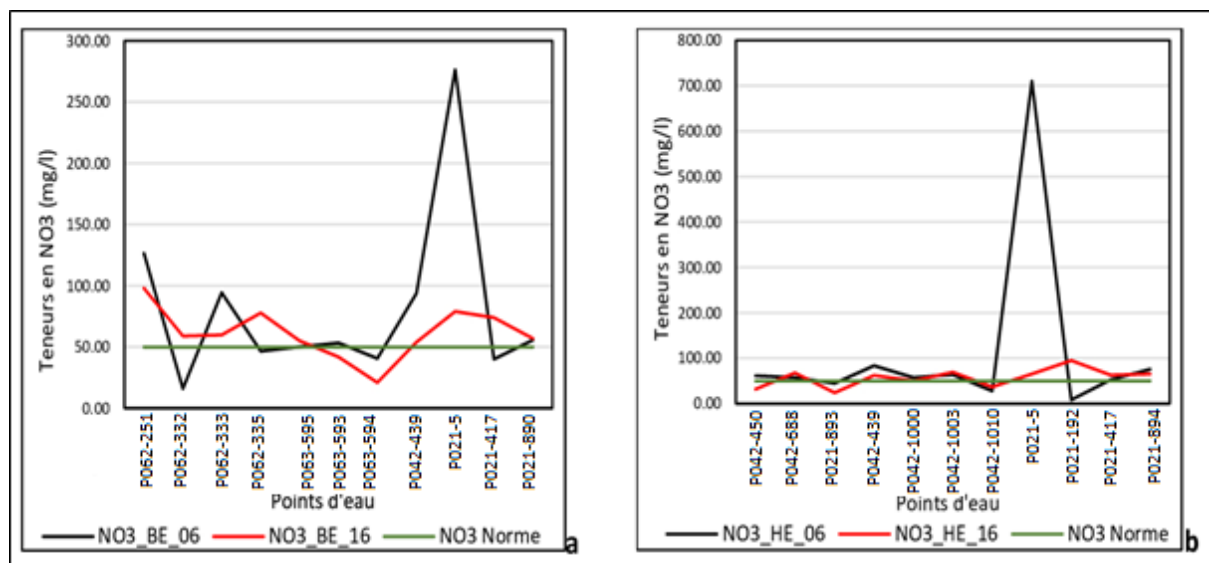
**Figure 3.5 :** Evolution des niveaux piézométriques pour 2006 et 2016 (a : BE2006 BE2016, b : HE2006 HE2016).

#### 3.1.2.2 Evolution des Nitrates

L'évolution des nitrates présentée sur la figure 3.6, montre bien des concentrations en  $\text{NO}_3^-$  dépassant la norme de l'OMS qui de 50 mg/l. En particulier durant la période des hautes eaux des deux années d'étude 2006 et 2016, pendant laquelle on enregistre plus de 72% de points d'eau contaminée. De même pour la période des basses eaux, où on note que plus de 54% en 2006 et plus de 81% en 2016 des points d'eau analysés présentent des concentration en nitrates supérieure à 50 mg/l.

Selon (Kafia.S et Touat. F, 2012), 49.83% des échantillons prélevés sur la Mitidja Est dépassent la norme de 50 mg/l. La zone la plus touchée est celle de Rouiba, où ils ont observé des concentrations élevées depuis les années 2000 sur les champs captant de Bouréah, Réghaïa et Rouiba.

Le point d'eau **P021-5 (E008-4583)**, Sud de Ain Taya présente des pics importants en basses et hautes eaux pour l'année 2006 (figure 3.6), une analyse sur une période allant de 1985 à 2016 (figure 3.8), afin de déterminer l'origine de ces concentrations très élevées.

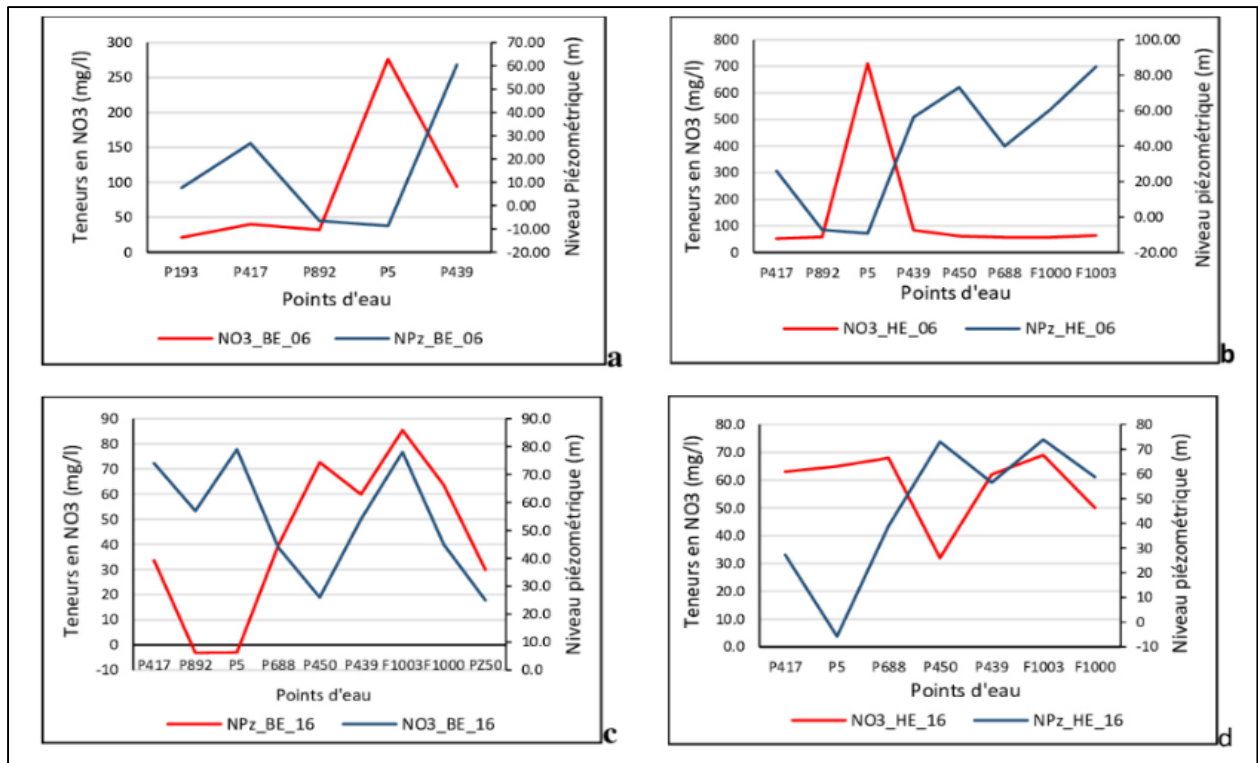


**Figure 3.6 :** Evolution des Nitrates pour 2006 et 2016 (a : BE2006 BE2016, b : HE2006 HE2016).

### 3.1.2.3 Relation entre la contamination par les nitrates et l'évolution de la nappe

Les résultats issus de la confrontation de l'évolution des teneurs en nitrates avec les niveaux de la nappe, montrent clairement que la concentration en nitrates suit une évolution inverse aux niveaux piézométriques. Notons, que lorsque ces derniers baissent les concentrations en nitrates augmentent en dépassant largement le seuil des 50 mg/l recommandés par l'OMS.

Ceci est dû, probablement, à plusieurs paramètres géologiques et hydrogéologiques, tels que : la nature du sol, formation perméable caractérisant la zone non saturée et le toit de la nappe étant proche de la surface du sol.



**Figure 3.7 :** Relation entre la contamination par les nitrates et l'évolution de la nappe (a : BE2006, b : HE2006, c : BE2016, d : HE2016).

### 3.1.2.4 Evolution des nitrates dans le puits P021-5 (E008-48583)

Nous avons noté précédemment que le puits P021-5 (E008-48583) se trouvant dans la région Sud de Ain Taya, présentent des pics de concentrations en nitrates durant l'année 2006 atteignant des valeurs de 276.30 mg/l et 820 mg/l respectivement en périodes de basses et hautes eaux.

L'analyse de ce puits (P021-5) sur une période allant de 1985 à 2016, en période de basses et hautes eaux, montre bien les fluctuations des teneurs en nitrates et met en évidence des valeurs alarmantes qui dépasse nettement le seuil de potabilité de 50 mg/l.

Ceci peut être expliqué par une origine anthropique de ces teneurs excédentaires en nitrates, qui est dues, essentiellement, à l'utilisation excessive des engrais azotés par les agriculteurs de la région. Ce dernier, jumelés à l'irrigation va permettre le transfert des nitrates vers la nappe et donc, contamination des eaux souterraines.



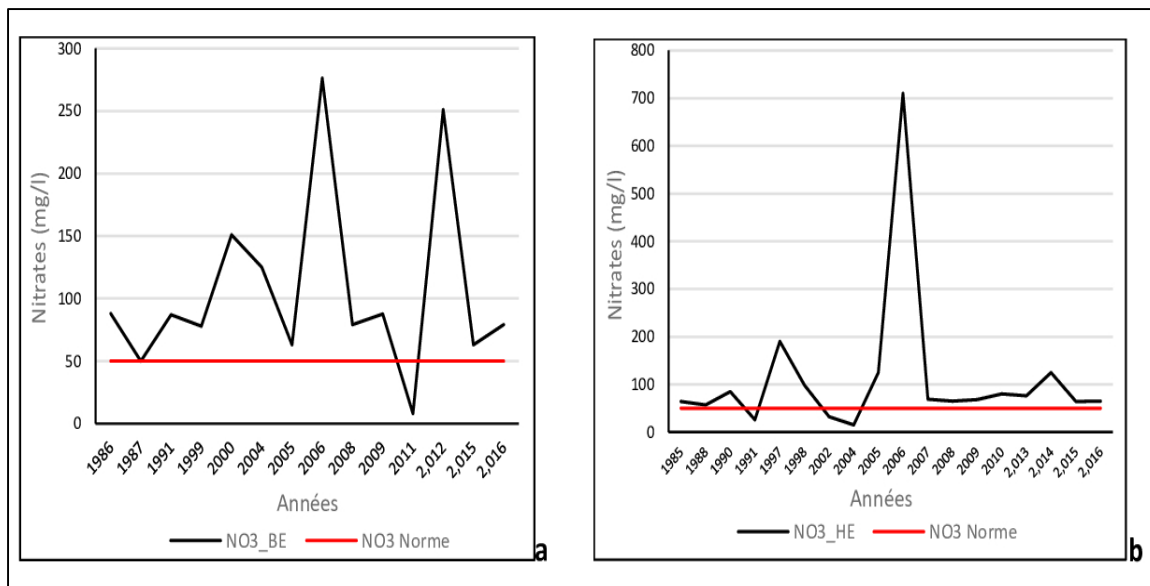


Figure 3.8 : Evolution des nitrates dans le puits P021-5 (E008-48583) (a : BE 1986-2016, b : HE du 1985 à 2016).

### 3.1.3 Isotropie anisotropie

#### 3.1.3.1 Variogrammes de surface

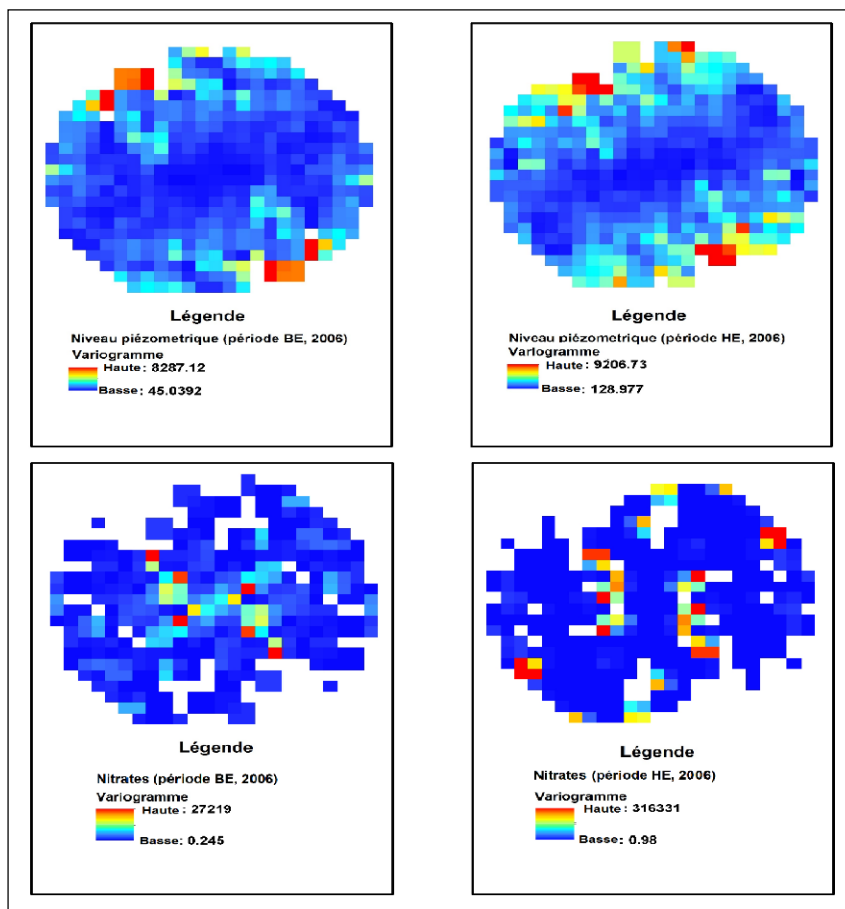
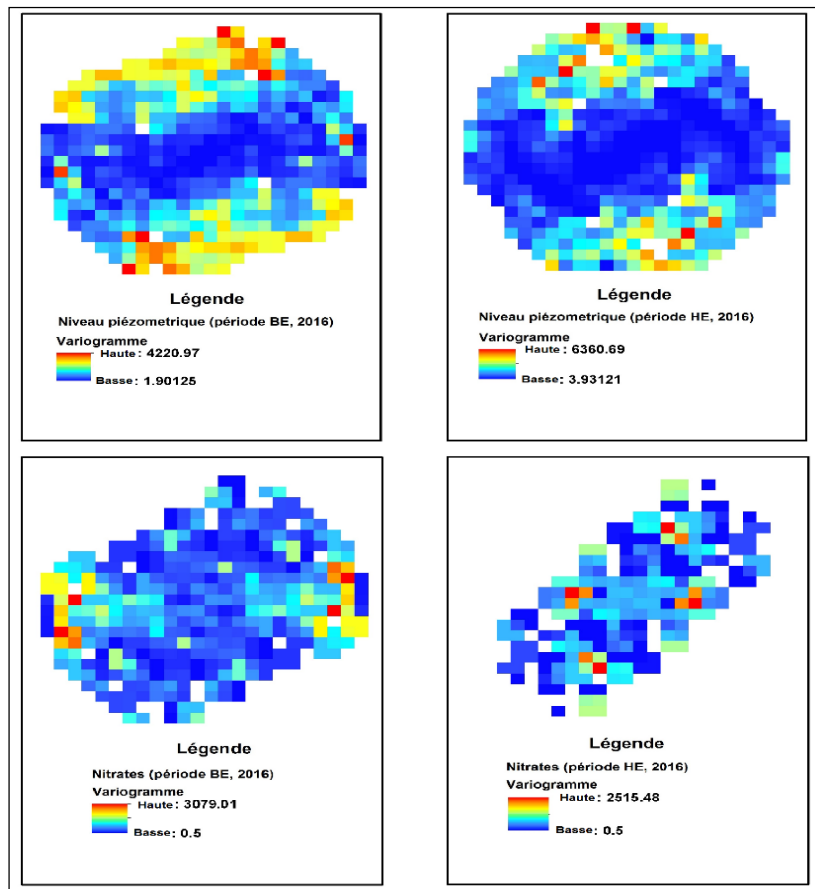


Figure 3.9 : Variogrammes de surface des NP et Nitrates, période BE et HE de l'année 2006.



**Figure 3.10 :** Variogrammes de surface des NP et Nitrates, période BE et HE de l'année 2016.

On remarque que dans tous les variogrammes de surface (BE 2006, HE 2006, BE 2016, HE 2016) qu'il n'y a pas une dégradation de couleur régulière qui explique la présence d'une anisotropie, ça veut dire que la variation des nitrates et les niveaux piézométrique n'ont pas une direction précise donc c'est le variogramme expérimental omnidirectionnel qui est le cas (cas isotropie).

## 3.1.4 Variogrammes expérimentaux

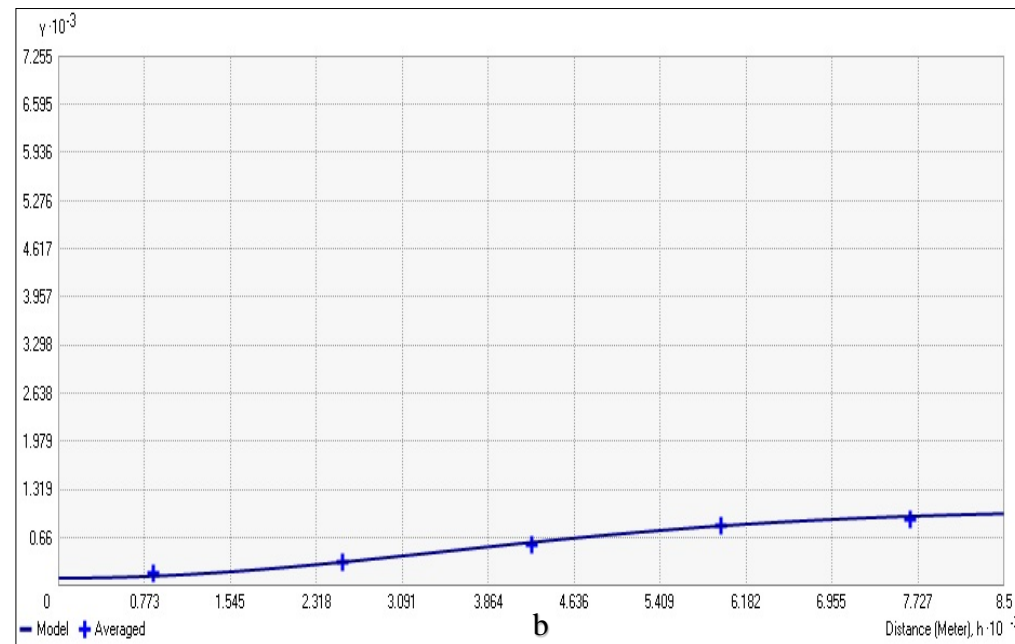
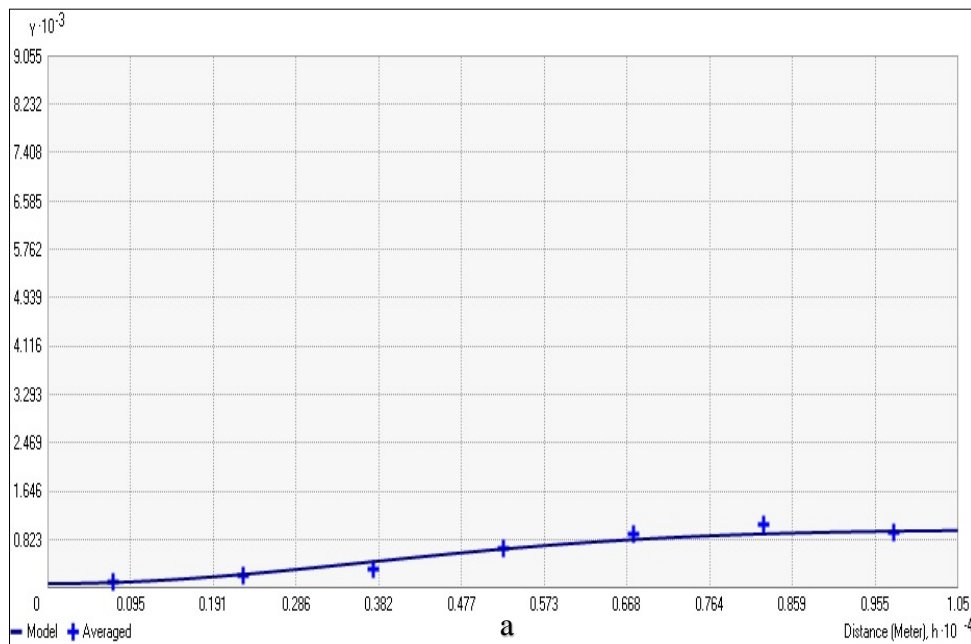


Figure 3.11 : Variogrammes expérimentaux des niveaux piézométriques (a : période BE 2006, b : période HE 2006)

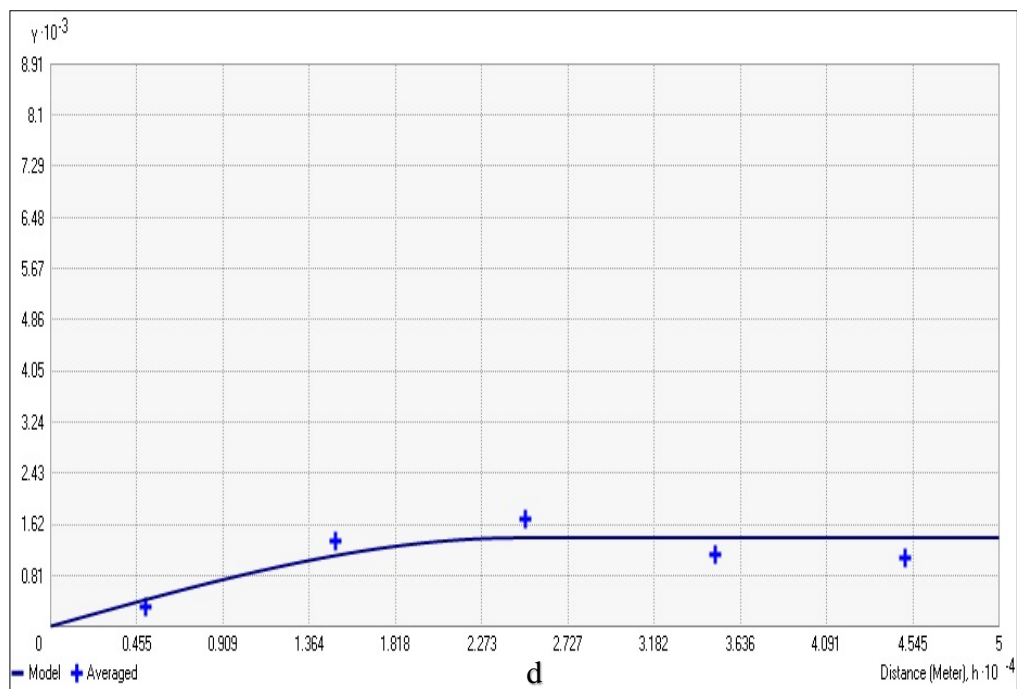
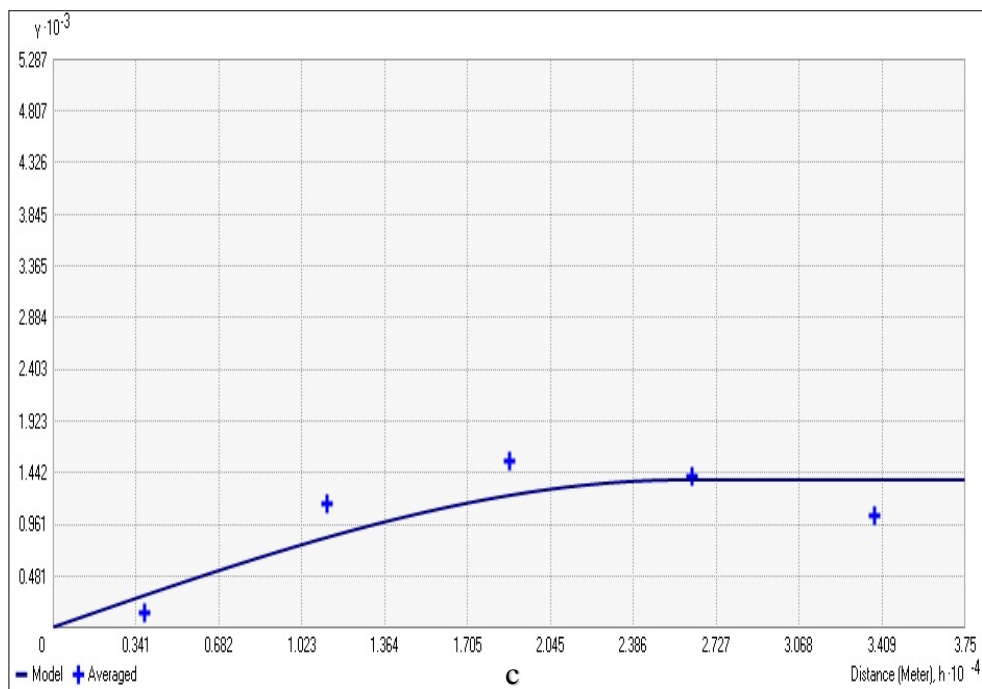
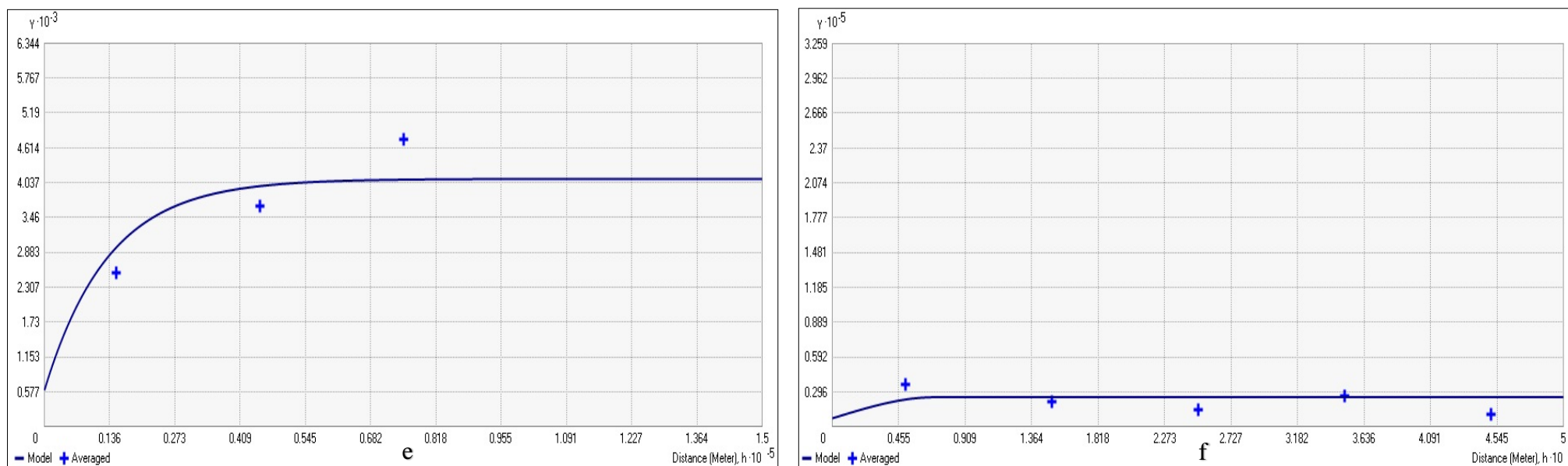
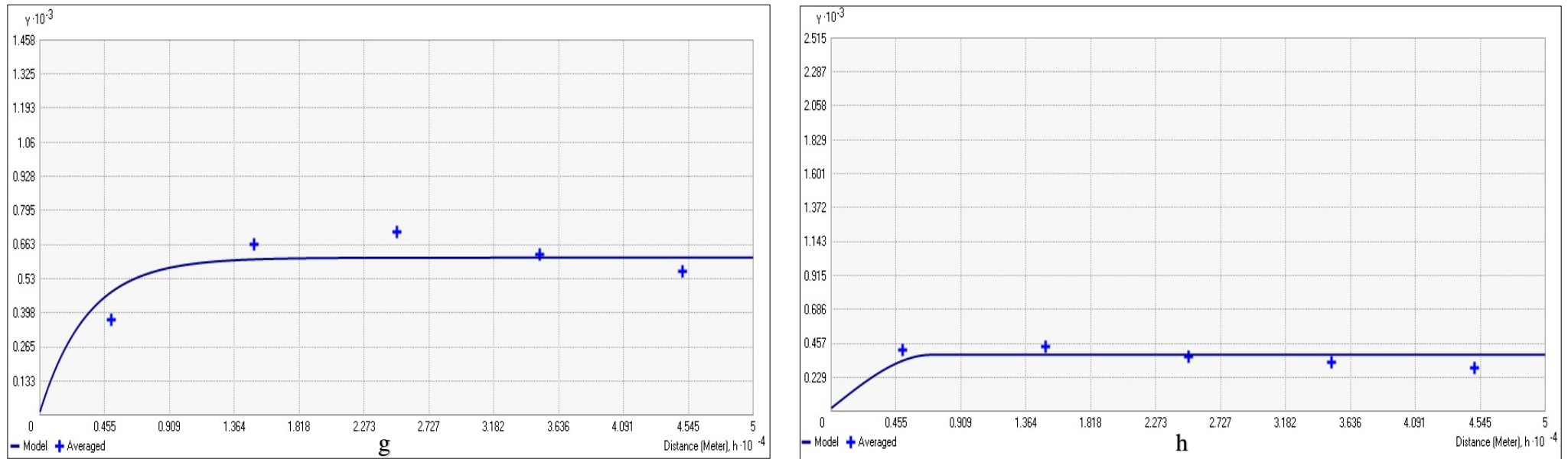


Figure 3.12 : Variogrammes expérimentaux des niveaux piézométriques (c : période BE 2016, d : période HE 2016)



**Figure 3.13 :** Variogrammes expérimentaux des Nitrates (e : période BE 2006, f : période HE 2006)



**Figure 3.14 :** Variogrammes expérimentaux des Nitrates (**g** : période BE 2016, **h** : période HE 2016)

## 3.1.5 Modélisation des semi-variogramme expérimentaux (SVE)

Tableau 3.1 : Modélisation des semi-variogrammes expérimentaux.

Variables	Années	Périodes	Semi-variogramme expérimental omnidirectionnel		Type de structure	Portée	Variance	Validation croisée	
			Pas de distance (m)	Nombre de pas de distance				MES	VES
Niveau piézométrique (m)	2006	Basses eaux	1450	8	Effet de pépité		80	0.15	0.99
					Gaussienne	8000	850		
		Hautes eaux	1700	7	Effet de pépité		120	0.11	1.00
					Gaussienne	9000	1100		
	2016	Basses eaux	5000	8	Effet de pépité		5	0.043	1.00
					Sphérique	22500	1200		
		Hautes eaux	8000	7	Effet de pépité		5	0.067	1.00
					Sphérique	25000	1300		
Nitrates (mg/l)	2006	Basses eaux	30000	7	Effet de pépité		2500	0.00	1.04
					Exponentiel	400000	6500		
		Hautes eaux	10000	7	Effet de pépité		800	0.07	1.04
					Sphérique	10000	30000		
	2016	Basses eaux	10000	7	Effet de pépité		500	0.025	1.01
					Sphérique	70000	150		
		Hautes eaux	10000	7	Effet de pépité		300	0.026	1.02
					Sphérique	20000	150		

Les semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels (SVE) des niveaux piézométriques sont calculés avec 07 et 08 pas de 1450 m à 8000 m. En raison du comportement directionnel erratique des SVE, donc ils sont calculés dans le cas d'isotropie. Le tableau 3.1 illustre, le type de la structure, la portée en mètre, les modèles adaptés à ces variogrammes expérimentaux, le résultat montre une variabilité gaussienne et sphérique bien structurée pour les périodes basse et hautes eaux et pour les deux années 2006 et 2016, la validation croisée pour vérifier la robustesse des modèles. Il ressort que la distribution des erreurs standardisées est gaussienne avec une moyenne des erreurs standardisées (MES) égale à zéro et une variance des erreurs standardisées (VES) égale à l'unité, ce qui implique que les modèles retenus sont robustes.

De même pour les semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels (SVE) des Nitrates sont calculés avec 07 pas de 10000 m à 30000 m. ils sont calculés dans le cas d'isotropie, le type de la structure, la portée en mètre, les modèles linéaires adaptés à ces variogrammes expérimentaux sont mentionné sur le tableau 3.1, le résultat montre une variabilité exponentiel et sphérique bien structurée pour les deux périodes et les deux années d'étude. La moyenne des erreurs standardisées (MES) égale à zéro et la variance des erreurs standardisées (VES) égale à l'unité, donc les modèles retenus sont robustes.

### **3.1.6 Estimation et résultats du krigeage**

Le krigeage nous a permis d'établir les cartes isovaleurs des nitrates et des niveaux piézométriques pour deux années d'étude (2006 et 2016) et deux périodes ; basses et hautes eaux (Figures : 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22). , afin de mieux interpréter le comportement hydrodynamique de la nappe au niveau de la Mitidja Est et étudié le niveau de contamination de cette dernière par les nitrates.

Nous avons, donc, pu constater ce qui suit :

- Présence d'un sens d'écoulement convergeant vers les champs de captage de Baraki et d'El Hamiz, en formant ainsi des cônes de dépression au niveau de ces champs de captage, où nous notons des niveaux piézométriques variant de 10 à 15 m au-dessous du niveau de la mer. Ceci peut être expliqué par la surexploitation de la nappe.
- La confrontation des deux cartes 2006 et 2016, montre que les lignes de courant indiquent des écoulements en direction des champs de captage : HaouchFlit, Beraki, Bordj El kiffan (Stamboul).



En ce qui concerne l'évolution des nitrates, à partir des cartes nous pouvons tirer les constatations suivantes :

- L'année 2006, présente de fortes concentrations en nitrates dépassant les 50 mg/l (en période des hautes eaux) dans la partie Sud- Ouest (Meftah, Larbaa), ainsi que des concentrations variant de 24 à 180 mg/l en basses eaux et atteignant plus de 640 mg/l en période des hautes eaux dans toute la partie Est de la zone d'étude.
- L'année 2016, présente des teneurs importantes en nitrates variant de 51 à plus de 93 mg /l, du côté Est et Ouest de la zone d'étude. Au niveau de la partie centrale, nous notons des concentrations entre 17 et 50 mg/l.
- L'évolution temporelle des nitrates entre 2006 et 2016, présente une diminution des teneurs en nitrates d'ordre général. Cette diminution est nettement visible au niveau central de la Mitidja Est, où nous notons des valeurs des teneurs en nitrates variant de 17 et 50 mg/l en 2016, contre des teneurs variant entre 51 et plus de 640 mg/l en 2006.

Les fortes concentrations en nitrates notées en 2006 (basses et hautes eaux), sont dues essentiellement, l'intensification agricole à travers l'utilisation de manière excessive des engrais azotés par les agriculteurs ainsi que, la présence d'une forte activité industrielle dans cette zone d'étude (la zone industrielle de Rouiba, et Réghaia, la zone industrielle de Oued Smar , Oued El Harrach et la baie d'Alger, l'entreprise CELPAP (Baba Ali) qui déverse ses eaux polluées dans l'oued Terro, qui se trouve à environ deux kilomètres du champ de captage de Baraki, la raffinerie de Baraki et la cimenterie de Meftah).

Les concentrations en nitrates varient selon le sens de l'écoulement des trois oueds principaux, qui acheminent les composés azotés issus des épandages des engrais chimiques azotés dans les terres agricoles du Sud vers le Nord, et augmentent par la suite leurs concentrations aux embouchures. (Djoudar, 2014)

La diminution remarquable des concentrations en nitrates dans la zone centrale de la Mitidja Est, peut être expliquée par la réduction de l'utilisation des engrais azotés de façon excessive par les agriculteurs (suite à des campagnes de vulgarisation), et à la réhabilitation des stations d'épuration de Baraki et de Réghaia, permettant un rejet d'une eau usée épurée d'origine industrielle de faible pollution.

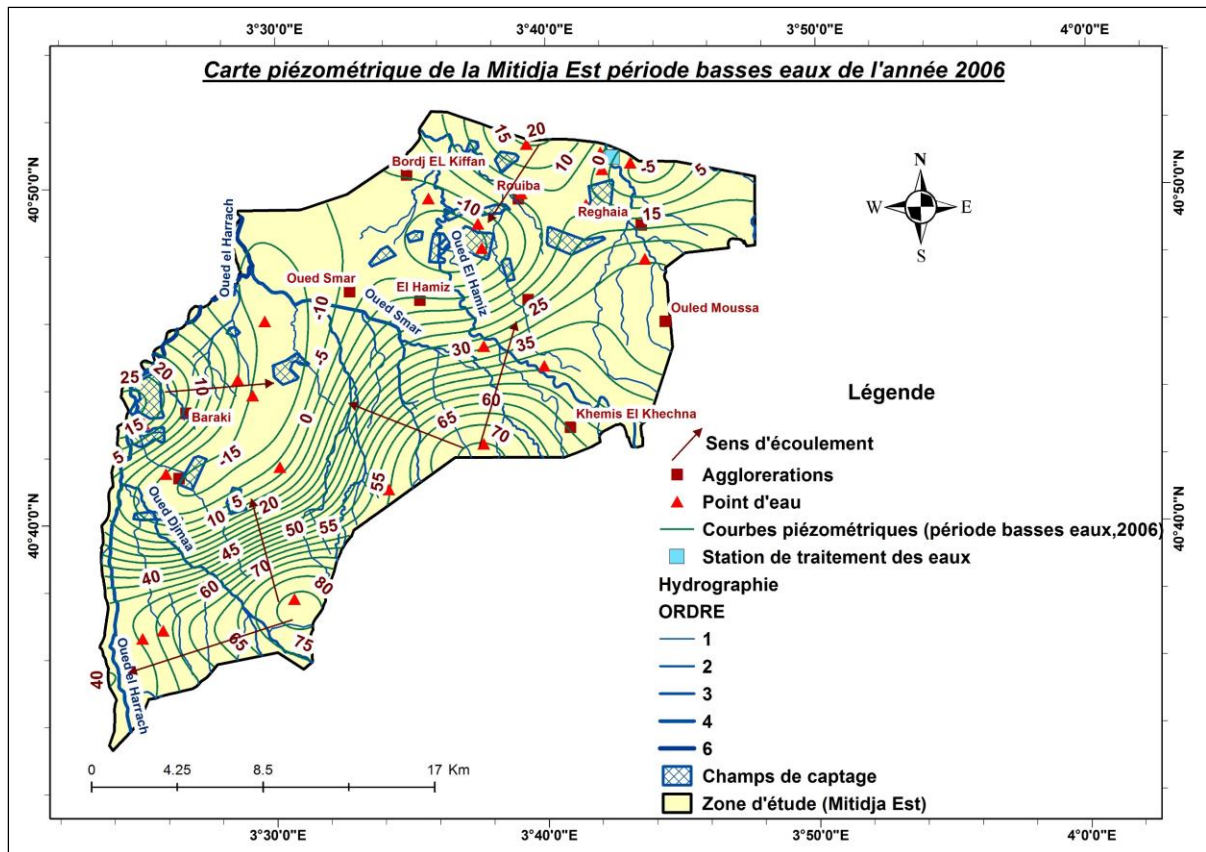


Figure 3.15 : Carte des NP de la Mitidja Est, période BE de l'année 2006

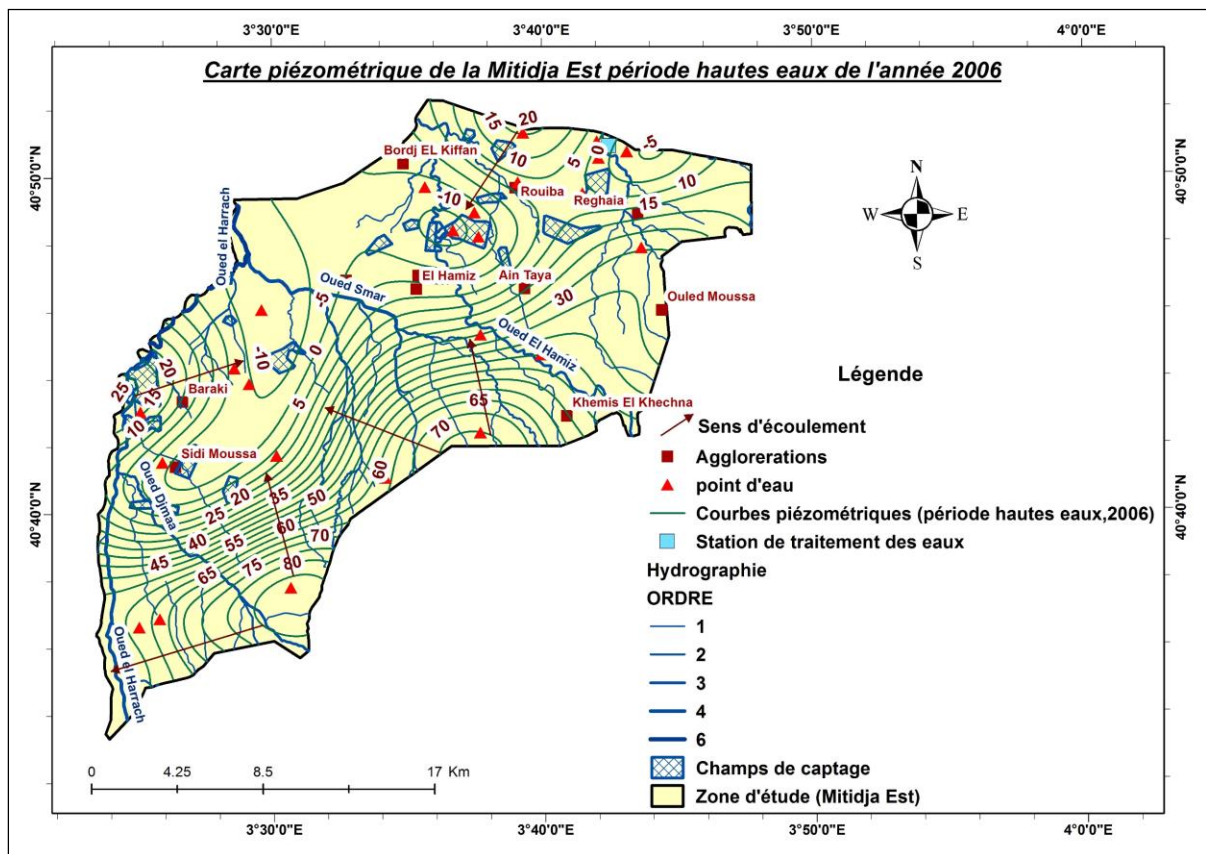


Figure 3.16 : Carte des NP de la Mitidja Est, période HE de l'année 2006

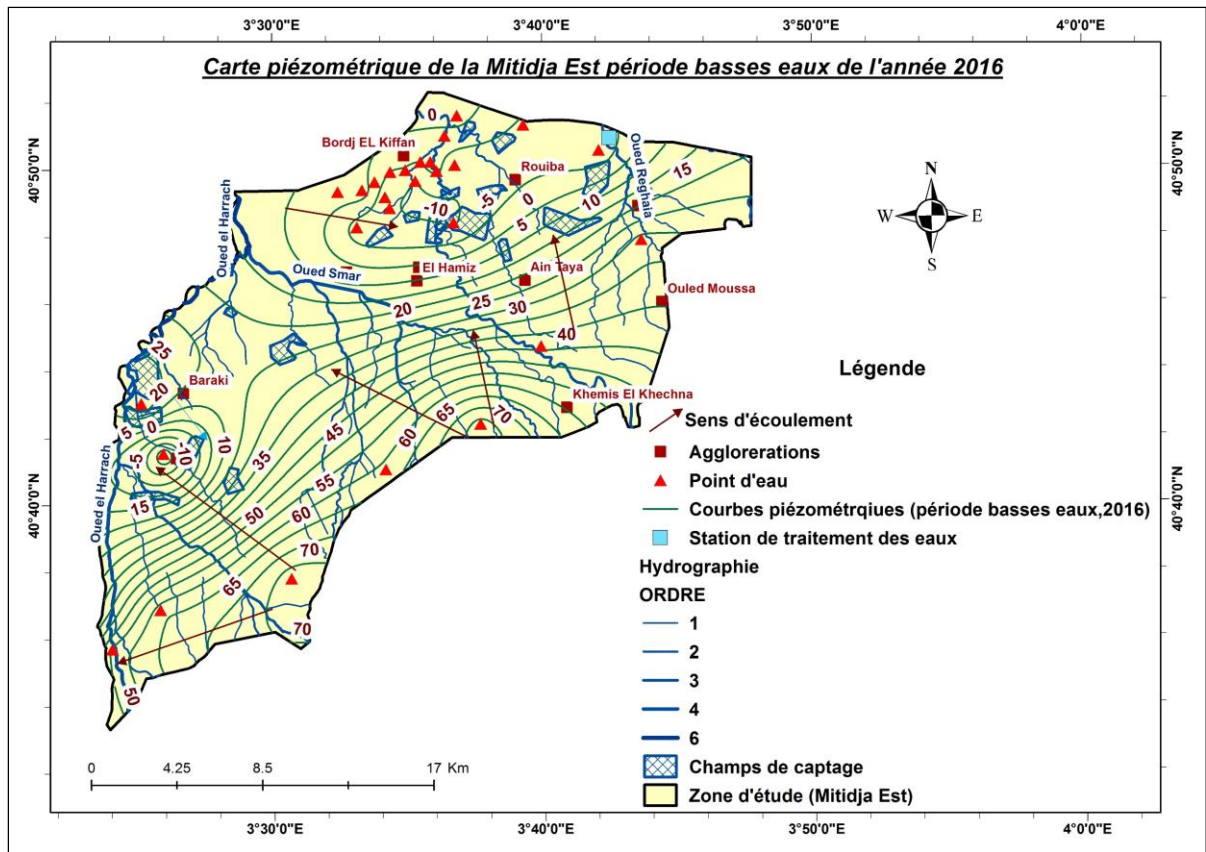


Figure 3.17 : Carte des NP de la Mitidja Est, période BE de l'année 2016

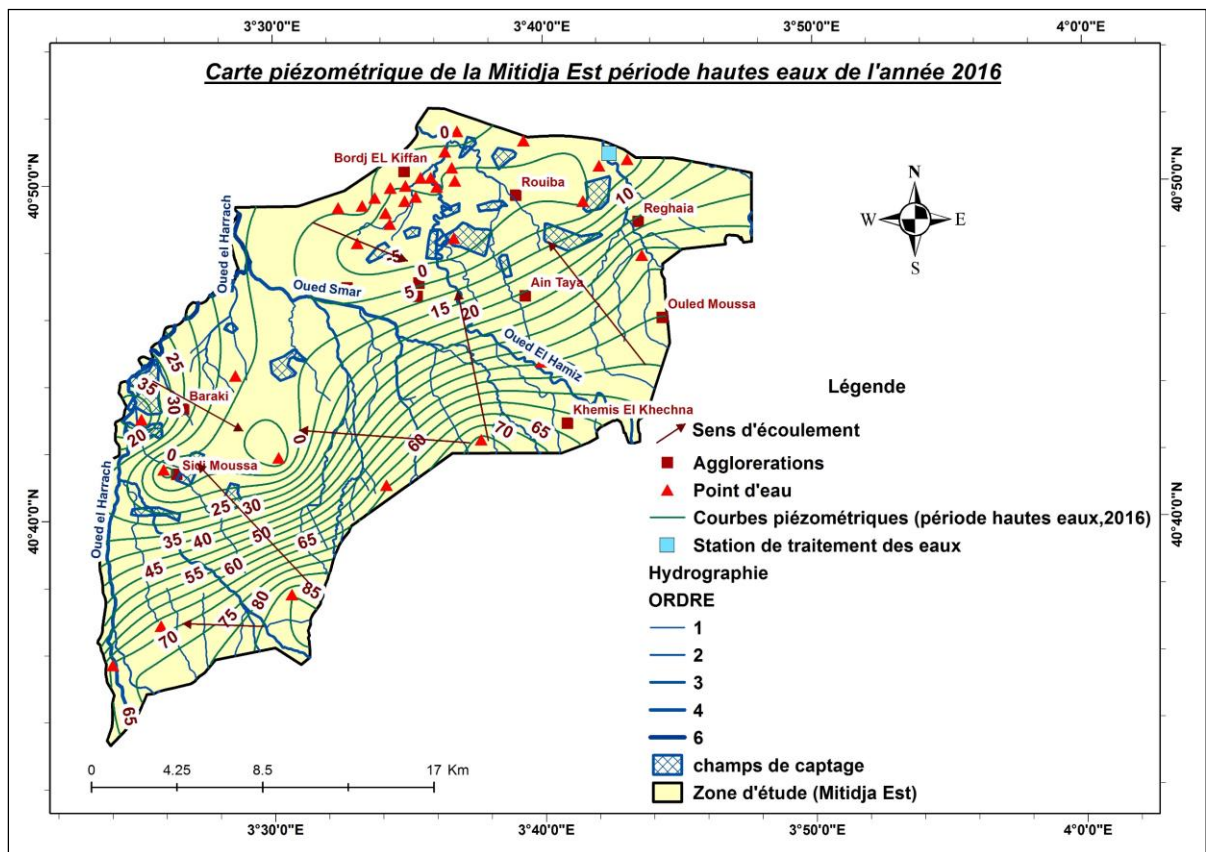


Figure 3.18 : Carte des NP de la Mitidja Est, période HE de l'année 2016



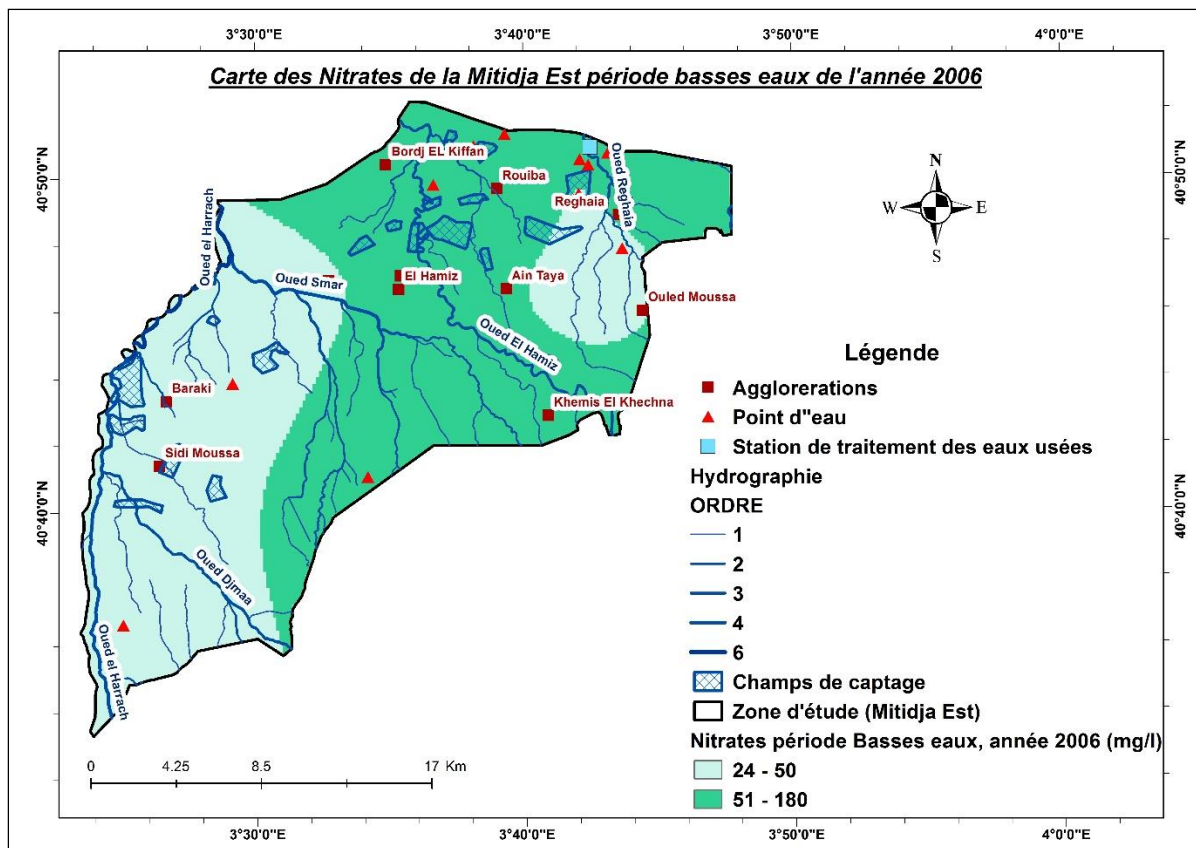


Figure 3.19 : Carte des nitrates de la Mitidja Est période BE de l'année 2006

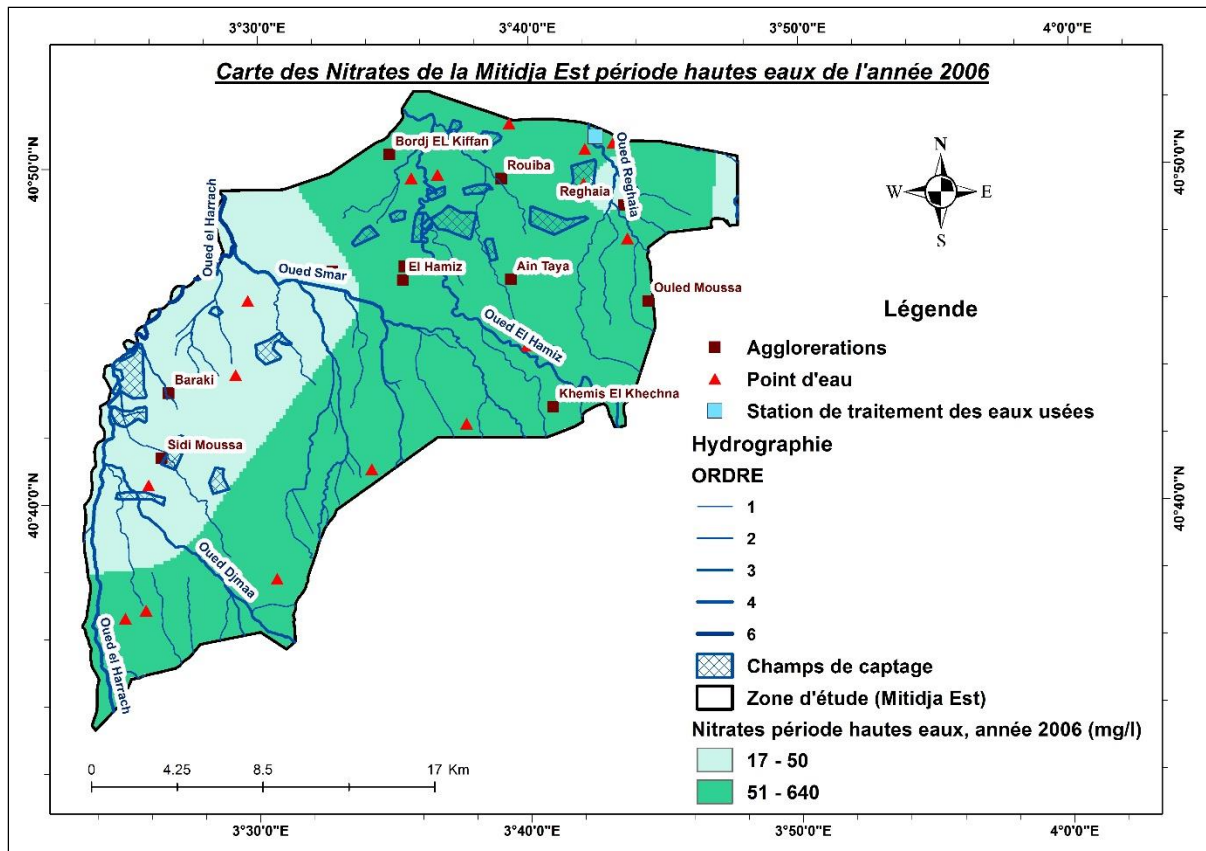


Figure 3.20 : Carte des nitrates de la Mitidja Est période HE de l'année 2006

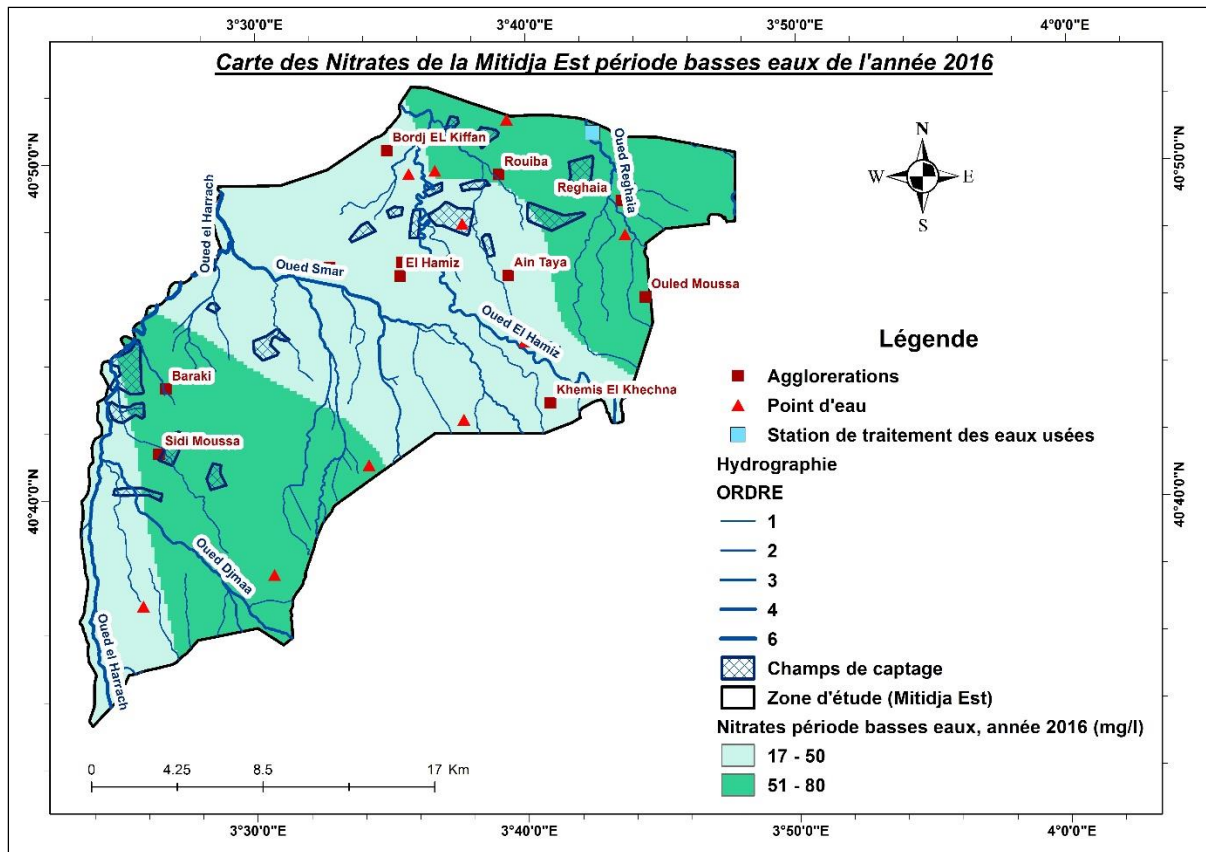


Figure 3.21 : Carte des nitrates de la Mitidja Est période BE de l'année 2016

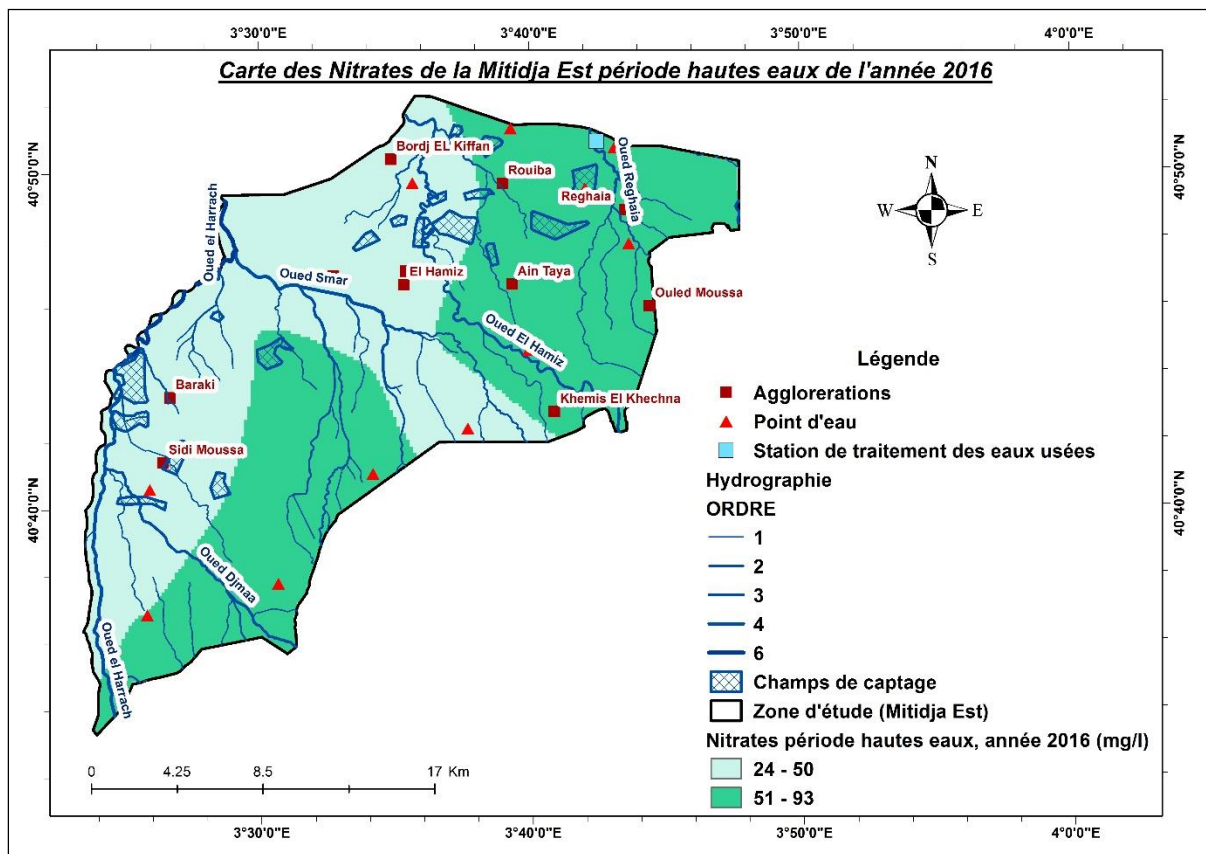


Figure 3.22 : Carte des nitrates de la Mitidja Est période HE de l'année 2016

**Conclusion**

Dans ce chapitre la méthode des variables régionalisées a été utilisée pour l'interpolation des données (niveaux piézométriques et les nitrates), il s'agit du krigeage, précédé par l'estimation des fonctions variographiques qui vont tenir compte à la fois de la géométrie des données, des caractéristiques de la régionalisation et de la précision de l'estimation. Il est donc important de souligner que la qualité de l'estimation et l'appréciation de sa précision reposent sur les modèles variographiques utilisés. La recherche d'un modèle convenable est assez délicate et nécessite une certaine expérience ou de nombreux essais. C'est une procédure qui ne peut être automatisée. Elle nécessite également les connaissances sur le terrain pour valider la véracité du phénomène observé (régularité spatiale, variabilité à courtes distances et anisotropie). Il doit par conséquent, être le plus cohérent possible avec ce qui a été observé. Le résultat montre que cette approche donne des bons modèles-bien structurés aux semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels retenus, et leurs qualités sont vérifiées par le biais de la validation croisée. Les modèles sont de bonne qualité, en raison que la moyenne des erreurs standardisées (MES) est environ de zéro et la variance est proche de l'unité.

### Conclusion générale

A travers cette étude, nous avons établi des cartes d'évolution des nitrates et des niveaux piézométriques de la Mitidja Est pour deux périodes basses et hautes eaux et deux années d'étude 2006 et 2016.

Premièrement une recherche bibliographique qui a englobé la définition de la géostatistique, son histoire depuis les estimations des réserves des gisements miniers à la modélisation spatio-temporelle et sa théorie, la cartographie, ses règles à respecter et l'outil principal le SIG qui permet de créer, d'organiser et de présenter des données numériques spatialement référencées, en final on a vu les différentes pollutions des nappes qui sont d'origines domestique, agricole, urbaine et routière.

Pour la zone d'étude la Mitidja Est, elle a été analysée sur différents aspects, elle se situe à l'est de la plaine de Mitidja dans les deux sous bassins Oued el Harrach Maritime et le côtiers Cap Matifou, sa superficie est de 592.93 km<sup>2</sup>, ou la forme générale de la plaine est allongée avec des pentes moyennes de 15 à 18%. Elle est drainée par trois principaux oueds qui sont oued El Harrach, oued Hamiz et oued Reghaia. Son climat est de type méditerranéen subhumide de pluviométrie qui peut atteindre à 800 mm par an avec une température modéré. Ses principales ressources en eaux superficielles sont les barrages d'El Hamiz, Keddara et la digue de Reghaia, pour les eaux souterraines, on trouve les forages et les puits exploités pour les différentes utilisations, géologiquement la formation alluvionnaire est dominante. La plaine de la Mitidja est une région agricole avec une diversité, en raison de sa topographie et de sa fertilité, c'est une zone industrielle par excellence (les zones de Rouiba, El Harrach, Oued Semar et Reghaia).

Des cartes d'évolution des nitrates et de la piézométrie ont été établi de notre zone d'étude à partir de l'application de l'approche géostatistique, le résultat de l'analyse statistique montre que les distributions de l'année 2006 sont dissymétriques alors que pour de l'année 2016 sont gaussiennes, l'analyse des variogrammes de surfaces montre l'absence de l'anisotropie, c'est le variogramme expérimental omnidirectionnel qui a été considéré.

Après plusieurs essais et itérations des modèles des semi-variogrammes expérimentaux robustes sont retenus, qui vont être utilisé pour le krigeage de nos cartes. Les résultats du krigeage ont montré l'existante des zone de dépression pour les deux années cela est expliqué par la surexploitation de la nappe pour les différentes utilisations. Concernant les

## Conclusion générale

---

concentrations des nitrates on a remarqué une variation entre les deux années d'étude, des fortes concentrations des nitrates à l'année 2006 ça revient aux exagérations des agriculteurs d'utiliser les engrais azotés, les déchets industrielles non traités à cette époque, par contre en 2016 ces concentration ont diminué cela est expliqué par la réduction de l'utilisation des engrais azotés par les agriculteurs, rejets industrielles traités, et la reprise des stations d'épurations.



## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- Allard, D., 2012. Statistiques spatiales : introduction à la géostatistique. Master Biostatistique. Université Montpellier I, II.
- Arnaud, M., Emery, X., 2000. Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris.
- Astite, W., Belabid, N., Medjerab, A., 2012. Cartographie des zones inondables à l'aide d'une modélisation hydraulique. Cas de Oued El Harrach, Alger. Université Houari Boumediene. First International Colloquium REZAS'12. Morocco. ISSN: 2107-6502.
- Ballerini et al. (1998): Pollution et dépollution des nappes d'eau souterraine, Paris.
- Bouron, P., 2005. Cartographie, lecture de carte. École Nationale des Sciences Géographiques, Institut Géographique National.
- Cressie, N.E., 1993. Statistics for Spatial Data, revised edition. ed. Wiley & Sons Inc., New York.
- Djoudar, D. (2014). Approche géostatistique de la pollution par les nitrates (Mitidja) Algérie. Thèse de doctorat USTHB.
- ENERGOPROJEKT, 2011. Annual Report Energoprojekt Holding p.l.c. Belgrade.
- Faurie, C, Medori, P, Ferra, C et al. (2003). Ecologie: Approche scientifique et pratique. 5<sup>ème</sup> Edition Lavoisier doc et tec, Paris, p.312.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation, Applied geostatistics series. Oxford University Press, New York ; Oxford.
- Grelaud, G. (1999). L'eau usage et polluants, tome 2, Edition INRA, Paris.
- Guillemin, C et ROUX, J.C. (1991). Pollution des eaux souterraines en France, bilan des connaissances, impacts et moyens de prévention. Ed. BRGM, manuels et méthodes. N° 23.
- Guillot, G., 2004. Introduction à la géostatistique. Institut National Agronomique de Paris-Grignon.
- Jégou, L., Buosi, J., 2007. Initiation à la cartographie automatique. Département de Géographie et Aménagement. Institut Daniel Faucher.
- Joly, F., 1990. Pour une cartographie de l'érosion. Soil Technology. Vol. 3, p.209-220. Cremlingen.
-

## Références bibliographiques

---

- Journel, A.G., Huijbregts, C.J.,1978. Mining Geostatistics. Academic Press, San Diego, CA,USA.
- Kafia.S et Touat. F, (2012). Etude hydrochimique et suivi de l'évolution de la qualité des eaux de la nappe alluviale de Mitidja USTHB. Alger
- Kankou, M. (2004). Vulnérabilité des eaux et des sols de la rive droite du fleuve Sénégal en Mauritanie- étude en laboratoire du comportement de deux pesticides. Thèse de doctorat. Université de Limoges, (2004), p23-24.
- Khelfi, M, A.,Touaibia., B, Guastaldi, E. 2017. Regionalisation of the Bintensity-duration-frequency curves in Northern Algeria
- 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.
- Levet .D.(2008) Guide pratique des Substances Toxiques dans les Eaux Douces et Littorales du Bassin Seine-Normandie.
- Maillard, A., 1972. Informatique appliquée, Cartographie par ordinateur. Cdl. O.R.S.T.O.M., s&r. Sci. Hum., vol. IX, no 2, 1972 : 231-246.
- Matheron, G., 1965, Les variables régionalisées et leur estimation : Masson, Paris, 306 p.
- Normand.B, et al (2000): Profils de nitrates dans la zone non saturée de la craie-relation avec les historiques culturaux et modélisation du transfert vers l'aquifère.Colloque «Eaux souterraines en Région Agricole», Poitiers, S2-5\_S2-10.
- Plumejeaud, C et al., 2012. Les données (zone, temporalités). Rapport GéoPeuple numéro L2.02.
- Poidevin, D., 2010. Manuel de cartographie. Edition ellipse. Artique, les roches, 37230 Fondettes.
- Renard. S. (2002). La biorémédiation: techniques de réhabilitation des sites pollués par l'action des microorganismes. Mém. Maîtrise B.G., Fac. Sci. Amiens.
- SOGREAH, 2008. Prospection géophysique de la plaine de la Mitidja- CGG (1967) Modèle Mathématique de la plaine de la Mitidja-Mission4.
- TOUBAL, A.C. (1998) : Apport de a géophysique à l'étude des problèmes hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrains. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger. Thèse Doctorat d'état. FSGAT. USTHB. Alger
- Yann, C., 2001. Histoire de la cartographie. Mémoire de fin d'étude. Equipe Epistémologie et histoire de la géographie (E.H.GO), Laboratoire Géographie-cités (CNRS, Université de Paris, I, Paris VII, 13 rue du Four, 75006 Paris. France.
-

## Références bibliographiques

---

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.

---