

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRONOMIE (ENSA)**



**THESE**

pour l'obtention du grade de **DOCTEUR EN SCIENCES**

**Département : Génie Rurale**

**Spécialité : Hydraulique Agricole**

Présentée par :

**M<sup>me</sup> Sonia MEDJDOUB LEULMI**

**THEME**

**Modélisation des transferts d'eau et de solutés dans le sol dans la  
plaine de la Mitidja. Impact sur la pollution de la nappe.**

Soutenue publiquement, le 08/12/2021 devant le jury composé de :

**M. CHABACA Mohamed Nacer**  
**M. Abdellah AIDAOU**  
**M<sup>me</sup> Dahbia DJOUDAR HALLAL**  
**M. Tarik HARTANI**

**M. Arezki MEKLI**  
**M<sup>me</sup>. Hind MEDDI**

**Professeur à l'ENSA**  
**Professeur à l'ENSA**  
**MCA à l'ENSH**  
**Professeur au Centre**  
**Universitaire de Tipaza**  
**Professeur à l'ENSA**  
**Professeur à l'ENSH**

**Président**  
**Directeur de Thèse**  
**Co- Directeur de Thèse**  
**Examinateur**  
**Examinateur**  
**Examinateur**

**Année universitaire 2021/2022**

## Remerciements

Je remercie d'abord le bon **DIEU** de m'avoir donné la volonté, le courage, et la force afin que ce travail puisse aboutir (el Hamdoulilah).

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu le **Professeur Abdellah AIDAOU** pour avoir accepté de diriger mes travaux de recherche dans le cadre de cette thèse et pour toute l'aide qu'il m'a apporté pour accomplir ce projet. Sans ces précieux conseils, ce projet n'aurait pas abouti.

Je remercie, également, ma Co-directrice de thèse **Dr. Dahbia DJOUDAR HALLAL**, d'avoir accepté de diriger ce travail, sans ses orientations et son dévouement je n'aurais pas pu accomplir ce projet.

Mes vifs remerciements vont à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à évaluer travail.

Je remercie, **Pr. Mohamed Nacer CHABACA**, Professeur à l'ENSA, d'avoir accepté de présider le Jury.

J'adresse mes vifs remerciements au **Pr. Tarik HARTANI**, Professeur au centre universitaire de Tipaza, pour ses conseils et d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Mes vives gratitude vont aussi au **Pr. Arezki MEKLCHE**, Professeur à l'ENSA pour avoir accepté de faire partie du jury.

Sans oublier **M. Fouad SELLAM**, Enseignant à l'ENSA qui n'a cessé de m'encourager, et m'orienter, depuis mon ingéniorat, et que je ne remercierai jamais assez. Grand merci d'être toujours à la disposition des étudiants.

Je tiens à remercier aussi toute l'équipe **QUALIWATER-ENSA**.

Qu'il me soit permis de remercier **M. BELAIDI Mouloud** et toute l'équipe de l'**ANRH Blida** pour l'aide qui m'ont apporté.

Mes vifs remerciements vont à **Dr. Mohamed Amine KHALFI**, pour son aide précieuse quant utilisation du programme ARCGIS et la réalisation des cartes géostatistiques.

Je remercie, également, **Dr. Abdelhadi AMMARI**, qui n'a pas arrêté de me pousser à terminer cette thèse et qui été toujours disponibles pour me conseiller.

Toute ma gratitude à mes amies, Mesdames : **Bahbouh L, Aziez O, Djoudar D., Saadoune S., Mazouzi S., Lounis A., Bellabas S, et Meddi H.** Sans oublier tous mes collègues de l'ENSH à leurs têtes **M. Habbouche Abdelhamid** (le directeur de l'ENSH Blida), ainsi que tous mes étudiants de toutes les promotions.

Mes sincères remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail de recherche.

## Résumé

La qualité des eaux dans la Mitidja a connu ces dernières années une grande détérioration à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques en agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau.

Les rejets provoquent une modification chimique de l'eau qui devient impropre à tous les usages.

Plusieurs cas de pollution ont déjà fait l'objet de nombreuses études, mémoires, thèses et publications dans des journaux internationaux.

La présente étude portera sur l'évolution de la fluctuation de la nappe d'eau souterraine et l'interprétation des résultats d'analyse des échantillons d'eau prélevés par les techniciens de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) durant les périodes de 2006 et 2016, 2008 et 2018. Ces derniers ont fait l'objet d'une approche statistique et géostatistique.

Ceci nous a permis de procéder à une cartographie assistée par le SIG des teneurs en nitrates contenus dans l'eau et des fluctuations des niveaux piézométriques, et de dresser un constat exhaustif sur l'état actuel de la relation fluctuation de la nappe – teneurs en nitrates .

De ce fait, l'approche géostatistique nous a permis l'établissement des cartes krigées de la répartition spatiale des teneurs en nitrates pour les deux années 2006 et 2016 des eaux souterraines ainsi que les cartes de fluctuation de la nappe pour les deux périodes prises en considération (hautes et basses eaux).

L'analyse des résultats obtenus révèlent que 72% des points d'eau présentent des concentrations en nitrates supérieures au seuil de 50 mg/l en hautes eaux des deux campagnes 2006 et 2016. Quant à la période des basses eaux les résultats révèlent que plus de 54% en 2006 et plus de 81% en 2016 des points d'eau analysés sont contaminés (dépassant le seuil recommandés par l'OMS).

Un rabattement important de la nappe, entre 2008 et 2018, est mis en exergue et qui a atteint en moyenne environ 23 m en basses eaux et 26 m en hautes eaux. Cette baisse du niveau de la nappe peut être expliquée par une surexploitation des eaux souterraines de la nappe alluviale engendrée par des pompages intensifs destinés à l'irrigation, l'industrie et l'AEP, mais aussi à la raréfaction des précipitations due aux changements climatiques qui sévissent de plus en plus ces trois dernières décennies.

Nous avons, également, établie une cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la plaine de la Mitidja par l'application de la méthode DRASTIC, afin de délimiter les zones vulnérable à la pollution. Cette recherche nous a permis de constater à travers cette méthode que la pollution de la nappe de la Mitidja présente les résultats alarmants et que plus de 50% de la surface totale est caractérisée par une vulnérabilité très élevée.

Vu l'évolution ascendante des teneurs en nitrates durant ces dernières années, il y a un risque important que les concentrations dépasseront de loin le seuil des 50 mg/l recommandé par l'OMS dans les 10 prochaines années.

Il est donc, impératif de remédier à cela à travers le contrôle des rejets industriels, et la vulgarisation au niveau de la communauté agricole quant à l'utilisation intensive des engrais chimique et (en particulièrement azotés), et des eaux souterraines.

**Mots clés :** Pollution, Nitrates, Niveaux piézométriques, Nappe, Mitidja Est, géostatistique, Krigeage, vulnérabilité.

## **Abstract**

The groundwater quality in the Mitidja plain has known an important deterioration during the last decades due to uncontrolled industrial waste discharges, intensive use of chemical fertilizers in agriculture, and an intense exploitation of groundwater resources. In this paper, we are interested in the Eastern part of the Mitidja plain, which covers an area of 495.52 km<sup>2</sup>. This study area is characterized by its industrial and agricultural vocation, thereby the problem of groundwater pollution. The study will focus on the fluctuation of the groundwater table, and the interpretation of the water quality analysis results made by ANRH (National Water Resources Agency), during the period between 2006 and 2016, 2008 and 2018. The last ones have been geostatistically approached. This allowed us to carry out a GIS-assisted mapping of the nitrate concentrations in the aquifer and to draw up an exhaustive report on the current state of the relationship between the fluctuation of water table and the nitrate concentration rates, also the spatial and temporal evolution of the aquifer. As a result, the geostatistical approach gave us the possibility to draw up Kriging maps of the nitrate level spatial distribution for the two field monitoring campaigns: 2006 and 2016 as well as groundwater fluctuation maps for the periods under consideration. The obtained result reveals that 72% of the sample's points have nitrate concentrations higher than 50 mg/l in rainy period in the 2 years 2006 and 2016. As for the dry period, the results show that more than 54% in 2006 and more than 81% in 2016 of the water samples analyzed are contaminated (exceeding the WHO's recommendation). A significant water table drawdown, between 2008 and 2018, is highlighted, which reached an average of around 23m in low water and 26m in rainy period (case of drilling F1003). This drop in the water table level can be explained by overexploitation of the groundwater caused by intensive pumping for irrigation, industry, and water supply, due essentially to the increasing scarcity of rainfall, which is a consequence of climate change, which has become increasingly prevalent over the last three decades.

We have also mapped the vulnerability of the Mitidja plain to pollution by applying the DRASTIC method, in order to delineate the areas vulnerable to pollution. This research has shown us through this method that the pollution of the Mitidja aquifer presents alarming results and that more than 50% of the total surface is characterized by a very high vulnerability.

Given the upward trend in nitrate levels in recent years, there is a significant risk that nitrate levels will far exceed the 50 mg/l threshold recommended by the WHO in the next 10 years. It is therefore imperative to remedy this through the control of industrial discharges and the extension at the level of the agricultural community regarding the intensive use of chemical fertilizers and (in particular nitrogen) and groundwater (by controlling the pumping).

**Keywords :** *Pollution . Nitrates . Piezometric levels . Aquifer . Mitidja East . Geostatistics . Kriging, vulnerability.*

<b>Table des Matières</b>	<b>Page</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b>Partie 01 :</b>	
<b>Présentation et Climatologie de la zone d'étude « la Mitidja »</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I :</b>	
<b>« CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE : LA MITIDJA »</b>	<b>4</b>
<b>I. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE « LA MITIDJA »</b>	<b>5</b>
<b>I.1. Localisation</b>	<b>5</b>
<b>I.2. La GEOLOGIE</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1. Formation et genèse de la Mitidja</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2. Lithostratigraphie de la plaine de la Mitidja</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2.1. Le socle primaire</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2.2. Le secondaire ou mésozoïque</b>	<b>8</b>
<b>I.2.2.3. Le Tertiaire ou Cenozoïque</b>	<b>8</b>
<b>A. Le Miocène et roches plus anciennes</b>	<b>8</b>
<b>B. Les roches éruptives du Tertiaire</b>	<b>8</b>
<b>C. Le Plaisancien</b>	<b>8</b>
<b>D. L'Astien</b>	<b>8</b>
<b>I.2.4. Le Quaternaire</b>	<b>9</b>
<b>A. Formation d'El Harrach</b>	<b>9</b>
<b>B. Formation de la Mitidja</b>	<b>9</b>
<b>C. Formation du Mazafran et de Halloula</b>	<b>10</b>
<b>D. Les dépôts récents</b>	<b>11</b>
<b>I.3. Pédologie</b>	<b>11</b>
<b>I.4. Réseau hydrographique</b>	<b>12</b>
<b>I.5. Ressources en eau</b>	<b>13</b>
<b>I.1.3. Potentialités en eau des nappes de la Mitidja</b>	<b>13</b>
<b>I.5.1. Ressources en eau souterraine</b>	<b>14</b>
<b>I.5.1.1. Prélèvements destinés à l'AEP</b>	<b>14</b>
<b>I.5.1.2. Prélèvements agricoles</b>	<b>14</b>
<b>I.5.1.3. Prélèvements industriels</b>	<b>15</b>
<b>I.5.2. Ressources en eau superficielles</b>	<b>15</b>
<b>I.6. Occupation du sol et pratiques agricole</b>	<b>16</b>
<b>I.7. Activités agricoles</b>	<b>17</b>
<b>I.7.1. L'agriculture</b>	<b>17</b>
<b>I.7.2. L'élevage</b>	<b>18</b>
<b>I.8. L'activité industrielle</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE II : « ETUDE CLIMATOLOGIQUE »</b>	<b>19</b>
<b>II.1. Climat de la zone d'étude</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Paramètres climatiques</b>	<b>20</b>
<b>II.2.1. La températures moyennes mensuelles</b>	<b>20</b>

II.1.2. Températures moyennes annuelles	21
II.2. Précipitation	23
II.2.1. Réseau pluviométrique	23
II.2.1.1. Précipitations mensuelles	24
II.2.1.2. Précipitations annuelles	26
II.2.2. Ajustement des pluies (Test de normalité)	28
II.3. Caractérisation du climat de la zone d'étude	28
II.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gausson	29
II.3.2. Indice de l'aridité de DeMartonne (1926)	29
II.3.3. Quotient pluviothermique d'Emberger	30
II.4. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	31
• La formule de Penman-Monteith	32
• Formule de Thornthwaite	33
II.5. Déficit pluviométrique : (Dp)	34
II.6. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)	36
II.6.1. Formule de TURC	36
II.6.2. Formule de COUTAGNE	36
II.6. bilan hydrologique	37
• Estimation du Ruissellement (R)	37
• Estimation de l'Infiltration (I)	38
<b>PARTIE 02 : PIEZOMETRIE ET HYDROCHIMIE DE LA PLAINE DE LA MITIDJA</b>	<b>39</b>
<b>CHAPITRE III :</b>	
<b>« CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES ET HYDROCHIMIQUES DE LA PLAINE DE LA MITIDJA »</b>	
	<b>40</b>
III.1. Aperçu hydrogéologique et hydrodynamique	41
III.1.1. L'aquifère de l'Astien	42
III.1.2. L'Aquifère des Alluvions de la Mitidja (le quaternaire)	43
III.2. Étude Piézométrique de la nappe de la Mitidja	43
III.2.1. Description	43
• L'aquifère de l'Astien	43
• L'aquifère des alluvions de la plaine de la Mitidja (le Quaternaire)	43
III.2.1.1. La Piézométrie	44
• Evolution des niveaux piézométriques	45
III.2.1.2. Fluctuation et évolution de la piézométrie de la nappe de la Mitidja	48
III.3. CHIMISME DE LA ZONE D'ETUDE	50
III.1 Hydrochimie :	51
III.1.1. Paramètres physico-chimiques des eaux	51
III.1.1.1. Paramètres physiques	51
- Potentiel d'Hydrogène (pH)	51
- La conductivité électrique	52
III.1.2. Les Analyses chimiques	54
1. Les éléments majeurs	55
2. Les nitrates	60

<b>III.1.3. Analyse Statistique des paramètres chimiques</b>	<b>67</b>
<b>III.1.4. Faciès chimiques</b>	<b>69</b>
• <i>Le diagramme de PIPER</i>	<b>69</b>
• <i>Le diagramme de Schoeller-Berkaloff</i>	<b>70</b>
• <i>Indice d'échange de base</i>	<b>71</b>
<b>III.1.4. Analyse factorielle</b>	<b>72</b>
<b>III.1.4.1. L'Analyse en Composantes Principales (ACP)</b>	<b>72</b>
<b>III.1.4.2. Application de l'ACP à plaine de la Mitidja</b>	<b>72</b>
• <i>Analyse de la matrice de corrélation</i>	<b>73</b>
• <i>Analyse des valeurs propres</i>	<b>74</b>
• <i>Corrélation entre les variables et les axes principaux</i>	<b>76</b>
• <i>Analyse des cercles de corrélation ACP</i>	<b>77</b>
<b>III.4.2. Qualité de l'eau : aptitude des eaux à l'irrigation</b>	<b>80</b>
<b>Partie 03 :</b>	
<b>« POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES LES NITRATES : APPROCHE GEOSTATISTIQUE DE L'EVOLUTION DES TENEURS EN NITRATES ET DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES DANS LA PLAINE DE LA MITIDJA »</b>	
	<b>82</b>
<b>Synthèse bibliographique :</b>	<b>83</b>
<b>CHAPITRE IV :</b>	
<b>« EVOLUTION DES NITRATES ET DES NIVEAUX DE LA NAPPE DE LA MITIDJA PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE »</b>	
	<b>86</b>
<b>IV.1. Aperçu Bibliographique et travaux antérieurs</b>	<b>88</b>
<b>IV.2. LE KRIGEAGE</b>	<b>88</b>
<b>IV.2.1. Modélisation</b>	<b>90</b>
<b>IV.2.2. Validation</b>	<b>90</b>
<b>IV.3. Application d'une approche géostatistique à l'évolution conjuguée des nitrates et des niveaux piézométriques dans la Mitidja</b>	<b>90</b>
	<b>113</b>
<b>CHAPITRE V : « Actualisation de l'étude de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, de la nappe alluviale de la Mitidja, par approche DRASTIC »</b>	
	<b>113</b>
<b>V.1. POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES</b>	<b>114</b>
<b>V.1.1. Critères d'appréciation de la pollution des eaux</b>	<b>114</b>
<b>V.1.2. Principaux types et origines des pollutions</b>	<b>114</b>
<b>V.1.2.1. Types de pollution</b>	<b>114</b>
<b>V.1.2.1.1. Selon la répartition géographique</b>	<b>115</b>
<b>V.1.2.1.2. Selon la répartition dans le temps</b>	<b>115</b>
<b>V.1.2.2. Origine de la pollution</b>	<b>115</b>
<b>V.1.3. Nature des polluants</b>	<b>115</b>
<b>V.2. Vulnérabilité des eaux à la pollution</b>	<b>115</b>
<b>V.3. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines</b>	<b>116</b>
<b>V.3.2. Les méthodes basées sur les documents cartographiques</b>	<b>116</b>

<b>V.3.2. Les méthodes basées sur un système de cotation numérique</b>	<b>117</b>
<b>V.3.2. Les méthodes basées sur la caractérisation du polluant</b>	<b>117</b>
<b>V.3.1. La méthode DRASTIC</b>	<b>117</b>
<b>V.3.2. Calcule de d'indice de vulnérabilité</b>	<b>118</b>
<b>V.3.3. Interprétation de l'indice de vulnérabilité « DRASTIC»</b>	<b>118</b>
<b>V.4. Application du modèle de vulnérabilité DRASTIC</b>	<b>118</b>
<b>V.4.2 Résultats et interprétation des cartes paramétriques</b>	<b>118</b>
<b>V.4.2.1. Profondeur de la nappe (D)</b>	<b>119</b>
<b>V.4.2.2. Carte de recharge de la nappe (R)</b>	<b>120</b>
<b>V.4.2.3. Carte du paramètre « A » zone saturée</b>	<b>121</b>
<b>V.4.2.3. Carte du paramètre « S » nature du sol</b>	<b>122</b>
<b>V.4.2.4. Carte du paramètre « T » topographie</b>	<b>123</b>
<b>V.4.2.5. Carte du paramètre « I » zone non saturée</b>	<b>124</b>
<b>V.4.2.6. Carte du paramètre « C » conductivité hydraulique</b>	<b>125</b>
<b>V.4.2.7. Indice de vulnérabilité DRASTIC</b>	<b>126</b>
<b>• Zones à vulnérabilité très élevée</b>	<b>126</b>
<b>• Zones à vulnérabilité élevée</b>	<b>126</b>
<b>• Zones à vulnérabilité moyenne</b>	<b>127</b>
<b>V.5. Etude de la validité des modèles utilisés</b>	<b>127</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>129</b>
<b>Recommandations</b>	<b>131</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>132</b>
<b>Annexes</b>	<b>139</b>
<b>Liste des Figures</b>	
<b>Figure I.1 : Présentation de la Mitidja (PAC.2004)</b>	<b>5</b>
<b>Figure I.2 : Carte de situation des sous bassins versants de la plaine de la Mitidja (ANRH, 2008)</b>	<b>6</b>
<b>Figure I.3 : Carte géologique de la plaine de la Mitidja et du centre septentrional d'Algérie (Source ANRH, 2011)</b>	<b>7</b>
<b>Figure I.4 : Formation Géologique de la région d'Alger (source : Benni et Partners 1983)</b>	<b>10</b>
<b>Figure I.5 : Différents stades de l'évolution de la Mitidja pendant le Plio-Quaternaire (Glangeaud L., 1952)</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.6 : Chevelu hydrographique et stations pluviométriques (source : Hadjoudj 2008)</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.7 : Les types de sols de la plaine de Mitidja (échelle originale : 1:500.000) (Source : PAC 2004)</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.8 : Répartition des surfaces agricoles utiles dans la Mitidja (moyenne : 2005, 2006 et 2007) (source : Hadjoudj 2008-INSID)</b>	<b>17</b>
<b>Figure II.1 : Evolution des températures mensuelles interannuelles dans Mitidja Est (station de dar el beida, période : 1956-2006)</b>	<b>21</b>
<b>Figure II.2 : Evolution des températures mensuelles interannuelles moyennes et extrêmes dans Mitidja Ouest (station de Soumaa, période : 2002-2015)</b>	<b>21</b>
<b>Figure II.3 : Evolution des températures moyennes annuelles dans Mitidja Est (station de dar el beida, période : 1956-2006)</b>	<b>22</b>

<b>Figure II.4</b> : Evolution des températures annuelles dans Mitidja Ouest (station de Soumaa, période : 2003-2015)	<b>23</b>
<b>Figure II.5</b> : Localisation des stations pluviométriques dans la Mitidja (source : Aziez, 2021)	<b>24</b>
<b>Figure II.6.</b> : Variation mensuelle interannuelle des pluies dans la Mitidja Est	<b>25</b>
<b>Figure II.7</b> : Variation mensuelle interannuelle des pluies dans la Mitidja Ouest	<b>26</b>
<b>Figure II.8</b> : Evolution des précipitations annuelles dans la Mitidja Est (période : 1968 - 2011)	<b>27</b>
<b>Figure II.9</b> : Evolution des précipitations annuelles dans la Mitidja Ouest (période : 1968 - 2011)	<b>27</b>
<b>Figure II. 10</b> : Carte des pluies interannuelles – plaine de la Mitidja (période : 1970 à 2015)	<b>28</b>
<b>Figure II.11</b> : Diagramme ombrothermique ( Station ONM Dar El Beida : 1956-2008 )	<b>28</b>
<b>Figure II.12</b> : Diagramme Ombrothermique de la Mitidja Ouest (station : Blida, Période : 1970-2011)	<b>29</b>
<b>Figure II.13</b> : Abaque d'indice d'aridité de DeMertonne de la Mitidja Ouest et Est (Périodes respectives : 1970-2011 ; 1956-2008)	<b>30</b>
<b>Figure II.14.</b> : Climagramme d'Emberger de la Mitidja Est et Ouest)	<b>31</b>
<b>Figure II.15</b> : Evolution des Evapotranspirations Potentielles dans la Mitidja Est (Station de Dar El Beida, Période : 1956 – 2008)	<b>33</b>
<b>Figure II.16</b> : Evolution des Evapotranspirations Potentielles dans la Mitidja Est (Stations : Soumaa 2002-2015 et Boufarik 1990-2015)	<b>34</b>
<b>Figure II.17</b> : Evolution du déficit pluviométrique dans la Mitidja Est (Station de Dar El Beida 1956-2008))	<b>35</b>
<b>Figure II.18</b> : Evolution du déficit pluviométrique dans la Mitidja Ouest (Station de Boufarik 1990-2015, et Blida 70-2011)	<b>35</b>
<b>Figure III. 01</b> : Carte krigée des transmissivités de la nappe alluviale de la Mitidja (Toubal, 1998)	<b>43</b>
<b>Figure III. 01bis</b> : Points d'eau pour la mesure de la profondeur de la nappe (Mitidja)	<b>45</b>
<b>Figure III.02</b> : Evolution du niveau piézométrique dans la Mitidja Est durant 2006 et 2016 (basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')	<b>46</b>
<b>Figure III.03</b> : Evolution du niveau piézométrique dans la Mitidja Ouest durant 2008 et 2018 (basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')	<b>46</b>
<b>Figure III.05</b> : Cartes piézométrique de l'année 2016 pour les deux périodes : basses (a) et hautes eaux (a')	<b>46</b>
<b>Figure III.05bis</b> : Cartes piézométrique de l'année 2018 pour les deux période : basses (a) et hautes eaux (a')	<b>47</b>
<b>Figure III.06</b> : Évolution de la profondeur de la nappe alluviale (niveau statique) du champ de captage d'El Hamiz PZ2 (Mitidja Est), période allant de 1995 à 2018	<b>48</b>
<b>Figure III.07</b> : Évolution de la profondeur de la nappe alluviale (niveau statique) du champ de captage du Mazafran MZ2 (Mitidja Ouest), période : 1996 – 2018.)	<b>49</b>
<b>Figure III.08</b> : Variation du pH de l'eau Campagnes : 2006 basses et hautes eaux	<b>51</b>
<b>Figure III.09</b> : Variation du pH de l'eau Campagnes : 2008 basses eaux et hautes eaux	<b>51</b>
<b>Figure III.10</b> : Variation du pH de l'eau Campagnes : 2016 basses eaux et hautes eaux	<b>52</b>
<b>Figure III.11</b> : Variation du pH de l'eau Campagnes : 2018 basses eaux et hautes eaux	<b>52</b>
<b>Figure III.12</b> : Variation de la Conductivité électrique (CE en $\mu$ /cm) de l'eau Campagnes : 2006 basses eaux et hautes eaux	<b>53</b>
<b>Figure III.13</b> : Variation de la Conductivité électrique (CE en $\mu$ /cm) de l'eau Campagnes : 2008 basses eaux et hautes eaux	<b>53</b>

<b>Figure III.14</b> : Variation de la Conductivité électrique (CE en $\mu\text{/cm}$ ) de l'eau Campagnes : 2016 basses eaux et hautes eaux	<b>54</b>
<b>Figure III.15</b> : Variation de la Conductivité électrique (CE en $\mu\text{/cm}$ ) de l'eau Campagnes : 2018 basses eaux et hautes eaux	<b>54</b>
<b>Figure III.16</b> : Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau Campagnes : 2006 basses et hautes eaux (a et a')	<b>56</b>
<b>Figure III.17</b> : Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau Campagnes : 2008 basses et hautes eaux (b et b')	<b>57</b>
<b>Figure III.18</b> : Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau Campagnes : 2016 basses et hautes eaux (c et c')	<b>58</b>
<b>Figure III.19</b> : Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau Campagnes : 2018 basses et hautes eaux (d et d')	<b>59</b>
<b>Figure III.20</b> : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau Campagnes : 2006 basses et hautes eaux	<b>61</b>
<b>Figure III.21</b> : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau Campagnes : 2008 basses et hautes eaux .	<b>62</b>
<b>Figure III.22</b> : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau Campagnes : 2016 basses et hautes eaux	<b>62</b>
<b>Figure III.23</b> : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau Campagnes : 2018 basses et hautes eaux	<b>62</b>
<b>Figure III.24</b> : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2006 , basses (a) et hautes (a') eaux	<b>63</b>
<b>Figure III.24bis</b> : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2016 , basses (b) et hautes (b') eaux	<b>64</b>
<b>Figure III.25</b> : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2008 , basses (c) et hautes (c') eaux	<b>65</b>
<b>Figure III.25bis</b> : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2018 , basses (d) et hautes (d') eaux	<b>66</b>
<b>Figure III.26</b> : Diagramme de Piper des hautes eaux 2018 de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>70</b>
<b>Figure III.27</b> : Classification chimique des eaux selon piper en Juillet, 1992 (Toubal, 1998)	<b>70</b>
<b>Figure III.28</b> : Diagrammes de Schoëller-Berkaloff pour les hautes eaux 2018 de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>71</b>
<b>Figure III.29</b> : Cercle de corrélation, campagne 2006 (basses (a) et hautes (b) eaux.	<b>73</b>
<b>Figure III.30</b> : Cercle de corrélation, campagne 2008 (basses (a) et hautes (b) eaux	<b>75</b>
<b>Figure III.31</b> : Cercle de corrélation, campagne 2016 (basses (a) et hautes (b) eaux	<b>76</b>
<b>Figure III.32</b> : Cercle de corrélation, campagne 2018 (basses (a) et hautes (b) eaux	<b>79</b>
<b>Figure IV.01</b> : Zone d'étude (Mitidja Est)	<b>91</b>
<b>Figure IV.02</b> : Zone d'étude (Mitidja Ouest)	<b>92</b>
<b>Figure IV.03</b> : Evolution des niveaux piézométriques durant 2006 et 2016 (Mitidja Est) ( basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')	<b>99</b>
<b>Figure IV.04</b> : Evolution des niveaux piézométriques durant 2008 et 2018 (Mitidja Ouest) ( basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')	<b>99</b>
<b>Figure IV.05</b> : Evolution de la concentration en nitrates dans la nappe (Mitidja Est) (périodes : Basses 'a' et hautes 'b' eaux, durant 2006 et 2016	<b>99</b>
<b>Figure IV.06</b> : Evolution de la concentration en nitrates dans la nappe (Mitidja Ouest) (périodes : Basses 'a' et hautes 'b' eaux, durant 2008 et 2018) (périodes : Basses 'a' et hautes 'b' eaux, durant 2008 et 2018)	<b>100</b>

<b>Figure IV.07</b> : Evolution des nitrates et des niveaux piézométriques (Mitidja Est) Hautes eaux : 2006 (a), 2016 (b), basses eaux : 2006 (c), 2016 (d).	<b>101</b>
<b>Figure IV.08</b> : Evolution des nitrates et des niveaux piézométriques (Mitidja Ouest) Hautes eaux : 2008 (a), 2018 (b), basses eaux : 2008 (c), 2018 (d).	<b>102</b>
<b>Figure IV.09</b> : Evolution des concentrations en nitrates dans le point d'eau P021-5 (E008-48583: Sud Ain Taya), basses et hautes eaux, respectivement 'a' and 'b'- de 1985 à 2016.	<b>103</b>
<b>Figure IV.10</b> : Evolution des concentrations en nitrates dans le point d'eau W062-251 basses et hautes eaux, respectivement 'a' and 'b'- de 2008 à 2018	<b>103</b>
<b>Figure IV.11</b> : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2006) – Mitidja Est	<b>104</b>
<b>Figure IV.12</b> : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2016) – Mitidja Est	<b>105</b>
<b>Figure IV.13</b> : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2008) – Mitidja Ouest.	<b>106</b>
<b>Figure IV.14</b> : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2018) – Mitidja Ouest	<b>107</b>
<b>Figure IV.15</b> : Semivariogramme des niveaux piézométriques (A) et des Nitrates (B) (Périodes : basses et hautes eaux, de l'année 2006 (a et b) et 2016 (c et d)) – Mitidja Est.	<b>108</b>
<b>Figure IV.16</b> : Semivariogramme des niveaux piézométriques (A) et des Nitrates (B) (Périodes : basses et hautes eaux, de l'année 2008 (a et b) et 2018 (c et d)) – Mitidja Ouest	<b>109</b>
<b>Figure V.1</b> : Carte paramétrique de la profondeur « D » de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>126</b>
<b>Figure V.2</b> : Carte paramétrique (R) recharge des eaux de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>127</b>
<b>Figure V.3</b> : Carte paramétrique « A » zone saturée de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>128</b>
<b>Figure V.4</b> : Carte paramétrique « S » nature du sol de la plaine de la Mitidja	<b>129</b>
<b>Figure V.5</b> : Carte paramétrique (T) pente topographique de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>130</b>
<b>Figure V.6</b> : Carte paramétrique « I » de la zone non saturée de la nappe alluviale de la Mitidja	<b>131</b>
<b>Figure V.7</b> : Carte paramétrique « C » de la conductivité hydraulique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja.	<b>132</b>
<b>Figure V.8</b> : Carte de la vulnérabilité DRASTIC des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja .	<b>133</b>
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Tableau I.1</b> : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja	<b>6</b>
<b>Tableau I.2</b> : Bilan d'eau de la nappe alluviale	<b>13</b>
<b>Tableau I.3</b> : Différentes estimations des prélèvements d'eau agricoles. (SOGREAH, 2008)	<b>15</b>
<b>Tableau I.3</b> : Répartition et superficie des classes d'aptitudes culturales (PAC, 2004)	<b>17</b>
<b>Tableau I.4</b> : Types de sols irrigables et leurs superficies.	<b>18</b>
<b>Tableau I.5</b> : Récapitulatif de la production animale	<b>18</b>
<b>Tableau II.1</b> : Températures moyennes mensuelles interannuelles dans la mitidja Est (station de dar el Beida, Période : 1956-2006).	<b>20</b>
<b>Tableau II.2</b> : Températures mensuelles moyennes et extrêmes dans la Mitidja Ouest (station de Soumaa, Période : 2002-2015).	<b>20</b>
<b>Tableau II.3</b> : Températures moyennes annuelles dans la Mitidja Est (station de Dar El Beida, Période : 1956-2006).	<b>22</b>

<b>Tableau II.4</b> : Températures moyennes annuelles dans la Mitidja Ouest (station de <i>Soumaa</i> , Période : 2003-2015).	<b>23</b>
<b>Tableau II.5</b> : Coordonnées des stations pluviométriques dans la Mitidja	<b>24</b>
<b>Tableau II.6</b> : Variations moyennes mensuelles des précipitations (en mm) dans la Mitidja Est	<b>25</b>
<b>Tableau II.7</b> : Variations moyennes mensuelles des précipitations (en mm) dans la Mitidja Ouest.	<b>25</b>
<b>Tableau II.8</b> : d'indice d'aridité de DeMartone	<b>29</b>
<b>Tableau II.9</b> : Indice d'aridité mensuel à la station de Da el Beida (Période : 1956 – 2008)	<b>30</b>
<b>Tableau II.10</b> : Indice d'aridité mensuel à la station de Blida (Période : 1970 – 2011)	<b>30</b>
<b>Tableau II.11</b> : récapitulatif des ETR obtenues par les formules de Turc et Coutagne dans la Mitidja.	<b>37</b>
<b>Tableau 12</b> : Estimation de la lame d'eau infiltrée et bilan hydrologique	<b>38</b>
<b>Tableau 13</b> : Normes OMS	<b>55</b>
<b>Tableau 14</b> : Analyse statistique des ions majeurs pour les 4 années (2006, 2008, 2016 et 2018) et pour les deux périodes (Basses et Hautes eaux)	<b>68</b>
<b>Tableau III.15</b> : Matrice de corrélation de la campagne 2006 basses (a) et hautes eaux(b)	<b>73</b>
<b>Tableau III.16</b> : Matrice de corrélation de la campagne 2008 basses (a) et hautes eaux(b)	<b>73</b>
<b>Tableau III.17</b> : Matrice de corrélation de la campagne 2016 basses (a) et hautes eaux(b)	<b>74</b>
<b>Tableau III.18</b> : Matrice de corrélation de la campagne 2018 basses (a) et hautes eaux(b)	<b>74</b>
<b>Tableau III.19</b> : Analyse des valeurs propres de la campagne 2006, périodes : basses et hautes eaux.	<b>75</b>
<b>Tableau III.20</b> : Analyse des valeurs propres de la campagne 2008, périodes : basses et hautes eaux.	<b>75</b>
<b>Tableau III.21</b> : Analyse des valeurs propres de la campagne 2016, périodes : basses et hautes eaux.	<b>75</b>
<b>Tableau III.22</b> : Analyse des valeurs propres de la campagne 2018, périodes : basses et hautes eaux.	<b>76</b>
<b>Tableau III.23</b> : Corrélation entre les variables et les axes principaux pour les campagnes 2006, 2008, 2016 et 2018 (basses et hautes eaux)	<b>76</b>
<b>Table IV.01</b> : Paramètres de modélisation (ajustement et validation) – Mitidja Est	<b>93</b>
<b>Table IV.02</b> : Paramètres de modélisation (ajustement et validation) – Mitidja Ouest	<b>95</b>
<b>Tableau V.01.</b> : Critère d'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC ( <i>ALLER et al., 1987</i> )	<b>124</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Faisant partie du bassin méditerranéen, l'Algérie souffre du problème de manque d'eau en particulier ces dernières années. Ce dernier est dû principalement, à l'irrégularité des pluies et leur hétérogénéité dans l'espace. L'exploitation irrationnelle des eaux souterraines et superficielles, ainsi que la pollution se répercutent sur les quantités d'eau mobilisées qui diminuent considérablement.

De ce fait, la ressource en eau en Algérie, fait l'objet d'une surveillance et d'un suivi drastique, vue la sécheresse pluviométrique qui règne sur la zone. Les potentialités en eau de surface sont de l'ordre de 11 milliards de m<sup>3</sup>, celle des eaux souterraines sont de 2.5 milliards de m<sup>3</sup> et 5 milliards de m<sup>3</sup> pour la zone Nord et le Sahara septentrional respectivement (*Deramchi., 2014*).

La plaine de la Mitidja est caractérisée par des terres très fertiles et un pôle à vocation agricole par excellence. Ces ressources en eaux souterraines couvraient autrefois, les besoins de la Capital et ses environs. Avec le temps cette ressource a connu une baisse importante qui est due principalement aux actions anthropiques, en effet la prolifération d'usines et des forages (surtout illicites) a provoqué des rabattements du niveau de la nappe, et a induit une pollution de cette dernière (nitrates, métaux lourds et autres).

La nappe de la Mitidja (Nord- centre de l'Algérie) est un cas parmi d'autres en Algérie. Elle couvre une superficie de 1450 km<sup>2</sup> avec une longueur moyenne de 100 Km, une largeur variant de 10 à 18 Km et une altitude moyenne de 100 m. La plaine de la Mitidja s'étend sur quatre wilayas Alger, Blida, Tipaza et Boumerdes, orienté WSW-ENE. Selon l'étude de *l'ENERGOPROJEKT (2011)*, la ressource en eau souterraine renouvelable est évaluée à une moyenne de 259,26 Mm<sup>3</sup>/an. C'est une nappe côtière dans son coté Est avec, en surface, une terre arable très fertile à l'agriculture d'une superficie de 45 000 ha (Hartani, 2004), et où nous comptant une prolifération des zones industrielles avec une large variation activités industrielles (du légère jusqu'au lourde). Sans oublier une population de plus en plus élevée selon l'OMS (2008), la population de la Mitidja est d'environ 30 000 habitants avec une densité de 20 habitants/Km<sup>2</sup>. Tout pour faire d'elle une nappe surexploitée et polluée.

La prédiction du risque de contamination des eaux et protection de celle-ci, sont important à déterminer. L'utilisation de logiciels ou des modèles d'aide à la gestion, permet de délimiter les zones à risques tant du point de vue quantitatif (ressources en eau) que qualitatif (zones vulnérables à la pollution).

Dans cette optique, le travail présenté dans ce document va nous permettre de mettre le point sur la problématique du rabattement du niveau de la nappe durant la dernière décennie, ainsi que sur la qualité des eaux souterraines du point de vue pollution par les nitrates.

L'étude a été menée dans le cadre d'un projet de recherche internationale « **Qualiwater** » avec une équipe pluridisciplinaire pour déterminer et diagnostiquer le niveau de salinité et de pollution par les nitrates dans les systèmes irrigués en Méditerranée.

Notre travail sera structuré donc, comme suit :

- La Première Partie, sera constituée de deux chapitres, dans lesquels nous présenterons globalement la zone d'étude (localisation, géomorphologie, géologie, hydrogéologie ....etc) dans le premier chapitre, et une étude climatologique détaillée de la région dans le second.
- La deuxième partie, sera consacrée à une étude des conditions d'écoulement des eaux souterraines à travers l'analyse des résultats de mesure de la piézométrie (faisant l'objet du 3ème chapitre) effectuées pour quatre (04) campagnes (2006, 2008, 2016 et 2018) et durant deux (02) périodes (hautes et basses eaux). Ces mesures ont été complétées au laboratoire (réalisées au laboratoire de l'ANRH-Blida) à travers une analyse hydrochimique des eaux prélevées dans les points d'eau (puits, forages et piézomètres) se trouvant dans la plaine Mitidja. Ces points d'eau font partie d'un réseau de surveillance de l'ANRH.
- La 3ème partie, fera l'objet d'une étude de la pollution des eaux souterraines par les nitrates, à travers une Approche Géostatistique de l'évolution des nitrates dans la Mitidja Est (campagne 2006 et 2016) et dans la Mitidja Ouest (campagne 2008 et 2018), de deux périodes de l'année : basses et hautes eaux. Une étude de la vulnérabilité de la nappe de la plaine de la Mitidja à la pollution sera, également, abordée dans cette partie à travers une approche par la méthode DRASTIC.

L'étude est réalisée afin de définir et de délimiter les zones qui subissent des rabattements important de la nappe, et cerné la problématique de la contamination de ces eaux souterraines par les nitrates. Cette dernière est due aux actions entreprises par l'homme à savoir :

- Présence de zones industrielles non équipées de stations d'épuration, et dont les rejets sont évacués directement dans le milieu récepteur (milieu naturel), qui à son tour a une relation avec la nappe, provoquant ainsi un passage de l'Oued vers la nappe.
- Et également, la situation des champs de captage, qui desservent une bonne partie de l'Algérois en eau potable, qui se trouvent à proximité des exploitations agricoles.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale où nous présenterons un récapitulatif sur les principaux résultats obtenus, qui nous permettrons de proposer quelques recommandations afin de mieux appréhender la problématique soulevée dans le présent travail.

**Partie 01 :**  
**Présentation et Climatologie de la zone d'étude**  
**« la Mitidja »**

**CHAPITRE I :**  
**« CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE : LA MITIDJA »**

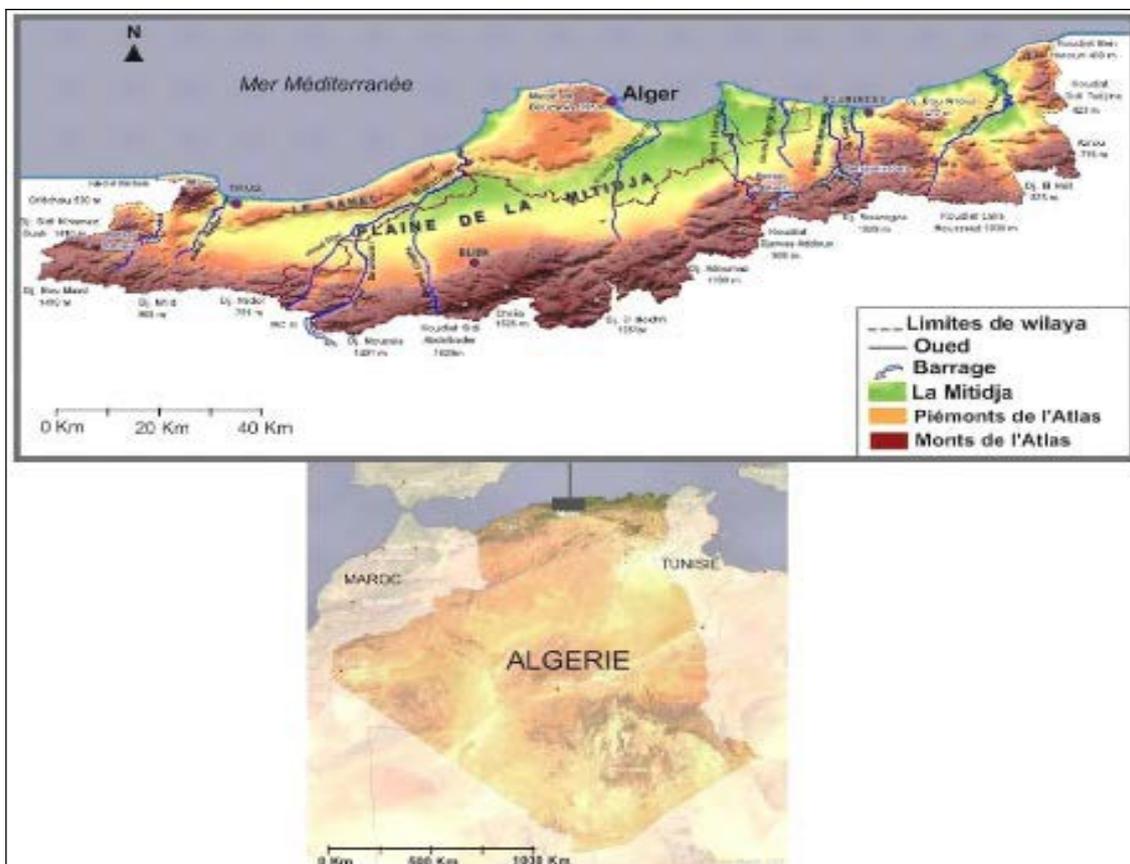
## I. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE : LA MITIDJA :

### I.1. Localisation

La plaine de la Mitidja jouit d'une superficie de 1450 km<sup>2</sup>, avec une longueur d'environ 100 km sur une largeur de 10 à 18 km (*figure I.1*). Son orientation est : Est Nord-Est et Ouest Sud-Ouest, de longitudes 2°32'00E et 3°19'00E et latitudes 36°25'17''N et 36°47'40''N. La plaine s'étendant sur quatre (04) Wilayates : Blida, Tipaza, Boumerdes et Alger. La Mitidja forme une dépression allongée d'Ouest en Est (de Hadjout à Blida) et s'incurve en direction Ouest Sud-Est – Est Nord-Est de Blida jusqu'à l'Oued El Hamiz et la baie d'Alger (la mer). On y distingue deux zones géographiques : La Mitidja Est et la Mitidja Ouest.

La plaine est limitée par les collines du Sahel algérien (260m) au Nord et l'Atlas Blidéen (1200m) au Sud, à une altitude d'environ 50 mètres.

Avec ses sols fertiles et son climat (pluviométrie) favorables aux pratiques agricoles, la Mitidja est connue comme étant une plaine à vocation agricole par excellence (arbres fruitiers, vignobles, agrumes ... etc). Malheureusement, l'évolution de l'urbanisme a diminué fortement les superficies des terres agricoles.



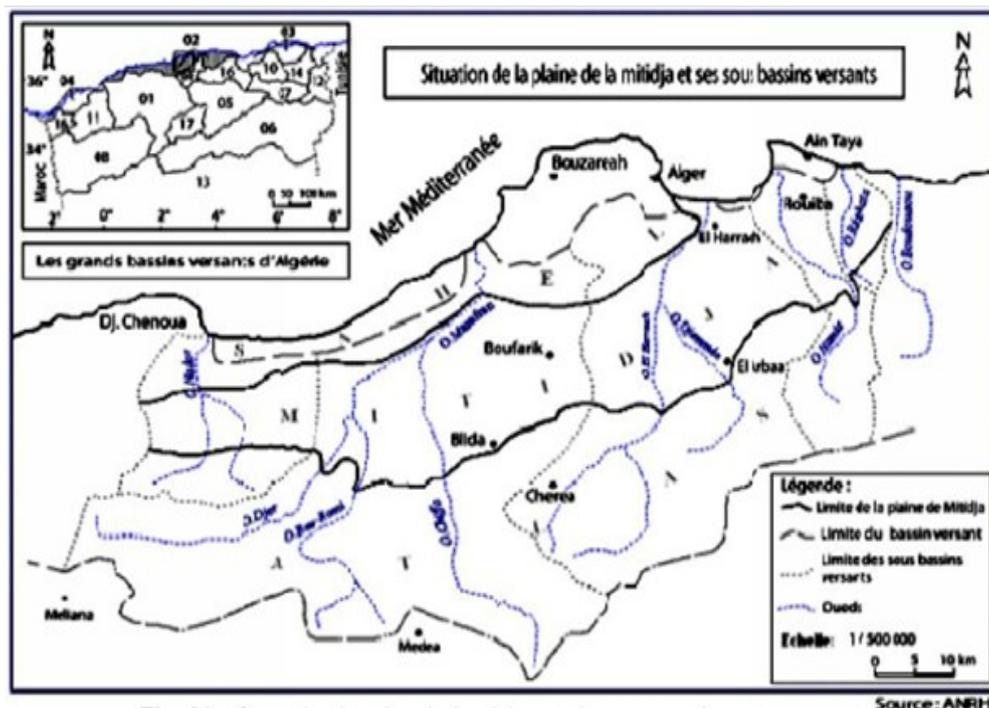
On distingue au niveau de la Mitidja quatre sous bassins versants : Hamiz, El Harrach, Mazafran et Nador (figure I.2). La connaissance des caractéristiques physiographiques et morphologiques, de ces derniers, est très importante permettant ainsi de définir le comportement hydrologique du bassin versant.

Selon le tableau I.1 ci-dessous, l'indice de compacité de Gravellius varie de 1,5 à 1,8 traduisant une allure rectangulaire (bassins allongés). Les valeurs de pentes globales

permettent d'estimer le temps de concentration des eaux de ruissellement. Dans le cas de la zone d'étude, il est long ce qui indique une bonne infiltration au détriment du ruissèlement. (Djoudar, 2010)

**Tableau I.1 : Paramètres géomorphologiques des sous bassins versants de la Mitidja**

Sous bassins versants	Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Indice de compacité gravellus Kc	Longueur rectangle équivalent	Largeur rectangle équivalent	Altitude moyenne (m)	Indice de pente globale (Ig) m/km
Hamiz	803	180	1,8	80	10	229,6	19,6
Harrach	1197	181	1,5	75	16	430	13,7
Mazafran	1826	273	1,8	122	15	367	18,1
Nador	260	89	1,6	38	7	305	21,6



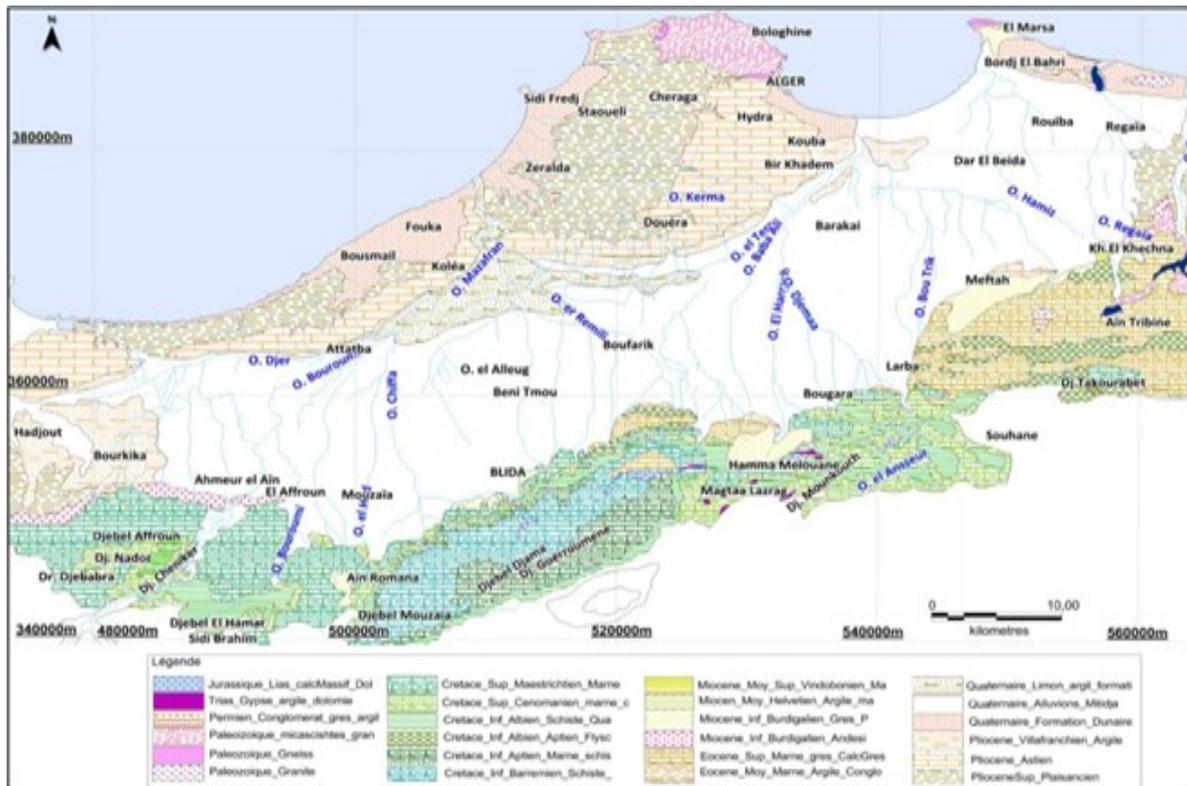
**Figure I.2 :** Carte de situation des sous bassins versants de la plaine de la Mitidja. (ANRH, 2008)

## I.2. La GEOLOGIE :

La plaine de la Mitidja est l'un des bassins néogène de l'Algérie qui a fait l'objet de plusieurs études géologiques, basées essentiellement sur les travaux de (Glangeaud, 1952), (Aymé, 1964), (Durand Delga, 1969), (Muttin, 1977) et (Bennie and Partner, 1983).

La plaine, siège d'une subsidence continue marquée par des remplissages plio-quaternaires, se situe au Nord du domaine tellien. Elle est circonscrite par deux blocs positifs :

- Au Nord, l'anticlinal du Sahel de 270m d'altitude moyenne, bande collinaire côtière. Il est constitué par des roches anciennes surmonté par des terrains tertiaires plissée ;
- Au Sud, l'Atlas Blidéen, vaste massif montagneux tranchant brusquement la plaine, est constitué d'épaisses séries d'âge Crétacé-paléocène (figure I.3).



**Figure I.3 :** Carte géologique de la plaine de la Mitidja et du centre septentrional d'Algérie  
(Source ANRH, 2011)

### I.2.1. Formation et genèse de la Mitidja

La genèse de la formation de la Mitidja d'après *Glangeaud (1952)* peut s'expliquer par trois facteurs :

- **Plissement** : qui s'étend jusqu'à la fin de l'Eocène et durant lequel, il y aurait eu la naissance d'une zone graduellement déprimée et les terrains qui forment le substratum du bassin.
- **Remblaiement** : Cette phase est caractérisée par la transgression du Miocène et les cycles du Pliocène qui vont combler la dépression.
- **Déblaiement** : Cette troisième phase est constituée par des matériaux Néogènes.

Influencé par le poids des dépôts, le bassin continu à se creuser en prenant une forme de cuvette (forme actuelle) c'est le phénomène de la subsidence. A la fin du Pliocène, la Mitidja était une plaine alluviale qui s'étendait du pied de l'Atlas jusqu'au-delà de la côte actuelle. Pendant le Quaternaire, les cours d'eau qui parcouraient la plaine alluviale l'ont déblayé par suite de l'abaissement du niveau de la mer, avec plus de 100 mètres au-dessous du niveau actuel. Les apports venant de l'Atlas par les torrents et les cours d'eau remplissent de cailloutis le synclinal Mitidjien. La vitesse d'alluvionnement étant sensiblement plus considérable que la vitesse de descente de fond, les produits détritiques pouvaient se déposer en certains points du Sahel. Ainsi se sont formés dans le Sahel des méplats couverts d'alluvions.

## **I.2.2. Lithostratigraphie de la plaine de la Mitidja**

Dans cette étude, on s'attachera essentiellement à préciser les caractéristiques lithostratigraphiques des différentes formations géologiques dans le but de préciser leurs superpositions. L'éventail des séries stratigraphiques s'étale du Primaire au Quaternaire.

### **I.2.2.1. Le socle primaire :**

Il affleure principalement à Alger et au Chenoua. Il est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphisé (gneiss ocellé, gneiss fin), surmonté par une série de schistes satinés faiblement métamorphisés (séricitoschistes et chloritoschistes).

### **I.2.2.2. Le secondaire ou mésozoïque :**

On y distingue :

- Les calcaires de l'Oued Sidi El Kebir : calcaires massifs cristallins d'âge Jurassique.
- Les calcaires et grès de la Chiffa d'âge Néocomien et Aptien.
- Les flyschs (marnes et calcaires) d'âge Albien supérieur à Sénonien.

### **I.2.2.3. Le Tertiaire ou Cenozoïque :**

#### **A. Le Miocène et roches plus anciennes :**

Ils existent dans le bassin de la Mitidja et par endroits dans l'Atlas, particulièrement au Sud Est de Khémis El Khechna et à Djebel Zerouala. Au Sud Est de Khémis El Khechna, le Miocène est représenté par des marnes épaisses de 50 m du Vindobonien, comprenant des lentilles de calcaires à Mélobésiées du Djebel Zerouala. Dans l'Atlas, ce sont les roches les plus dures du Crétacé et de l'Oligocène qui affleurent. Les terrains les plus communément rencontrés sont les roches argileuses parmi lesquelles des schistes argileux et des argiles (*Glangeaud, 1952*).

#### **B. Les roches éruptives du Tertiaire :**

Ces dernières affleurent sur tout le pourtour SW de la Mitidja, où elles se trouvent en contact avec les alluvions récentes du bassin de la Mitidja. Sur les bordures méridionales et occidentales du bassin, l'existence d'un volcanisme calco-alcalin daté de 11 à 16 millions d'années, atteste de l'ouverture par effondrement EW du bassin durant le Miocène (*Bellon, 1975; Lepvier, 1975 et 1981 ; Ait Hammou, 1981*). D'autres affleurements de roches volcaniques se rencontrent dans la région de Khémis El Khechna et Thenia (rhyolites - andésites).

#### **C. Le Plaisancien**

Il repose en discordance sur les formations du Miocène (*Glangeaud, 1952*). Il s'agit d'une formation constituée de niveau fossilifère glauconieux, de marnes jaunes et grises parfois sableuses. Cela pourrait correspondre aux sédiments de milieu profond qui se sont déposés sur une surface d'érosion avec une épaisseur moyenne de 200 m. Les affleurements du Plaisancien en surface se rencontrent uniquement dans les collines du Sahel, Au cœur d'un plissement anticlinal et dans la zone de Khémis El Khechna et Réghaia, ils constituent la fermeture Est du bassin (*Rivoirard, 1952*).

#### **D. L'Astien**

La formation de l'Astien comporte plusieurs faciès séparés par un niveau repère glauconieux de 4 m à quelques centimètres d'épaisseur. Le faciès marno-sableux

jaunâtre à blanchâtre est plus répandu avec un nombre important de fossiles, associés à une sédimentation marine de haut fond (*Rivoirard, 1952*). Les descriptions lithologiques les plus rencontrées de l'Astien se réfèrent aux séries rencontrées dans les forages du Sahel qui l'ont atteint, et qui sont : les calcaires ou calcaires sableux ; les grès ; les argiles calcaires jaunes ; les calcaires à faciès récifal.

L'Astien, dont l'épaisseur moyenne varie entre 100 à 130 m (*Bennie and Partners, 1981*) se situe généralement à des profondeurs allant de 250 à 300 m au-dessous de la surface du sol de la Mitidja.

Dans la région de Rouïba, il se trouve à de faibles profondeurs car l'érosion a été très importante (*Glangeaud et Aymé, 1935*). Les affleurements de l'Astien se rencontrent sur le côté Sud du Sahel et dans les faubourgs Sud d'Alger.

#### **I.2.4. Le Quaternaire :**

##### **A. Formation d'El Harrach**

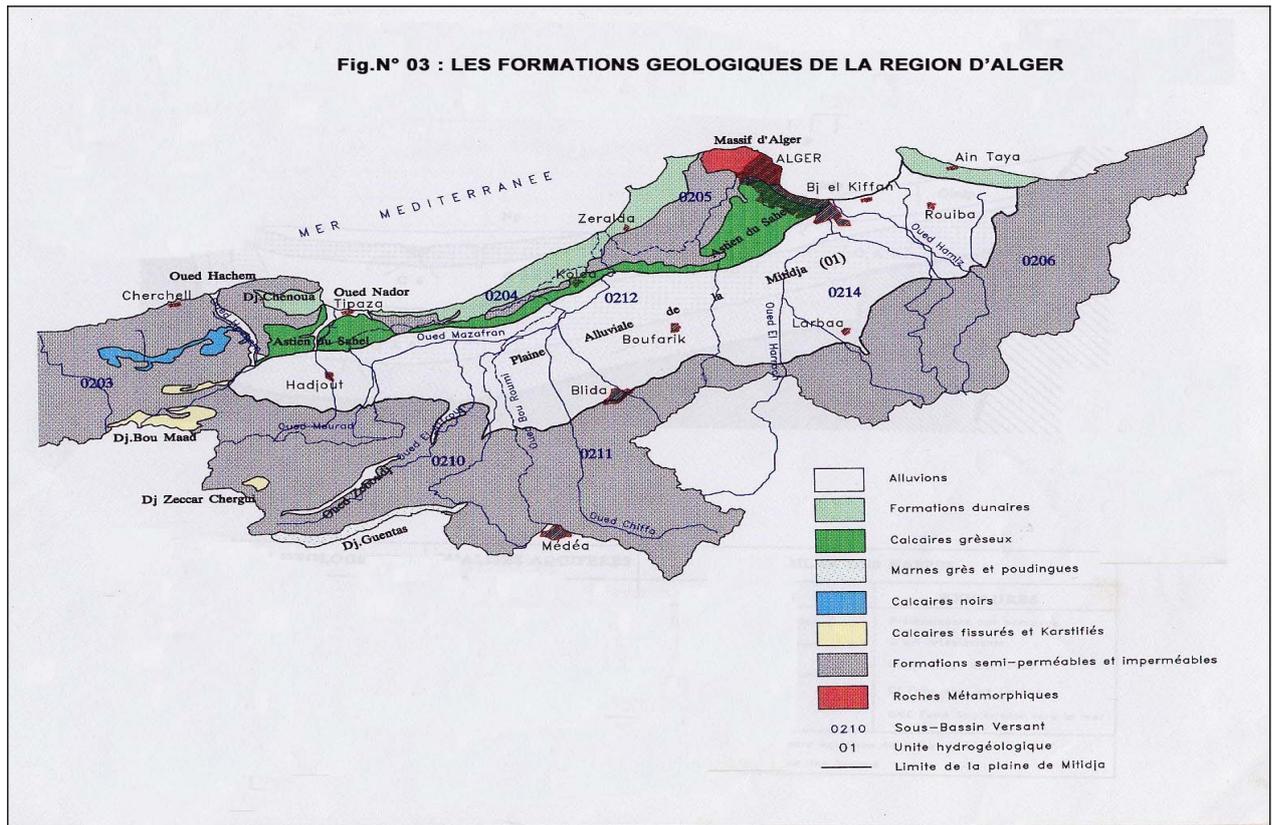
Cette formation, connue sous le nom «formation de Maison Carrée», constitue une séquence relativement uniforme, d'argiles plastiques jaunâtres et grises à la base.

On y rencontre de minces niveaux lenticulaires de graviers et de sable. En raison de la présence de gravier, cette formation a été confondue avec les formations alluviales sus-jacentes qui sont essentiellement caillouteuses. Elle affleure dans les régions suivantes : El Harrach, le long du versant Sud du Sahel et à l'Ouest de Hadjout.

La formation d'El Harrach atteint son épaisseur maximale de 200m dans la partie occidentale du bassin, tandis que l'érosion a fait disparaître cette dernière dans le secteur Est, région de Réghaia et de Rouiba, entraînant un passage direct vers la formation de la Mitidja (Soltano - Tensiftien) au Pliocène supérieur (Figure A).

##### **B. Formation de la Mitidja**

La formation de la Mitidja se compose principalement de matériaux alluviaux grossiers : des graviers; des galets; des limons ou argiles en quantités variables (*figure I.4*).



**Figure I.4 : Formation Géologique de la région d'Alger**  
(source : Benni et Partners 1983)

Des éléments à grains fins sont présents en quantité relativement importante dans la partie supérieure de la formation. On remarque aussi des variations granulométriques considérables qui se produisent dans le sens horizontal et dans le sens vertical et qui sont liées aux sources de matériaux (*figure I.5*).

En effet, les principales sources de matériaux sont:

- les dépôts des oueds les plus importants;
- les cônes de déjections des piémonts de l'Atlas.

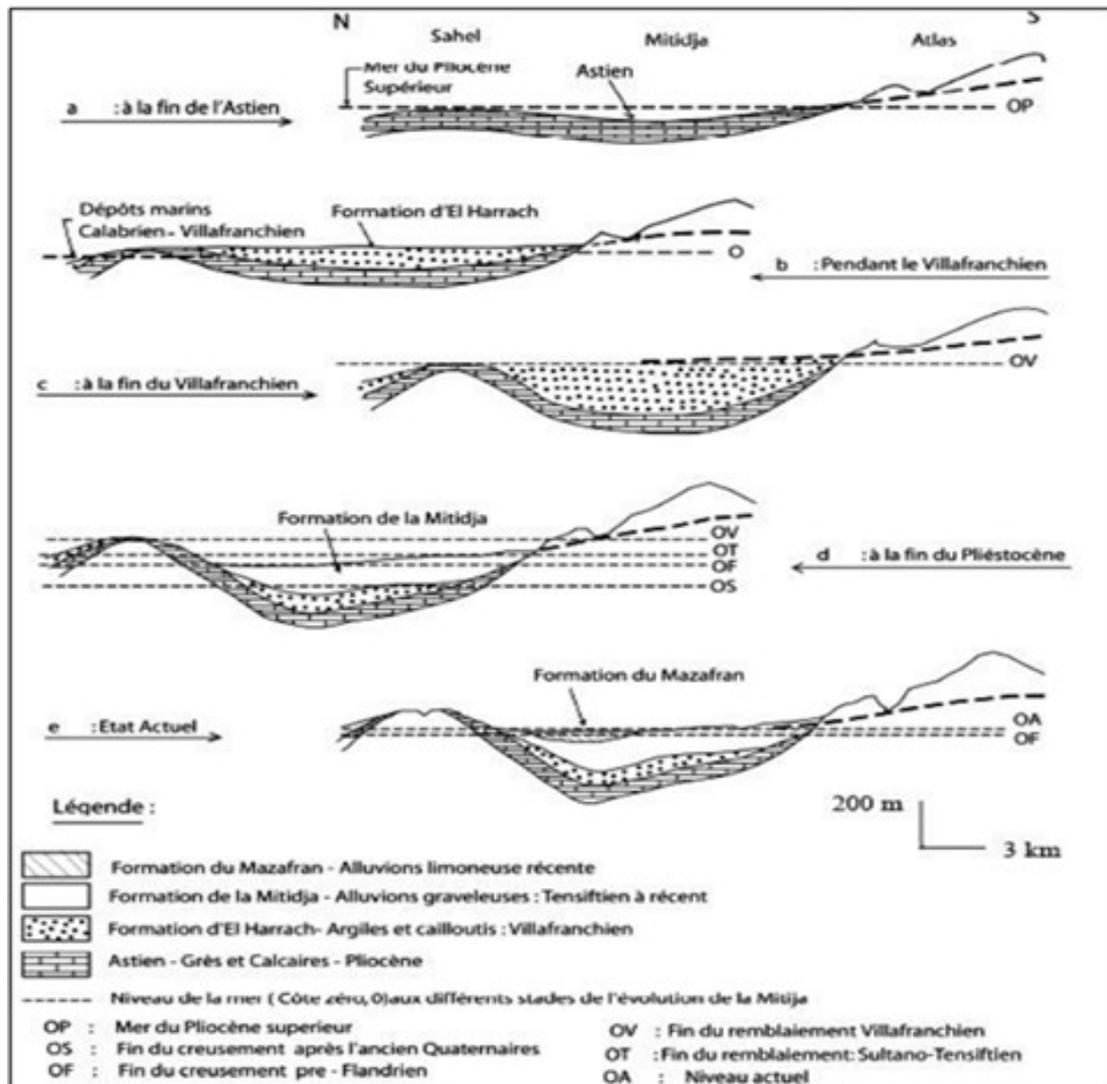
- cette formation est présente sur toute l'étendue de la plaine, à l'exception de la partie occidentale où ces matériaux passent en dessous des marnes et argiles de la basse plaine du Mazafran. La formation perd de son épaisseur en traversant les piémonts en direction de son contact avec l'Atlas et vers le Nord, dans la baie d'Alger où elle se retrouve reliée à la mer en traversant les dépôts dunaires et marins.

### **C. Formation du Mazafran et de Halloula :**

Elle est constituée de limons et d'argiles limoneuses de couleur généralement grise à jaunâtre et contenant parfois un peu de graviers.

Les limons de la formation du Mazafran s'étendent le long de la cluse du Mazafran ; ils atteignent leur épaisseur maximale à proximité de l'extrémité de la cluse, soit 60 m.

La formation de Halloula se situe à l'Ouest des Oueds Djer et BouRoumi, où elle occupe la zone de l'ancien lac de Halloula.



**Figure 1.5 :** Différents stades de l'évolution de la Mitidja pendant le Plio-Quaternaire (Glangeaud L., 1952)

#### D. Les dépôts récents :

Ces derniers comprennent :

- des dépôts de sable dunaire ;
- des sables et des graviers ;
- des dépôts de piémont de l'Atlas.

Leur mise en place constitue une partie relativement peu importante par rapport aux dépôts du Mazafran, Halloula et du remplissage de la Mitidja. Au niveau de la baie d'Alger et de la région de Réghaia, ils sont représentés par des sables dunaires. Au niveau du piémont de l'Atlas, on trouve de gros éléments anguleux dans une matrice de limons argileux provenant des cônes de déjections. Ils sont également localisés dans les lits d'oueds et se composent de sables fins gris et de graviers.

#### I.3. Pédologie :

L'étude agro-pédologique de la Mitidja faite par *Ecrément en 1971*, et la cartographie pédologique à l'échelle du 1/20.000 de la Mitidja réalisée par *Raissi, O en 2004*, ont permis

de mettre en évidence, cinq (5) classes de sols : sols peu évolués, sols calcimagnésiques, vertisols, sols à sesquioxyde de fer et les sols hydromorphes.

Selon *Dridi et Zemmouri (2012)*, les sols de la plaine de la Mitidja se caractérisent par des teneurs élevées en argile (49,3 % en moyenne), alors que les limons fins sont présents avec des taux appréciables (29,4 % en moyenne). À l'inverse, les taux des limons grossiers et des sables sont bas.

Selon le *PAC 2004*, ce sont les critères, liés à la pédologie (profondeur des sols, texture, etc.) et à la capacité de drainage des sols (risques d'hydromorphie), qui permettent de distinguer les classes d'aptitude des terres. La Mitidja est constituée d'alluvions quaternaires récentes avec quelques poches de grés, sables, marnes, pliocènes et quelques formations éruptives. Les sols peu évolués d'apport alluvial, présentant une fertilité minérale élevée, sont les plus fréquents.

Ces formations d'alluvions est très différente du Nord au Sud caillouteuses au pied de l'Atlas jusque vers le milieu de la plaine, elles sont ensuite limoneuses jusqu'à la lisière de collines du sahel .La Mitidja a permis de recenser cinq (5) classes de sol, se sont développés sur des superficies importantes. (*Chaouati, 2014*) :

- **Sol Peu évolué** : non climatique/d'épandage colluvial.

- **Sol Calcimagnésiques** : sol carbonatés /sol brun calcaires.

- **Sol à Sesquioxydes de fer** : sol rouge formé sous un climat de type méditerrané.

- **Sol Vertisols** : à drainage externe nul ou réduit à structure au geuleuses sur au moins dans 15 cm supérieur à drainage externe possible à structuré arrondie sur au moins de 15 cm.

- **Sol Hydromorphe** : à caractère hydromorphe a été favorisé par un relief relativement plat, des textures fines à très fines et un système de drainage généralement défectueux. (*ANRH, 2013*)

#### **I.4. Réseau hydrographique :**

Le chevelu hydrographique est considéré comme étant le tracé en plan du réseau hydrographique classé par *Schumm* suivant l'importance des différents cours d'eau le constituant (*figure I.6*). L'ensemble des affluents de ces oueds prennent naissance au sommet de l'Atlas Blidéen avec un sens d'écoulement général Sud-Nord (*hadjoudj, 2008*).

Selon la même source, les débits les plus élevés sont enregistrés au niveau du Mazafran considéré comme étant le plus important oued avec une longueur de 65km. La surface du bassin versant du Mazafran est égale à 1826 km<sup>2</sup>, et se compose de trois oueds : Oued Djer, Oued Bou Roumi et Oued Chiffa. Des volumes importants d'eaux superficielles se déversent dans la mer chaque année et dépassent parfois les volumes annuels prélevés de la nappe.

Les principaux Oueds traversant la plaine de la Mitidja font partie du sous bassin côtier Algérois, à savoir : Oued Mazafran et Oued El-Harrach, qui sont de loin les plus pollués, et ils sont alimentés en grande partie de rejets d'eaux usées non traitées qui en font, un milieu en perpétuelle dégradation (*Hartani, 2004*).



**Figure I.6 :** Chevelu hydrographique et stations pluviométriques  
(source : *Hadjdoudj 2008*)

### I.5. Ressources en eau :

Selon une étude portant sur la carte des ressources en eaux souterraines du Nord de l'Algérie, la ressource en eau souterraine renouvelable est évaluée à une moyenne de 259,26 Mm<sup>3</sup>/an avec 100,02 Mm<sup>3</sup>/an pour l'année sèche et 555,1 Mm<sup>3</sup>/an pour l'année humide (période 1929-2004). (*ENERGOPROJEKT, 2011*).

Le bilan d'eau de la nappe est présenté dans le tableau I.2 ci – dessous à partir des résultats obtenus dans les études Binni & Partners 1979-80 et Atkins International 1990 après avoir effectué des travaux de modélisation sur la nappe alluviale.

**Tableau I.2 :** Bilan d'eau de la nappe alluviale

Bureau d' étude	Entrée hm <sup>3</sup> /an	Sortie hm <sup>3</sup> /an
Etude Binnie Atkins	328	335
Etude Atkins BNEDER	309	309

Source : *Programme d'Aménagement Côtier (PAC, 2004)*

### I.1.3. Potentialités en eau des nappes de la Mitidja :

Les potentialités hydriques de la nappe de la Mitidja, en prenant en considération la réserve et la recharge, sont estimées à 410 Hm<sup>3</sup>, selon le *Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement : MATE, avril 2005*.

Cependant il a été constaté une baisse continue du volume d'eau stockée dans l'aquifère due à une pluviométrie irrégulière (recharge irrégulière) et une exploitation en constante augmentation.

La plupart des prélèvements d'eau pratiqués au niveau de la plaine ne sont pas contrôlés, mis à part ceux de la SEAAL qui sont plus ou moins connus et seraient de l'ordre de 120 Hm<sup>3</sup> par

an (*hadjoudj, 2008*). Pour les autres wilayates de la région, les prélèvements de la nappe seraient selon la direction de l'hydraulique de wilaya de 75 Hm<sup>3</sup> répartis comme suit :

- 40 Hm<sup>3</sup> pour Blida,
- 15 Hm<sup>3</sup> pour Tipaza,
- 20 Hm<sup>3</sup> pour Boumerdes.

A cela, il faut ajouter les volumes prélevés pour l'irrigation et l'industrie. Avec une recharge de **234 Hm<sup>3</sup>** et des prélèvements de **330 Hm<sup>3</sup>**, la surexploitation de la nappe continue et le déstockage de l'aquifère s'accroît. (*MATE, 2005*).

Les eaux souterraines de la Mitidja offrent une disponibilité immédiate, ce qui la rend particulièrement prisée par les activités agricoles et industrielles.

Au cours de l'été 2002, toute l'eau qui coulait des robinets de la capitale était puisée des champs captants de la Mitidja, 42 forages ont été réalisés en un temps record par la DHW d'Alger (Direction de l'Hydraulique d'Alger) lorsque les niveaux des barrages avaient atteint des seuils très critiques (en 2002, le barrage de Keddara ne donnait plus que 50.000m<sup>3</sup>/jour, alors que la consommation journalière pour Alger, était de 360.000m<sup>3</sup>/jour. (*hadjoudj, 2008*))

C'est le secteur de l'agriculture, grand consommateur d'eau, qui sollicite le plus les eaux souterraines. Confrontés à une pluviométrie irrégulière, la politique agricole est fondée sur la disponibilité du facteur eau. Des forages sont autorisés et financés par le PNDAR (Plan National pour le Développement Agricole et Rural), en dehors de ce cadre, les agriculteurs ne déclarent pas leurs forages, (creusés de nuit sans autorisation) sans information sur les quantités prélevées, ce qui complique l'évaluation de la ressource souterraine (*Rebah, 2005*).

### **I.5.1. Ressources en eau souterraine :**

Selon l'ABH (*l'Agence des Bassins Hydrographiques, 2000*) de l'Algérois, la ressource en eau souterraine de la Mitidja est de 328Hm<sup>3</sup>, dont les principaux champs captants sont : Mazafran I et II, Chebli, Baraki, Haouch Felit, et Hamiz. L'exploitation de ces ressources est représentée essentiellement par des :

#### **I.5.1.1. Prélèvements destinés à l'AEP**

Les principaux prélèvements en eau potable au sein de la plaine de la Mitidja sont dans l'ordre décroissant :

- l'alimentation d'Alger qui est gérée par la SEAAL (Société de l'Eau et de l'Assainissement d'Alger ;
- l'alimentation des communes de la wilaya de Blida ;
- dans une moindre mesure l'alimentation des communes des autres wilayas (Boumerdes, et Tipaza).

La SEAAL exploite environ 200 forages répartis sur la plaine de la Mitidja. La majorité de ces forages captent exclusivement l'aquifère quaternaire de la Mitidja.

Pour l'année 2007, le débit moyen d'exploitation par forage était de 66 m<sup>3</sup>/h. En raison de ce débit unitaire limité, elle devait donc disposer d'un nombre important de forages pour alimenter la ville d'Alger.

#### **I.5.1.2. Prélèvements agricoles**

Un inventaire réalisé entre 1996 et 2002 a permis de positionner les forages agricoles et de répartir les débits annuels prélevés. De ce fait, 2700 forages agricoles répartis de façon homogène sur la zone modélisée ont été répertoriés par *SOGREAH en 2008*, et sont présentés dans le tableau I.3 ci - après.

**Tableau I.3 : Différentes estimations des prélèvements d'eau agricoles. (SOGREAH, 2008)**

Prélèvements	Méthode	Année	Mm <sup>3</sup> /an
Géohydraulique, 1969	Inventaire des puits et estimation du volume prélevé par puits	1969	172.5
Bennie and Parteners et al. 1980	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	1980	125.8
Estimation des surfaces par photos satellites, Mac Donald et al. 1988	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	1988	188.0
Estimation des surfaces : Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par dire d'expert SOGREAH, 2007	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	92.0
Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par CROPWAT, SOGREAH, 2007	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	137.0
Recensement agricole 2001 et volumes unitaires par expertise SOGREAH de 1969	Estimation des surfaces irriguées et des volumes unitaires prélevés par culture	2001	214.0
Recensement BIRH, 1996 à 2002	Inventaire des puits et estimation du volume prélevé par puits	2002	127.0

Les méthodes d'estimation des prélèvements agricoles dans la nappe de la Mitidja montrent une très grande dispersion. Cela est dû à la difficulté de connaître précisément les surfaces irriguées, les besoins et les productivités des cultures ainsi que les volumes prélevés par les forages et puits. Donc pour les besoins du modèle, SOGREAH a retenu les estimations données par le recensement agricole de 2001.

Il est à noter que les besoins en eau pour l'irrigation sont plus importants que les besoins pour l'alimentation en eau potable, laquelle est sensiblement égale à ceux pour l'industrie.

### **I.5.1.3. Prélèvements industriels**

Selon SOGREAH (2008), les prélèvements industriels ne représentent qu'une part minime des volumes annuels extraits de la nappe. Ces forages se situent principalement au niveau de la Mitidja orientale (de Baraki à Réghaia). En 2002, on recense un volume d'eau prélevé de 5,6 Mm<sup>3</sup> destiné aux activités industrielles (SOGREAH, 2008).

Il faut savoir que la majorité des activités industrielles sont regroupées au Centre et à l'Est de la plaine

(l'Arbaa, Rouiba, Blida, El-Harrach, Boufarik,...), avec des pôles industriels tels que Rouiba et Réghaia. Les industries rencontrées dans la plaine sont (MRE, 2002) :

- Mines et installation de traitement de minerais.
- Industrie de transformation de fer et autres matériaux.
- Industries chimiques des silicates d'alumines.
- Industries alimentaires.
- Industries transformatrices des résidus végétaux et animaux.
- Industrie de transformation de combustibles.
- Industrie de la cellulose et du papier...etc

### **I.5.2. Ressources en eau superficielles :**

Les eaux de surfaces sont emmagasinées dans les barrages existant dans la plaine :

- Barrage du HAMIZ = 15,6 hm<sup>3</sup> ;
- Barrage de BOUKERDENE = 90 hm<sup>3</sup> ;
- Barrage de BOU ROUMI = 200 hm<sup>3</sup>.

Le bilan des écoulements pour la période 1913 à 1956 des oueds qui parcourent la Mitidja, est le suivant (*Ait Ouali, 2006*) :

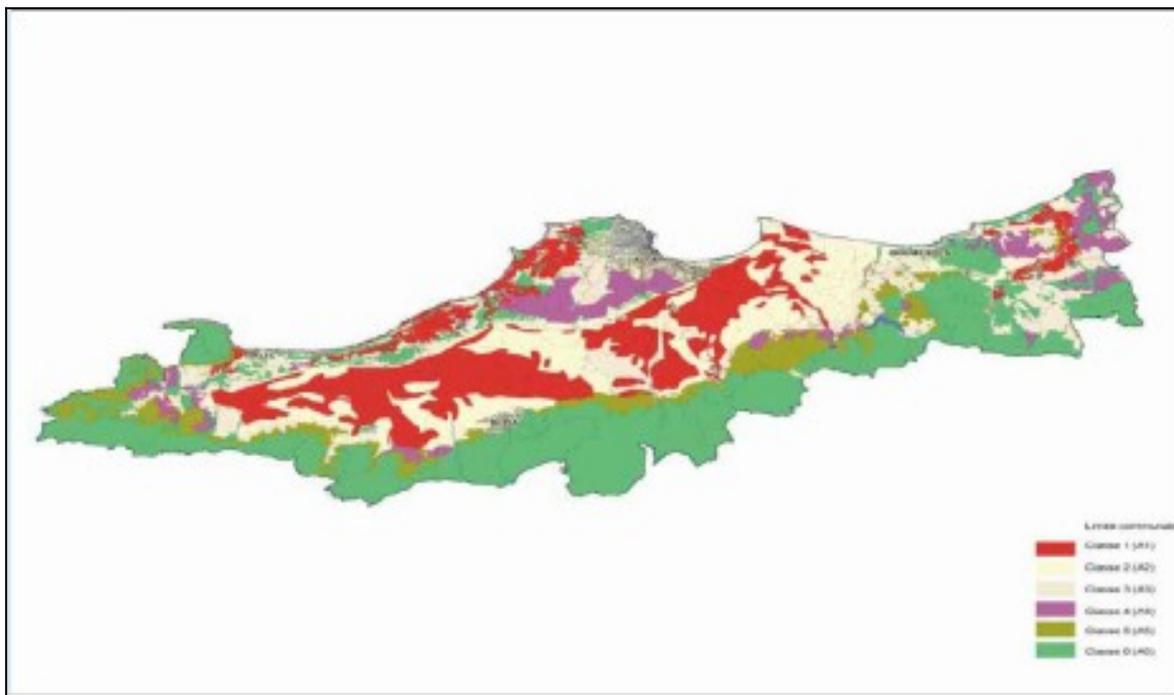
- Mazafran 389 millions de m<sup>3</sup> ;
- El Harrach 370 millions de m<sup>3</sup> ;
- Hamiz 50 millions de m<sup>3</sup> ;
- Nador 28 millions de m<sup>3</sup>.

### **I.6. Occupation du sol et pratiques agricole :**

Par ses caractéristiques naturelles, la plaine alluviale de la Mitidja dispose d'un potentiel naturel appréciable. L'une de ses principales caractéristiques est sa vocation agricole qui s'explique par l'existence d'un espace d'une haute valeur agronomique. Elle fait partie des grands ensembles agricoles de la zone PAC.

Elle est favorable aux différentes cultures : agrumes, arbres fruitiers, maraîchages en terrains irrigués ; vignes, tabac, etc.

Il est à noter que la connaissance de l'aptitude des terres agricoles constitue une donnée de base, aussi bien pour la planification agricole que pour l'orientation de l'urbanisation, l'étude établie par le PAC (2004) a permis de classer ces terres agricoles selon leur aptitude culturale en six grandes classes : A1, A2, ..., A6 (figure I.7).

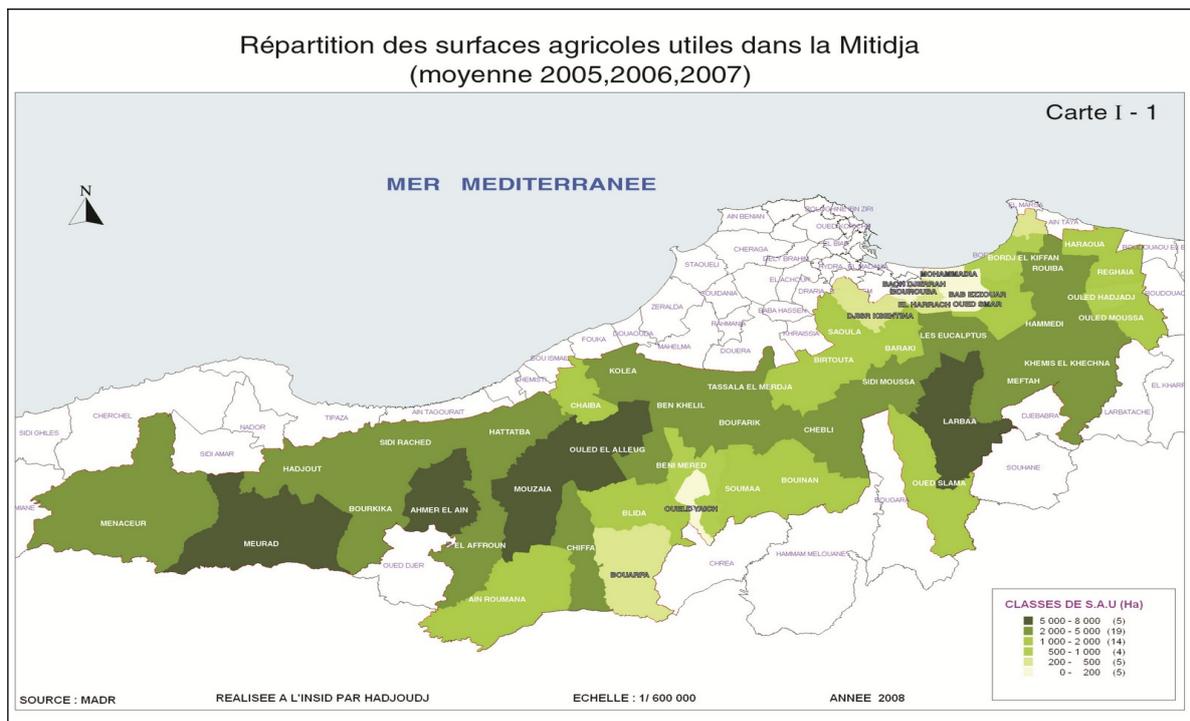


**Figure I.7 : Les types de sols de la plaine de Mitidja**  
(échelle originale : 1:500.000) (Source : PAC 2004)

Les critères retenus sont la topographie, la géomorphologie, la pédologie et la possibilité de bonification par l'irrigation. Ces classes sont reportées dans le Tableau I.3 et figure I.8 qui représente la répartition des surfaces agricoles utiles dans la Mitidja.

**Tableau I.3 : Répartition et superficie des classes d'aptitudes culturales (PAC, 2004)**

Secteur agricole	Superficie (ha)	Pente%	Classe d'aptitude	%
Mitidja, Est-Algérois, Plaine littorale du Sahel	83.400	0 - 3	A1	22,33
Mitidja	62.350	3 - 12,5	A2	16,69
Sahel, Est-Algérois	33.760	12,5 - 25	A3	9,03
Sahel, Est-Algérois	20.450	> 25	A4	5,47
Est-Algérois, Chenoua-Zaccar, Atlas blidéen	30.138		A5	8,06
Est-Algérois, Chenoua-Zaccar, Atlas blidéen	143.388		A6	38,39
<b>Total</b>	<b>373.486</b>			<b>100,00</b>



**Figure I.8 : Répartition des surfaces agricoles utiles dans la Mitidja (moyenne : 2005, 2006 et 2007) (source : Hadjoudj 2008-INSID)**

## **I.7. Activités agricoles :**

### **I.7.1. L'agriculture :**

L'agriculture dans la Mitidja est très variable, ceci est dû à des conditions climatiques très favorables et des sols assez riches, homogènes et hautement fertiles qui conviennent à une vaste gamme de cultures (Ecrement, 1971, Dridi et Zemmouri, 2012).

Selon le MADR (2003), l'agriculture représentait avec ses 217 936 ha, 2,6 % de la superficie agricole utile (SAU) totale, avec :

- 45 % des vergers agrumicoles,
- 21 % de vignoble,
- 16,5 % de l'arboriculture à pépins et noyaux
- et 13 % des cultures maraîchères. (plus du quart pratiqué en cultures sous serre).

Les terres irriguées s'étendant sur 26,5 % de la SAU. Les cultures dominantes sont les cultures maraîchères à l'Est de la plaine (Boumerdes et Alger), et à l'Ouest (Tipasa). (Semmoud et Ladhém, 2015)

Selon Hydrotechnic corporation (1976) on distingue quatre (04) types de sols irrigables et ce en fonction de leurs qualités :

**Tableau I.4 :** Types de sols irrigables et leurs superficies.

<b>Qualité des sols</b>	<b>Superficies</b>
<b>meilleurs sols</b>	43 730 ha
<b>sols de bonne qualité</b>	55 555 ha
<b>sols de qualité moyenne</b>	5 270 ha
<b>sols assez pauvres</b>	9 795 ha
<b>Total</b>	114 350 ha

### **I.7.2. L'élevage :**

D'après le Bureau National des Études pour le Développement Rural (BNEDER 1979 in Mimouni, 2010), Pour les ovins, on remarque que leur distribution est concentrée dans la partie centre est de la Mitidja (Tableau I.5.).

**Tableau I.5 :** Récapitulatif de la production animale

<b>Productions</b>	<b>Quantité</b>
<b>Bovins</b>	18 576
<b>Dont vaches laitières</b>	9 088
<b>Ovins</b>	37 912
<b>Aviculture chair (capacité instantanée)</b>	2 942 700
<b>Aviculture ponte (capacité)</b>	457 920
<b>Dindes (capacité instantanée)</b>	178 000
<b>Cuniculture (capacité instantanée)</b>	230
<b>Apiculture (Ruches)</b>	56 583

## **I.8. L'activité industrielle :**

La majorité des activités industrielles sont regroupées au Centre et à l'Est de la plaine (l'Arbaa, Rouiba, Blida, El-Harrach, Boufarik,...) avec des pôles industriels de Rouiba et de Réghaia.

Selon le MRE (2002), les industries rencontrées dans la plaine sont les suivants :

- Mines et installation de traitement de minerais.

- Industrie de transformation de fer et autres matériaux.
- Industries chimiques des silicates d'alumines.
- Industries alimentaires.
- Industries transformatrices des résidus végétaux et animaux.
- Industrie de transformation de combustibles.
- Industrie de la cellulose et du papier....etc.

**Conclusion :**

A l'issue de ce chapitre, on peut conclure que la plaine de la Mitidja s'étant sur quatre wilayates, et on y distingue quatre (04) sous bassins versants, avec un réseau hydrographique très fourni. La détérioration de qualité de l'eau et le rabattement du niveau de la nappe, a pour cause l'intensification agricole et la prolifération industrielle d'autre part, ainsi que le nombre indéfini de forage (entre autres illicites).

Ces caractéristiques que nous avons abordé dans ce chapitre vont être compléter par d'autres analyses dans les chapitres suivant, afin de mieux cerner cette problématique.

## **CHAPITRE II :**

### **« ETUDE CLIMATOLOGIQUE »**

## **Introduction :**

Afin de mieux caractériser notre zone d'étude du point de vue climatique (qui est indispensable à connaître), nous allons aborder dans ce chapitre une étude climatologique à travers l'analyse des données pluviométriques, températures et évapotranspirations potentielles, qui constituent des paramètres de base dans l'établissement du bilan hydrologique, l'alimentation en eau des barrages ainsi que la recharge des aquifères.

La source d'alimentation de l'eau souterraine est l'infiltration qui renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères (Castany, 1998).

Dans cette optique, nous allons dans un premier temps, à l'aide des données que nous avons, caractériser le climat de la plaine de la Mitidja ; ensuite, effectuer une analyse des paramètres climatiques afin d'en dégager les termes du bilan hydrique et de quantifier les ressources en eau.

## **II.1. Climat de la zone d'étude :**

La Mitidja étant caractérisée par un climat méditerranéen subhumide, dépendant principalement de deux paramètres importants, à savoir : la température et la pluviométrie.

On y distingue deux périodes :

- Période froide et humide s'étalent de d'Octobre à Mai.
- Période chaude et sèche s'étalent de Juin à Septembre.

## **II.2. Paramètres climatiques :**

### **II.2.1. La températures moyennes mensuelles :**

Ce paramètre constitue un des éléments majeurs caractérisant le climat d'une région donnée. Les moyennes mensuelles des températures relatives aux deux stations prises en considération : Dar El Beida (1956-2006) présentés dans le tableau II.1 et Soumaa (période 2002-2015) présentés dans le tableau II.2 sont représentées sur les *figures II.1 et II.2* ci-après. En enregistrant, un minimum en janvier de 8.3°C (dar El beida) et 7.08°C (Soumaa), et un maximum en Août de 28.5°C (dar el beida) et 31.90°C (Soumaa).

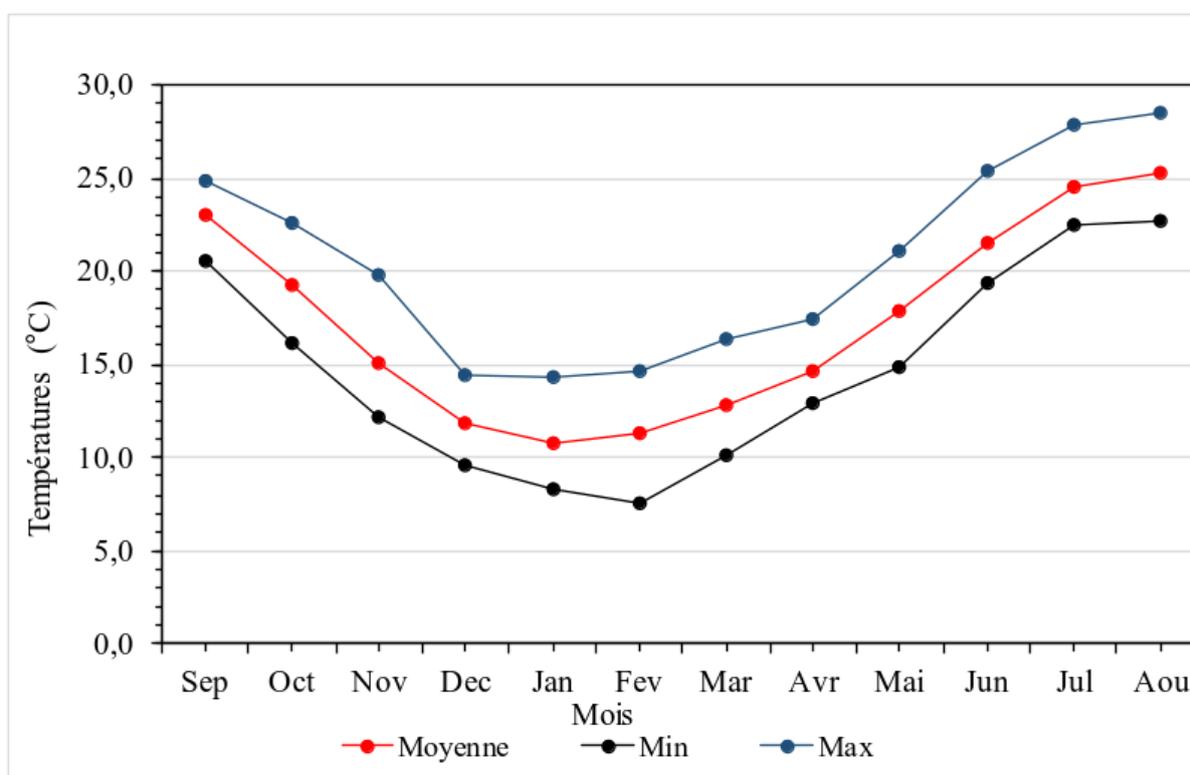
**Tableau II.1. :** Températures moyennes mensuelles interannuelles dans la mitidja Est (station de *dar el Beida*, Période : 1956-2006).

Dar el Beida	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou
T Moy	23,0	19,2	15,0	11,9	10,7	11,3	12,8	14,7	17,9	21,6	24,6	25,3

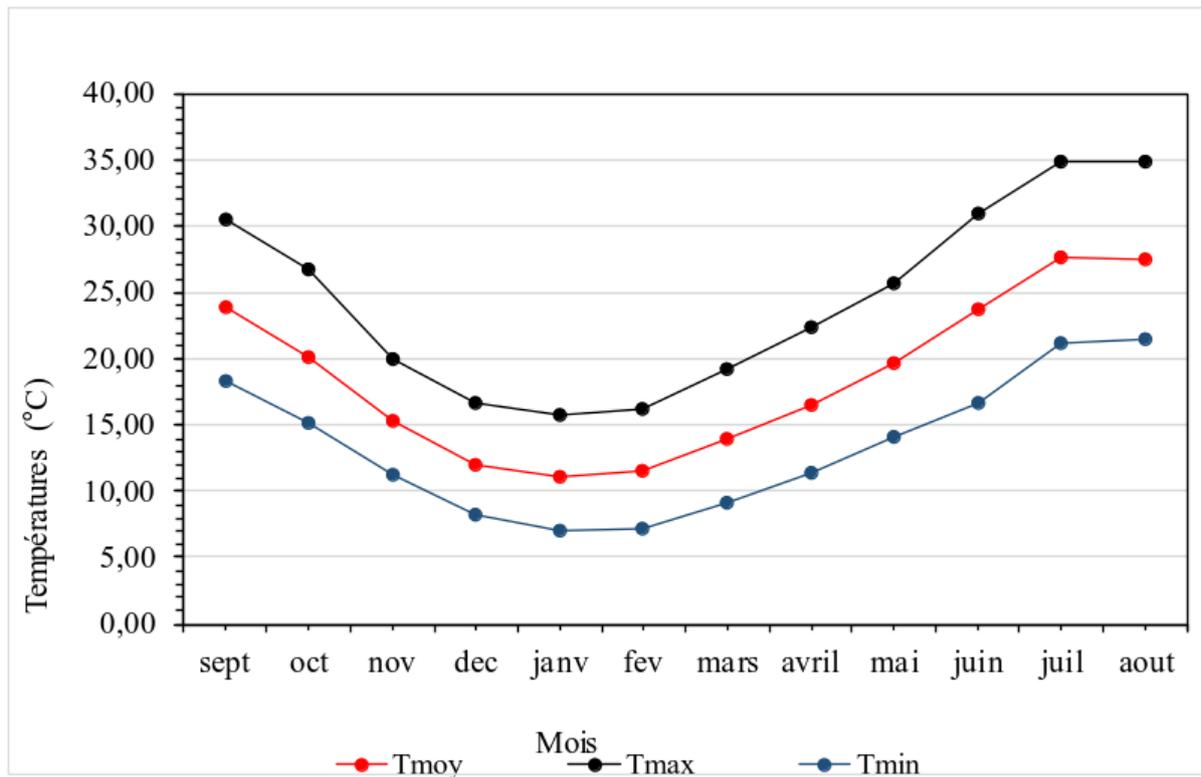
T Min	20,5	16,1	12,2	9,6	8,3	7,5	10,1	12,9	14,9	19,4	22,5	22,7
T Max	24,9	22,6	19,8	14,4	14,3	14,7	16,4	17,4	21,1	25,4	27,8	28,5

**Tableau II.2 :** Températures mensuelles *moyennes et extrêmes* dans la Mitidja Ouest (station de Soumaa, Période : 2002-2015).

Soumaa	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
Tmoy	23,84	20,18	15,25	12,04	11,01	11,49	13,91	16,58	19,68	23,76	27,70	27,49
Tmax	30,45	26,70	20,04	16,61	15,83	16,26	19,17	22,39	25,77	31,04	34,90	34,88
Tmin	18,28	15,12	11,31	8,27	7,08	7,18	9,10	11,36	14,10	16,69	21,19	21,46



**Figure II.1 :** Evolution des températures mensuelles interannuelles dans Mitidja Est (Station de dar el beida, période : 1956-2006)



**Figure II.2 :** Evolution des températures mensuelles interannuelles moyennes et extrêmes dans Mitidja Ouest (station de Soumaa, période : 2002-2015)

### II.1.2. Températures moyennes annuelles

La plaine de la Mitidja présente à travers les deux stations analysées, des températures moyennes annuelles de 17,33 °C et 18,5 °C respectivement pour Dar el beida et Soumaa.

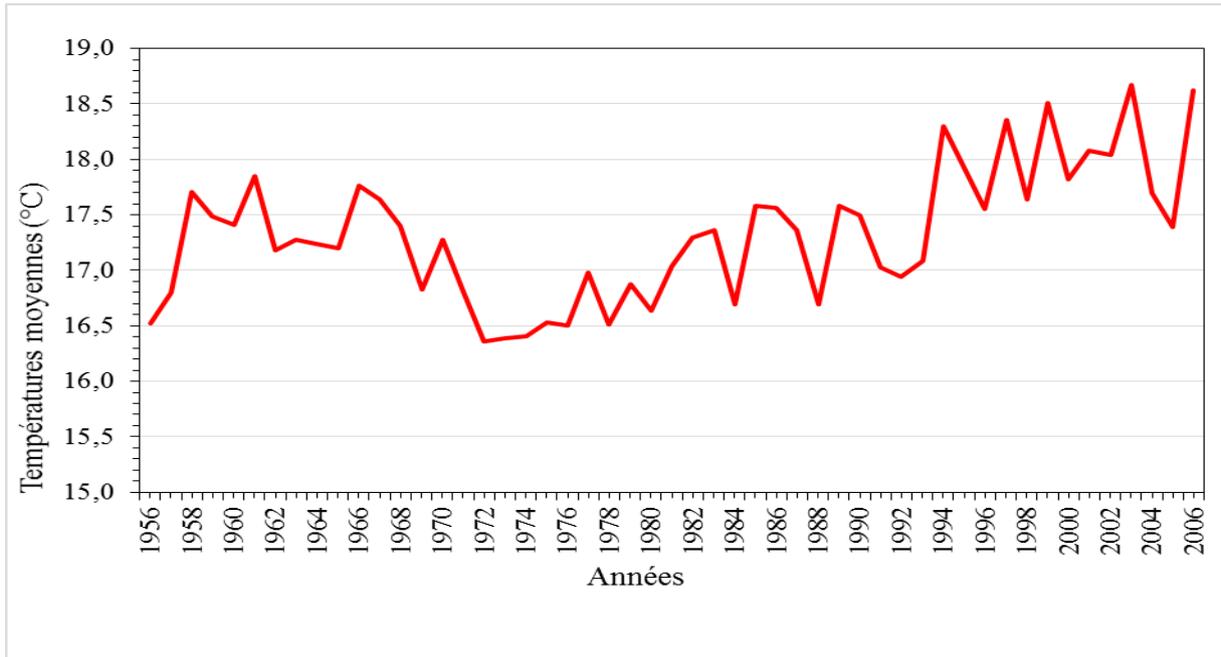
Les graphiques II.3 et II.4 présentent les températures moyennes annuelles des stations de Dar el beida et Soumaa, en notant une variabilité assez importante des températures enregistrées durant les périodes considérées.

L'évolution de la température est un paramètre important puisque son analyse nous permet d'aboutir à informations caractérisant la région d'étude. En effet, les valeurs élevées des températures peuvent avoir un impact sur l'emmagasinement de l'eau dans le sol et donc un rabattement du niveau piézométrique.

**Tableau II.3 :** Températures moyennes annuelles dans la Mitidja Est (station de Dar El Beida, Période : 1956-2006).

<b>Années</b>	<b>1956</b>	<b>1957</b>	<b>1958</b>	<b>1959</b>	<b>1960</b>	<b>1961</b>	<b>1962</b>	<b>1963</b>	<b>1964</b>	<b>1965</b>
<b>T°C Ann</b>	16,52	16,80	17,71	17,49	17,41	17,85	17,18	17,28	17,23	17,20
<b>Années</b>	<b>1966</b>	<b>1967</b>	<b>1968</b>	<b>1969</b>	<b>1970</b>	<b>1971</b>	<b>1972</b>	<b>1973</b>	<b>1974</b>	<b>1975</b>
<b>T°C Ann</b>	17,77	17,64	17,40	16,82	17,28	16,81	16,36	16,39	16,40	16,53
<b>Années</b>	<b>1976</b>	<b>1977</b>	<b>1978</b>	<b>1979</b>	<b>1980</b>	<b>1981</b>	<b>1982</b>	<b>1983</b>	<b>1984</b>	<b>1985</b>
<b>T°C Ann</b>	16,50	16,98	16,51	16,88	16,64	17,04	17,30	17,36	16,69	17,58
<b>Années</b>	<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>
<b>T°C Ann</b>	17,56	17,36	16,69	17,58	17,50	17,02	16,94	17,08	18,30	17,93
<b>Années</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
<b>T°C Ann</b>	17,55	18,35	17,64	18,51	17,83	18,08	18,04	18,67	17,70	17,39

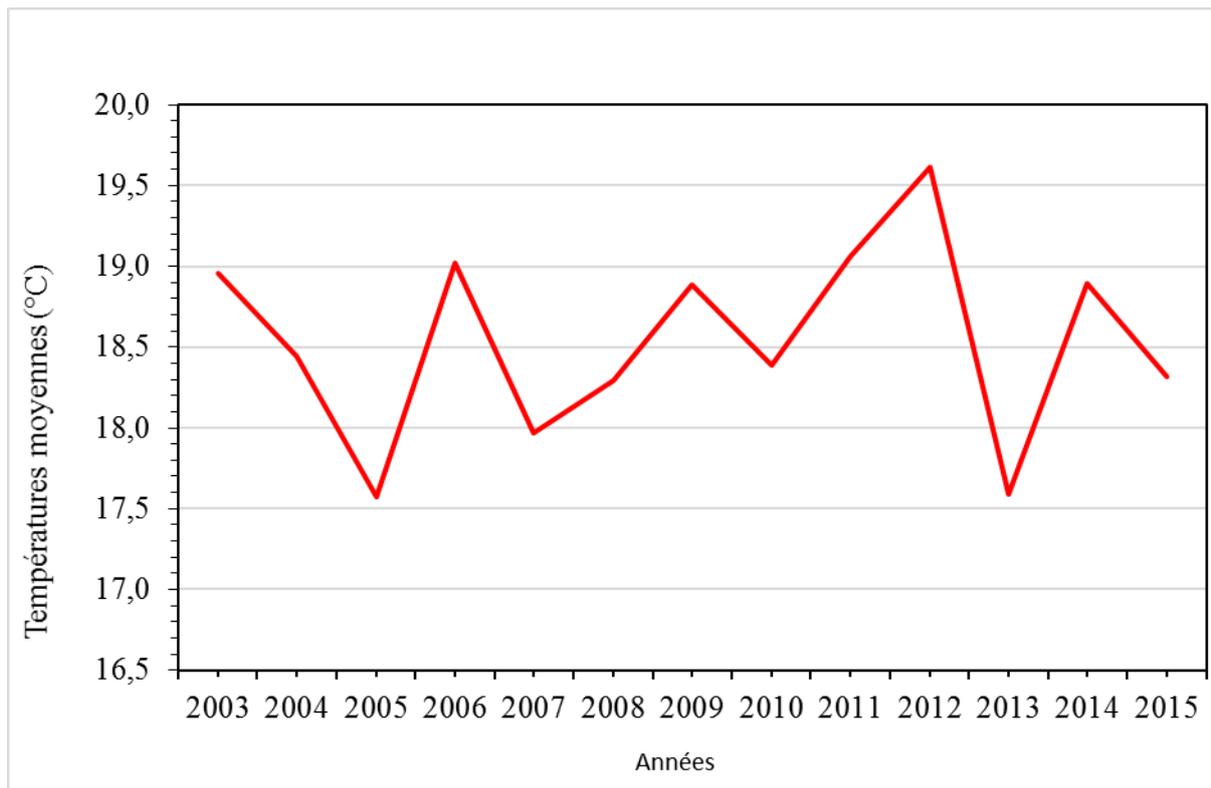
Années	2006
T°C Ann	18,62



**Figure II.3 :** Evolution des températures moyennes annuelles dans Mitidja Est (station de dar el beida, période : 1956-2006)

**Tableau II.4 :** Températures moyennes annuelles dans la Mitidja Ouest (station de Soumaa, Période : 2003-2015).

Soumaa	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
T°C Moy	19,0	18,4	17,6	19,0	18,0	18,3	18,9	18,4	19,1	19,6	17,6	18,9	18,3



**Figure II.4 :** Evolution des températures annuelles dans Mitidja Ouest (station de Soumaa, période : 2003-2015)

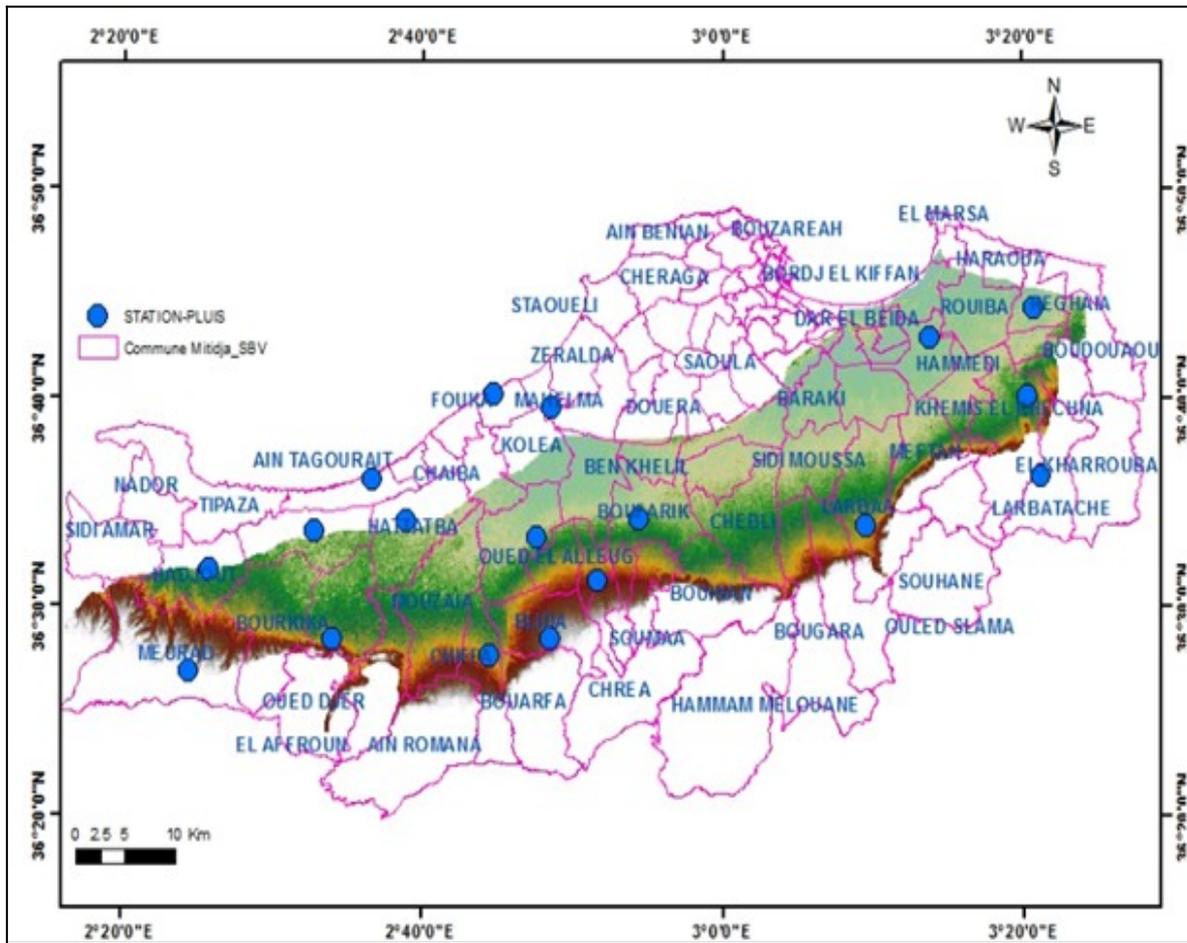
## II.2. Précipitation :

### II.2.1. Réseau pluviométrique :

Il existe sur la Mitidja 18 station de relevage permettant de mesurer la pluviométrie sur l'ensemble de la plaine (figure II.5).

Sachant que la pluviométrie constitue la principale source d'alimentation naturelle de la nappe aquifère de la plaine, il est donc nécessaire d'analyser leurs répartitions dans le temps et dans l'espace.

Mc Donald (bureau d'étude international) a établi une relation (par ajustement) entre les pluies et la recharge de la nappe de la Mitidja entre 1971 et 1988 qui a abouti à un coefficient de détermination de  $R^2 = 0.80$ .



**Figure II.5 :** Localisation des stations pluviométriques dans la Mitidja (source : Aziez, 2021)

Les précipitations constituent l'un des plus importants paramètres climatiques du bilan Hydrologique La connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour apprécier l'état des réserves en eau du sol, la recharge et le régime des cours d'eau (Boufekane, 2017). Le tableau II.5 présente les coordonnées des stations pluviométriques prises en considération dans la plaine de la Mitidja.

**Tableau II.5 :** Coordonnées des stations pluviométriques dans la Mitidja

Code Station	Stations	X	Y	Z
--------------	----------	---	---	---

Mitidja Est	21421	BARAKI	535,05	376,5	20
	21403	LARBAA	541.15	362.95	100
	20602	Hamiz Barrage	558.55	367.4	130
	20611	Dar el Beida	547.4	379.6	24
	20632	REGHAIA	557.8	382.25	20
Mitidja Ouest	21020	AMEUR EL AIN	488.1	352.75	120
	20325	HADJOUT	475.85	358.85	59
	21022	ATTATBA CAVE	495.45	363.15	60
	21116	BLIDA	509.8	352.75	210

### II.2.1.1. Précipitations mensuelles :

Les graphiques représentant les variations des précipitations mensuelles des station de Larbaa (Mitidja Est) et Hadjout (Mitidja Ouest), nous permettent de constater des pluies annuelles de 653.13 mm et 496.97 mm respectivement pour les deux stations. (figures II.6 et II.7)

La plaine de la Mitidja se caractérise par une saison hivernale assez pluvieuse, permettant ainsi l'infiltration des eaux en profondeur vers la nappe (recharge de la nappe).

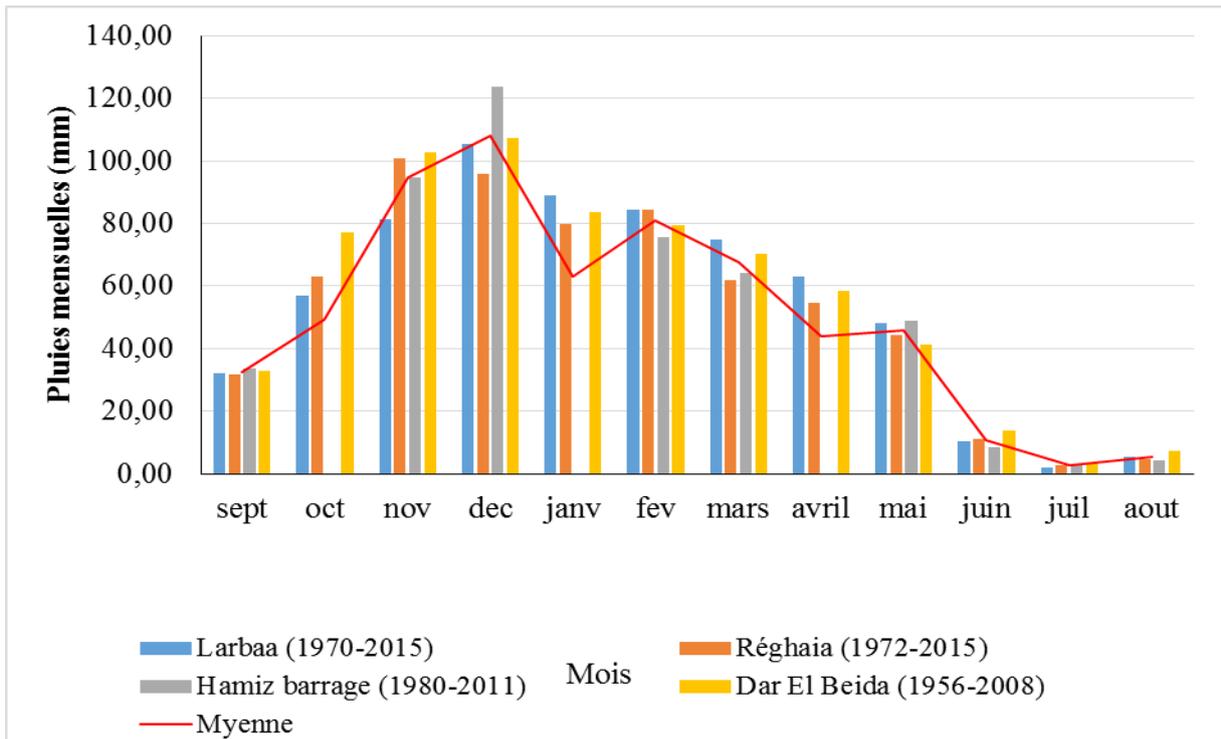
Les faibles valeurs annuelles du coefficient de variation (0.29 pour la station de larbaa et 0.31 pour la station de hadjout) traduisent une dispersion relative des pluies. (tableau II.6 et II.7)

**Tableau II.6 :** Variations moyennes mensuelles des précipitations (en mm) dans la Mitidja Est.

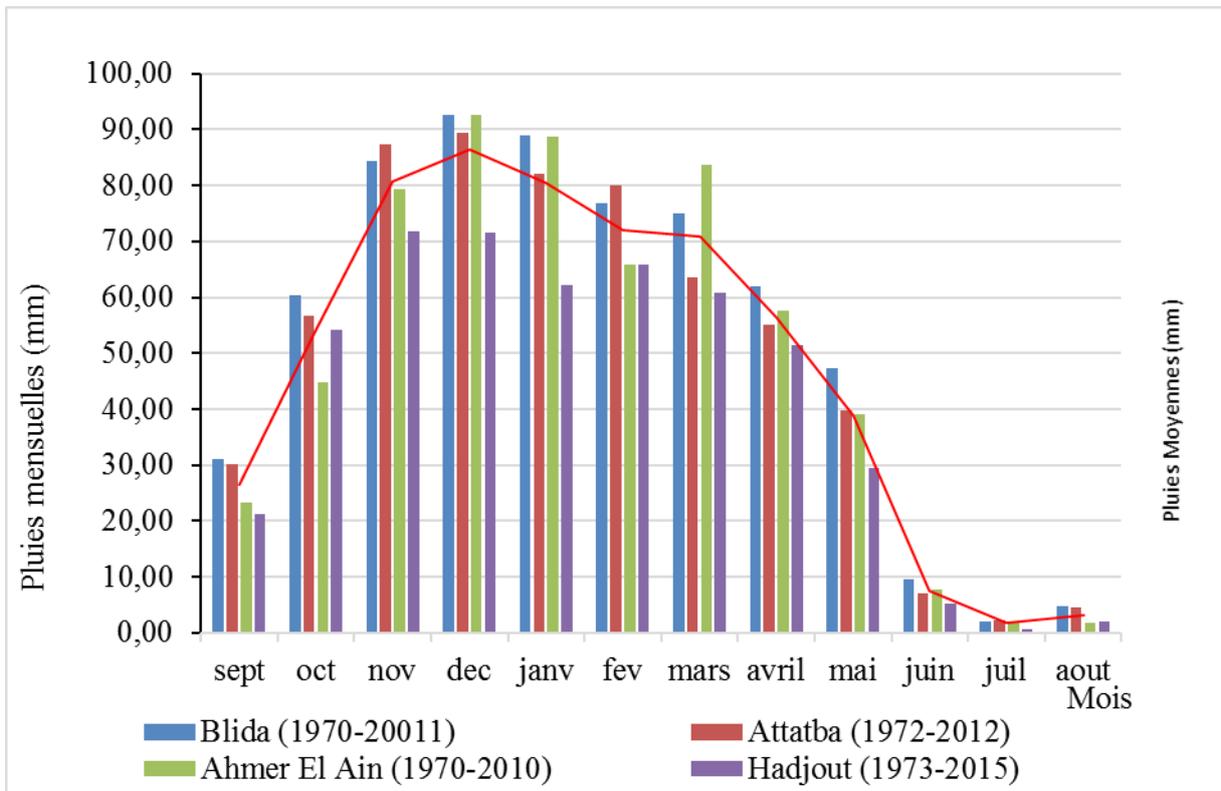
Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Ann
Station	Larbaa (1970-2015)												
Moyenne	32,23	56,83	81,53	105,43	89,03	84,36	74,72	62,98	48,30	10,39	2,04	5,32	653,13
Ecart-type	31,32	53,88	61,94	73,45	63,59	58,91	61,92	52,99	45,83	16,76	4,93	10,36	189,10
CV (%)	0,97	0,95	0,76	0,70	0,71	0,70	0,83	0,84	0,95	1,61	2,42	1,95	0,29

**Tableau II.7 :** Variations moyennes mensuelles des précipitations (en mm) dans la Mitidja Ouest.

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	Ann
Station	Hadjout (1973-2015)												
Moyenne	21,36	54,11	71,92	71,57	62,25	65,81	60,93	51,54	29,49	5,33	0,68	1,98	496,97
Ecart-type	24,23	53,05	48,65	58,45	45,34	58,39	38,18	38,92	32,41	10,82	2,28	6,04	153,92
CV	1,13	0,98	0,68	0,82	0,73	0,89	0,63	0,76	1,10	2,03	3,37	3,05	0,31



**Figure II.6 :** Variation mensuelle interannuelle des pluies dans la Mitidja Est



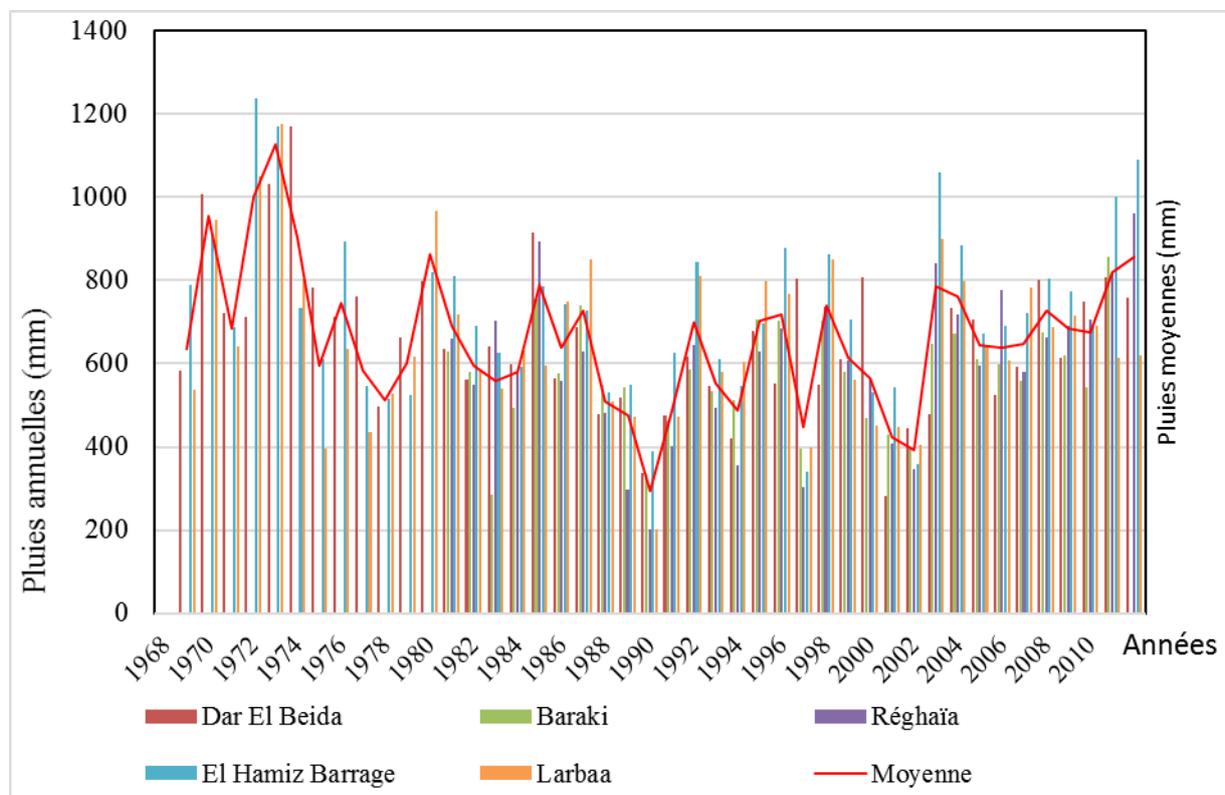
**Figure II.7 :** Variation mensuelle interannuelle des pluies dans la Mitidja Ouest

### III.2.1.2. Précipitations annuelles :

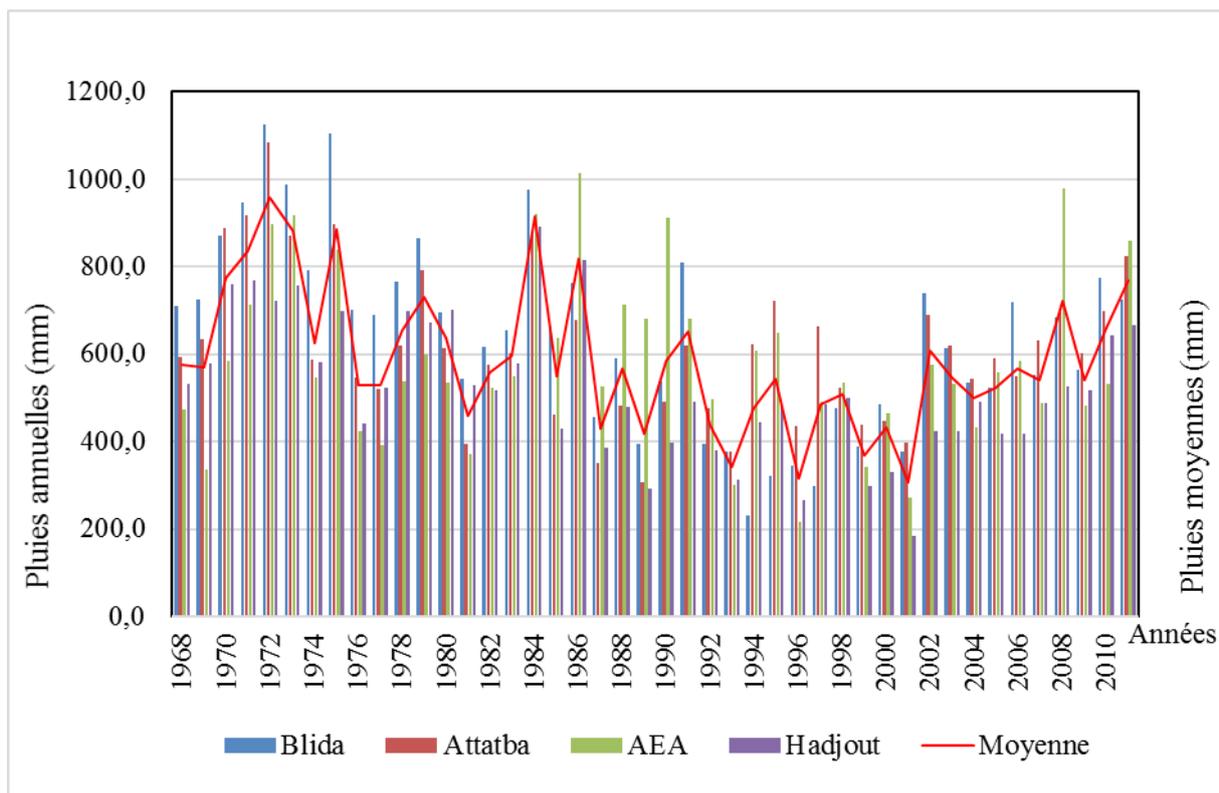
Sur une période de plus de 40 ans, l'analyse des pluies présente une variation des précipitations annuelles assez remarquable au niveau de la zone d'étude (figure II.8 et II.9), avec des pluies variables et irrégulières.

Afin d'évaluer cette variation, nous avons effectué une analyse statistiques descriptives à travers le calcul de la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation. Les résultats obtenus sont reportés sur les tableaux II.6 et II.7 ci-dessus.

Cette analyse montre que, en fonction du facteur temps, la variation apparait clairement d'Est en Ouest. Le coefficient de variation exprimé en pourcentage varie entre 29 % et 31 % pour les stations de larbaa et hadjout, respectivement.

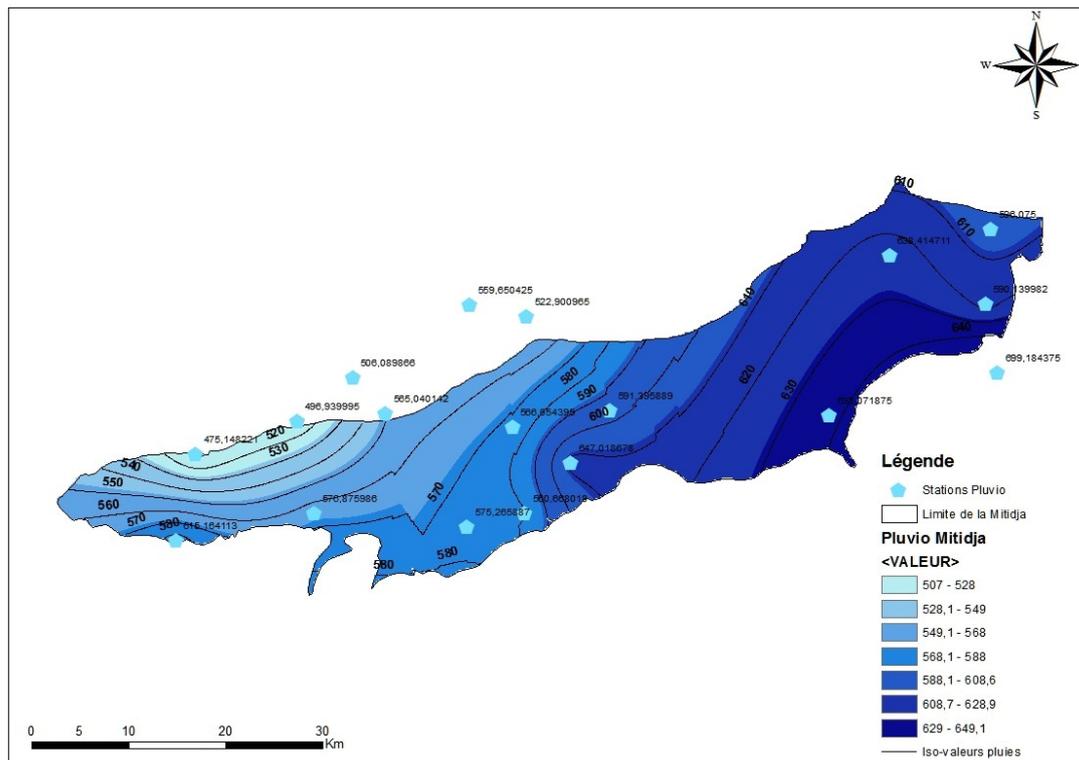


**Figure II.8** : Evolution des précipitations annuelles dans la Mitidja Est (période : 1968 - 2011)



**Figure II.9 :** Evolution des précipitations annuelles dans la Mitidja Ouest (période : 1968 - 2011)

La figure ci-dessous présente une carte des précipitations annuelles caractérisant la plaine de la Mitidja. Nous notons que les pluies sont plus importantes dans la région Ouest qu'à l'Est de la plaine.



**Figure II. 10 :** Carte des pluies interannuelles – plaine de la Mitidja (période : 1970 à 2015)

### II.2.2. Ajustement des pluies (Test de normalité) :

Ce test a pour objectif principal la détermination de la période de retour d'une crue ou d'un étiage donné.

Dans notre cas, l'ajustement a été fait sur des pluies annuelles s'étalant sur une période de 43 ans (de 1973 à 2015) et 45 ans (de 1970 à 2015) respectivement pour les stations de Larbaa et Hadjout, à l'aide du logiciel Hydrolab.

A partir des résultats (figure II.10 et II.10bis) obtenus de l'ajustement des pluies à la loi normale, en utilisant le logiciel hydrolab (Laborde, 1998), nous notons que la loi normale ajuste bien les séries de notre région à un seuil de probabilité égale à 0.05.

Nous pouvons dire que nous avons obtenu un bon ajustement, eu égard de la distribution des points (les valeurs des pluies) présentant un alignement limités par les bornes supérieures et inférieures.

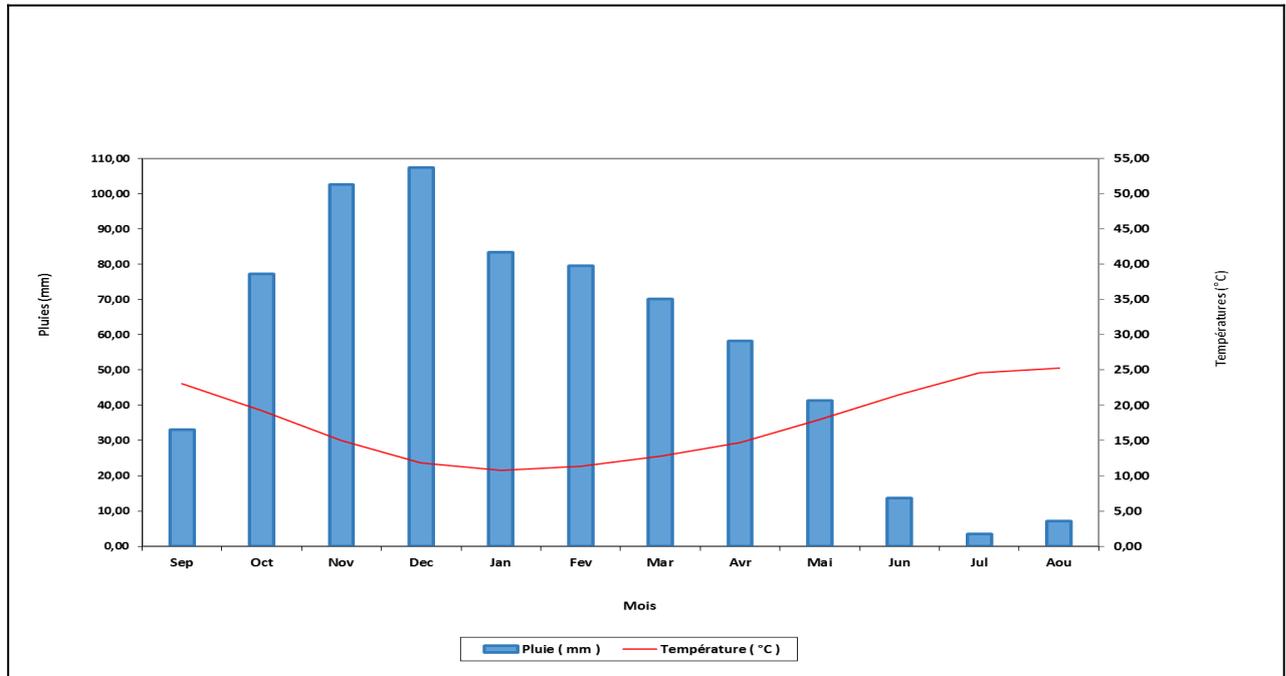
### II.3. Caractérisation du climat de la zone d'étude :

Afin de caractériser le climat des zones d'étude (Mitidja Est et Ouest), nous nous sommes basés sur des méthodes graphiques tels que : le diagramme Ombrothermique, l'indice d'aridité de DeMartone et le Quotient d'Emberger, qui prennent en considération principalement les pluies et les températures.

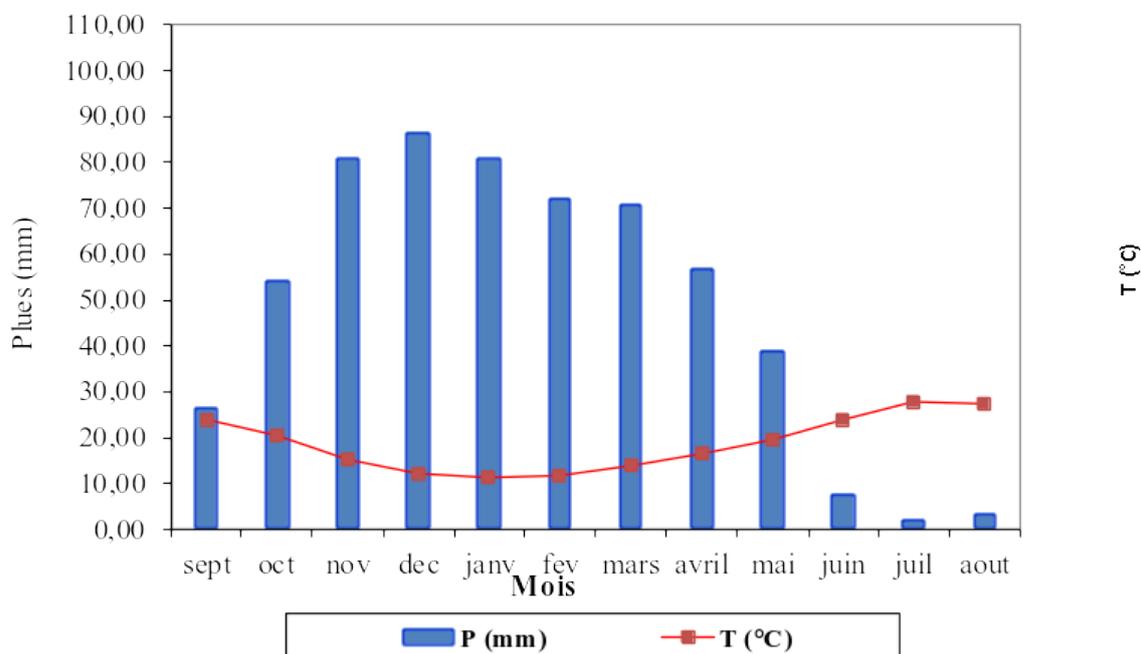
### II.3.1. Diagramme Ombrothermique de Gausсен :

Le diagramme ombrothermique nous permet de distinguer, au niveau de la zone d'étude, deux périodes durant l'année : période sèche et humide, à travers l'intersection des courbes de températures et des pluies.

Selon *Bagnouls et Gausсен (1953)*, un mois est dit "sec" si le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés centigrades ( $P \leq 2T$ ).



**Figure II.11 : Diagramme ombrothermique**  
( Station ONM Dar El Beida : 1956-2008 )



**Figure II.12 :** Diagramme Ombrothermique de la Mitidja Ouest  
(Station : Blida, Période : 1970-2011)

A partir des diagrammes établis pour les deux stations considérées, nous constatons nette la présence de deux périodes distinctes :

- Période humide s'étalant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.
- Période sèche, appelée aussi « période déficitaire » allant du mois de juin jusqu'au mois de septembre.

### II.3.2. Indice de l'aridité de DeMartonne (1926)

Pour caractériser le climat des zones d'étude, nous nous sommes basés sur des méthodes on s'est basé sur les indices résultant de l'utilisation et de la combinaison d'éléments météorologiques recueillis :

$$I = P / (t + 10) \dots\dots\dots(01)$$

- **I** : Indice d'aridité de DE MARTONNE
- **P** : Pluies moyenne annuelles (mm)
- **t** : température moyenne mensuelle (°C)

Le tableau ainsi que l'indice d'aridité de DeMartone, ci-dessous, nous permettra d'interpréter les résultats obtenus et déterminer le type de climat des zones d'étude (Mitidja Est et Ouest)

**Tableau II.8 :** d'indice d'aridité de DeMartone

Type de climat	Désertique	Aride	Semi aride	Sub humide	Humide
<b>I</b>	$\geq 5$	$5 < I \leq 10$	$10 < I \leq 20$	$20 < I \leq 30$	$I > 30$

Les résultats du calcul de l'indice d'aridité sont présentés dans les tableaux II.9 et II.10 ci-dessous.

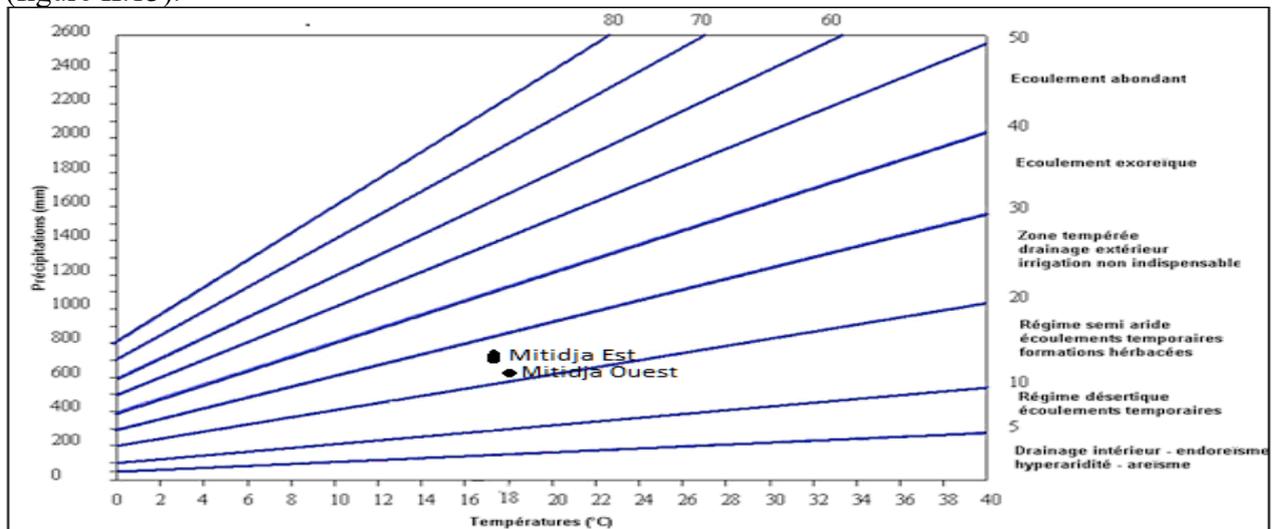
**Tableau II.9 :** Indice d'aridité mensuel à la station de Da el Beida (Période : 1956 – 2008)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T ( °C )	10,73	11,38	12,81	14,71	17,94	21,58	24,59	25,30	23,04	19,25	14,98	11,81
P ( mm )	83,45	79,52	70,17	58,29	41,32	13,68	3,51	7,18	32,99	77,19	102,64	107,45

**Tableau II.10 :** Indice d'aridité mensuel à la station de Blida (Période : 1970 – 2011)

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
P (mm)	31,09	60,45	84,33	92,63	88,92	76,73	75,03	62,00	47,44	9,68	2,15	4,71
T ( °C )	23,84	20,18	15,25	12,04	11,01	11,49	13,91	16,58	19,68	23,76	27,70	27,49

L'indice d'aridité étant de  $I = 24.77$  et  $22.22$ , respectivement, pour la station de Dar el beida et Blida, nous indiquent que la Mitidja est caractérisée par un climat **Sub-humide**. (figure II.13).



**Figure II.13 :** Abaque d'indice d'aridité de DeMertonne de la Mitidja Ouest et Est (Périodes respectives : 1970-2011 ; 1956-2008)

### II.3.3. Quotient pluviothermique d'Emberger :

Le climagramme d'EMBERGER permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée. Il est déterminé à partir de la formule suivante :

$$Q_2 = (2000 \cdot P) / (M^2 - m^2) \dots\dots\dots (02)$$

- La moyenne annuelle des pluies (**P**), exprimée en mm.
- La moyenne des maxima des températures (**M**) du mois le plus chaud, exprimée en °Kalvin.
- La moyenne des minima des températures (**m**) du mois le plus froid exprimée en °Kalvin.

Avec :

$$T (°K) = T (°C) + 273.15 \dots\dots\dots (03)$$

La formule suivante élaborée par STEWART (1968) pour l'Algérie et le Maroc, s'écrit comme suit :

$$Q_2 = 3.43 (P/M-m) \dots\dots\dots(04)$$

Avec :

- Q: le quotient pluviométrique d'EMBRGER
- P: Pluviométrie annuelle moyenne en mm.
- M: Moyenne maximale du mois le plus chaud en °C
- m: Moyenne minimale du mois le plus froid en °C

En utilisant cette formule sur la Mitidja Est et Ouest, nous obtenons les résultats suivants :

$$Q_{2(M.Est)} = 94.94 \text{ et } Q_{2(M.Ouest)} = 71.41,$$

sachant que :

Mitidja Est : P = 581.25 mm, M = 28.5 °C, Et m = 7.5 °C.

Mitidja Ouest : P = 579.18 mm, M = 34.90 °C, Et m = 7.08°C.

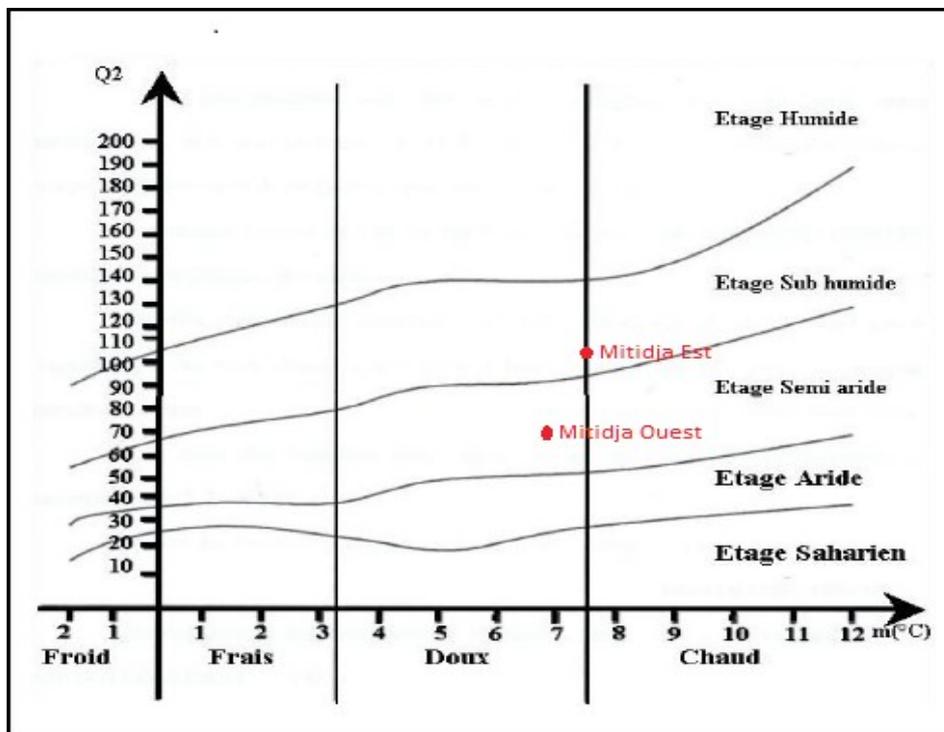


Figure II.14. : Climagramme d'Emberger de la Mitidja Est et Ouest

Nous constatons donc, à travers le climagramme d'Emberger, que le climat est à étage Sub-Humide à hiver Doux dans la Mitidja Est, et à étage Semi-aride à hiver Doux dans la Mitidja Ouest.

#### II.4. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évaporation d'une surface, qui serait suffisamment approvisionnée en eau, pour évaporer la quantité d'eau maximale, permise par les conditions climatiques et physiologiques. (Boufekane, 2017)

Faisant partie des *OutPut* dans un bilan hydrologique d'une région donnée, L'ETP constitue un paramètre très important à déterminer, malgré sa difficulté à être mesurée.

Le calcul de l'ETP nécessite un certain nombre de facteurs variables dans le temps et dans l'espace, tels que : les facteurs climatiques (températures, pluies, vitesse du vent, durée d'insolation et humidité de l'air), ainsi que le sol et la végétation.

De nombreuses formules empiriques ont été établies en se basant sur dans leur résolution sur des paramètres climatiques possible à la mesure.

Dans cette partie nous avons utilisé deux formules de calcul des ETP ou ET0, à savoir la formule de Penman-Monteith dans la Mitidja Est (à l'aide d'un programme permettant d'effectuer le calcul), et la formule empirique de Thornthwaite dans la Mitidja Ouest.

• **La formule de Penman-Monteith : (selon la méthode de la FAO, 1956)**

Cette formule nécessite plusieurs paramètres climatiques afin de pouvoir calculer l'ETP, moyennant la formule ci-dessous :

$$ET0 = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{Cste}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \dots\dots\dots (05)$$

Avec:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{4098 e_{sat}(T)}{(T + 237,3)^2} \\ \gamma &= 0,665 * 10^{-3} P \\ P &= 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \\ e_{sat}(T) &= 0,6108 e^{\frac{17,27 T}{T+237,3}} \end{aligned} \dots\dots\dots (06)$$

Sachant que :

ET0 = évapotranspiration de référence, en mm/j ou mm/h,

Rn = rayonnement global en MJ/m<sup>2</sup>/j ou MJ/m<sup>2</sup>/h,

G = flux de chaleur dans le sol par conduction en MJ/m<sup>2</sup>/j ou MJ/m<sup>2</sup>/h,

Δ et γ = constantes en kPa/°C,

T = température en °C

P = pression atmosphérique en kPa,

z (présent dans la formule de P) = altitude par rapport à la mer (m),

e<sub>a</sub>(T) = pression de vapeur actuelle en kPa = humidité relative \* e<sub>s</sub> / 100,

u<sub>2</sub> = vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s. Ayant la vitesse du vent à 10 mètres du sol, nous utiliserons la formule suivante, avec z l'altitude à laquelle la vitesse est mesurée :

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \dots\dots\dots(07)$$

• **Formule de Thornthwaite :**

La formule de Thornthwaite, qui s'écrit comme suit :

$$ETP = 16 (10.T/I)^a \dots\dots\dots(08)$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

T : température moyenne mensuelle (°C).

I : indice thermique annuel :  $I = \sum 12 i$ .

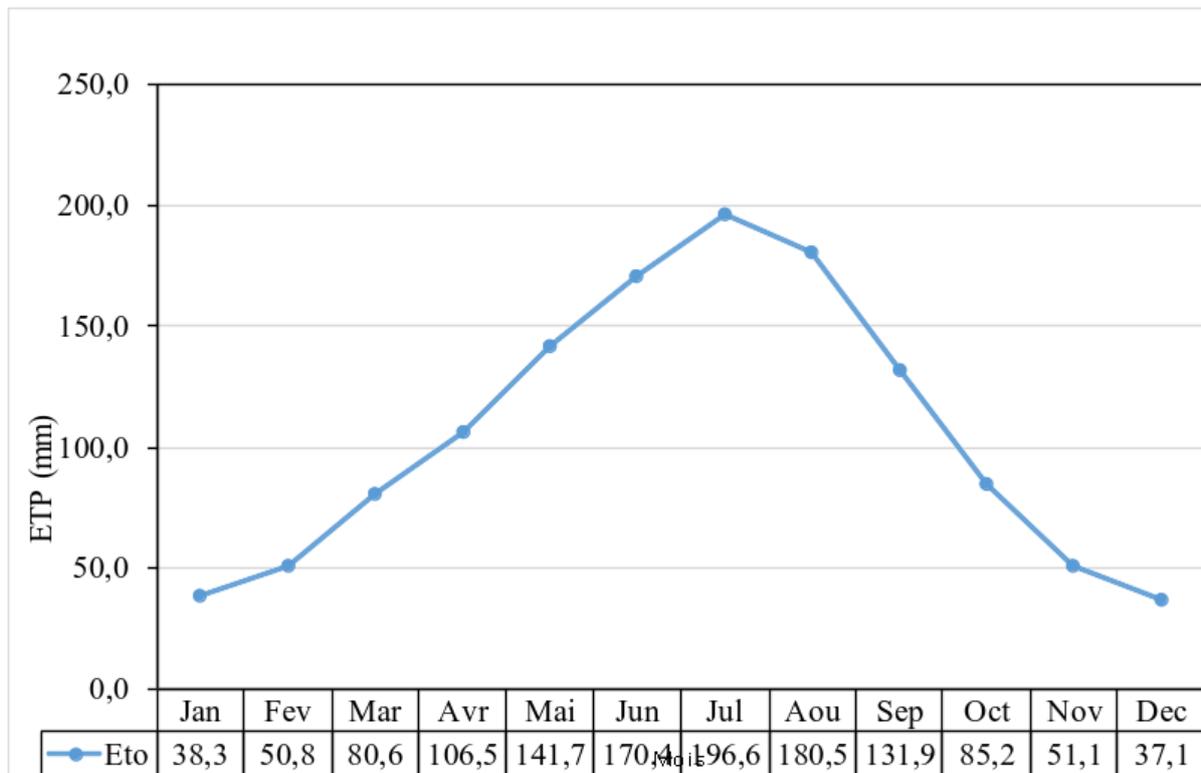
i : indice thermique mensuel :  $i = (T/5)^{1.514}$ .

a : Constante fonction de l'indice thermique annuel :  $a = ((1.6/100) \times I) + 0.5$

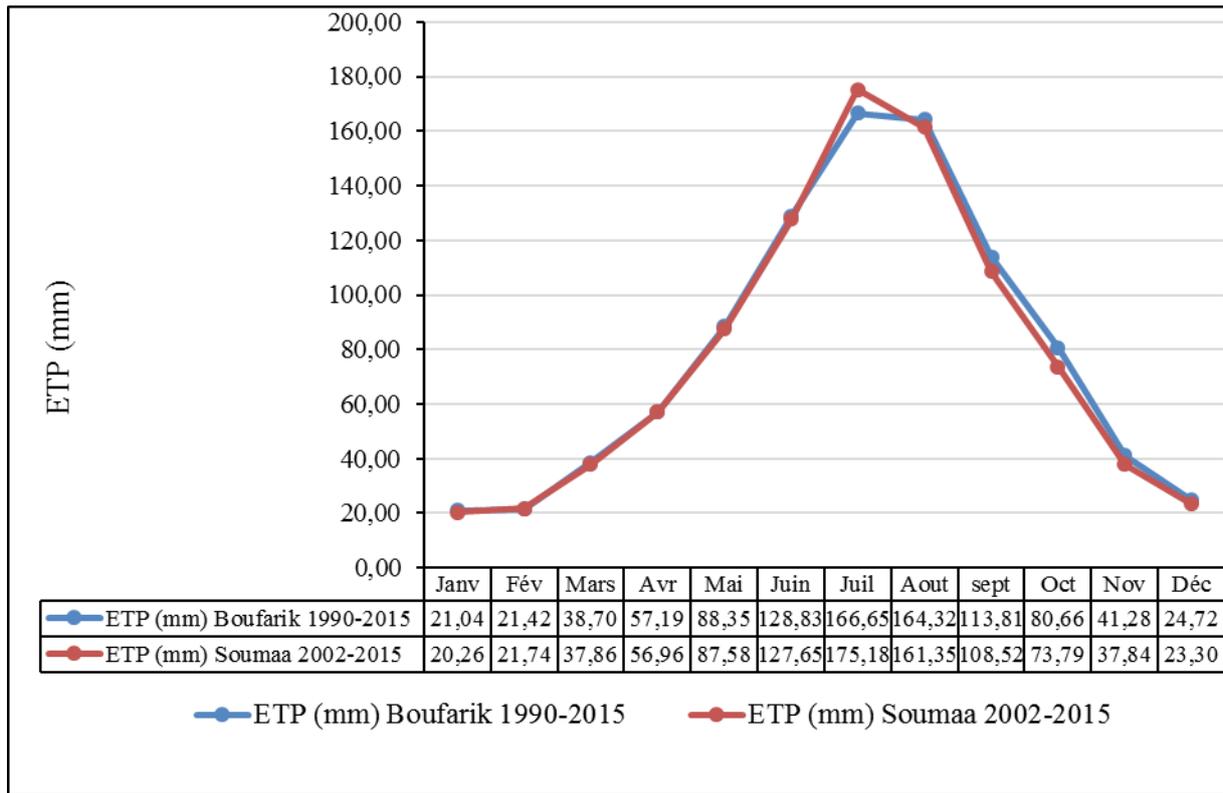
Ensuite, on fait une correction de l'ATP calculé suivant la latitude en la multipliant par le facteur correctif K.:

La détermination de l'ETP a été effectuée en utilisant les deux méthodes :

- Penman-Monteith pour la station de Dar el Beida. (figure II.15)
- Thornthwaite pour la station de Boufarik et Soumaa. (figure II.16)



**Figure II.15 :** Evolution des Evapotranspirations Potentielles dans la Mitidja Est (Station de Dar El Beida, Période : 1956 – 2008)



**Figure II.16 :** Evolution des Evapotranspirations Potentielles dans la Mitidja Est  
(Stations : Soumaa 2002-2015 et Boufarik 1990-2015)

Les évapotranspirations calculées pour les trois stations, présentent les quantités annuelles suivantes :

- Station de Dar el beida, ETPann = 1270.74 mm avec un maximum atteint durant le mois de juillet, estimé à 296.60 mm.
- Station de Boufarik ETPann = 946.97 mm avec un maximum atteint durant le mois de juillet, estimé à 166.65 mm.
- Station de Soumaa ETPann = 932.03 mm avec un maximum atteint durant le mois de juillet, estimé à 141.27 mm.

### II.5. Déficit pluviométrique : (Dp)

Ce paramètre est calculé en utilisant les pluies enregistrées et les ETP calculées des stations considérées.

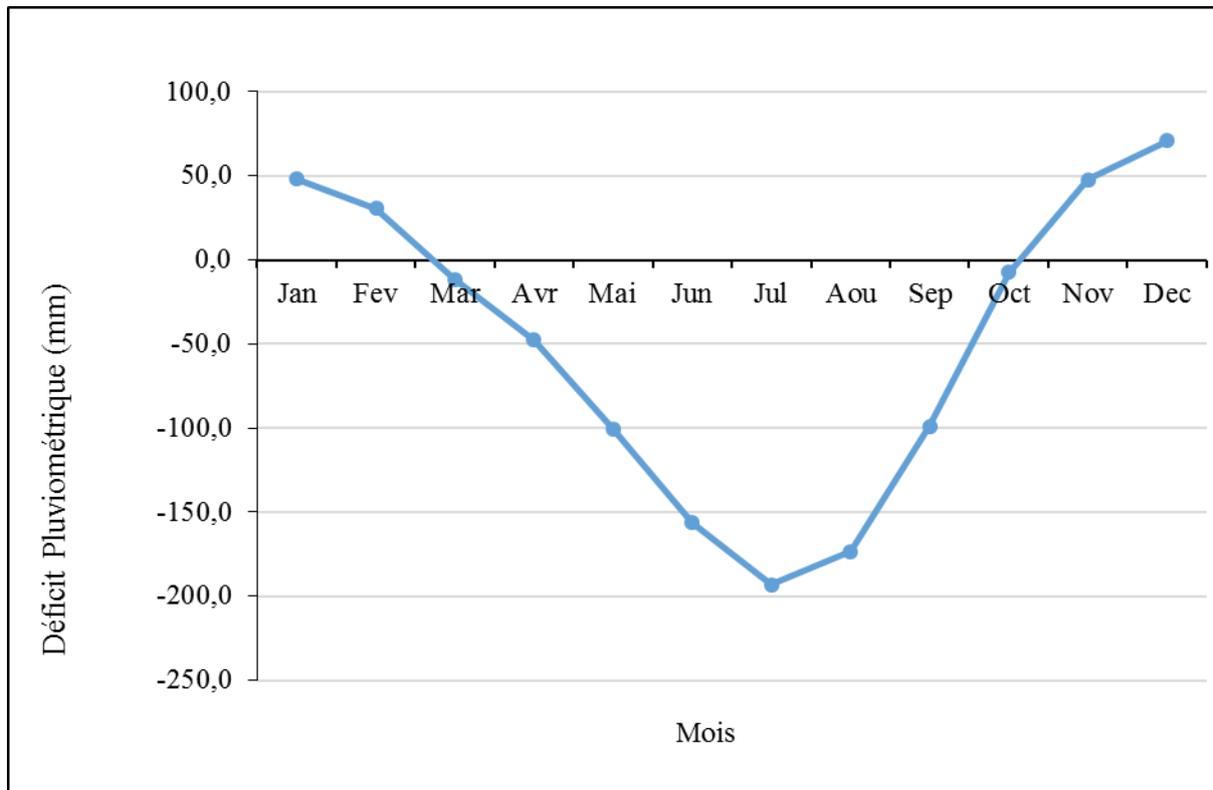
Le déficit pluviométrique se calcule moyennant la formule suivante :

$$Dp = ETP - P \dots\dots\dots(09)$$

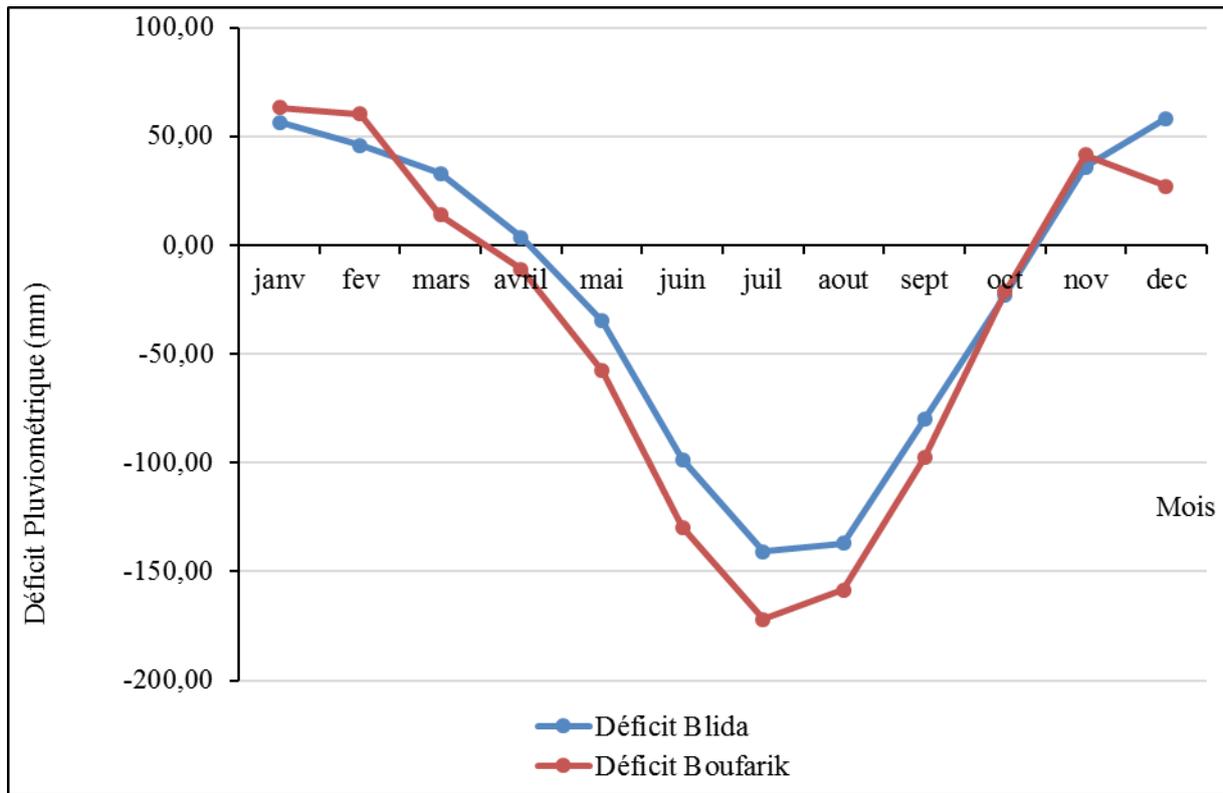
Sachant que Si :

- **Dp > 0** : la région d'étude présente un déficit pluviométrique durant une période donnée de l'année (stresse hydrique).
- **Dp < 0** : la région d'étude ne présente pas un déficit pluviométrique. On considère que durant cette période la région est en confort hydrique.

Les figures (figures II.17 et II.18) ci-dessous, nous donnent respectivement, une représentation graphique du déficit pluviométrique au niveau des stations de Dar el Beida (1956-2008), Boufarik (1990-2015) et Blida (1970-2011).



**Figure II.17** : Evolution du déficit pluviométrique dans la Mitidja Est (Station de Dar El Beida 1956-2008)



**Figure II.18** : Evolution du déficit pluviométrique dans la Mitidja Ouest (Station de Boufarik 1990-2015, et Blida 70-2011)

Nous notons que pour les trois stations analysées, le déficit pluviométrique est enregistré à partir du mois d’Avril jusqu’au mois d’Octobre. Période pendant laquelle l’évapotranspiration potentielle dépasse de loin les quantités de pluies tombées.

### II.6. Estimation de l’évapotranspiration réelle (ETR) :

L’évapotranspiration réelle constitue la quantité d’eau effectivement perdue par évapotranspiration du sol et de la plante. L’estimation de ce paramètre se fait à l’échelle annuelle à travers l’utilisation de formules empiriques tels que : les formules de TURC et COUTAGNE.

Nous allons présenter dans ce qui suit les résultats obtenus avec ces deux formules dans les deux zones d’étude (Mitidja Est et Ouest).

#### II.6.1. Formule de TURC :

L’application de cette formule est valable pour tous les climats, et s’exprime comme suit :

$$ETR = P / (0,9 + P^2/L^2)^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

Avec :

**ETR** : évapotranspiration réelle annuelle (mm).

**P** : Hauteur annuelle des précipitations (mm).

**L** : pouvoir évaporant :  $L = 300 + 25T + 0,05T^3$ .

**T** : Températures moyennes annuelles (°C).

Sachant que les pluies annuelles et les températures moyennes annuelles au niveau de la Mitidja Est et Ouest sont estimées, respectivement, à 677.41 mm et 635.14 mm, 17.34°C et 18.58°C.

Le pouvoir évaporant étant de 994.48 et 1085.07, respectivement, dans la Mitidja Est et Ouest.

L'ETR est donc estimée à : **580.02 mm/an** et **569.77 mm/an** soit 85.62% et 89.70% des pluies, respectivement, dans la Mitidja Est et Ouest.

### III.6.2. Formule de COUTAGNE :

Cette méthode permet le calcul de l'ETR à travers la connaissance de deux facteurs climatiques, à savoir la pluie et la température, mais en respectant la condition que les pluies soient comprises entre  $1/8\lambda$  et  $1/2\lambda$ .

Sachant que :

$$\lambda = 1/(0.8+0.14T) \dots\dots\dots(11)$$

Et que la formule de COUTAGNE s'exprime comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2 \dots\dots\dots(12)$$

Avec :

ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (m).

T : température moyenne annuelle (°C).

Sachant que les températures moyennes annuelles sont de 17.34°C et 18.58°C, respectivement, dans la Mitidja Est et Ouest, on obtient donc :

$$\lambda_{\text{Mitidja Est}} = 0.310$$

$$\lambda_{\text{Mitidja Ouest}} = 0.294$$

Etant donné que les pluies sont de 677.41 mm et 635.14 mm soit 0.677 m et 0.635 m, respectivement, dans la Mitidja Est et Ouest, On constate que la condition :  $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$  est vérifiée puisque :

$$0.403 < P < 1.614 \text{ (Mitidja Est)}$$

$$0.425 < P < 1.700 \text{ (Mitidja Ouest)}$$

La condition étant remplie, cela permet l'application de la formule de COUTAGNE dans les zones d'étude.

- *Mitidja Est* : **ETR = 553.02 mm/an**
- *Mitidja Ouest* : **ETR = 516.43 mm/an**

Le tableau ci-dessous présente les ETR moyennes dans la Mitidja Est et Ouest.

**Tableau II.11** : récapitulatif des ETR obtenues par les formules de Turc et Coutagne dans la Mitidja.

	ETR Turc (mm/an)	ETR Coutagne (mm/an)	Moyenne (mm/an)
Mitidja Ouest	569,77	516,43	543,10

Mitidja Est	580,02	553,02	566,52
-------------	--------	--------	--------

### III.6. bilan hydrologique

Dans cette partie, et connaissant les pluies, les températures et les ETP, nous allons établir un bilan hydrologique suivant le raisonnement de Thornthwaite et s'écrivant comme suit :

$$P = ETR + R + I + \Delta S \dots\dots\dots (13)$$

Avec :

**ETR** : l'évapotranspiration réelle (mm)

**R** : le Ruissellement (mm)

**I** : l'Infiltration (mm)

**ΔS** : variation de stock (mm)

- **Estimation du Ruissellement (R) :**

Le ruissellement peut être estimé moyennant la formule de *Tixeront-Berkaloff*, qui s'exprime comme suit :

$$R = P^3/3*(ETP^2) \dots\dots\dots(14)$$

Avec :

**R** : Ruissellement (mm),

**P** : Précipitation (mm),

**ETP** : Evaporation Potentielle (mm).

Sachant que les pluies sont de 677.41 mm et 635.14 mm, et les évapotranspirations potentielles sont de 1270.7 mm (période de 1956-2008) et 1326 mm (période de 1971-2004), respectivement, dans la Mitidja Est et Ouest.

On obtient donc :

- *Mitidja Est* : **R = 64.17 mm**
- *Mitidja Ouest* : **R = 48.57 mm**

- **Estimation de l'Infiltration (I) :**

Etant la quantité d'eau qui s'infiltré effectivement dans le sol, permettant ainsi la recharge du réservoir sol ainsi que la nappe d'eau souterraine.

A partir du bilan hydrologique nous pouvons estimer la quantité d'eau infiltrée comme suit :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S$$

on aura donc :  $I = P - ETR - R \pm \Delta S \dots\dots\dots (15)$

La variation de la réserve (**ΔS**) devient négligeable (**ΔS = 0**), quand il s'agit d'une longue série d'observation (> à 30 ans), avec succession de périodes humides et périodes sèches sur l'intervalle d'observation (*Grisoni M.; Decroux J.,1972*).

On écrira donc :

$$I = P - ETR - R \dots\dots\dots (16)$$

Le tableau ci-après, présente la lame d'eau infiltrée et le bilan hydrologique :

**Tableau 12** : Estimation de la lame d'eau infiltrée et bilan hydrologique

	P (mm)	ETR moyenne (mm)	ETP moyenne (mm)	Ruissellement (mm)	Infiltration (mm)
<b>Mitidja Ouest</b>	635,14	543,10	1326	48,57	43,47
<b>Mitidja Est</b>	677,41	566,52	1270,7	64,17	46,72

La moyenne des pluies est de 635,14 mm et 677.41 mm, la lame infiltrée est de 43,47 mm et 46.72 mm soit 6,84 % et 6.90 % des pluies, par contre le ruissellement est de 48,57 mm et 64.17 mm, soit 7,65 % et 9.47 % des pluies, respectivement, dans la Mitidja Ouest et Est.

Ceci est dû probablement aux caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Mitidja et à la prédominance des formations imperméables, en faveur du phénomène de ruissellement.

### **Conclusion :**

A l'issu de ce chapitre, le climat de la Mitidja est de type méditerranéen, les méthodes utilisées dans la caractérisation de ce climat ont abouti à :

- La plaine de la Mitidja a un climat Sub-humide à semi-aride, à hiver doux .et été chaud et sec
- La période humide s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, et la période sèche va du mois de juin jusqu'au mois de septembre.
- La quantité de pluies annuelles enregistrées est de 635.14 mm et 677.41 mm, respectivement pour la Mitidja Ouest et Est.
- Les évapotranspirations Potentielles estimées sont de l'ordre de 1326 mm et 1270.7 mm, respectivement pour la Mitidja Ouest et Est.
- Quant aux évapotranspirations réelles, nous avons obtenu les valeurs estimées suivantes : 543.10 mm et 566.52 mm respectivement pour la Mitidja Ouest et Est.
- Les lames d'eau infiltrées été de 43.47 mm et 46.72 mm, et les lames d'eau ruisselées été de 48.57 mm et 64.17 mm, respectivement pour la Mitidja Ouest et Est.

**Partie 02 :**  
**Piézométrie et hydrochimie de la plaine de la Mitidja**

**CHAPITRE III :**  
**« CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES ET HYDROCHIMIQUES DE LA  
PLAINE DE LA MITIDJA »**

## **Introduction :**

Selon *Boufekane (2017)*, la bonne connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude, des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et des directions d'écoulement des eaux souterraines joue un rôle majeur dans la compréhension de l'évolution des éléments chimiques, la protection et la résolution des problèmes de pollution au niveau des nappes d'eau souterraines.

La mesure des niveaux statiques et la détermination des niveaux piézométriques permettent de faire un suivi spatio – temporelle de leur évolution dans la région d'étude, afin de pouvoir arriver à savoir si la nappe a subi des rabattements suite à son exploitation (voir sa surexploitation), ou une recharge.

La connaissance de la profondeur de la nappe permet d'expliquer l'état quantitatif de la ressource en eau souterraine, en n'importe quel point localisé dans l'espace ou dans le temps (*Compte, 1994*).

Afin de savoir si les eaux utilisées sont potables ou non, la qualité de l'eau est très importante à connaître, voir indispensable. Cette qualité est définie en ayant recours à une analyse physico-chimique de l'eau, permettant ainsi de quantifier les concentrations en éléments chimiques la composant.

Une étude chimique des eaux souterraines est donc, nécessaire, en effectuant un suivi de la répartition des concentrations dans l'espace et dans le temps.

Les formations géologiques, les activités anthropiques (rejets industrielles et pratiques agricoles) au niveau de la plaine de la Mitidja sont à l'origine de la qualité des eaux.

L'étude présentée dans ce chapitre, nous permettra de faire un constat sur l'état actuel du niveau de la nappe, ainsi que sur la qualité chimique des eaux.

Nous procéderons d'abord, à une analyse détaillée de l'évolution de la piézométrie au niveau la plaine de la Mitidja, ainsi qu'une étude des principaux processus chimiques et leurs évolutions spatio – temporelle. Un traitement statistique des ions majeurs est, également, fait. L'étude est basée sur quatre campagnes 2006, 2008, 2016 et 2018 et pour deux périodes : Hautes et basses eaux.

### **III.1. Aperçu hydrogéologique et hydrodynamique :**

La Mitidja est caractérisée par la présence de aquifères : l'Astien et l'Alluviale de la Mitidja. Les deux aquifères sont séparés par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Est où ils sont en contact direct.

Les caractéristiques hydrodynamiques des terrains permettent d'évaluer d'une part, leur 'facilité' à laisser l'eau circuler lorsqu'ils sont soumis à un gradient de charge hydraulique, et d'autre part, leur capacité d'emmagasinement de l'eau. Les paramètres qui décrivent ces caractéristiques sont respectivement la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement. (*Djouadar, 2010*)

La productivité d'un captage est caractérisée par la transmissivité. Cette dernière est le produit entre le coefficient de perméabilité (K) et l'épaisseur de la zone saturée (h).

L'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique est la définition de la perméabilité (*Castany G., 1982*), qui se mesure moyennant

le coefficient de perméabilité (K) dépendant à la fois des caractéristiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace) et des caractéristiques du fluide (viscosité, température et masse volumique).

Le coefficient d'emmagasinement d'un aquifère est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée. Lorsqu'il s'agit de nappe libre, c'est la gravité qui provoque l'écoulement de l'eau. Dans le cas d'une nappe captive, l'expulsion d'une petite quantité d'eau provoque une grande variation de pression et donc une forte perte de charge.

### **III.1.1. L'aquifère de l'Astien :**

Le réservoir Astien est généralement constitué par le faciès des grès fins consolidés. A l'Est du Hamiz (poche de Rouïba) l'Astien est en contact avec les alluvions avec lesquels il constitue un aquifère unique. Il est captif au centre de la plaine avec des niveaux piézométriques juste au-dessus du niveau du sol et il est libre dans les zones d'affleurement de l'Astien, dans le sahel et dans les piémonts sud.

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues. Les valeurs de transmissivité sont comprises entre  $0,8 \cdot 10^{-4}$  et  $2,9 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, soit des perméabilités comprises entre  $4 \cdot 10^{-6}$  et  $1,6 \cdot 10^{-4}$  m/s.

L'Astien est une nappe peu sollicitée vu sa localisation à de grandes profondeurs (300 mètres en moyenne), ce qui la rend non économique pour la réalisation de forages. Cette nappe est captée au centre de la Mitidja par seulement deux forages, et quelques forages au niveau de Haouch Félit et de Dergana. Dans la partie latérale de la Mitidja, un certain nombre de forages a été réalisé au niveau de la commune de Birkhadem. (*Hadjoudj, 2008*).

Etant un aquifère captif (excepté pour les zones en contact direct avec l'aquifère des alluvions de la Mitidja), l'Astien est caractérisé par des coefficients d'emmagasinement compris entre  $5 \cdot 10^{-3}$  à  $5 \cdot 10^{-6}$  en zone captive et 0.03 à 0.05 en zone libre. (*Mc Donald, 1992 ; SOGREAH, 2008*).

### **III.1.2. L'Aquifère des Alluvions de la Mitidja (le quaternaire) :**

Le réservoir alluvial du quaternaire est constitué par les terrains clastiques de la formation de la Mitidja (Soltano-tensifien). Il s'agit d'un ensemble de galets de sable alternant avec des limons et des argiles qui recouvrent toute l'étendue de la plaine. La limite inférieure est formée par les marnes de la formation d'El-Harrach attribuée au villafranchien-Callabrien et sa limite supérieure est libre sauf dans la zone du Mazafran où la nappe devient captive sous les limons du Rharbien. L'épaisseur de cet aquifère varie de 100 à 200 mètres en moyenne et va en s'amincissant vers le sud pour atteindre l'Atlas. (*Hadjoudj, 2008*)

L'aquifère alluvial de la Mitidja est caractérisé par une nappe libre, exception faite, au niveau du bas Mazafran où elle captive, et présente des perméabilités verticales inférieures aux perméabilités horizontales, du fait des grandes variations de granulométrie et de stratification.

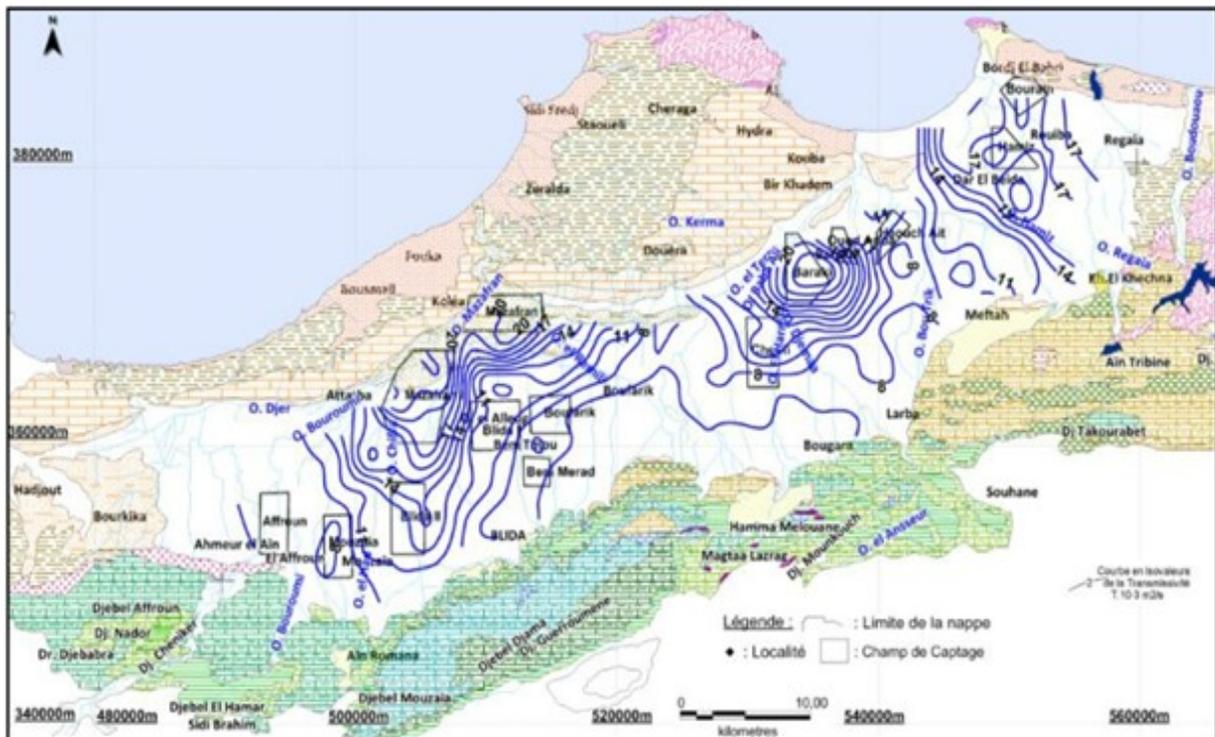
Selon une étude établie par *SOGREAH* en 2008 à partir de valeurs obtenues depuis 1968, la transmissivité des alluvions de la Mitidja est comprise entre  $1 \cdot 10^{-4}$  et  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Souvent, elles atteignent des valeurs très importantes, surtout dans la partie Est, où les grands oueds déposent les matériaux grossiers relativement résistants (*Djoudar, 2010*).

D'après la carte krigée des transmissivités (*Toubal, 1998*) (figure III.01), on observe trois zones d'intérêt hydrogéologique :

- La première zone : se localise au niveau du Hamiz avec des transmissivités qui varient entre  $1,7 \cdot 10^{-2}$  et  $2,3 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.
- La deuxième zone : se situe au niveau du bassin d'El Harrach avec des transmissivités qui varient entre  $0,4 \cdot 10^{-2}$  et  $3 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.
- La troisième zone : se trouve au niveau du Mazafran avec des transmissivité de l'ordre de  $1,5 \cdot 10^{-2}$  et  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Les faibles valeurs se repartissent dans les fonds peu perméables (l'axe de Mouzaia-Attatba, de Boufarik-Oued El Alleug et dans la région de Meftah). Ainsi que dans les piémonts de l'Atlas où les valeurs de la transmissivité varient entre  $10^{-3}$  et  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Ces zones de faibles transmissivités correspondent aux endroits où le toit des marnes est topographiquement relevé. (Djoudar, 2010).



**Figure III. 01** : Carte krigée des transmissivités de la nappe alluviale de la Mitidja (Toubal, 1998)

En ce qui concerne le coefficient d'emmagasinement, les valeurs répertoriées dans l'étude de (Bennie & Partners, 1983), de (Mac Donald, 1992) et de (Toubal, 1998) aboutissent à des valeurs de l'ordre de 3% à l'Ouest et de 15% à l'Est avec une valeur moyenne de 6 à 7% sur l'ensemble de la plaine. D'après la synthèse des données, les valeurs des coefficients d'emmagasinement varient de  $10^{-3}$  pour la nappe captive, et 0,15 pour la nappe libre. (SOGREAH, 2008).

### III.2. Etude Piézométrique de la nappe de la Mitidja :

### III.2.1. Description :

- **L'aquifère de l'Astien**

L'Astien se situe sous les alluvions de la Mitidja, son épaisseur varie entre 100 m et 130 m en diminuant fortement vers le Sud-Est atteignant entre 15 à 30 mètres seulement, et le toit se trouve à une profondeur allant de 250 m à 400 m.

Deux formations caractérisent cet aquifère : les marnes bleues du plaisancien et les argiles jaunes du Villafranchien (formation d'El Harrach). Exception faite de la partie EST, où l'Astien est en contact direct avec l'aquifère des alluvions de la plaine de la Mitidja.

Les écoulements souterrains se font depuis les bordures vers le centre de la plaine. Le toit de cet aquifère se trouve à environ 400 m de profondeur à Oued El Alleug et à 200 m dans le Mazafran. (*Hadjoudj, 2008*).

Son alimentation est effectuée, principalement, par l'infiltration des eaux de pluies sur le Sahel, mais aussi à partir de la nappe alluviale sus-jacente par drainance.

Vu sa localisation à des profondeurs importantes (en moyenne à 300 m), cette nappe est peu sollicitée. Il existe peu de forages captant cette nappe, on trouve au niveau du centre de la Mitidja seulement deux (02) forages, quelques forages au niveau de Haouch Flit et Dergana et quelques un dans la commune de Birkhadem.

Le flux de drainance vers la nappe alluviale (dans la formation d'El Harrach) constitue le seul exutoire de cet aquifère.

- **L'aquifère des alluvions de la plaine de la Mitidja (le Quaternaire) :**

Le Quaternaire est le siège d'une nappe libre reposant sur un substratum marneux d'âge plaisancien, sauf dans le bas Mazafran où la nappe est captive sous les limons récents de la formation du Mazafran. présentant une formation hétérogène de Galets alternant avec des limons et des argiles.

Son épaisseur moyenne varie entre 100 m et 130 m, et est réduite à proximité du littoral (10 mètres à Bordj-El-Kiffan). La surface du sol étant la limite supérieure et la formation d'El Harrach la limite inférieure.

L'alimentation de la nappe se fait principalement par l'infiltration des précipitations et des des crues dans les lits d'oued (Oueds : El Harrach – El Hamiz et Réghaia), l'infiltration d'une partie de l'eau d'irrigation, ainsi que les écoulements souterrains de l'Astien dans la région de Rouiba.

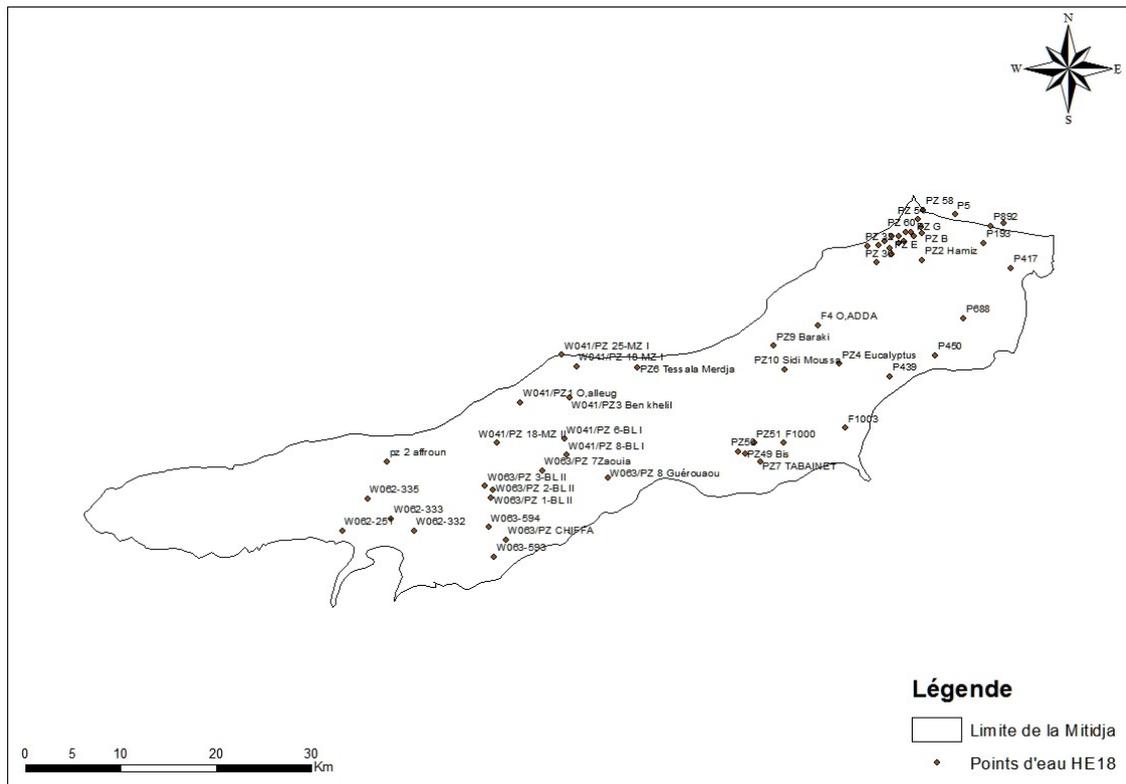
Connu pour ses excellentes caractéristiques hydrodynamiques, cette nappe est très exploitée en agriculture (irrigation), en industrie et en alimentation d'eau potable des wilayates du centre.

La nappe s'écoule de l'Atlas vers la mer qui constitue son unique exutoire souterrain.

#### III.2.1.1. La Piézométrie :

Afin de mieux comprendre le comportement hydrodynamique de la nappe de la Mitidja, nous allons analyser, dans ce qui suit, l'évolution des niveaux piézométriques, à travers un historique piézométrique entre 2006 et 2016 ; ainsi que 2008 et 2018, en prenant en compte deux périodes : Hautes et Basses eaux.

Les campagnes piézométriques sont effectuées au niveau de la Mitidja par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques), à travers 18 points de mesures (piézomètres, forages et puits) ; et 15 respectivement pour les campagnes 2008 et 2018/2006 et 2016. Les mesures ont été effectuées à deux périodes : Hautes et Basses eaux. (figure III.20)



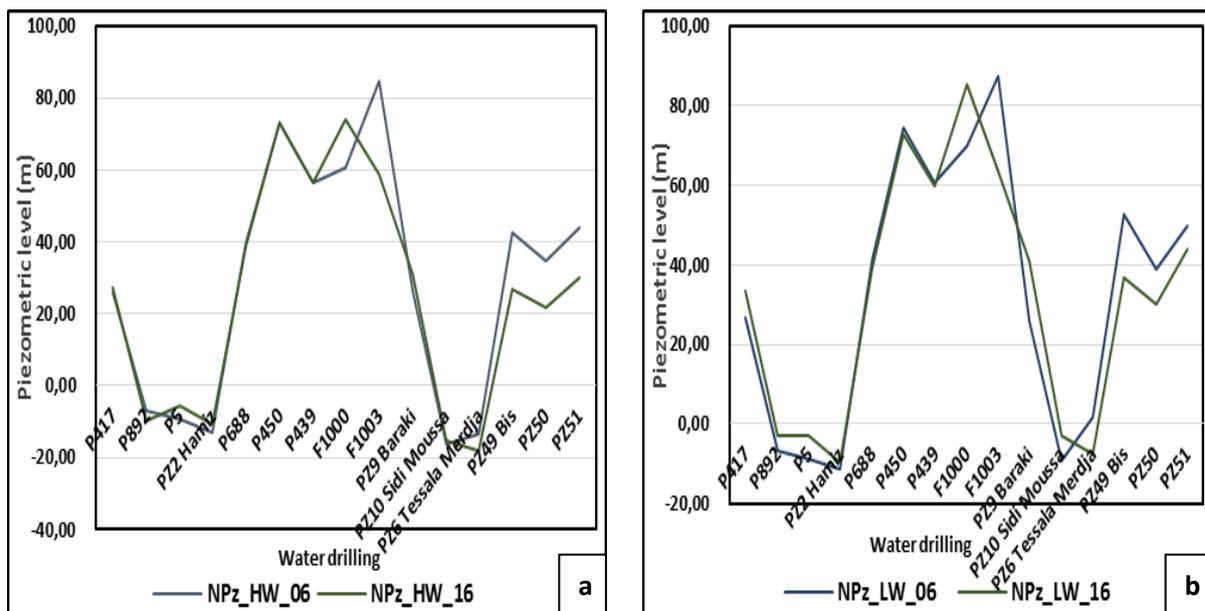
**Figure III.01bis :** Points d'eau pour la mesure de la profondeur de la nappe (Mitidja)

• **Evolution des niveaux piézométriques :**

Il faut noter que l'évolution des niveaux piézométriques dans la nappe alluviale de la Mitidja, fait l'objet d'un suivi régulier par l'ANRH. Les statistiques établies pour la période 2001 à 2013 révèlent qu'entre Baraki et Sidi Moussa, les niveaux piézométriques mesurés dans deux piézomètres (E007-9126-pz9baraki), E007-9127-pz10 sidi moussa) affichent une amélioration spectaculaire d'une dizaine de mètres en 2013 par rapport aux années précédentes.

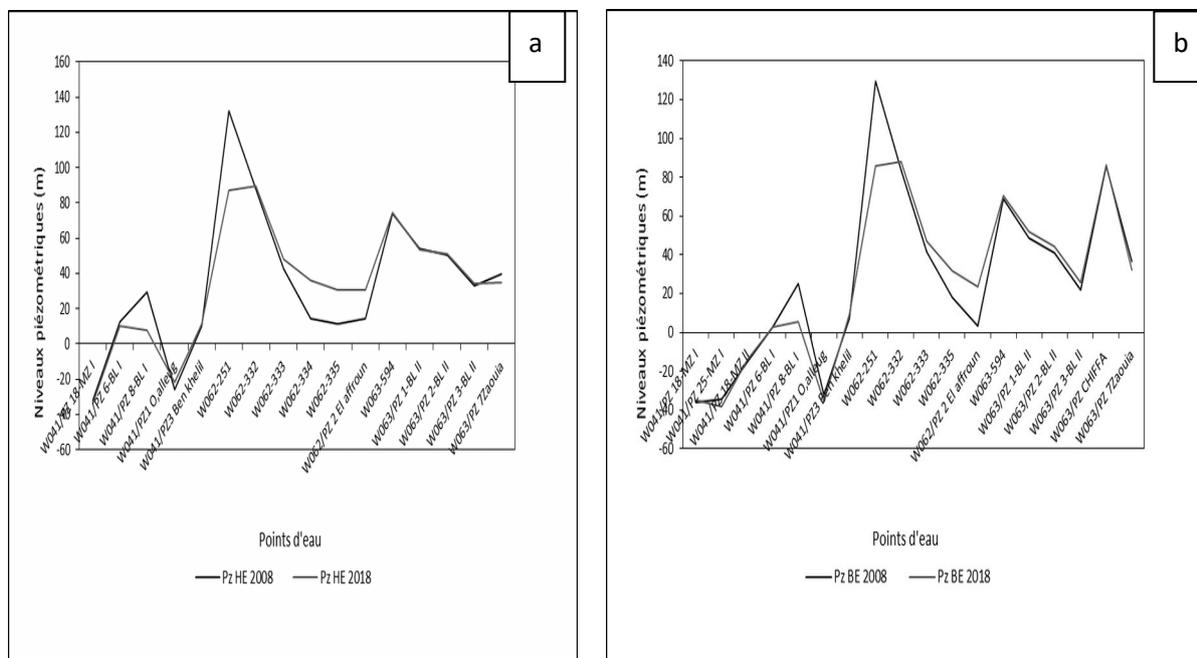
Au niveau de la région des Eucalyptus, le forage (E007-9641-f 997/42) a montré une remontée de 7 m entre 2010 et 2012, suite à l'arrêt de plusieurs forages AEP des champs de captage de baraki et Hamiz. (voir graphe du pz 2 hamiz E008-4212) (ANRH, 2013)

Les graphiques des hautes et basses eaux 2006 et 2016 ont été réalisés pour illustrer l'évolution de la surface piézométrique dans le temps (figure III. Ces derniers révèlent un rabattement de la nappe entre 2006 et 2016, pouvant atteindre environ 23 m en basses eaux et 26m en hautes eaux (cas du forage F1003).

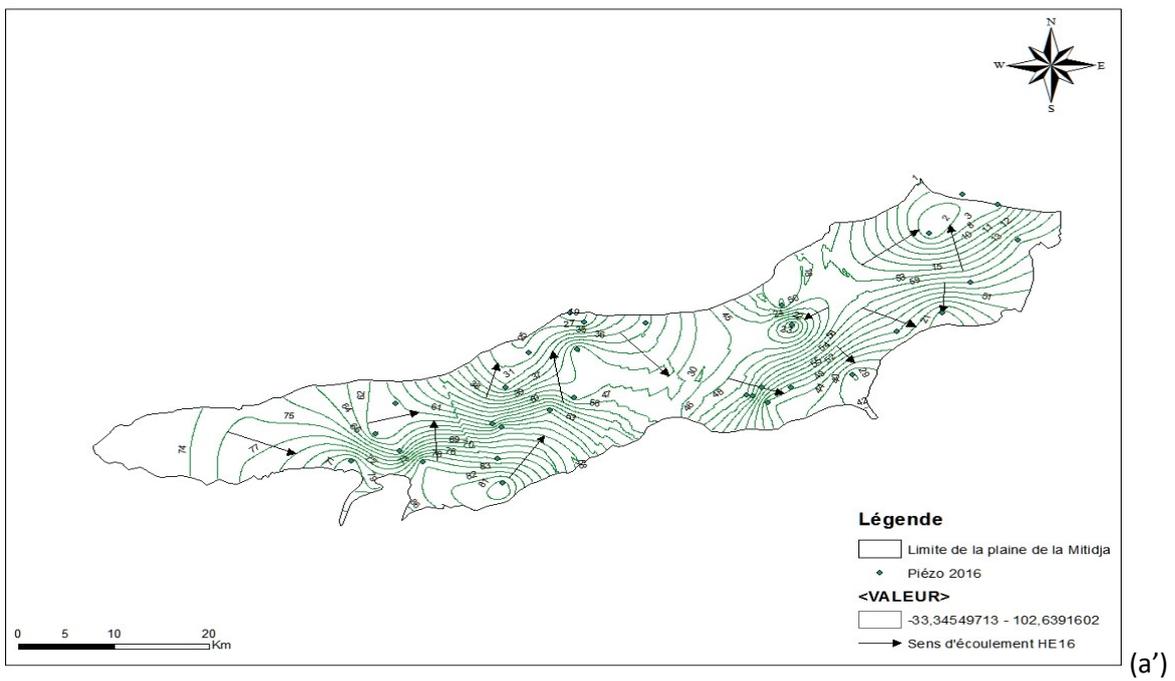
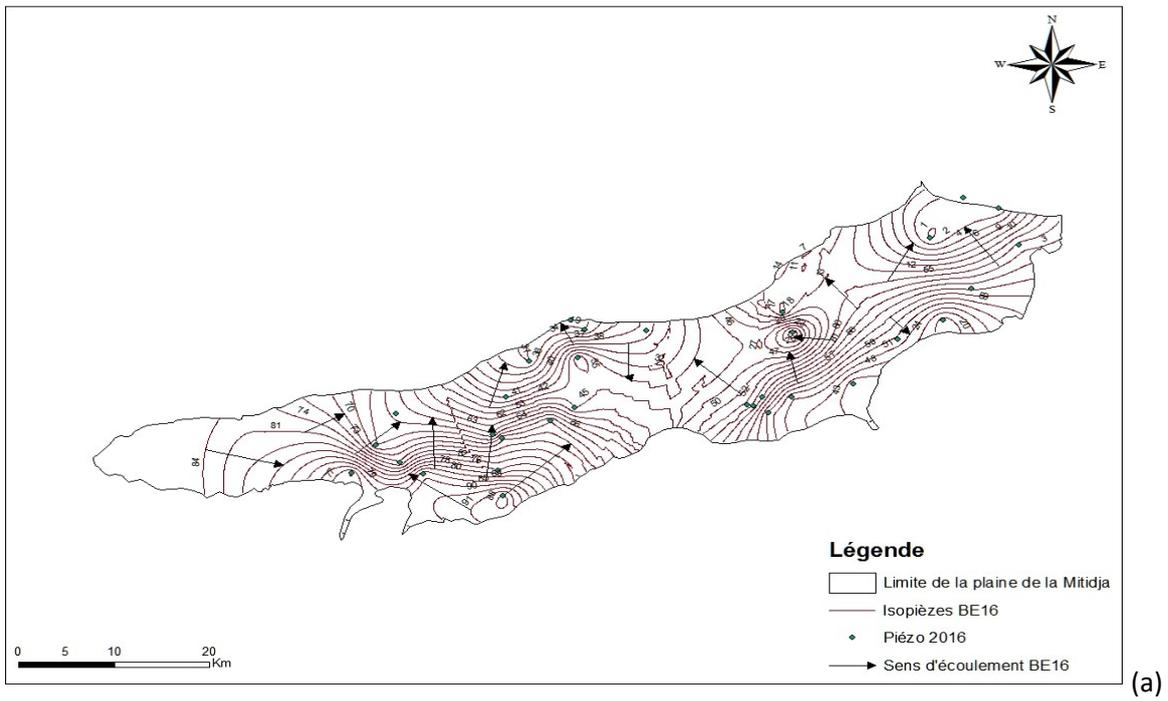


**Figure III.02 :** Evolution du niveau piézométrique dans la Mitidja Est durant 2006 et 2016 (basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')

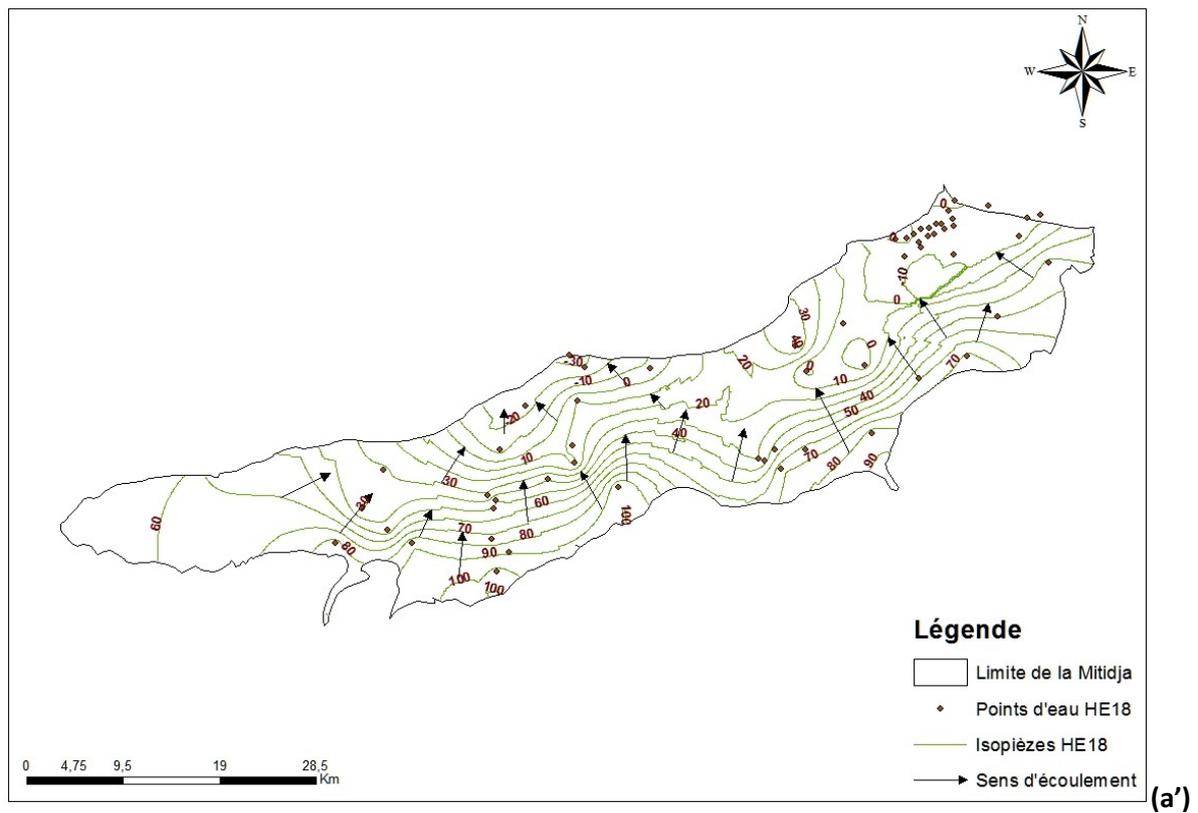
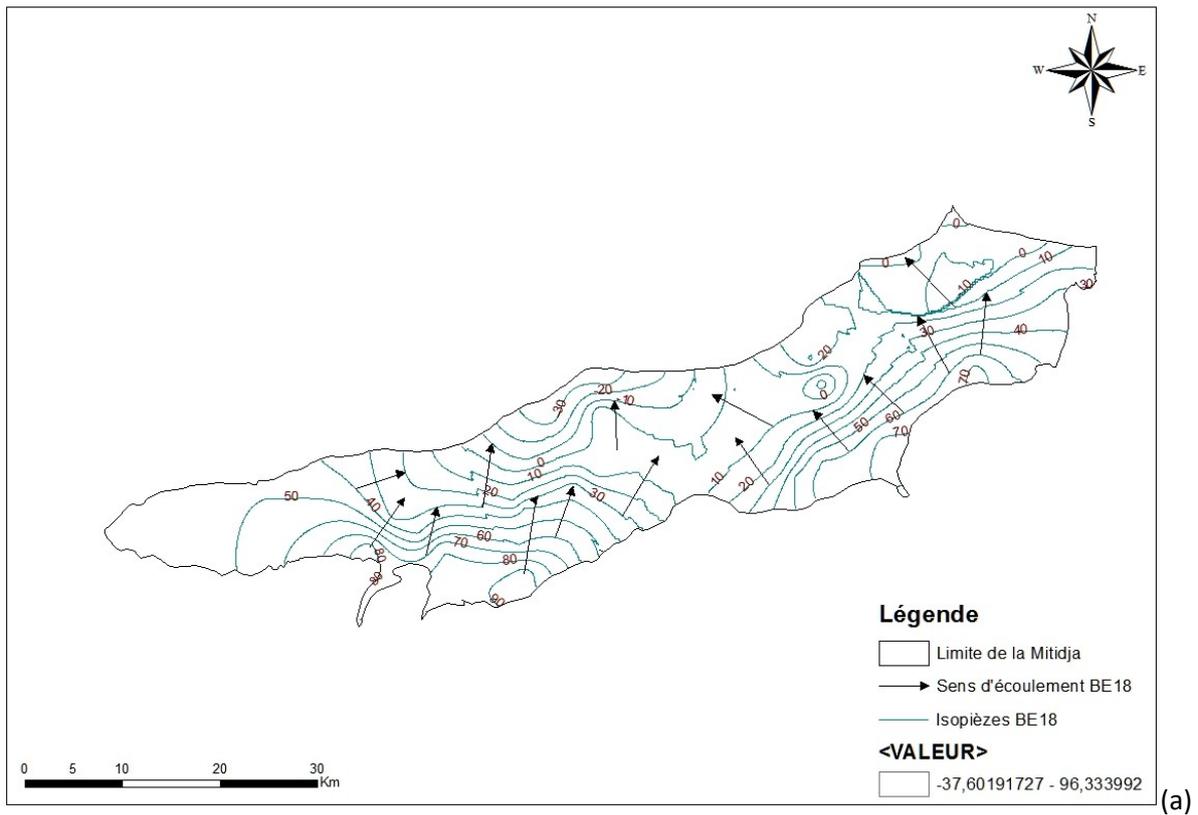
En ce qui concerne les campagnes 2008 et 2018 (basses et hautes eaux), les graphiques montre clairement un rabattement de la nappe, parfois important, dans quelques points d'eau. Cas du point d'eau W062-251, où une diminution du niveau piézométrique atteignant plus de 40 m est enregistré entre 2008 et 2018 (basses eaux et hautes eaux) (figure III.03).



**Figure III.03 :** Evolution du niveau piézométrique dans la Mitidja Ouest durant 2008 et 2018 (basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')



**Figure III.04** : Cartes piézométrique de l'année 2016 pour les deux période : basses (a) et hautes eaux (a')



**Figure III.05 :** Cartes piézométrique de l'année 2018 pour les deux période : basses (a) et hautes eaux (a')



Afin de mieux comprendre l'évolution du niveau de la nappe à travers le temps, nous avons établi des graphiques (figures III.25 et III.26), illustrant l'évolution du niveau statique de deux points d'eau au niveau de la Mitidja : PZ2 d'El Hamiz et Pz18 Mazafran MZ2.

Les graphiques mettent en exergue un rabattement de la nappe, dans les deux piézomètres HZ2 et MZ2, entre 1995 et 2016. L'abaissement de la nappe est estimé à 9.54 m entre Mai 1995 et juin 2016, et 19.51 m entre Mars 1996 et Juin 2016, respectivement au niveau des piézomètres Pz 2 d'El hamiz et Pz 18 du Mazafran. Ce rabattement est dû principalement à la prolifération des forages (surtout illicites) ainsi le pompage excessif des eaux, qui risque d'engendrer des conséquences plus graves.

Par contre, en 2018, nous enregistrons une remontée considérable de la nappe comparée à 2016. Cette remontée est estimée à 27.74 m et 46.55 m, respectivement au niveau du Hamiz et du Mazafran. L'élévation du niveau de la nappe est expliquée par l'arrêt d'un certain nombre de points d'eau au niveau des deux zones d'étude. (selon une étude faite par *SOGREAH (2008)*)

### III.3. CHIMISME DE LA ZONE D'ETUDE :

#### Introduction

La connaissance de la qualité chimique des eaux est très importante. L'analyse de l'eau, qui indispensable, nous renseigne sur la composition chimique de celle-ci, afin de déterminer l'usage adéquat (eau potable, Irrigation, Industrie ...).

Néanmoins, l'étude de la chimie des eaux souterraines, constitue un complément indispensable à l'étude hydrogéologique et à la gestion des ressources en eaux (*Boufekane, 2017*)

Nous permettant ainsi, l'obtention d'information nécessaire au suivi spatio-temporel des éléments chimiques présents dans les eaux souterraines, afin de mieux caractériser le milieu aquifère.

Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (*Gouaidia ; 2008*), ainsi que les activités anthropiques (influençant la qualité et la quantité des eaux).

Dans la plaine de la Mitidja, la chimie des eaux souterraines est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques, les rejets industriels et l'activité agricole.

L'objectif de ce chapitre, est de faire un constat sur l'état actuel des eaux souterraines et de déterminer l'origine de la contamination ainsi que la concentration en éléments chimiques de ces eaux, et leur évolution dans l'espace et dans le temps.

Le travail dans ce chapitre sera structuré comme suit :

- Etudier de près les principaux processus chimiques des eaux souterraines, à travers une analyse statistique des ions majeurs composant l'eau, à travers des analyses physicochimiques (effectuées au laboratoire de l'*ANRH*: Agence Nationale de la Ressource Hydrique Blida), et ce pour les quatre campagnes 2006, 2008, 2016 et 2018 et pour deux périodes : Basses et Hautes eaux.
- Mettre en évidence l'état de la contamination des eaux souterraines par les nitrates et son évolution spatio-temporelle, afin de mieux cerner le problème de la pollution de la nappe et contribuer à l'évaluation de la qualité de l'eau.

### III.1 Hydrochimie :

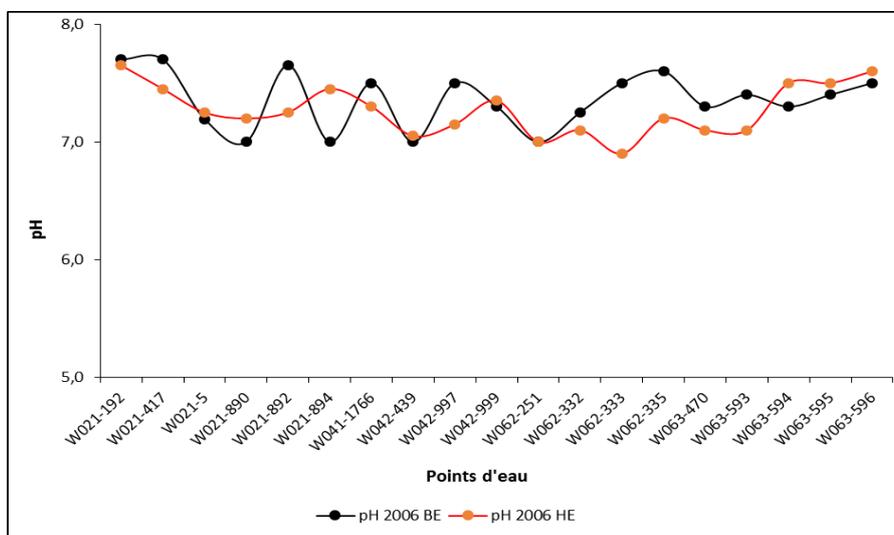
#### III.1.1. Paramètres physico-chimiques des eaux :

##### III.1.1.1. Paramètres physiques :

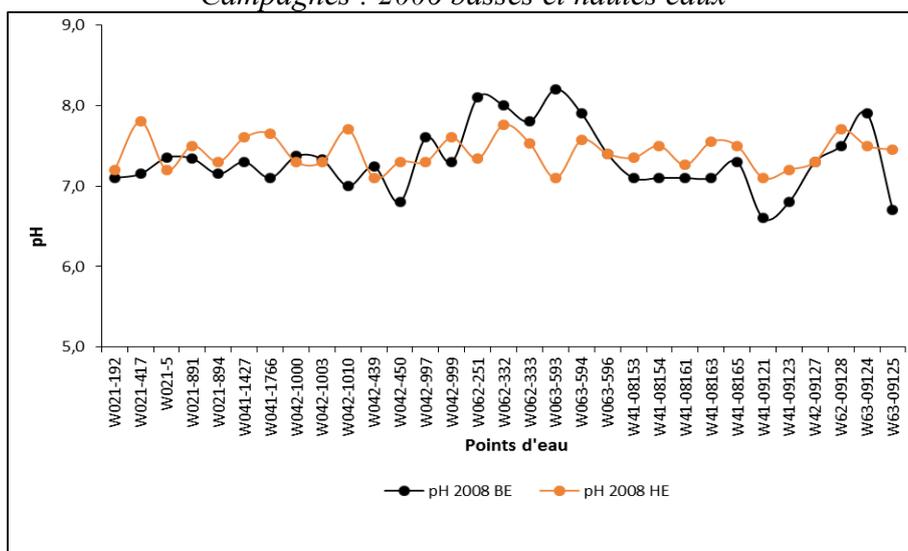
Ces paramètres (pH, CE) sont faciles à mesurer *In-Situ* et nous permettent d'avoir un aperçu sur l'état chimique des polluants dans l'eau. Ces mesures sur terrain seront complétées par des analyses chimiques au laboratoire.

##### - Potentiel d'Hydrogène (pH) :

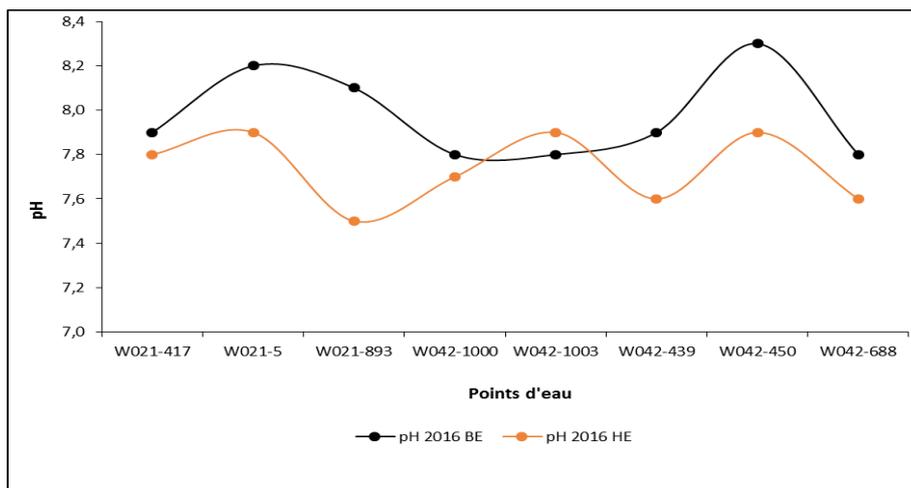
Est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Le tableau 13, présente l'analyse statistique du pH des campagnes 2006, 2008, 2016 et 2018 (Basses et Hautes eaux). Nous constatons qu'un écart-type assez faible chose qui est acceptable puisque la moyenne et la médiane sont très proches. Les valeurs du pH varient entre 6.8 et 8.0, ce sont des valeurs qui restent dans la norme de potabilité établie par l'OMS ( $6.5 < \text{pH} < 9.5$ ). Ces eaux sont donc, légèrement basiques. (figures : III.08, III.09, III.10 et III.11).



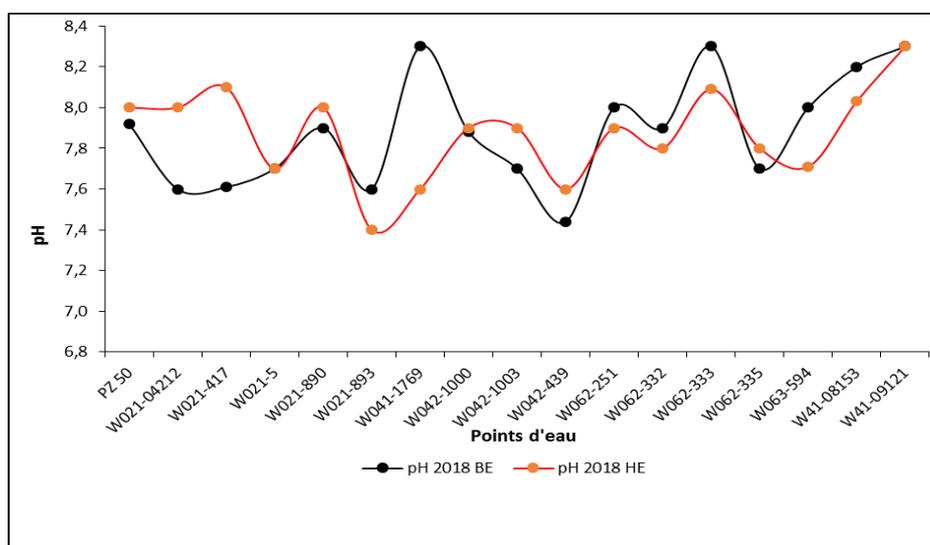
**Figure III.08 :** Variation du pH de l'eau  
Campagnes : 2006 basses et hautes eaux



**Figure III.09 :** Variation du pH de l'eau  
Campagnes : 2008 basses eaux et hautes eaux



**Figure III.10 : Variation du pH de l'eau**  
Campagnes : 2016 basses eaux et hautes eaux



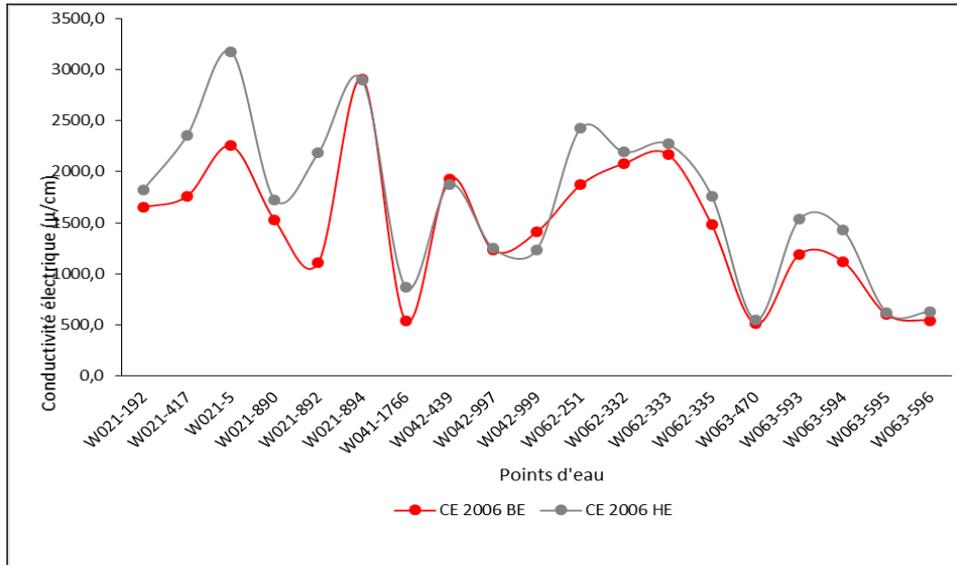
**Figure III.11 : Variation du pH de l'eau**  
Campagnes : 2018 basses eaux et hautes eaux

**- La conductivité électrique :**

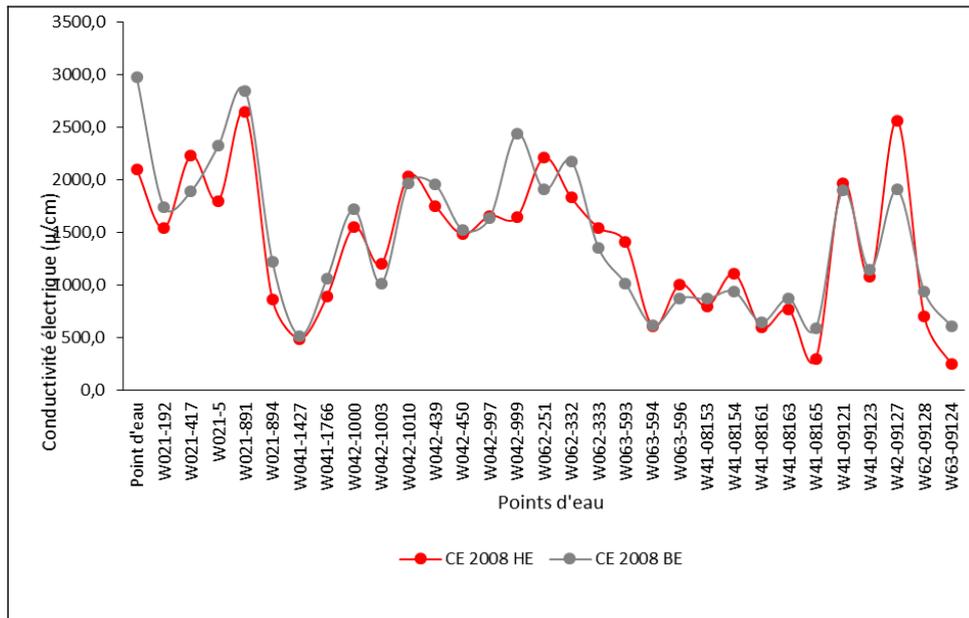
La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à laisser les charges électriques se déplacer librement (Boufekane, 2017).

Cette notion dépend de la minéralisation (dissolution des sels dans l'eau) et s'exprime, généralement, en  $\mu\text{mho/cm}$  à 25 °C.

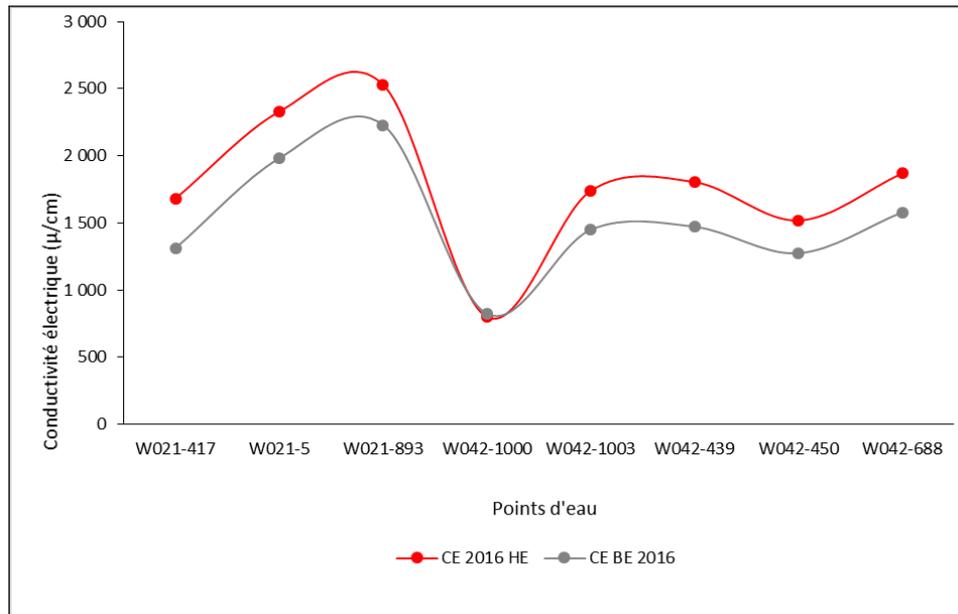
Les conductivités électriques mesurées à différentes périodes (2006, 2008, 2016 et 2018 Basses et hautes eaux), montrent de grandes variations spatio-temporelles variant entre 510 et 3176.8  $\mu\text{mho/cm}$  (figure III.12, III.13, III.14 et III.15), expliquées par une forte minéralisation durant les périodes analysées.



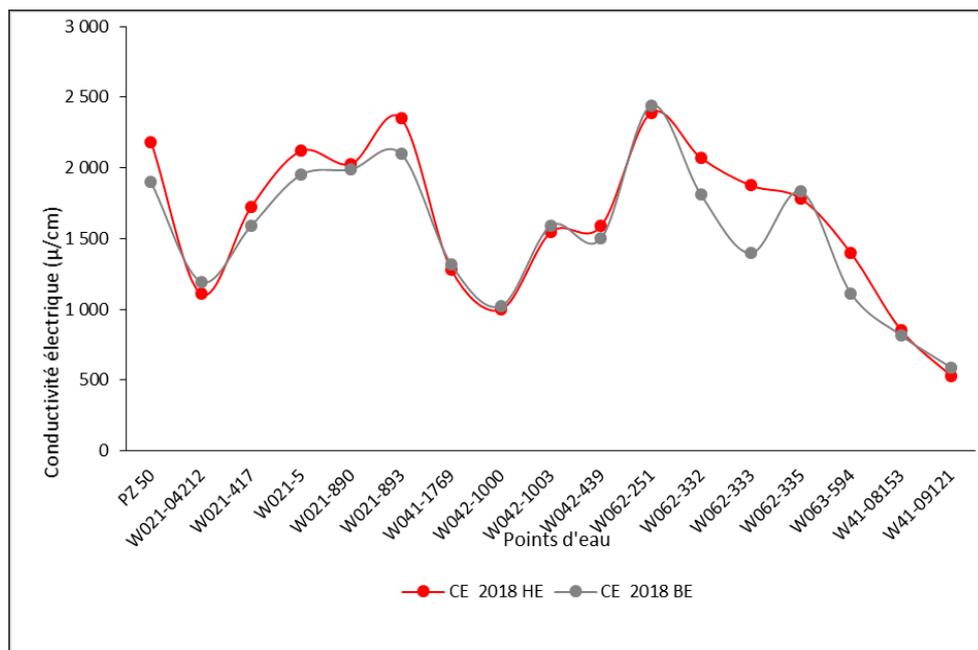
**Figure III.12** : Variation de la Conductivité électrique (CE en  $\mu/cm$ ) de l'eau Campagnes : 2006 basses eaux et hautes eaux



**Figure III.13** : Variation de la Conductivité électrique (CE en  $\mu/cm$ ) de l'eau Campagnes : 2008 basses eaux et hautes eaux



**Figure III.14** : Variation de la Conductivité électrique (CE en  $\mu/cm$ ) de l'eau  
Campagnes : 2016 basses eaux et hautes eaux



**Figure III.15** : Variation de la Conductivité électrique (CE en  $\mu/cm$ ) de l'eau  
Campagnes : 2018 basses eaux et hautes eaux

### III.1.2. Les Analyses chimiques :

Afin de mieux caractériser les eaux souterraines de la plaine de la Mitidja, nous avons procédé à une collecte des résultats d'analyse effectuée au niveau du laboratoire de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques-Blida), ainsi qu'un traitement statistique (tableau 14) de ces résultats. Ce dernier a été établi pour les quatre campagnes de mesure : 2006, 2008, 2016 et 2018, qui ont fait l'objet de notre étude.

## 1. Les éléments majeurs :

Ces derniers sont représentés graphiquement (figure III.36, III.37, III.38 et III.39) respectivement pour les campagnes d'analyse faisant l'objet de notre étude, à savoir, 2006-2008-2016 et 2018 en périodes de basses et hautes eaux. L'interprétation des graphiques est faite en tenant compte de la norme de potabilité de l'OMS (tableau 13)

**Tableau 13 : Normes OMS**

Unité	mg/l									µS/cm	
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	R.Sec	CE	pH
Norme OMS	100	50	150	12	250	250	250	50	1500	2500	9,5

(source OMS, 2011)

En ce qui concerne le calcium (Ca<sup>2+</sup>), nous notons des concentrations très élevées et variables au niveau de tous les points d'eau pouvant dépasser de loin la norme de potabilité (100 mg/l) en atteignant des valeurs maximales variant entre 311.3 mg/l (en 2006) et 249.5 mg/l (en 2018).

Les plus faibles concentrations ont été enregistrées en 2008, avec des valeurs de l'ordre de 7 mg/l et 15 mg/l, respectivement, en basses et hautes eaux au niveau du point d'eau W41-09121.

Les ions (Mg<sup>2+</sup>) sont issus de la dissolution des formations carbonatées riches en magnésium (dolomite). Nous enregistrons des variations de concentration sont très faibles, avec des valeurs inférieures à la norme (50mg/l) dans la majorité des points d'eau.

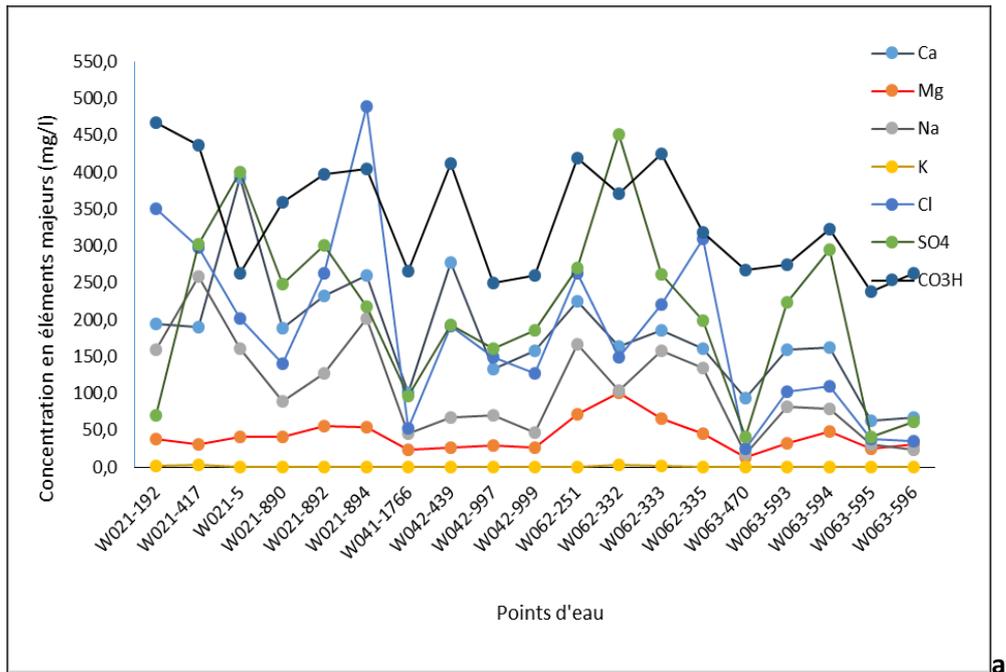
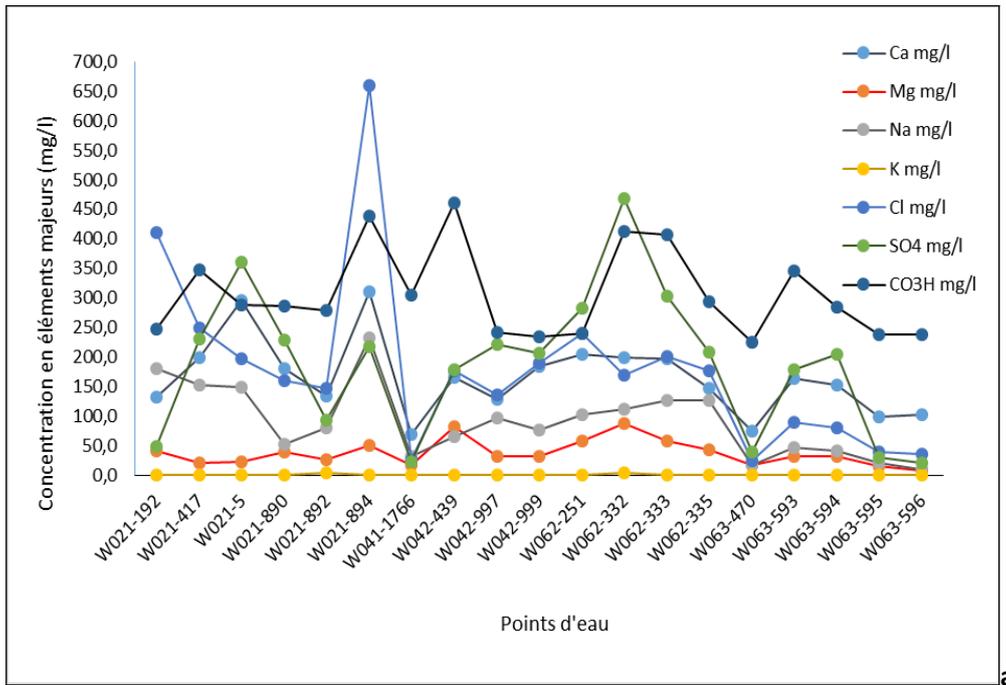
Les concentrations en Sodium (Na), répondent dans la plupart des points prélevés à la norme OMS (150 mg/l). Les valeurs les plus élevées sont observées particulièrement, au niveau des points d'eau se trouvant dans la Mitidja Est (Baie d'Alger) et cela durant les quatre campagnes et les deux périodes considérées. Ceci peut s'expliquer par le phénomène d'intrusion marine qui devient problématique dans cette région.

Les teneurs en Chlorures (Cl<sup>-</sup>) des quatre campagnes d'étude (basses et hautes eaux) présentent des valeurs importantes dépassant la norme OMS (250 mg/l) et atteignant des valeurs extrêmes allant jusqu'à 660 mg/l et 625 mg/l, respectivement, en 2006 et 2008 en période des basses eaux.

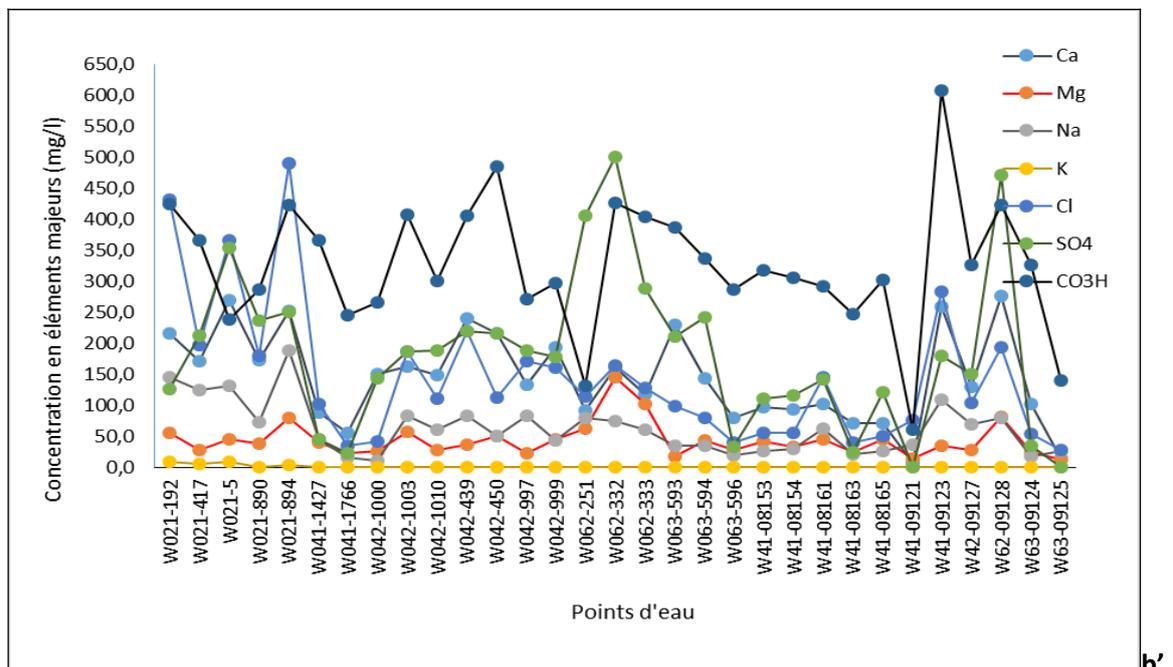
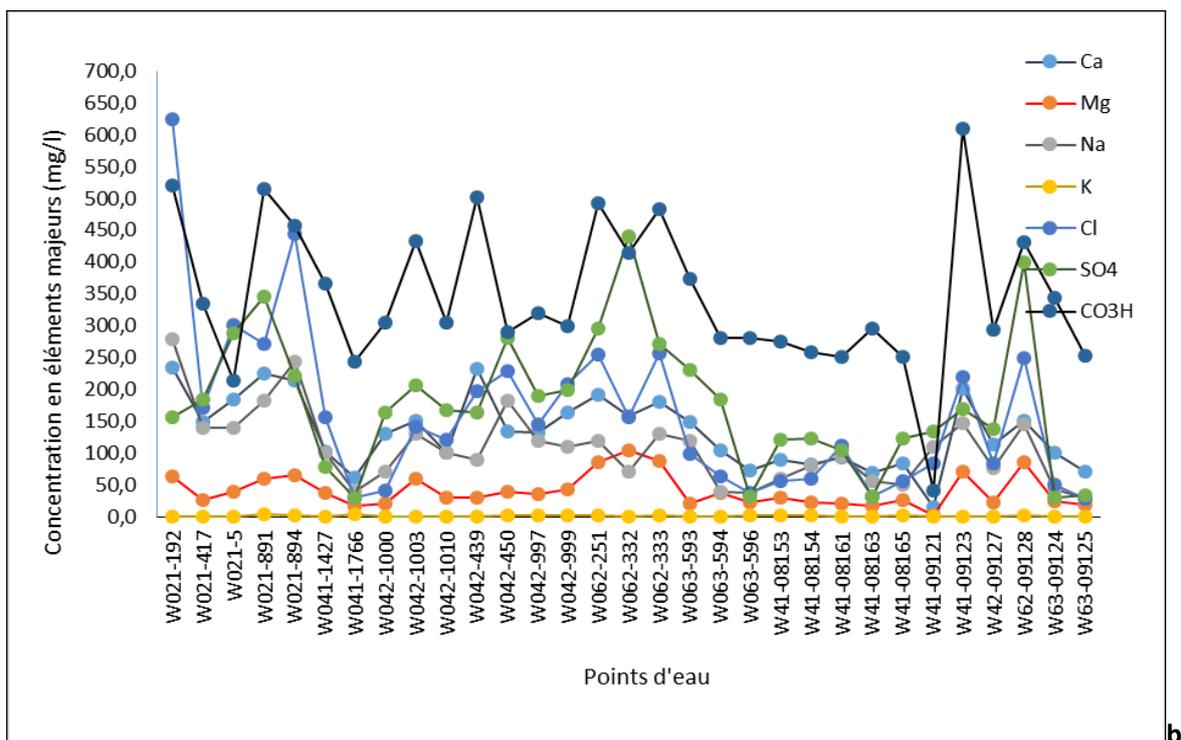
La dissolution des engrais chimiques (NPK) et l'altération des argiles potassiques constituent la principale origine des quantités de potassium se trouvant dans les eaux souterraines. Les résultats des analyses présentent des concentrations très faibles voir nul au niveau de la casimajorité des points d'eau prélevés en basses et hautes eaux.

Selon *Achi (1971)*, La présence des sulfates dans l'eau est liée au lessivage de la formation triasique (gypse, marnes bariolées cargneules) éparpillée dans l'Atlas Blidéen en petits lambeaux. Les teneurs en cet élément présentent des variations importantes en basses et hautes eaux, en notant des valeurs dépassant de beaucoup la norme (250 mg/l) et des valeurs maximales variant entre 248 mg/l en 2016 (basses eaux) et 500 mg/l en 2008 (hautes eaux).

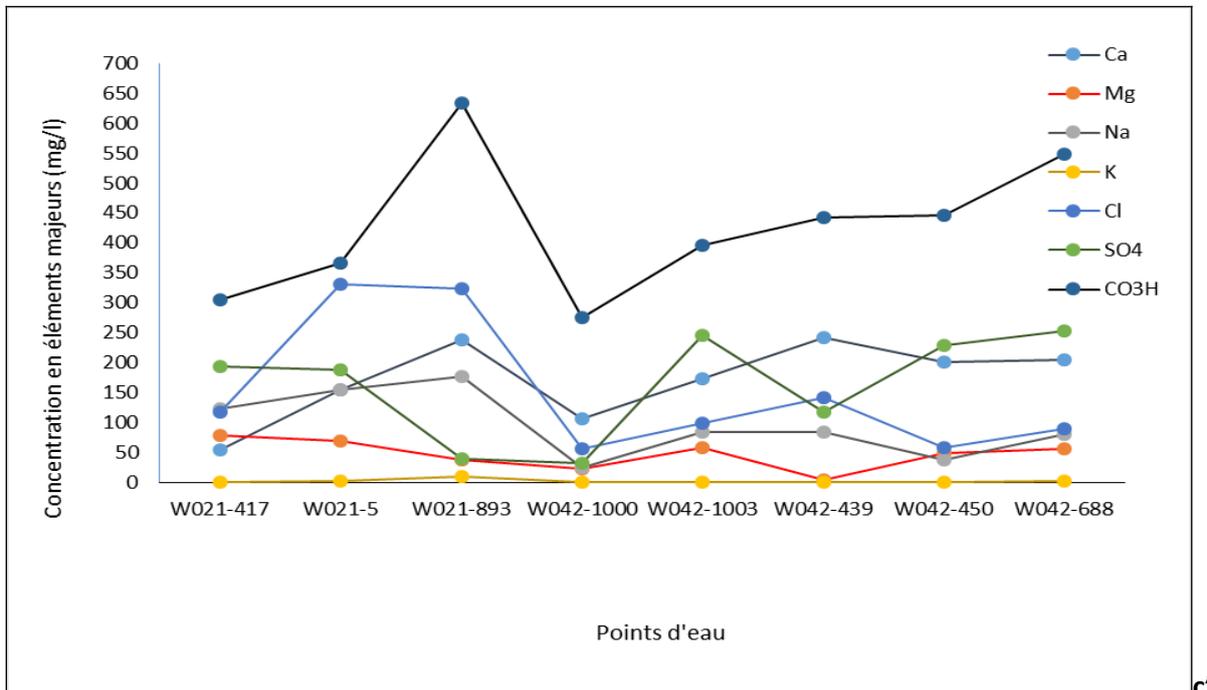
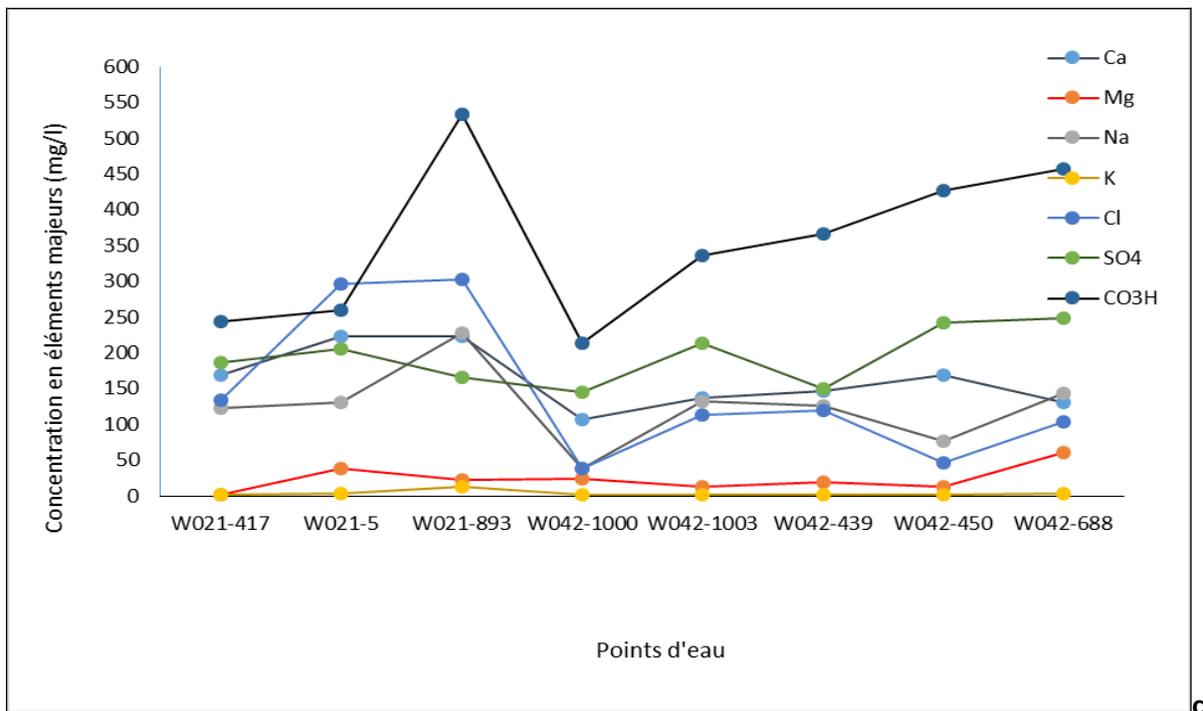
Les bicarbonates se trouvant dans les eaux souterraines sont dus, essentiellement, à la dissolution des formations carbonatées qui bordent la nappe (*Djouadar, 2010*). Les concentrations en bicarbonates les plus élevées sont enregistrées durant la période des hautes eaux des campagnes 2016 et 2018 avec des valeurs respectives de 634.4 mg/l et 823.5 mg/l.



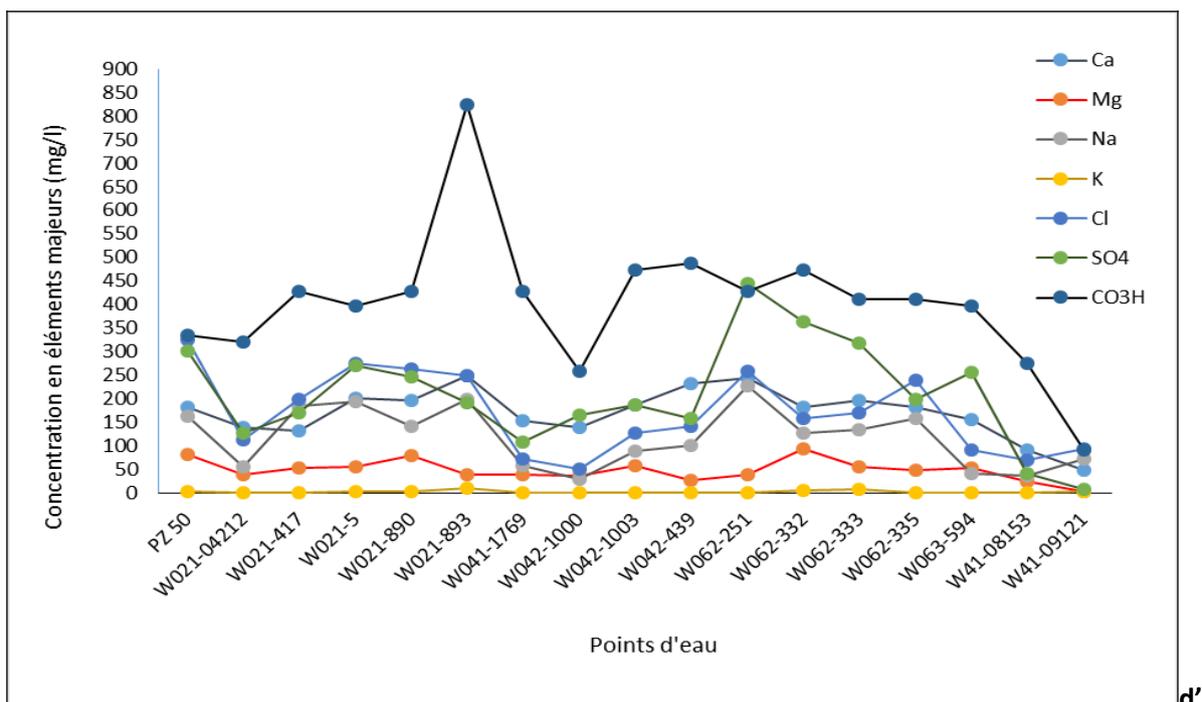
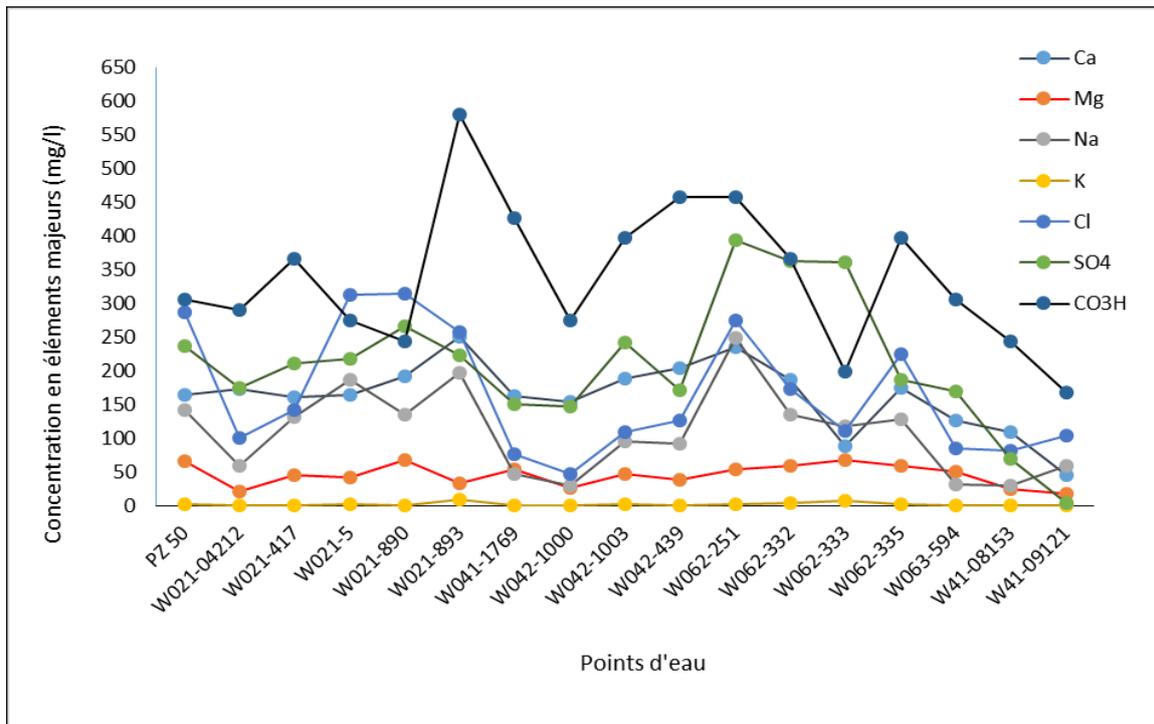
**Figure III.16 :** Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2006 basses et hautes eaux (a et a')



**Figure III.17 :** Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2008 basses et hautes eaux (b et b')



**Figure III.18 :** Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau Campagnes : 2016 basses et hautes eaux (c et c')



**Figure III.19 :** Variation des concentrations en éléments majeurs (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2018 basses et hautes eaux (d et d')

## 2. Les nitrates :

Ayant pour origine l'intensification agricole à travers l'utilisation excessive des engrais et des amendements chimiques, ainsi que les rejets des eaux usées dans les oueds.

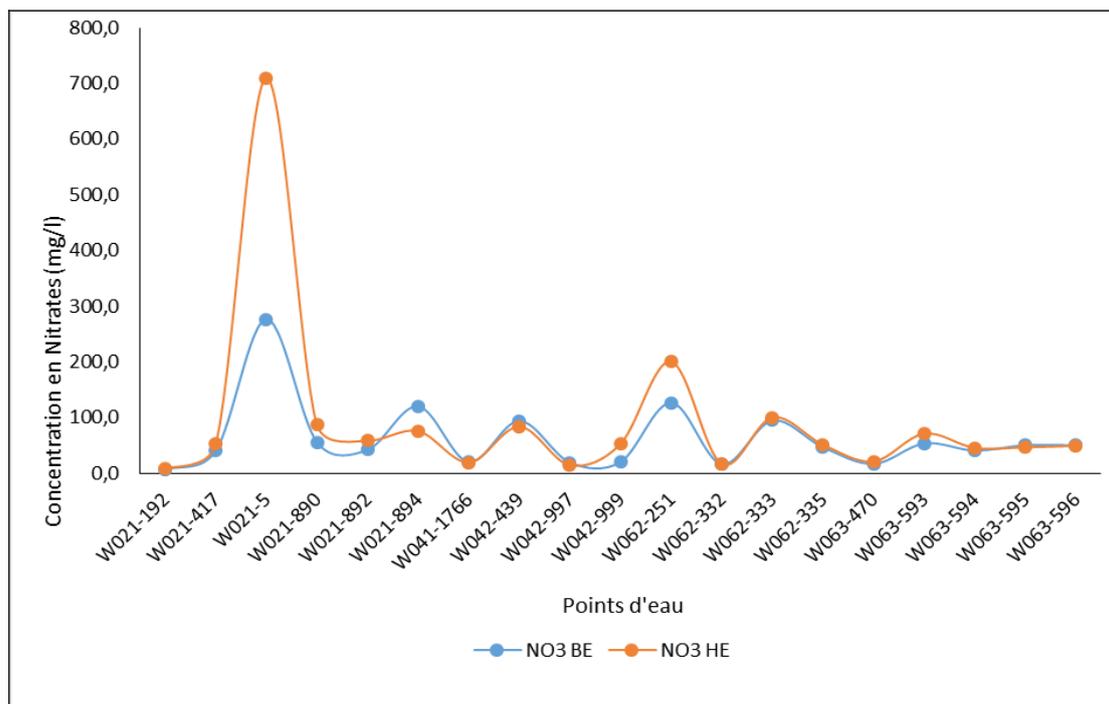
La contamination de la nappe par les nitrates se voit évoluer dans le Mitidja Est où les eaux souterraines qui subit les rejets industriels au niveau des régions de Rouiba et Réghaia.

Dans la Mitidja Ouest et centrale (régions de sidi rached, ahmer el ain, bougara ...), la contamination est plutôt d'origine agricole, puisque la Mitidja Ouest est connue pour sa vocation agricole.

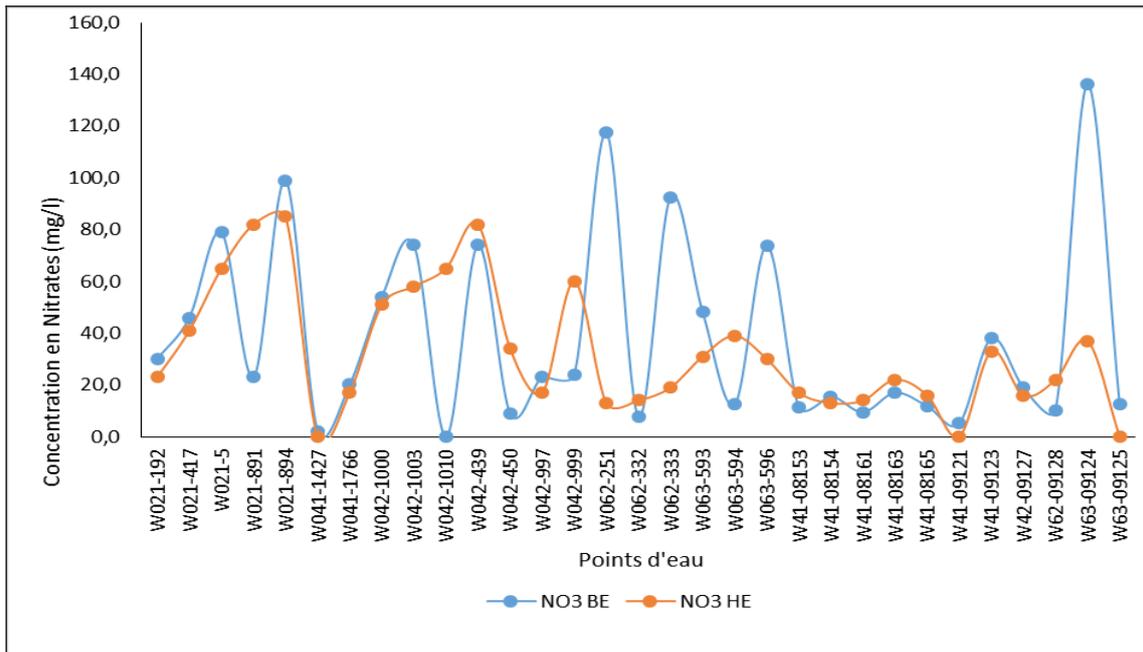
L'augmentation des concentrations en nitrates particulièrement en période des hautes eaux s'explique par le lessivage plus ou moins important des terres en période de pluie.

Les figures (III.20, III.21, III.22 et III.23) ci-dessous présentent l'évolution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines des quatre (04) campagnes étudiées et durant les deux périodes : hautes et basses eaux.

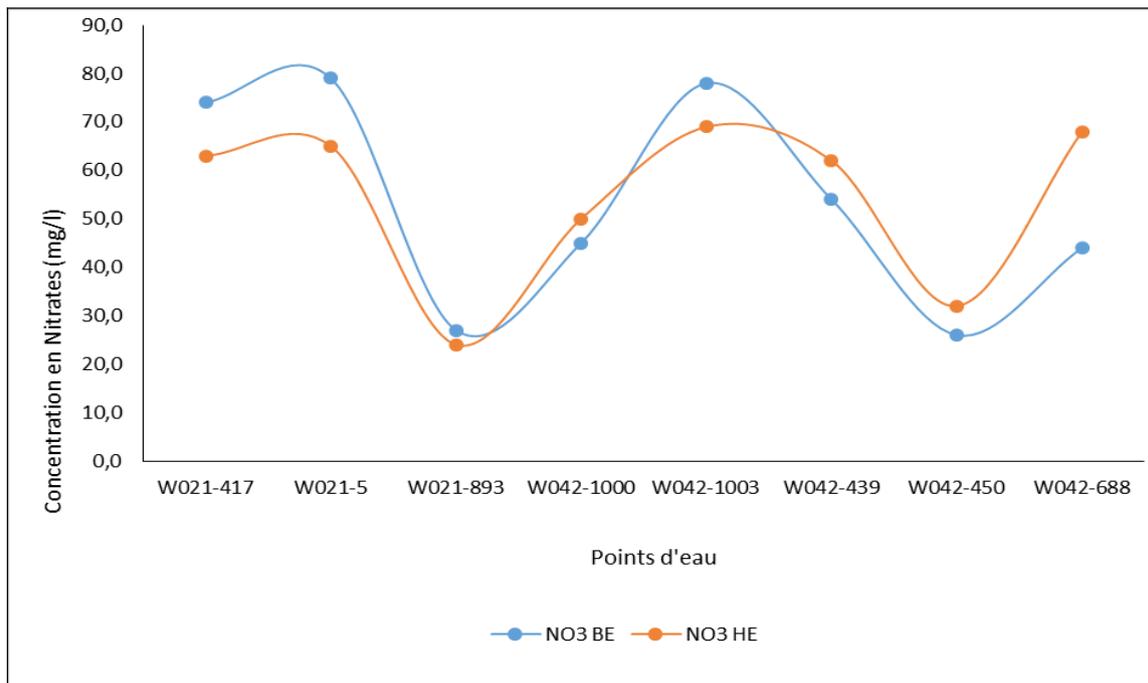
Les représentations graphiques montrent que les nitrates dépassent dans un grand nombre de points d'eau la norme de potabilité OMS qui est de 50 mg/l, avec des valeurs maximales pouvant atteindre les 710 mg/l au niveau du point d'eau (W021-5) en 2006 (hautes eaux). Notons que l'analyse complète de ce paramètre sera détaillée dans la partie 03, où nous avons utilisé l'approche géostatistique de la pollution par les nitrates, afin de mieux mettre en évidence et cerner cette problématique.



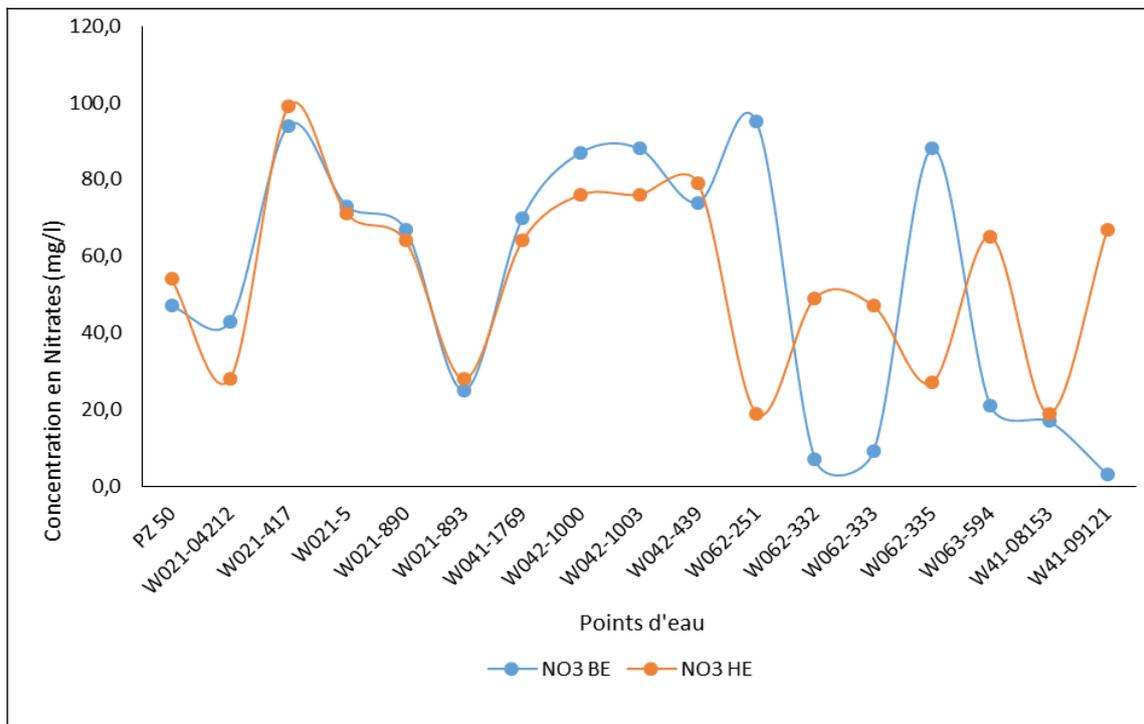
**Figure III.20 :** Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2006 basses et hautes eaux



**Figure III.21** : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2008 basses et hautes eaux



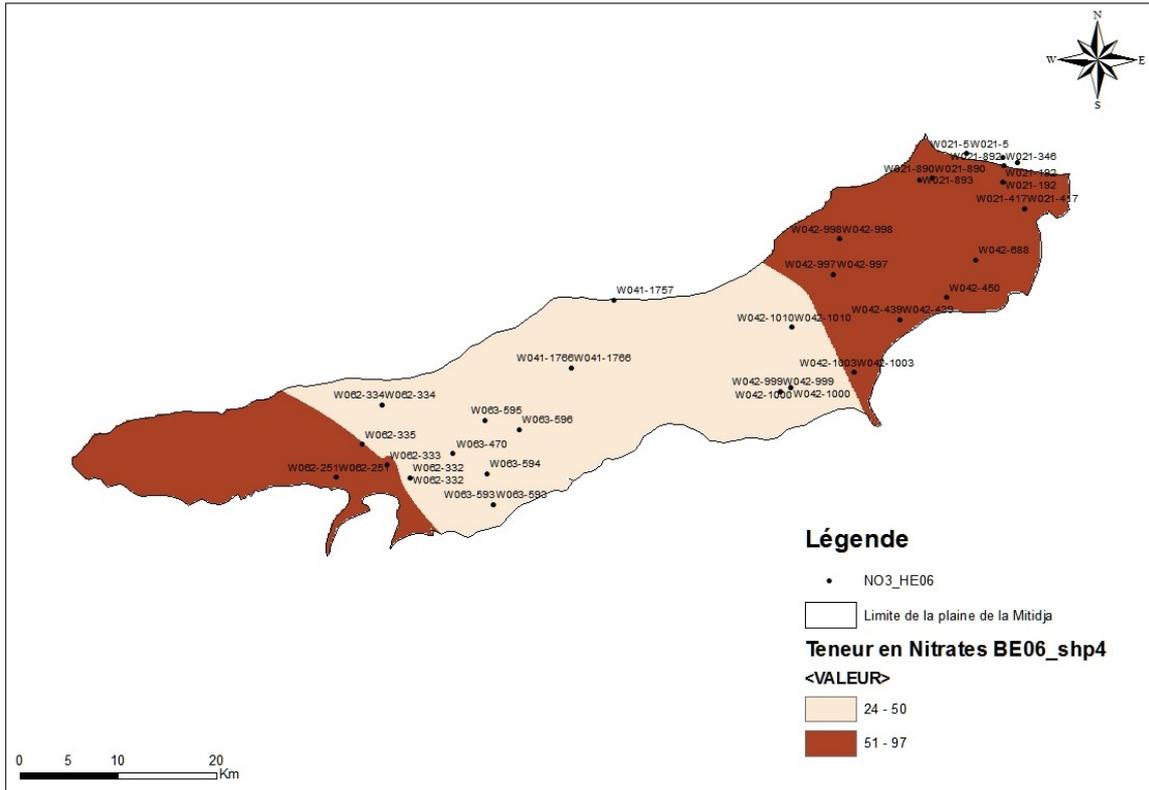
**Figure III.22** : Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2016 basses et hautes eaux



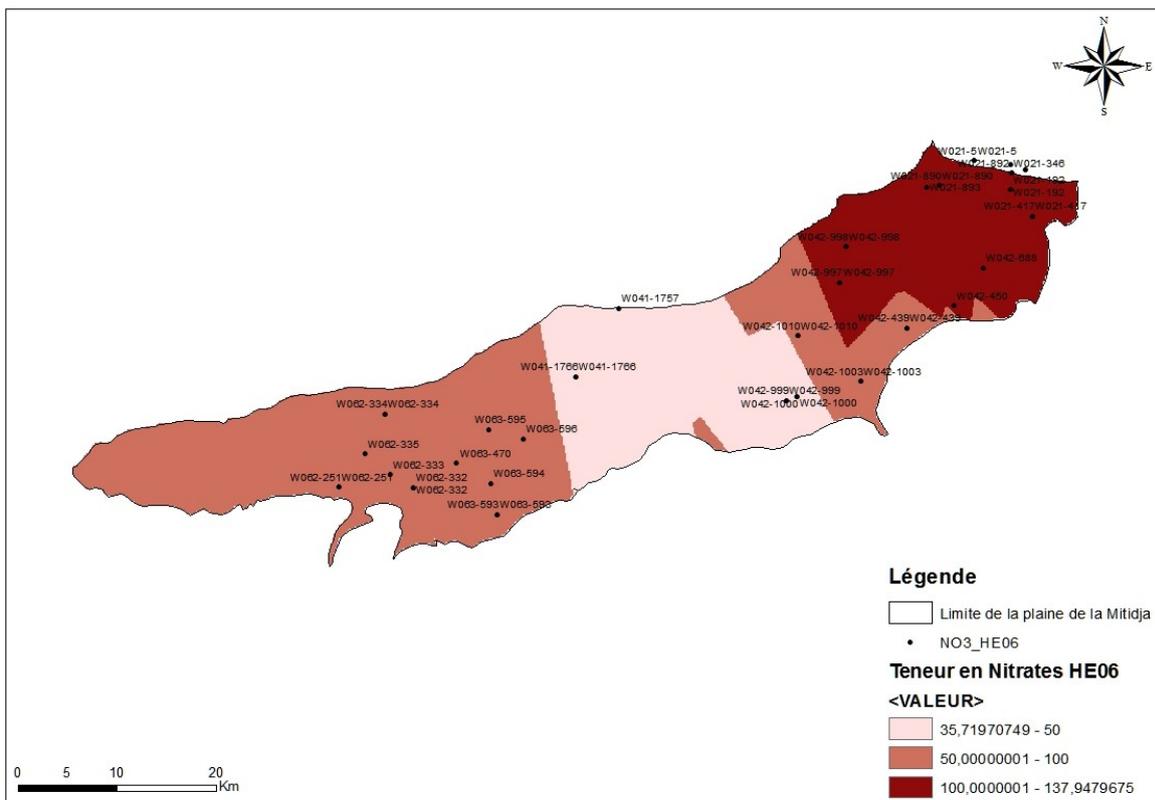
**Figure III.23 :** Variation des concentrations en Nitrates (mg/l) de l'eau  
Campagnes : 2018 basses et hautes eaux

A partir des cartes élaborées pour les quatre campagnes (2006, 2008, 2016 et 2018) et pour les deux périodes : hautes eaux et basses eaux ; afin de mettre en exergue l'évolution des teneurs en nitrates dans la plaine de la Mitidja, nous pouvons constater ce qui suit :

- La plaine de la Mitidja présente, durant la campagne de 2006, des teneurs en nitrates importantes et dépassant le seuil de 50 mg/l, dans sa région Est et à l'extrême Ouest où les concentrations varient entre 50 et 70 mg/l en basses eaux, et des concentrations alarmantes en hautes eaux dépassant les 100 mg/l à l'Est. Par contre, en 2016, durant la période des basses eaux, les nitrates dépassent le seuil de potabilité au niveau de la partie centrale de la Mitidja Ouest et à l'extrémité de la Mitidja Est. En hautes eaux nous remarquons que le seuil des 50 mg/l est dépassé sur toute la plaine.
  - En 2008, la période des basses eaux présente des teneurs en nitrates acceptables et inférieures au seuil de potabilité sur toute la zone d'étude. En hautes eaux, seules la partie centrale de la Mitidja Est où l'on note des valeurs supérieures à 50 mg/l.
- Les cartes de l'évolution des nitrates de la campagne 2018, montre de façon générale, que les nitrates dépassent les 50 mg/l sur la partie Est et centrale de la Mitidja, en période des basses et hautes eaux. Comparé à la campagne 2008, nous pouvons constater que la concentration en nitrates a augmenté en 2018.

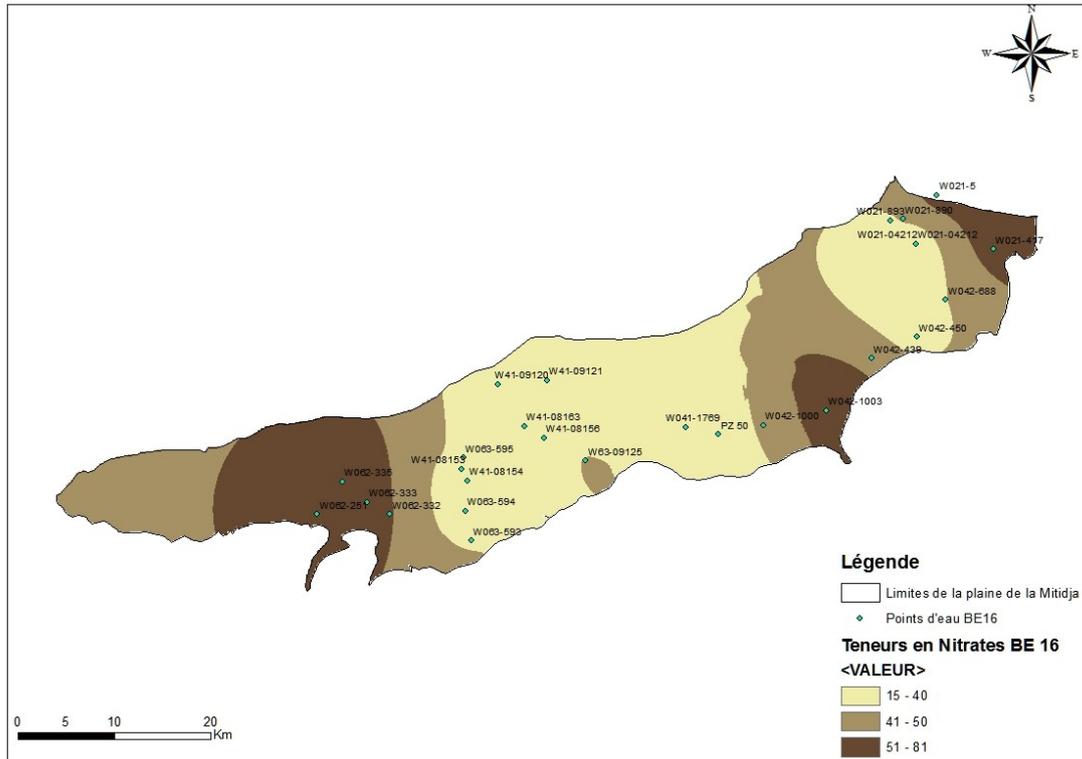


(a)

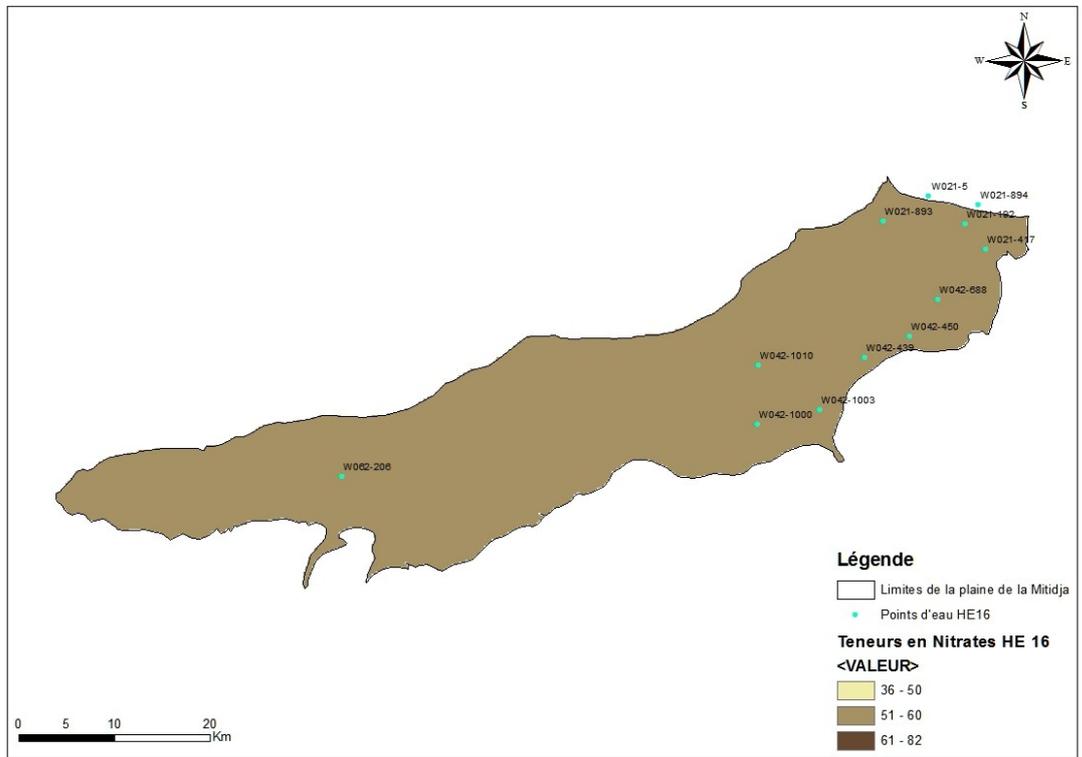


(a')

**Figure III.24 :** Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2006 , basses (a) et hautes (a') eaux

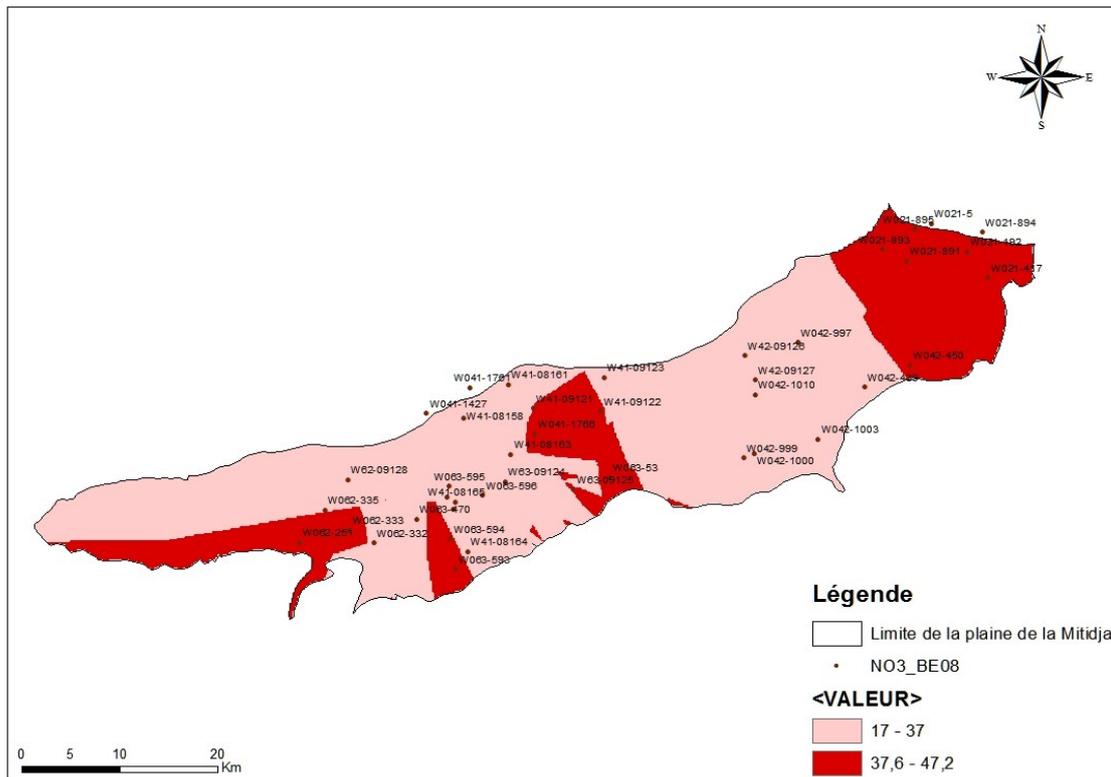


(b)

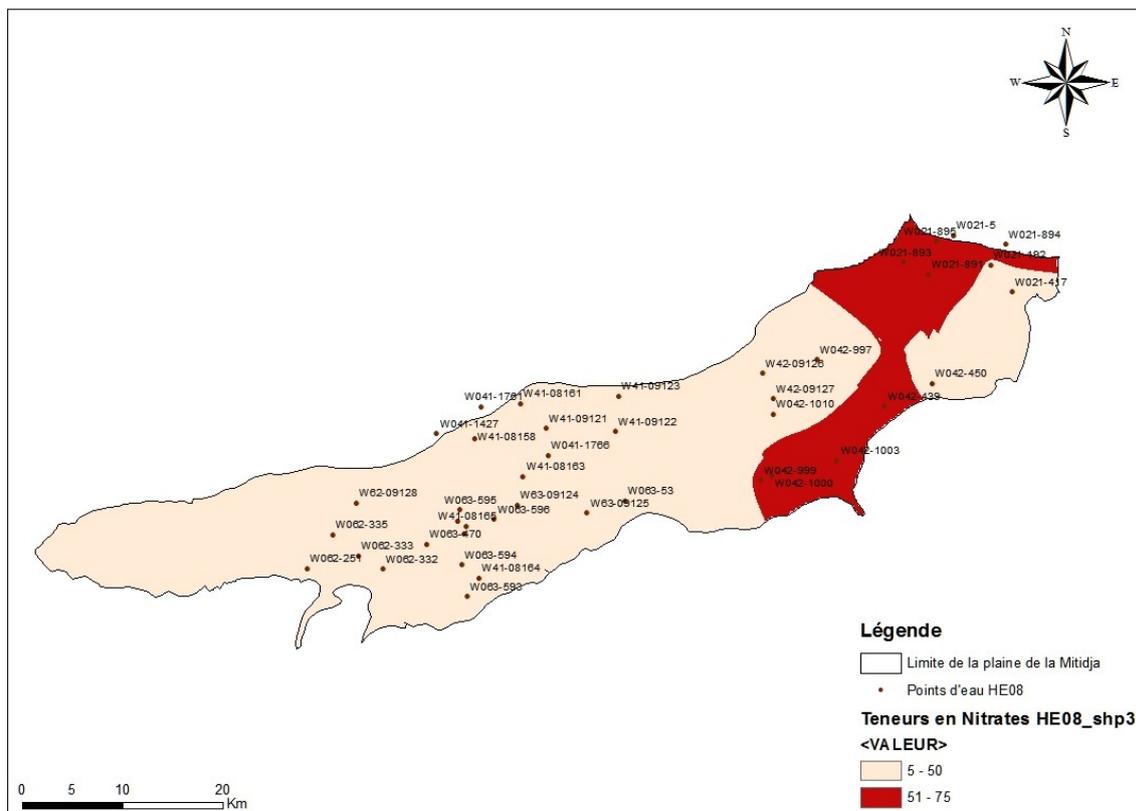


(b')

**Figure III.24bis** : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2016 , basses (b) et hautes (b') eaux

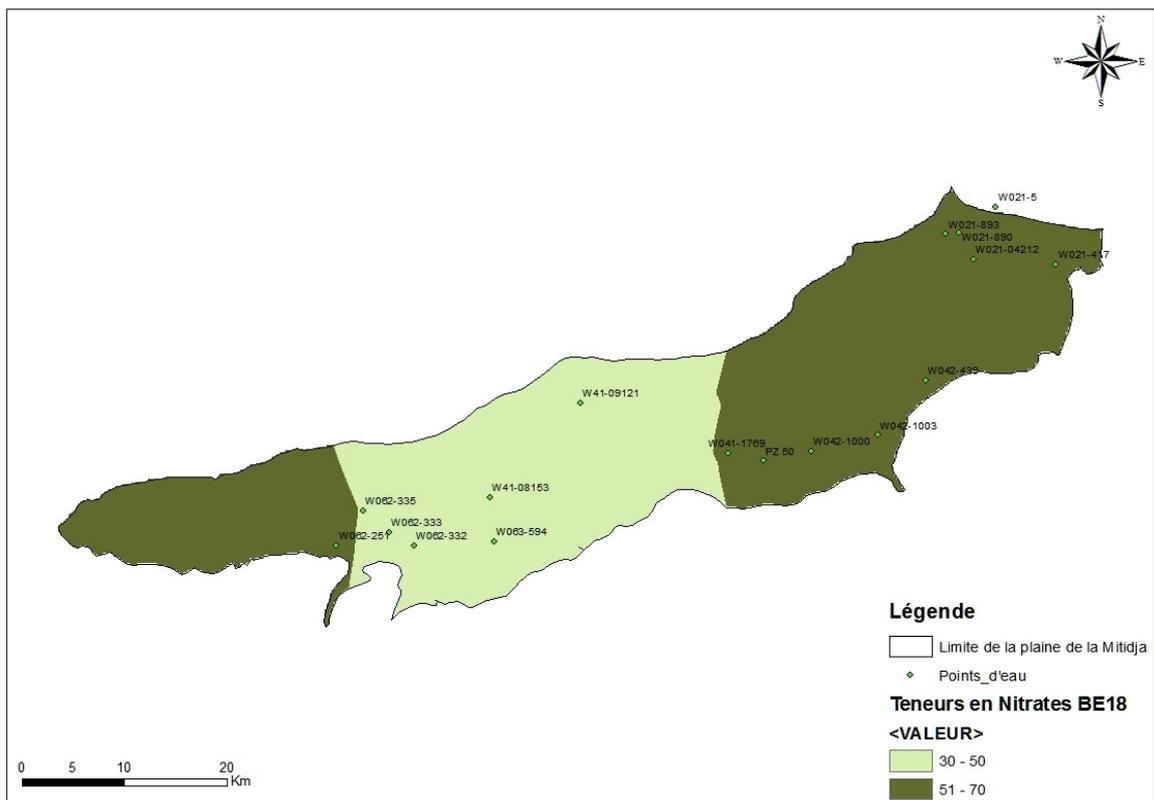


(c)

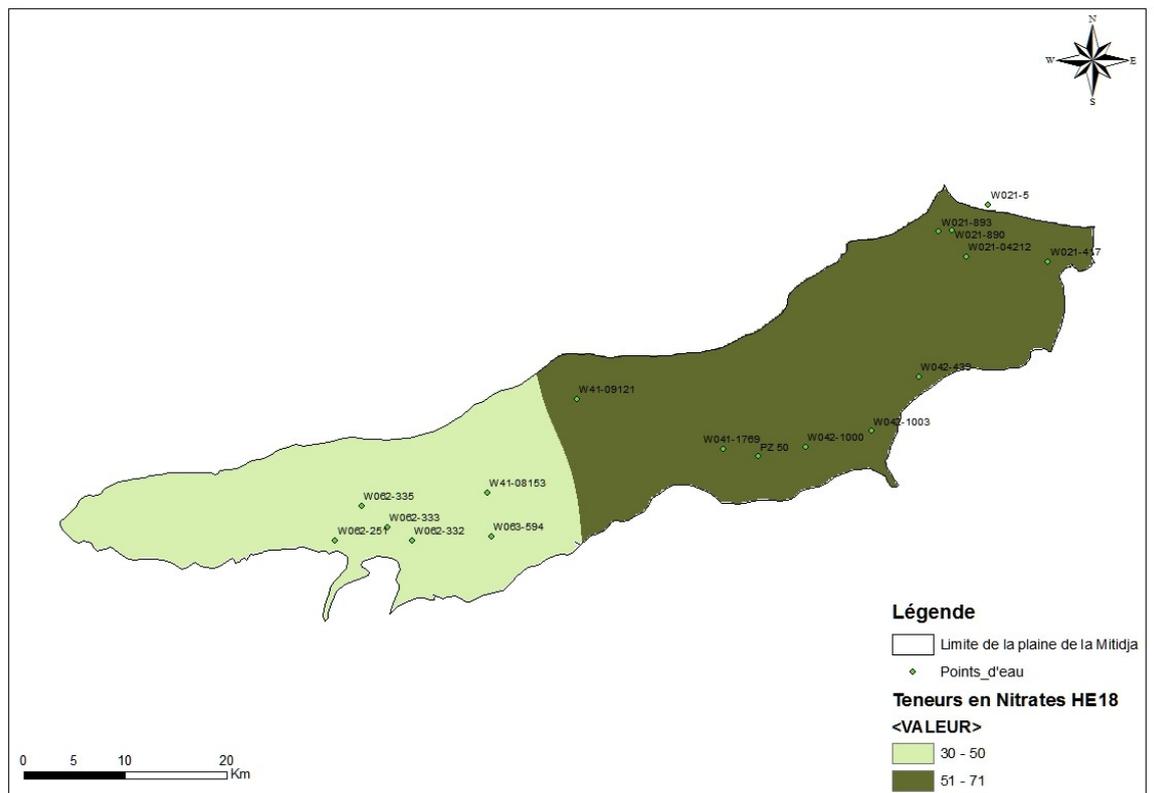


(c')

**Figure III.25 :** Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2008 , basses (c) et hautes (c') eaux



(d)



(d')

*Figure III.25bis : Cartes des teneurs en nitrates dans la Mitidja (année 2018 , basses (d) et hautes (d') eaux*

### III.1.3. Analyse Statistique des paramètres chimiques :

Le tableau 14 présente les statistiques descriptives élémentaires (nombre d'échantillons, minimum, maximum, moyenne, écart-type et coefficient de variation) des éléments chimiques composants l'eau souterraine, des quatre (04) campagnes d'analyse : 2006, 2008, 2016 et 2018 (basses et hautes eaux).

L'analyse statistique des éléments composants l'eau et caractérisant sa qualité (tableau 14 ci-dessus), nous permet de constater ce qui suit :

- Les valeurs de l'écart-type sont assez importantes (entre 39.33 mg/l et 76.41 mg/l, ceci confirme la variation des concentrations en Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ) observée précédemment. Les moyennes des quatre campagnes restent proches, avec des valeurs variant de 133.6 mg/l et 179.2 mg/l.
- Le Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ) présente des écarts-type faibles variant entre 16.05 mg/l et 27.3 mg/l. La concentration en cet éléments principalement causé par le lessivage des formations argileuses du Pliocène (Villafranchien).
- Pour le sodium  $\text{Na}^+$ , comme cité déjà précédemment, les valeurs les plus importantes sont observées au niveau de la zone côtière (la baie d'Alger) où le phénomène d'intrusion marine évolue de façon remarquable. Ceci est confirmé par les valeurs élevées des écarts-type obtenus.
- En ce qui concerne les chlorures, nous notons des valeurs très élevées des écarts-type variant entre 82.66 mg/l (en 2018 hautes eaux) et 145.6 mg/l (en 2006 basses eaux). Ceci confirme les graphiques présentés précédemment, où nous avons enregistré des concentrations très importantes en chlorures. Selon *Djouadar (2010)*, ceci s'explique par le lessivage des formations éruptives et des alluvions argileuses, des marnes de la formation d'El Harrach et le déversement des eaux usées dans les plaines.
- Les résultats de l'analyse statistique montrent très valeurs très très faibles de l'écart-type (variant entre 0.7 mg/l en 2008 et 3.77 mg/l en 2016 (basses eaux), qui est en concordance avec les très faibles teneurs en cet élément observé précédemment.
- Les teneurs en sulfates présentent des variations assez importantes durant les deux périodes et les quatre campagnes de mesure. Les écarts-type varient entre 36.9 mg/l en 2016 (basses eaux) et 125.8 mg/l en 2008 (hautes eaux). Ces teneurs élevés en sulfates sont dues, principalement, aux rejets industrielles non contrôlés, particulièrement dans la région Est de la Mitidja (Réghaia et Rouiba).
- Tout comme les sulfates, les bicarbonates présentes des teneurs et des écarts-types très élevés (73.0 mg/l en 2006 basses eaux et 141.82 mg/l en 2018 hautes eaux). Ceci s'explique par le lessivage des formations carbonatées durant la période des hautes eaux.

**Tableau 14 : Analyse statistique des ions majeurs pour les 4 années (2006, 2008, 2016 et 2018) et pour les deux périodes (Basses et Hautes eaux) (voir Annexe 01)**

Unités	mg/l								μ/cm	mg/l	°F		
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	CE	R.Sec	pH	TH	TAC
<b>2006 BE</b>													
Nbre d'obs	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
Min	68,1	8,2	10,0	0,0	25,0	20,0	225,7	5,9	510,0	328,0	7,0	24,4	18,2
Max	311,3	87,5	232,0	3,0	660,0	467,5	460,6	276,3	2908,4	1964,0	7,7	99,0	37,1
Moyenne	165,3	37,7	90,5	0,5	179,2	186,2	306,0	62,5	1467,2	1003,5	7,4	57,0	24,7
Ecart-type	62,3	21,2	58,9	0,9	145,5	118,8	73,0	60,8	642,2	457,0	0,2	20,8	5,9
CV (%)	37,7	56,1	65,1	198,1	81,2	63,8	23,9	97,3	43,8	45,5	3,1	36,4	23,9
<b>2006 HE</b>													
Nbre d'obs	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Min	63,3	13,2	17,0	0,0	25,0	41,0	237,9	8,4	550,0	361,0	6,9	26,3	19,2
Max	393,4	101,3	258,0	2,5	488,8	451,3	467,9	710,0	3176,8	2287,0	7,7	115,7	37,7
Moyenne	179,2	42,2	106,2	0,4	185,0	211,3	337,5	92,7	1726,6	1172,9	7,3	62,4	27,2
Ecart-type	76,41	20,47	63,86	0,78	119,05	112,71	74,70	151,42	734,75	507,49	0,21	23,12	6,02
CV (%)	42,6	48,5	60,1	173,5	64,3	53,3	22,1	163,3	42,6	43,3	2,8	37,1	22,1
<b>2008 BE</b>													
Nbre d'obs	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Min	15,0	2,0	30,0	0,0	28,0	30,0	41,2	0,0	520,0	389,0	6,6	4,6	3,3
Max	235,0	104,0	279,0	3,0	625,0	440,0	610,0	136,1	2974,7	1851,0	8,2	85,0	49,2
Moyenne	133,6	40,8	107,6	1,4	160,6	178,6	346,2	38,6	1457,9	945,1	7,3	50,4	27,9
Ecart-type	55,3	24,9	57,7	0,7	129,8	103,9	115,1	36,3	669,7	402,0	0,4	22,2	9,3
CV (%)	41,4	61,1	53,7	53,9	80,8	58,2	33,2	94,0	45,9	42,5	5,4	44,0	33,2
<b>2008 HE</b>													
Nbre d'obs	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Min	7,2	12,7	10,0	0,0	28,0	0,0	61,0	0,0	250,0	198,0	7,1	7,4	4,9
Max	276,5	145,6	189,0	8,0	490,0	500,0	607,6	85,0	2640,0	1756,0	7,8	103,0	49,0
Moyenne	145,5	43,8	62,7	0,8	145,5	180,4	325,7	32,8	1375,0	920,7	7,4	54,6	26,3
Ecart-type	72,6	27,3	41,9	2,3	112,8	125,8	105,7	24,1	645,1	427,4	0,2	24,3	8,5
CV (%)	49,9	62,4	66,8	269,3	77,6	69,7	32,4	73,6	46,9	46,4	2,6	44,5	32,4
<b>2016 BE</b>													
Nbre d'obs	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8,0	8	8
Min	107,4	2,5	38,0	1,0	39,0	145,0	213,5	26,0	824,0	590,0	7,8	36,8	17,5
Max	223,2	60,6	228,0	13,0	302,0	248,0	533,8	79,0	2 230,0	1 485,0	8,3	71,6	43,8
Moyenne	163,2	24,0	124,9	3,3	144,4	194,6	354,6	53,4	1 515,8	991,6	8,0	50,8	29,1
Ecart-type	39,33	16,89	51,16	3,77	94,93	36,90	105,86	20,29	405,71	258,30	0,19	11,84	8,68
CV (%)	24,1	70,4	41,0	115,9	65,8	19,0	29,9	38,0	26,8	26,0	2,3	23,3	29,9

Unités	mg/l								µ/cm	mg/l		°F	
2016 HE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	CE	R.Sec	pH	TH	TAC
Nbre d'obs	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8,0	8	8
Min	53,8	4,6	24,0	1,0	55,0	32,0	274,5	24,0	800,0	636,0	7,5	36,1	22,5
Max	242,3	78,5	176,0	10,0	331,0	253,0	634,4	69,0	2 530,0	1 557,0	7,9	75,0	52,0
Moyenne	171,4	46,7	95,0	2,4	151,9	162,4	426,6	54,1	1 784,6	1 143,1	7,7	62,3	35,0
Ecarts-type	61,07	22,75	49,46	2,91	104,83	82,97	112,50	16,15	489,06	269,11	0,15	13,04	9,22
CV (%)	35,6	48,7	52,1	122,6	69,0	51,1	26,4	29,8	27,4	23,5	1,9	20,9	26,4
2018 BE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	CE	R.Sec	pH	TH	TAC
Nbre d'obs	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Min	44,4	17,0	29,0	0,1	47,0	3,0	167,8	3,0	590,0	367,0	7,4	18,2	13,8
Max	251,0	68,2	248,0	9,5	314,0	394,0	579,5	95,0	2 440,0	1 635,0	8,3	80,8	47,5
Moyenne	163,2	45,2	109,4	2,1	166,2	210,6	338,2	53,4	1 539,1	1 009,6	7,9	59,6	27,7
Ecarts-type	48,94	16,05	61,53	2,50	88,93	97,03	103,46	32,69	475,95	325,41	0,26	15,17	8,48
CV (%)	30,0	35,5	56,2	119,7	53,5	46,1	30,6	61,2	30,9	32,2	3,3	25,4	30,6
2018 HE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	CE	R.Sec	pH	TH	TAC
Nbre d'obs	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Min	47,8	2,6	29,0	0,2	50,0	8,0	91,5	19,0	530,0	320,0	7,4	13,0	7,5
Max	249,5	93,9	226,0	9,0	326,0	445,0	823,5	99,0	2 390,0	1 660,0	8,3	84,8	67,5
Moyenne	171,0	48,0	117,9	2,1	170,2	209,1	403,7	54,8	1 637,5	1 087,4	7,9	62,8	33,1
Ecarts-type	50,67	21,60	61,43	2,32	82,66	108,45	141,82	23,00	528,77	354,59	0,22	18,28	11,62
CV	29,6	45,0	52,1	108,8	48,6	51,9	35,1	41,9	32,3	32,6	2,7	29,1	35,1

### III.1.4. Faciès chimiques :

Dans le but de définir le faciès hydrochimique différentes méthodes ont été mise en place par divers auteurs. Les plus communément utilisées sont : les diagrammes de *Piper*, de *Schoeller-Berkaloff* et de *Stabler*, qui feront l'objet d'une analyse dans cette partie.

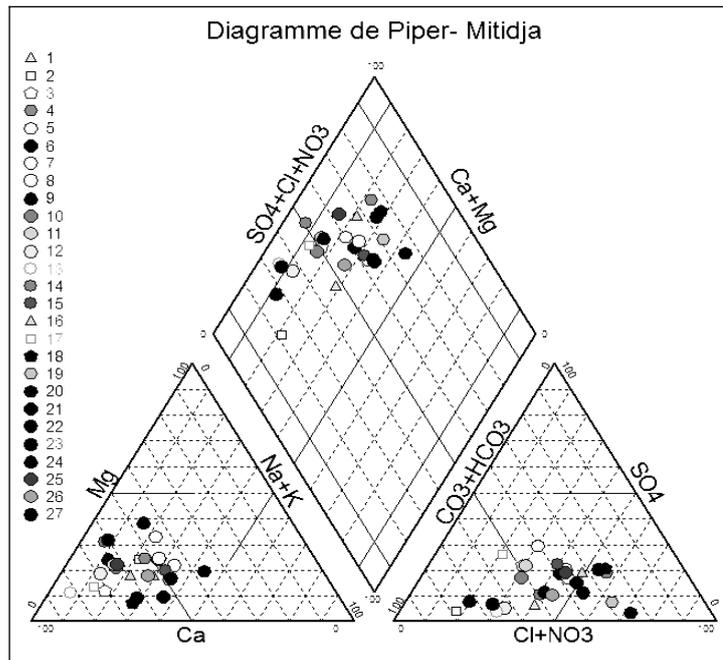
- **Le diagramme de PIPER**

Ce diagramme nous permet de définir le faciès chimique des eaux, et ceci en visualisant sur un triangle des anions et des cations.

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants. (*Djoudar, 2010*).

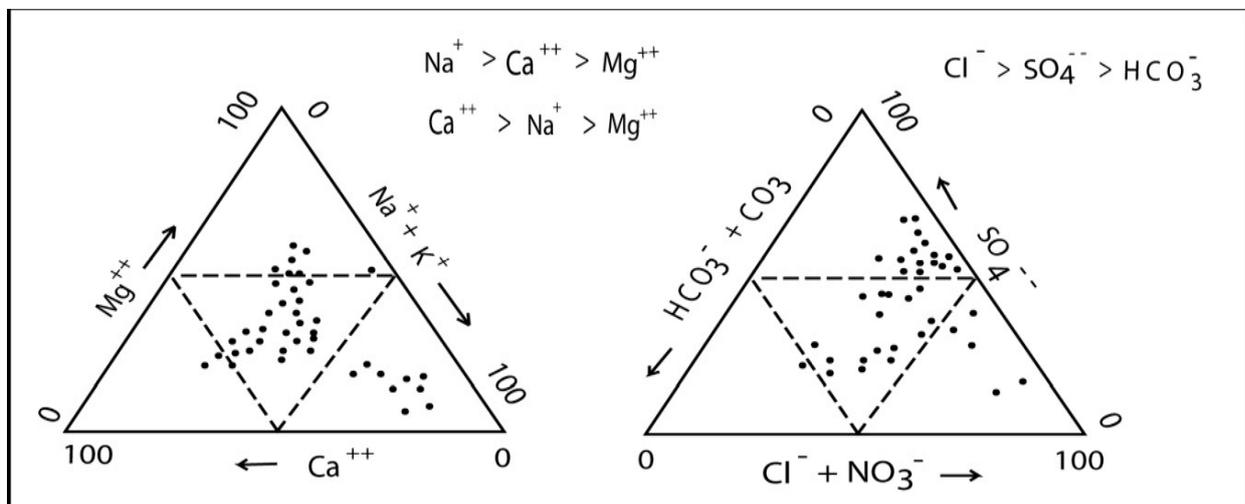
Le logiciel « Diagrammes » (conçu par *Roland Simler, Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004*), nous a permis de réaliser ces triangles et de déterminer le faciès chimique de l'eau, et ceci pour les quatre campagnes d'analyse (2006, 2008, 2016 et 2018 ; Basses et hautes eaux).

Les résultats obtenus montrent que le diagramme (figure III.26) met en évidence un faciès bicarbonaté calcique et magnésique, un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, et un faciès chloruré sodique et potassique.



**Figure III.25 :** Diagramme de Piper des hautes eaux 2018 de la nappe alluviale de la Mitidja

Les travaux de *Toubal de l'année 1992* (figure III.27) ont montré que sur toute la bande côtière une nette évolution chimique des eaux vers un faciès Sodique et Sulfaté. Cela prouve que déjà pendant ces années 90 les eaux souterraines ont été touchées par le phénomène d'intrusion marine.



**Figure III.27 :** Classification chimique des eaux selon piper en Juillet, 1992  
(*Toubal, 1998*)

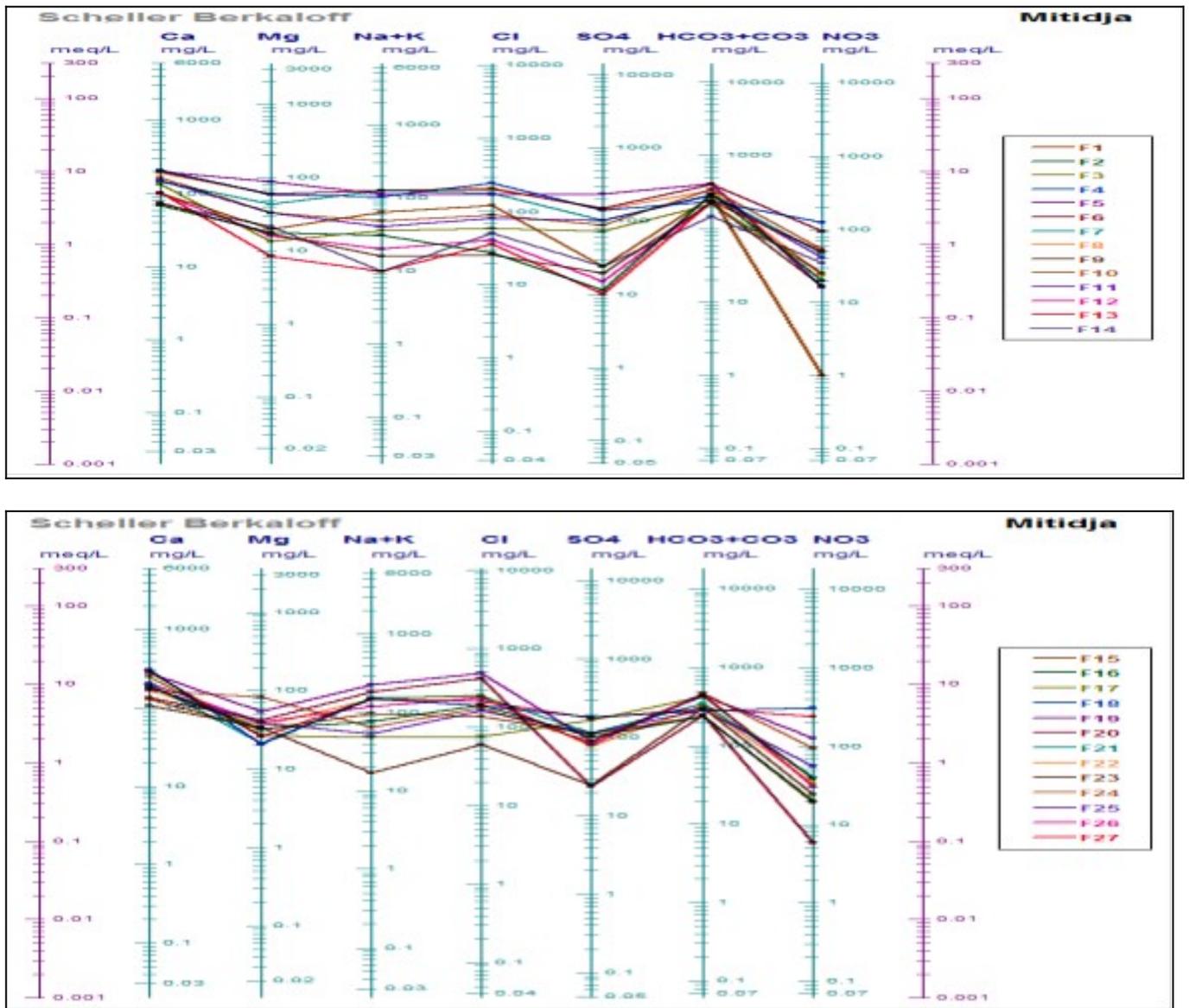
- **Le diagramme de Schoeller-Berkaloff :**

Etant un diagramme semi-logarithmique, le diagramme de *Schoëller-Berkaloff*, nous permet de mettre en évidence le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux, dont chacun est représenté par une ligne brisée qui est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques.

Un certain parallélisme entre les lignes représentant la majorité des éléments majeurs a été observé, ce qui atteste d'une même évolution du chimisme.

Ces diagrammes (figure III.28) mettent en évidence cinq faciès chimiques :

- bicarbonaté calcique.
- chloruré calcique.
- chlorurés sodique.
- bicarbonaté sodique.
- sulfaté magnésique



**Figure III.28 :** Diagrammes de Schoëller-Berkaloff pour les hautes eaux 2018 de la nappe alluviale de la Mitidja

• **Indice d'échange de base :**

Afin de déterminer le sens dans lequel se font les échanges entre les eaux et la lithologie du système aquifère, *Schoeller (1934)* a mis en place une formule permettant de calculer l'indice

d'échange de base (i.e.b) ou indice d'équilibre chloruré alcalin. Cette formule s'exprime comme suit : (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> : en méq/l)

$$eb = \frac{r_{Cl^-} - r_{(Na^+ + K^+)}}{r_{Cl^-}} \dots\dots\dots (17)$$

L'interprétation se fait en fonction des résultats obtenus comme suit :

**i.e.b** > 0 : les eaux échangent des ions Na<sup>+</sup> contre des ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> de la formation.

**i.e.b** < 0 : les eaux échangent des ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> contre des ions Na<sup>+</sup>, dans cas, il est préférable de recalculer l'indice d'échange de base en utilisant la formule suivante :

$$ieb = \frac{r_{Cl^-} - r_{(Na^+ + K^+)}}{r_{SO_4^{2-}} + r_{HCO_3^-} + r_{NO_3^-}} \dots\dots\dots (18)$$

**i.e.b** = 0 : Il n'y a pas d'échange ionique entre la roche et l'eau (état d'équilibre).

La figure ... ci-après montre, que pratiquement 80% de la Mitidja Est présente un i.e.b > 0 ceci s'explique par l'échange du Sodium de l'eau contre le Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> de l'aquifère (Na<sup>+</sup> d'eau de mer et Ca<sup>2+</sup> des eaux souterraines).

Dans la partie Ouest de la plaine environ 30 % des échantillons présentent un i.e.b < 0, mettant en évidence un échange entre le Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> de l'eau contre le Na<sup>+</sup> du système aquifère.

### III.1.4. Analyse factorielle :

#### III.1.4.1. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

Selon *Diday et al. (1982)* ; *Philippeau (1992)*, l'ACP a pour objectif la présentation graphiquement le maximum de l'information contenue dans un tableau de données. Ce tableau doit être constitué, en lignes, par des individus sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives (*Gaudin, 1982* ; *Diday et al, 1982* ; *Philippeau, 1992* ; *Deverin, 1992*).

Cet analyse nous permet de définir le comportement des différents éléments entre eux et d'en faire sortir une relation explicative du schéma obtenu.

Selon *Philippeau, 1992*, l'ACP permet ainsi de réduire les dimensions des espaces, en retenant les espaces à une dimension (des droites) c'est la plus utilisée, ou à deux dimensions (des plans).

#### III.1.4.2. Application de l'ACP à plaine de la Mitidja :

Afin de mieux interpréter statistiquement les données hydrochimiques obtenues à partir des résultats d'analyse des eaux souterraines prélevées au niveau de la plaine de la Mitidja, nous avons eu recours à la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode nous permet d'avoir une idée sur le rapport et la corrélation qui existe entre les différents éléments.

Le programme XLS.STAT nous a permis de réaliser les analyses statistiques qui seront présenté dans cette partie.

L'analyse a été effectuée sur des points d'eau prélevés et analysés par l'ANRH, pour quatre campagnes d'analyse (2006, 2008, 2016 et 2018) et durant deux périodes (basses et hautes eaux), et a concerné les teneurs de dix (10) éléments chimiques à savoir : Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CE et Résidu sec.

• **Analyse de la matrice de corrélation :**

Cette analyse (tableaux III.15, III.16, III.17 et III.18) nous permet de déterminer les éléments corrélables entre eux et présentant un coefficient de corrélation significatif. Les tableaux ci-dessous présentent les matrices de corrélation obtenues pour les quatre campagnes (2006, 2008, 2016 et 2018) durant les deux périodes d'analyse.

**Tableau III.15 :** Matrice de corrélation de la campagne 2006 basses (a) et hautes eaux(b)

Variables	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	CO3H mg/l	NO3 mg/l	CE mmhos	R.Sec mg/l
Ca mg/l	1									
Mg mg/l	0,362	1								
Na mg/l	0,732	0,432	1							
K mg/l	0,116	0,250	0,286	1						
Cl mg/l	0,655	0,450	0,912	0,226	1					
SO4 mg/l	0,742	0,531	0,424	0,054	0,226	1				
CO3H mg/l	0,582	0,615	0,478	0,388	0,474	0,439	1			
NO3 mg/l	0,699	0,043	0,412	-0,164	0,278	0,468	0,130	1		
CE mmhos	0,907	0,636	0,878	0,241	0,817	0,679	0,689	0,557	1	
R.Sec mg/l	0,908	0,641	0,860	0,209	0,791	0,700	0,648	0,599	0,989	1

**(a)**

Variables	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	CO3H mg/l	NO3 mg/l	CE mmhos	R.Sec mg/l
Ca mg/l	1									
Mg mg/l	0,227	1								
Na mg/l	0,476	0,217	1							
K mg/l	0,124	-0,085	0,279	1						
Cl mg/l	0,548	0,296	0,803	0,149	1					
SO4 mg/l	0,538	0,641	0,464	0,137	0,285	1				
CO3H mg/l	0,367	0,369	0,592	0,206	0,616	0,251	1			
NO3 mg/l	0,731	0,051	0,289	0,107	0,121	0,364	-0,098	1		
CE mmhos	0,834	0,459	0,810	0,209	0,767	0,709	0,539	0,566	1	
R.Sec mg/l	0,822	0,435	0,812	0,198	0,701	0,701	0,528	0,618	0,982	1

**(b)**

**Tableau III.16 :** Matrice de corrélation de la campagne 2008 basses (a) et hautes eaux(b)

Variables	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	CO3H mg/l	NO3 mg/l	CE mmhos	R.Sec mg/l
Ca mg/l	1									
Mg mg/l	0,705	1								
Na mg/l	0,741	0,518	1							
K mg/l	-0,141	0,141	0,015	1						
Cl mg/l	0,812	0,626	0,928	-0,036	1					
SO4 mg/l	0,624	0,786	0,514	0,121	0,507	1				
CO3H mg/l	0,853	0,739	0,552	-0,074	0,612	0,438	1			
NO3 mg/l	0,408	0,268	0,164	-0,015	0,256	0,099	0,350	1		
CE mmhos	0,937	0,782	0,870	-0,030	0,915	0,697	0,776	0,368	1	
R.Sec mg/l	0,925	0,804	0,864	-0,018	0,912	0,711	0,776	0,341	0,991	1

**(a)**

Variables	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	CO3H mg/l	NO3 mg/l	CE mmhos	R.Sec mg/l
Ca mg/l	1									
Mg mg/l	0,317	1								
Na mg/l	0,680	0,399	1							
K mg/l	0,396	0,065	0,649	1						
Cl mg/l	0,734	0,393	0,940	0,705	1					
SO4 mg/l	0,633	0,717	0,554	0,100	0,458	1				
CO3H mg/l	0,690	0,444	0,439	0,177	0,463	0,354	1			
NO3 mg/l	0,643	0,118	0,485	0,182	0,525	0,333	0,305	1		
CE mmhos	0,882	0,640	0,810	0,376	0,813	0,830	0,617	0,591	1	
R.Sec mg/l	0,875	0,655	0,813	0,392	0,818	0,787	0,681	0,598	0,982	1

**(b)**

**Tableau III.17 : Matrice de corrélation de la campagne 2016 basses (a) et hautes eaux(b)**

Variables	Calcium	Magnésium	Sodium	Potassium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	Nitrates	CE µ/cm	Résidu Sec
Calcium	1									
Magnésium	0,050	1								
Sodium	0,514	0,392	1							
Potassium	0,382	0,064	0,516	1						
Chlorures	0,698	0,379	0,806	0,417	1					
Sulfates	0,568	0,524	0,699	0,253	0,490	1				
Bicarbonates	0,556	0,255	0,474	0,516	0,236	0,580	1			
Nitrates	0,317	0,382	0,502	-0,073	0,393	0,564	0,187	1		
CE µ/cm	0,767	0,497	0,888	0,460	0,890	0,788	0,562	0,560	1	
Résidu Sec	0,738	0,518	0,868	0,462	0,814	0,833	0,643	0,490	0,976	1

**(a)**

Variables	Calcium	Magnésium	Sodium	Potassium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	Nitrates	CE µ/cm	Résidu Sec
Calcium	1									
Magnésium	-0,647	1								
Sodium	-0,064	0,555	1							
Potassium	0,356	0,040	0,669	1						
Chlorures	-0,062	0,509	0,850	0,634	1					
Sulfates	-0,114	0,630	0,462	-0,078	0,138	1				
Bicarbonates	0,854	-0,389	0,208	0,662	0,120	-0,020	1			
Nitrates	-0,466	0,625	0,174	-0,420	0,179	0,464	-0,507	1		
CE µ/cm	0,184	0,497	0,915	0,665	0,861	0,462	0,418	0,166	1	
Résidu Sec	0,062	0,599	0,916	0,602	0,885	0,483	0,258	0,310	0,964	1

**(b)**

**Tableau III.18 : Matrice de corrélation de la campagne 2018 basses (a) et hautes eaux(b)**

Variables	Calcium	Magnésium	Sodium	Potassium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	Nitrates	CE µ/cm	Résidu Sec
Calcium	1									
Magnésium	0,184	1								
Sodium	0,519	0,285	1							
Potassium	0,364	0,048	0,479	1						
Chlorures	0,474	0,362	0,930	0,366	1					
Sulfates	0,806	0,507	0,457	0,314	0,399	1				
Bicarbonates	0,690	0,290	0,461	0,528	0,317	0,469	1			
Nitrates	0,430	-0,185	0,123	-0,178	0,072	0,336	-0,006	1		
CE µ/cm	0,830	0,483	0,855	0,487	0,822	0,785	0,670	0,232	1	
Résidu Sec	0,778	0,489	0,850	0,457	0,823	0,755	0,656	0,148	0,975	1

**(a)**

Variables	Calcium	Magnésium	Sodium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	Nitrates	CE µ/cm	Résidu Sec
Calcium	1								
Magnésium	-0,117	1							
Sodium	0,519	0,210	1						
Chlorures	0,443	0,265	0,927	1					
Sulfates	0,699	0,250	0,465	0,310	1				
Bicarbonates	0,701	0,135	0,531	0,394	0,331	1			
Nitrates	0,526	-0,073	0,160	0,113	0,290	0,302	1		
CE µ/cm	0,786	0,281	0,897	0,846	0,697	0,657	0,369	1	
Résidu Sec	0,723	0,349	0,890	0,855	0,704	0,590	0,280	0,981	1

**(b)**

L'analyse obtenue des matrices de corrélation montre que la plupart des variables sont positivement corrélées.

Nous notons que sur toute la période d'étude (2006 – 2018), les éléments ayant une bonne corrélation entre eaux, présentent le même faciès chimique.

Ces derniers s'expliquent par la nature lithologique des bassins versants, par la contamination d'origine agricole et industrielle, et par le phénomène d'intrusion marine.

- **Analyse des valeurs propres :**

Exprimée en pourcentage des valeurs propres totales, cette analyse (tableaux III.19, III.20, III.21 et III.22) permet de définir la variation des individus sur l'axe correspondant, afin de mieux les interpréter.

Les axes de représentation sont considérés comme étant fiables, si la somme des pourcentages de variabilité est suffisamment élevée.

Par contre, si le pourcentage est faible il est conseillé de faire des représentations sur plusieurs couples d'axes afin de valider l'interprétation faite sur les deux premiers axes factoriels.

**Tableau III.19** : Analyse des valeurs propres de la campagne 2006, périodes : basses et hautes eaux.

2006 BE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	5,996	1,498	0,998	0,69	0,41	0,296	0,084	0,015	0,007	0,005
Variabilité (%)	59,96	14,98	9,98	6,89	4,12	2,96	0,84	0,15	0,065	0,05
Cumul %	59,96	74,94	84,92	91,81	95,93	98,90	99,73	99,88	99,95	100,0
2006 HE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	5,379	1,470	1,236	0,882	0,448	0,289	0,238	0,038	0,012	0,008
Variabilité (%)	53,79	14,70	12,36	8,82	4,48	2,89	2,38	0,38	0,12	0,08
Cumul %	53,79	68,49	80,85	89,67	94,16	97,04	99,42	99,80	99,92	100,00

**Tableau III.20** : Analyse des valeurs propres de la campagne 2008, périodes : basses et hautes eaux.

2008 BE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	6,404	1,151	0,954	0,734	0,461	0,177	0,079	0,024	0,010	0,007
Variabilité (%)	64,04	11,51	9,54	7,34	4,61	1,77	0,79	0,24	0,10	0,07
Cumul %	64,04	75,55	85,09	92,43	97,04	98,81	99,60	99,84	99,93	100,00
2008 HE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	6,264	1,417	0,928	0,695	0,341	0,222	0,092	0,024	0,010	0,007
Variabilité (%)	62,64	14,17	9,28	6,95	3,41	2,22	0,92	0,24	0,10	0,07
Cumul %	62,64	76,81	86,08	93,04	96,45	98,67	99,59	99,83	99,93	100,00

**Tableau III.21** : Analyse des valeurs propres de la campagne 2016, périodes : basses et hautes eaux.

2016 BE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	5,961	1,370	0,885	0,769	0,481	0,286	0,204	0,031	0,009	0,003
Variabilité (%)	59,61	13,70	8,85	7,69	4,81	2,86	2,04	0,31	0,09	0,03
Cumul %	59,61	73,31	82,16	89,86	94,67	97,53	99,57	99,88	99,97	100,00
2016 HE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	4,838	3,165	1,056	0,511	0,210	0,137	0,055	0,023	0,005	0,00004
Variabilité (%)	48,38	31,65	10,56	5,11	2,10	1,37	0,55	0,23	0,05	0,00
Cumul %	48,38	80,03	90,58	95,70	97,80	99,17	99,72	99,95	100,00	100,00

**Tableau III.22** : Analyse des valeurs propres de la campagne 2018, périodes : basses et hautes eaux.

2018 BE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeurs Propres	5,684	1,404	1,070	1,003	0,430	0,271	0,092	0,035	0,008	0,003
Variabilité (%)	56,84	14,04	10,70	10,03	4,30	2,71	0,92	0,35	0,08	0,03
Cumul %	56,84	70,88	81,57	91,60	95,91	98,61	99,53	99,88	99,97	100,00
20018 HE	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
Valeurs Propres	5,267	1,423	0,902	0,649	0,611	0,124	0,019	0,004	0,001	
Variabilité (%)	58,52	15,81	10,02	7,22	6,79	1,37	0,21	0,05	0,01	
Cumul %	58,52	74,32	84,35	91,56	98,36	99,73	99,94	99,99	100,00	

Dans le cas des quatre campagnes d'analyse, nous constatons que les informations sont expliquées par les deux premiers axes factoriels (F1 et F2), traduisant une représentation acceptable des variables et des individus. Les contributions des différents paramètres dans la formation de F1, F2 pour les basses et hautes eaux varient entre 48.38% et 64.04% et un total variant entre 80.03% et 75.55% de l'information expliquée.

- **Corrélation entre les variables et les axes principaux :**

La projection d'un point sur un axe est considérée comme fiable que si la somme des cosinus carrés sur les axes de représentation est proche de '1'. Le cosinus carré mesure la proximité entre un point et l'individu qu'il représente.

L'analyse de la corrélation entre les variables et les axes principaux présentée sur le tableau ci-après (tableau III.23) à travers l'analyse des cosinus carré, permet d'éviter des erreurs d'interprétation dues à des effets de projection.

Il est à noter que l'axe F1  $\text{Cos}^2$ , présente une très bonne corrélation avec la majorité des éléments : Ca, Na, Cl, CE et R.Sec, moyenne pour les éléments : Mg, SO4 et HCO3 ; et une mauvaise corrélation pour les éléments : K et NO3, en basses et hautes eaux.

**Tableau III.23** : Corrélation entre les variables et les axes principaux pour les campagnes 2006, 2008, 2016 et 2018 (basses et hautes eaux)

Corrélation entre les variables et les axes principaux									
2006 BE	F1	F2	F1 $\text{Cos}^2$	F2 $\text{Cos}^2$	2006 HE	F1	F2	F1 $\text{Cos}^2$	F2 $\text{Cos}^2$
Ca mg/l	<b>0,911</b>	-0,291	<b>0,829</b>	0,085	Ca mg/l	<b>0,821</b>	0,380	<b>0,674</b>	0,144
Mg mg/l	<b>0,648</b>	0,401	<b>0,419</b>	0,161	Mg mg/l	<b>0,494</b>	-0,154	0,245	0,024
Na mg/l	<b>0,870</b>	0,057	<b>0,756</b>	0,003	Na mg/l	<b>0,830</b>	-0,278	<b>0,689</b>	0,077
K mg/l	0,273	0,715	0,075	<b>0,511</b>	K mg/l	0,249	-0,133	0,062	0,018
Cl mg/l	<b>0,798</b>	0,151	<b>0,638</b>	0,023	Cl mg/l	<b>0,774</b>	-0,406	<b>0,599</b>	0,165
SO4 mg/l	<b>0,705</b>	-0,239	<b>0,497</b>	0,057	SO4 mg/l	<b>0,716</b>	0,193	<b>0,512</b>	0,037
CO3H mg/l	<b>0,708</b>	0,401	<b>0,502</b>	0,161	CO3H mg/l	<b>0,612</b>	-0,625	0,375	<b>0,391</b>

NO3 mg/l	<b>0,554</b>	-0,701	0,307	<b>0,492</b>
CE mmhos	<b>0,996</b>	-0,017	<b>0,992</b>	0,000
R.Sec mg/l	<b>0,990</b>	-0,070	<b>0,981</b>	0,005

NO3 mg/l	<b>0,537</b>	0,773	0,288	<b>0,597</b>
CE mmhos	<b>0,989</b>	0,063	<b>0,978</b>	0,004
R.Sec mg/l	<b>0,978</b>	0,113	<b>0,957</b>	0,013

2008 BE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Ca mg/l	<b>0,942</b>	-0,180	<b>0,888</b>	0,032
Mg mg/l	<b>0,834</b>	0,272	<b>0,696</b>	0,074
Na mg/l	<b>0,845</b>	0,006	<b>0,714</b>	0,000
K mg/l	-0,011	0,863	0,000	<b>0,745</b>
Cl mg/l	<b>0,897</b>	-0,061	<b>0,805</b>	0,004
SO4 mg/l	<b>0,726</b>	0,390	<b>0,526</b>	0,152
CO3H mg/l	<b>0,819</b>	-0,150	<b>0,670</b>	0,022
NO3 mg/l	0,377	-0,348	0,142	0,121
CE mmhos	<b>0,991</b>	-0,028	<b>0,981</b>	0,001
R.Sec mg/l	<b>0,990</b>	0,001	<b>0,981</b>	0,000

2008 HE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Ca mg/l	<b>0,890</b>	0,047	<b>0,792</b>	0,002
Mg mg/l	<b>0,605</b>	-0,589	<b>0,367</b>	0,347
Na mg/l	<b>0,874</b>	0,310	<b>0,764</b>	0,096
K mg/l	<b>0,502</b>	0,709	0,252	<b>0,502</b>
Cl mg/l	<b>0,882</b>	0,378	<b>0,778</b>	0,143
SO4 mg/l	<b>0,753</b>	-0,481	<b>0,567</b>	0,231
CO3H mg/l	<b>0,663</b>	-0,193	<b>0,440</b>	0,037
NO3 mg/l	<b>0,616</b>	0,159	0,379	0,025
CE mmhos	<b>0,979</b>	-0,134	<b>0,958</b>	0,018
R.Sec mg/l	<b>0,984</b>	-0,124	<b>0,968</b>	0,015

2016 BE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Calcium	<b>0,757</b>	0,300	<b>0,573</b>	0,090
Magnésium	<b>0,515</b>	-0,537	0,265	<b>0,288</b>
Sodium	<b>0,893</b>	0,002	<b>0,797</b>	0,000
Potassium	<b>0,512</b>	0,676	0,262	<b>0,457</b>
Chlorures	<b>0,830</b>	0,020	<b>0,689</b>	0,000
Sulfates	<b>0,836</b>	-0,218	<b>0,700</b>	0,047
Bicarbonates	<b>0,647</b>	0,356	<b>0,419</b>	0,127
Nitrates	<b>0,564</b>	-0,599	0,319	<b>0,359</b>
CE $\mu$ /cm	<b>0,988</b>	-0,028	<b>0,976</b>	0,001
Résidu Sec	<b>0,981</b>	0,001	<b>0,962</b>	0,000

2016 HE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Calcium	-0,007	0,856	0,000	<b>0,733</b>
Magnésium	<b>0,644</b>	-0,686	0,415	<b>0,471</b>
Sodium	<b>0,956</b>	0,021	<b>0,914</b>	0,000
Potassium	<b>0,646</b>	0,633	<b>0,417</b>	0,401
Chlorures	<b>0,887</b>	0,037	<b>0,787</b>	0,001
Sulfates	<b>0,511</b>	-0,397	0,262	0,158
Bicarbonates	0,257	0,878	0,066	<b>0,770</b>
Nitrates	0,269	-0,777	0,072	<b>0,604</b>
CE $\mu$ /cm	<b>0,970</b>	0,165	<b>0,941</b>	0,027
Résidu Sec	<b>0,982</b>	0,013	<b>0,963</b>	0,000

2018 BE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Calcium	<b>0,834</b>	0,403	<b>0,695</b>	0,162
Magnésium	<b>0,477</b>	-0,302	0,228	0,091
Sodium	<b>0,846</b>	-0,181	<b>0,716</b>	0,033
Potassium	<b>0,542</b>	-0,388	0,294	0,151
Chlorures	<b>0,797</b>	-0,217	<b>0,635</b>	0,047
Sulfates	<b>0,792</b>	0,308	<b>0,627</b>	0,095
Bicarbonates	<b>0,709</b>	-0,098	<b>0,502</b>	0,010
Nitrates	<b>0,208</b>	0,902	0,043	<b>0,813</b>
CE $\mu$ /cm	<b>0,995</b>	0,025	<b>0,991</b>	0,001
Résidu Sec	<b>0,976</b>	-0,043	<b>0,952</b>	0,002

2018 HE	F1	F2	F1 Cos <sup>2</sup>	F2 Cos <sup>2</sup>
Calcium	<b>0,813</b>	0,508	<b>0,661</b>	0,258
Magnésium	0,274	-0,637	0,075	0,405
Sodium	<b>0,881</b>	-0,281	<b>0,776</b>	0,079
Chlorures	<b>0,813</b>	-0,393	<b>0,660</b>	0,155
Sulfates	<b>0,709</b>	0,156	<b>0,503</b>	0,024
Bicarbonates	<b>0,698</b>	0,221	<b>0,488</b>	0,049
Nitrates	0,398	0,653	0,158	<b>0,427</b>
CE $\mu$ /cm	<b>0,996</b>	-0,047	<b>0,993</b>	0,002
Résidu Sec	<b>0,976</b>	-0,153	<b>0,952</b>	0,023

- **Analyse des cercles de corrélation ACP :**

Le cercle de corrélation est un graphique représentant les corrélations des variables avec les composantes principales (figures III.29, III.30, III.31 et III.32), et qui est défini par deux

composantes principales. Cette analyse permet de mettre en évidence les variables corrélées entre elles et par conséquent les ressemblances entre ces dernières et inversement.

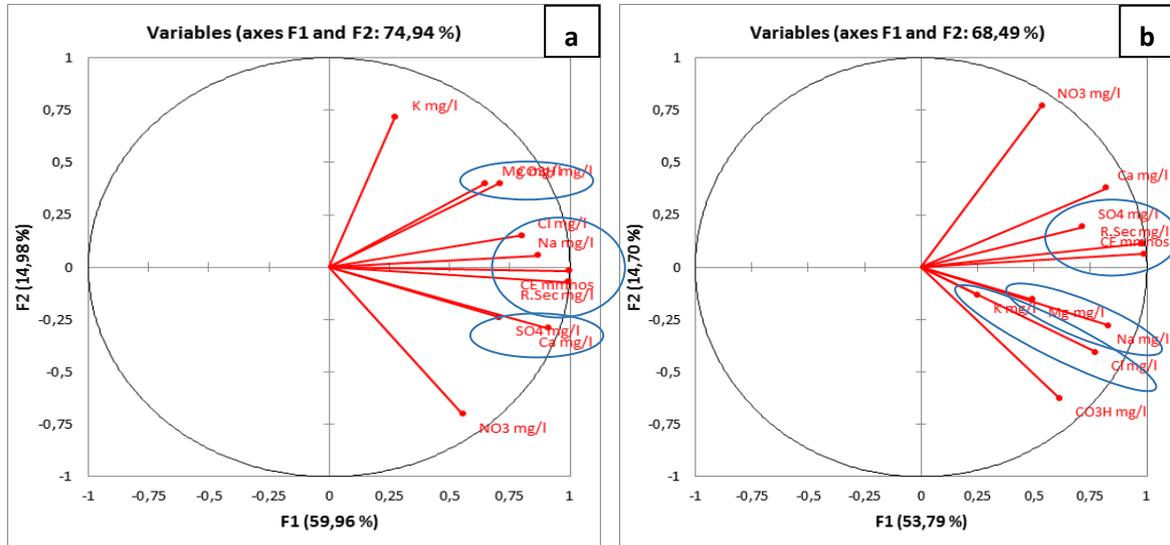


Figure III.29 : Cercle de corrélation, campagne 2006 (basses (a) et hautes (b) eaux).

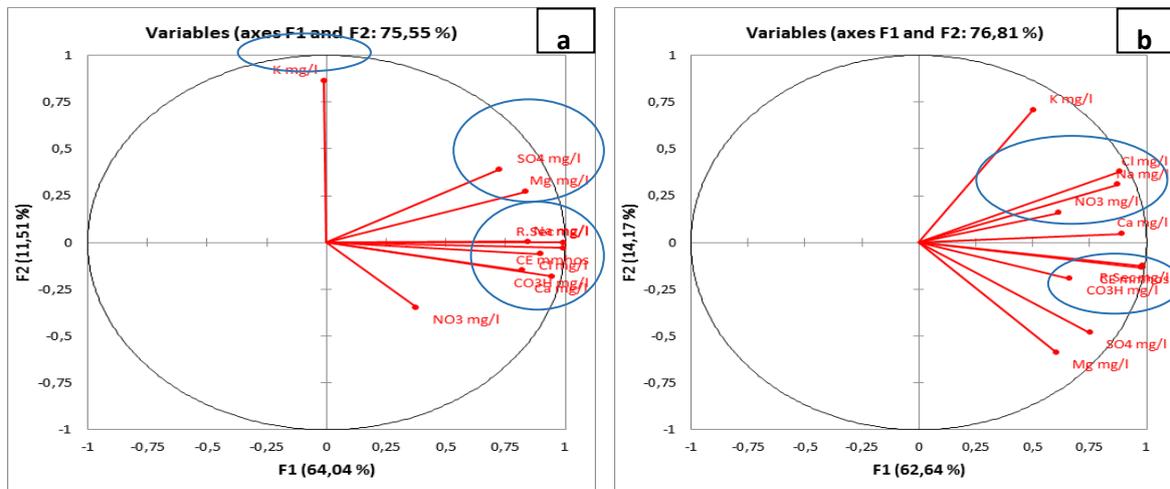
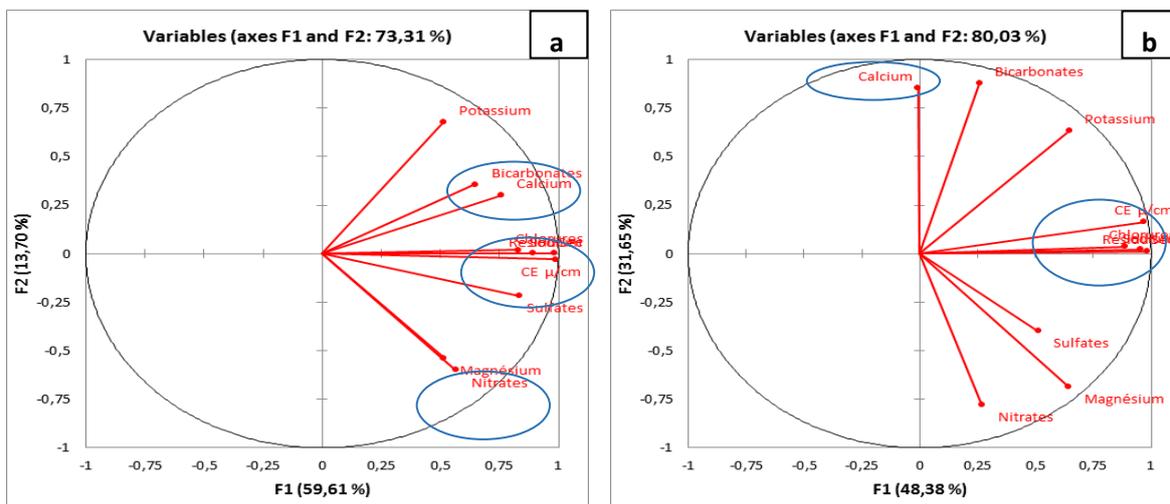
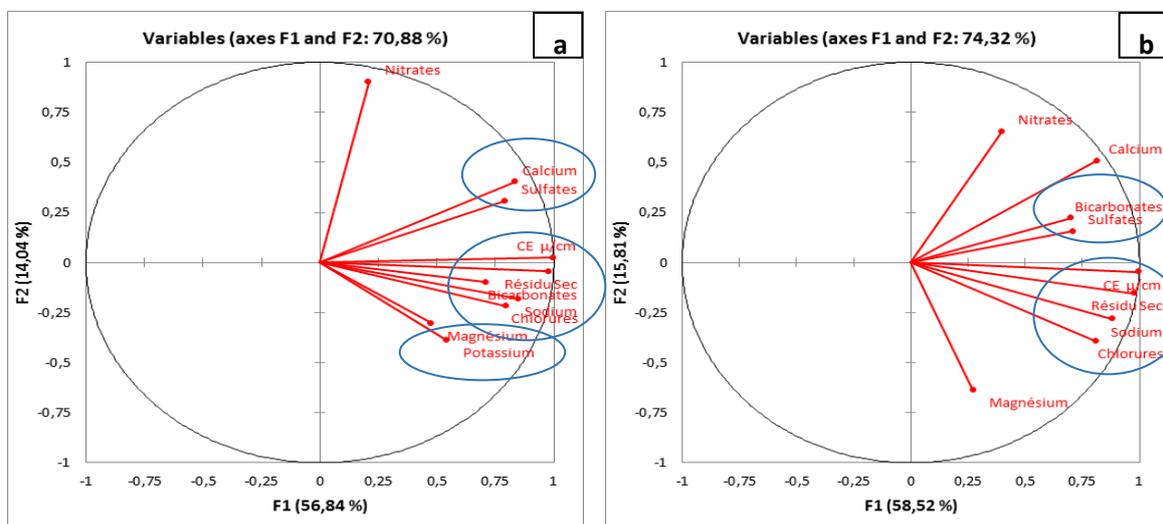


Figure III.30 : Cercle de corrélation, campagne 2008 (basses (a) et hautes (b) eaux)



**Figure III.31** : Cercle de corrélation, campagne 2016 (basses (a) et hautes (b) eaux



**Figure III.32** : Cercle de corrélation, campagne 2018 (basses (a) et hautes (b) eaux

**- Campagne 2006 :**

Le cercle formé par les axes F1 et F2 fournit un maximum d'information : 74.94 % (basses eaux) et 68.49 % (hautes eaux), soit 59,96 % et 53.79 % (respectivement, pour les basses et hautes eaux) pour l'axe F1 et 14,98 % (basses eaux) et 14.70 % (hautes eaux) pour l'axe F2. L'observation du cercle (figure III.51) montre que tous les éléments sont du même côté pour l'axe F1, en notant une bonne corrélation entre les éléments : Mg et HCO<sub>3</sub>, Cl Na CE et R.sec, SO<sub>4</sub> et Ca (basses eaux) ; SO<sub>4</sub> R.sec et CE, Mg et Na, K et Cl (hautes eaux).

**- Campagne 2008 :**

Pour cette campagne, les pourcentages d'inertie sont de 75.55% et 76.81% respectivement, pour les basses et hautes eaux sur les axes F1 et F2, soit des pourcentages 64.06% (basses eaux) et 62.64% (hautes eaux) pour l'axe F1 et 11.51% et 14.17% pour l'axe F2. L'observation du cercle (figure III.52) montre que tous les éléments sont du même côté pour l'axe F1 sauf le potassium (K) en basses eaux qui se trouve sur l'axe F2. Nous remarquons une bonne corrélation entre la majorité des éléments.

**- Campagne 2016 :**

Il est à noter pour cette campagne, que les axes F1 et F2 représentent un pourcentage d'inertie de 73.31% et 80.03% respectivement, en basses et hautes eaux. Soit des pourcentages sur l'axe F1 de 59.61% et 48.38%, et 13.70% (basses eaux) et 31.65% (hautes eaux) sur l'axe F2. La figure III.53 montre que tous les éléments sont du même côté pour l'axe F1 avec une bonne corrélation entre les éléments Ca et HCO<sub>3</sub>, Cl CE R.sec Na et SO<sub>4</sub>, Mg et NO<sub>3</sub> (basses eaux), et entre Cl R.sec Na et CE, SO<sub>4</sub> Mg et NO<sub>3</sub> avec le Ca qui se trouve sur l'axe F2.

**- Campagne 2018 :**

Le cercle formé par les axes F1 et F2 fournit un maximum d'information : 70.88 % (basses eaux) et 74.32 % (hautes eaux), soit 56.84 % et 58.52 % (respectivement, pour les basses et hautes eaux) pour l'axe F1 et 14,04 % (basses eaux) et 15.81 % (hautes eaux) pour l'axe F2. L'observation du cercle (figure III.54) montre que tous les éléments sont du même côté pour l'axe F1, en notant une bonne corrélation entre les éléments : Ca et SO<sub>4</sub>, CE R.sec Cl Na et HCO<sub>3</sub>, Mg et K (basses eaux) ; SO<sub>4</sub> HCO<sub>3</sub> et Ca, R.sec CE Na et Cl (hautes eaux).

On dira enfin que :

- L'axe principal F1 est représentatif et confirme les résultats de l'analyse de la matrice de corrélation présentés précédemment et une meilleure reconstitution de la variance.
- L'élément NO<sub>3</sub> n'est pas corrélé, dans la majorité des cas analysés avec les axes F1 et F2, ceci est expliqué par son origine anthropique (en particulier, issu des pratiques agricoles).

### III.4.2. Qualité de l'eau : aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation dépend, particulièrement, de deux paramètres principaux, à savoir : La Salinité exprimée par la conductivité électrique (CE) et l'alcalinité exprimée par le Sodium Adsorption Ratio (SAR). Ces deux paramètres agissent directement sur les cultures (la salinité) et sur le sol (l'alcalinité).

Nous avons eu recours au diagramme de Riverside (Annexe ...) afin de déterminer la qualité de l'eau d'irrigation. Le diagramme présente quatre (04) classes de salinité, et quatre (04) classe d'alcalinité qui représentée par le SAR. Il suffit donc, de positionner la valeur mesurée de la CE et celle calculée du SAR pour connaître la classe de l'eau et pouvoir conclure si cette eau est bonne pour l'irrigation.

Le SAR est calculé par la formule suivante :

$$\text{SAR} = [\text{Na}] / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})^2} \dots\dots\dots(19)$$

Avec :

Na, Mg et Ca des concentrations exprimées en mg/l ou méq/l.

Nous noton que les résultats obtenus du calcul du SAR sont < 6, eau de classe **S1**. Ces ne posent pas de problèmes du point de vu alcalinité.

De même pour la salinité, les eaux des différents points d'eau analysés au niveau de la Mitidja présente un niveau de salinité acceptable et font partie de la classe **C3**.

On peut donc déduire, que ces eaux sont dans la classe **C3S1** et considérées comme étant bonne à l'irrigation, en rajoutant une fraction de lessivage afin d'éviter les dépôts salins à long terme.

### Conclusion :

La plaine de la Mitidja jouit d'une superficie de 1450 km<sup>2</sup>, divisée en quatre sous bassins versants (El harrach, Hamiz, Mazafran et Nador de forme allongés (exception faite du Mazafran qui présente une forme ramassée), ce qui permet une bonne infiltration des eaux de pluie (ruissellement lent). La plaine est caractérisée par un important réseau hydrographique. Les altitudes se comprises entre 0 et 1 600 m avec un couvert végétal forestier abondant en amont, et une zone agricole sur la plaine, en plus de l'industrie et de la population (1287.3 hab/Km<sup>2</sup>).

Nous avons pu, à travers ce chapitre, définir les caractéristiques de la plaine de la Mitidja du point de vu morphologique, climatique, piézométrique et hydrochimique et en ayant effectué des analyses détaillées de ces derniers.

Le climat de la plaine de type méditerranéen, avec une saison sèche (mai à septembre) et une saison froide et humide (octobre à avril).

L'étude de la piézométrie nous permis de mettre en évidence la surexploitation de la nappe alluviale. Cette dépression est dû principalement, à une importante des forages et puits qui est passé, selon l'ANRH, de 1492 en 1970 à 4193 en 1997 (voir le triple). En plus l'augmentation du nombre de forages illicites (non inventoriés).

En ce qui concerne l'analyse hydrochimique, les campagnes d'études 2006, 2008, 2016 et 2018, on montrées que la nappe de la Mitidja se caractérise par un faciès chimique de type Chloruré, sulfaté calcique et magnésien.

Il est à noter que le phénomène d'intrusion marine persiste dans zone Est de la Mitidja, ce qui influe sur la qualité des eaux souterraines et les sols agricoles de la région.

De même pour les nitrates, puisque nous notons des valeurs élevées sur pratiquement toute la plaine, d'Est à l'Ouest, en notons des concentrations alarmantes dépassant la norme de potabilité de l'OMS qui est de 50mg/l. Cette pollution par les nitrates est d'origine anthropique, et est expliquée par une intensification agricole (application excessive des engrais azotés) surtout dans la partie Ouest, ainsi que les rejets urbains et industriels qui sont déversés directement dans les Oueds et en mer.

**Partie 03 :**  
**« Pollution des eaux souterraines les nitrates : Approche  
Géostatistique de l'évolution des teneurs en nitrates et des niveaux  
piézométriques dans la plaine de la Mitidja »**

## Synthèse bibliographique :

Le phénomène de la pollution des nappes phréatiques est un problème dont souffrent les eaux souterraines depuis des années. Cette pollution est le plus souvent d'origine anthropique de part l'occupation des sols (agriculture, élevage, urbanisme, et industrie).

Dans le but de mettre en évidence cette pollution des nappes, plusieurs études ont été menées par le monde, afin de mettre en exergue l'origine des polluants.

Selon *Benson et al. (2007)* ; *Babiker et al. (2004)*, la pratique de l'intensification agricole et l'élevage favorisent la pollution diffuse. D'autres études (*Tandia et al., 1999*; *Umezawa et al., 2008*; *Mattern et al., 2009*) ont montré que les problèmes d'assainissement (absence du réseau, ou bien un réseau défectueux) dans les zones urbanisées peut être une cause importante d'une pollution. Sur les sols cultivés, le lessivage des nitrates correspond à sa mobilisation en-dessous de la zone racinaire, permettant ainsi le transfert vers les eaux souterraines.

Constituant un élément essentiel pour le développement des cultures, les nitrates peuvent avoir plusieurs origines : sources minérales (air, précipitations, dépôts secs, minerais etc.), ou bien de la composition de la matière organique. La fertilisation des sols, l'élevage, l'apport et la valorisation des déchets organiques domestiques et industriels contribuent, énormément, à la présence de nitrates dans le sol.

Le type de sol et sa structure ont un rôle très important sur les propriétés hydrodynamiques de ce dernier. En effet, *Feyen et al. (1998)* affirment que la caractérisation de l'écoulement et la conceptualisation du transfert de soluté, et donc aussi de nitrate, sont largement déterminées par la structure du sol. Le transfert des nitrates se fait plus facilement sur des sols à texture grossière (sables et graviers) qui présentent des perméabilités importantes (faible rétention d'eau). *Petrovic (2004)* a trouvé que les quantités de nitrate lessivées étaient plus élevées pour le sable (9.1% de la quantité appliquée) suivi de la vase limoneuse (3.5%) puis du limon sableux (1.5%). Le volume des lixiviats pour le sable était plus important de 22% que pour les autres sols.

L'état de la surface du sol (relief, existence de croûte de battance etc.) joue également un rôle important dans le transfert. Dans une étude menée par *Mbalame et al. (1998)*, l'auteur présente des taux de lessivage plus importants sur des sols labourés que sur des sols non labourés.

Dans un sol agricole fertilisé, la richesse en nitrate potentiellement lessivable est très influencée par la nature et le rythme d'application du fertilisant. *Mantovi et al. (2006)* qui a mené une étude en Italie, montre que l'application des fertilisants (le plus souvent azotés) en grandes quantités dépassent la capacité de prélèvements des éléments nutritifs, tel que les nitrates, par les cultures conduisant à une accumulation de ce dernier dans le sol, en particulier en périodes chaudes. Dans une autre étude menée sur des sols tropicaux par *Stumpe et Vlek (1991)*, on a montré que l'utilisation non raisonnable d'azote peut conduire à une acidification et une dégradation de ces sols fragiles et favoriser ainsi le lessivage.

Les précipitations par leurs quantités, répartition et intensité affectent le régime d'écoulement dans les sols (*Vanderborgh et al., 1997*), jouant, ainsi, un rôle important dans le processus de transfert des nitrates qui s'effectue grâce à l'écoulement de l'eau. Les sols soumis à une pluviométrie importante sont donc plus susceptibles au lessivage de nitrate que les sols arides non irrigués.

Le système de drainage est très important puisqu'il a impact direct sur l'écoulement, selon *Banton et al. (1992)* Le temps nécessaire pour que le nitrate lessivé atteigne la nappe dépend largement de la profondeur du drainage. En effet, les nappes phréatiques peu profondes sont plus vulnérables à la pollution par le nitrate que les nappes très profondes ou captives.

Dans une étude sur la pollution des nappes en Virginie, *Bruggeman et al. (1995)* trouvent que la profondeur joue un rôle plus important que les autres caractéristiques des sites. Ce résultat a aussi été trouvé par *Mattern et al. (2009)* en Belgique dans l'étude de la pollution de la nappe du Bruxel par les nitrates. Les relations entre les nappes alluviales et les eaux de surface sont aussi mises en cause dans la dynamique de la pollution.

Les ouvrages de captages (forages, puits et piézomètres) favorisent, également, la pollution ponctuelle lorsque leur conception n'est pas adéquate (problème d'étanchéité) ou lorsque leur environnement n'est pas suffisamment protégé (absence d'aire de protection).(*Mamadou Sall, 2010*).

Le transfert des nitrates (lixiviation) du sol vers la nappe a pour principale conséquence la pollution des eaux souterraines, qui peut avoir un impact sur :

- la santé humaine et animale,
- la limite la disponibilité de l'eau potable,
- le plan agronomique, puisque le lessivage de nitrate prive les cultures d'azote et réduit l'efficacité de la fertilisation azotée.
- et l'utilisation en industrie. (ex. les industries agro-alimentaires).

Lorsque le nitrate atteint la nappe, les couches supérieures sont les premières à être polluées avec une concentration tendant vers celle de la recharge, si cette dernière reste constante. La distribution spatiale du nitrate dans la nappe est liée à la variabilité des propriétés du milieu souterrain (*Skonard et al., 1999*), à la variabilité des flux aux limites de la nappe, et à la variabilité des processus de transformation au sein de la nappe.

Une importante recharge de la nappe peut aussi diluer la concentration en nitrate lorsqu'il n'y a pas d'apport supplémentaire d'azote. *Arowolo (2005)* dans une région du Nigeria trouve une teneur en nitrate plus importante dans les puits durant la saison des pluies.

L'étude de près du phénomène de transfert des nitrates dans le système sol-nappe, nous permet de mieux cerner cette problématique et essayé de trouver des solutions à cette dernière, afin conserver la qualité de la ressource ou de diminuer la contamination des eaux, et ceci à travers :

- la compréhension des processus de transport de polluants à travers la zone vadose ;
- le suivi de l'évolution spatio-temporelle de l'évolution de la pollution ainsi que la quantification des flux de nitrate transférés du sol vers la nappe phréatique ; et son impact sur l'environnement.
- La localisation des zones vulnérables à la pollution par les nitrates.

L'implantation d'un réseau de mesure est souvent utilisée comme système de surveillance de la qualité des eaux souterraines. Une bonne représentativité des données requiert une bonne définition de l'unité d'échantillonnage, et une répartition adéquate de l'échantillonnage dans l'espace et dans le temps. (*Mamadou Sall, 2010*)

Dans l'objectif de protéger la qualité des eaux souterraines, il est nécessaire de mettre en place des méthodes d'évaluation permettant l'estimation des risques potentiels sur la qualité de l'eau. Pour cela, souvent on a recours à la modélisation en utilisant des modèles qui répondent aux critères voulus afin d'optimiser l'évaluation du risque et analyser des scénarii. Etant donc, des outils indispensables dans l'amélioration de la gestion des ressources, les modèles devraient se basés sur une bonne compréhension des processus contrôlant la pollution des eaux souterraines, en particulier, l'origine, le devenir et le comportement des polluants dans l'environnement (*Vanclooster et al., 2004*).

La modélisation devient donc, indispensable et permet de faire des simulations des scénarii, évitant ainsi la mise en œuvre d'expériences complexes et coûteuses. Cette modélisation est toujours basée sur des mesures expérimentales en amont afin de caractériser les processus essentiels du phénomène physique (calage) et en aval pour permettre la validation du modèle. Une modélisation efficace doit donc définir très précisément les phénomènes dont elle tient compte et surtout les limites de validité qu'elle se donne lorsqu'on envisage de négliger certains de ces phénomènes.

Ces modèles constituent aussi un complément d'informations pour les campagnes et mesures de terrain, qui souvent ne peuvent se faire qu'à des intervalles de temps relativement espacés et avec une résolution spatiale assez grossière. D'où le recours au système d'information géographique à travers l'utilisation d'outils tels que : ArcGis, QGis, Surfer .... ect, qui permettent d'appliquer une approche géostatistique (par la méthode du krigeage), afin d'obtenir une répartition spatio-temporelle, de faire une estimation et une évaluation de l'état de la pollution par les nitrates des eaux souterraines.

**CHAPITRE IV :**  
**« EVOLUTION DES NITRATES ET DES NIVEAUX DE LA NAPPE DE  
LA MITIDJA PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE »**

## **Introduction :**

La géostatistique est un outil permettant d'avoir des données présentées sous forme cartographiée ou en un réseau de mailles structurées en interpolant les observations dispersées et irrégulières sur l'ensemble du domaine d'étude.

La géostatistique est une science de plus en plus utilisée pour cartographier les variables régionalisées. Une des méthodes géostatistiques est le krigeage, qui a pour avantage de restituer la continuité spatiale de la variable à référence spatiale dans l'expression cartographique. Selon l'algorithme géostatistique, le krigeage, la règle de pondération et donc la carte qui en résulte sont directement déterminées par le comportement spatial des données de l'élément à analyser. L'analyse variographique est l'étape préalable au krigeage, elle est menée afin d'estimer la fonction de la continuité spatiale de la variable régionalisée (*Thomas, 2003*).

Les méthodes statistiques, géostatistiques et stochastiques sont souvent utilisées pour la spatialisation des données obtenues dans une région (*Kolpin et Goolsby, 1995; Mattern et al., 2008*).

Ces méthodes nécessitent un certain nombre d'information avec une bonne répartition dans le temps et dans l'espace, afin d'obtenir des résultats fiables.

Selon *Webb et Lilburne (2005)*, qui mettent l'accent sur l'importance des conséquences de l'incertitude de mesure associée à la cartographie des sols sur l'évaluation des risques environnementaux. Les mesures réalisées sont souvent espacées dans la zone faisant l'objet d'étude et dans le temps.

Utilisant différentes techniques d'interpolation (Krigage-CoKrigage, distance inverse ... etc), la géostatistique s'appuie sur l'hypothèse d'auto-corrélation spatiale des variables, permettant ainsi d'estimer les valeurs probables dans des endroits où la mesure n'est pas disponible (*Goovaert, 1997*).

La géostatistique, par opposition à la modélisation déterministe, choisit délibérément un cadre probabiliste en proposant un modèle qui considère le phénomène d'observation comme étant une réalisation aléatoire. Ce processus est représenté par une fonction aléatoire  $Z(x, y, t)$  où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées géographiques et où  $t$  le temps (*Boufekane, 2017*).

Selon *Delholmme (1976)*, plusieurs champs de variables hydrologiques possèdent une structure spatiale et relève donc des méthodes géostatistiques (Charges hydrauliques, transmissivité, épaisseur des couches aquifères, lame d'eau précipitée, ...etc).

Certains auteurs proposent des procédures pour optimiser la conception des réseaux d'échantillonnage avec des méthodes géostatistiques (*Yfantis et al., 1987; van Groenigen et Stein, 1998; Di Zio et al., 2004*). *L'étude de Yfantis et al. (1987)*, permettant par exemple un choix de la forme de la grille (triangle, carré, hexagone) en tenant compte de la densité d'échantillonnage et de l'importance des valeurs ponctuelles élevées du taux de polluant (effet pépite). Mais d'après van Groenigen et Stein (1998), la méthode d'échantillonnage en grille peut être limitée par des contraintes d'ordre pratique.

L'analyse géostatistique se fait en deux phases :

- L'analyse spatiale de la variable étudiée à travers la « variographie » (ex. la concentration en nitrates et l'évolution du niveau piézométrique faisant l'objet la présente étude) ;
- Et une « prédiction » spatiale en utilisant le Krigeage.

Le recours aux systèmes d'information géographique (SIG) permet la représentation des résultats obtenus de l'analyse statistique sur toute la zone d'étude.

#### IV.1. Aperçu Bibliographique et travaux antérieurs :

L'application de l'approche géostatistique dans l'étude de l'environnement et de la pollution des eaux de surface ou souterraines, est en soit une « modélisation » basée sur la caractérisation spatiotemporelle de la pollution à grande échelle, et l'étude de relations entre la pollution et d'autres paramètres environnementaux.

Techniquement, la géostatistique utilise également une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. De plus, elle permet d'intégrer des informations auxiliaires dans l'estimation. Ces avantages font considérablement améliorer les estimations dans le contexte spatial.

Une grande diversité d'applications au sens large, la « géostatistique environnementale » recoupe des disciplines variées, ayant pour objet de caractériser ou de quantifier les ressources renouvelables, s'exprime dans des champs d'applications comme la géologie, l'océanographie, la météorologie, le génie civil, l'environnement, la qualité de l'air et des sols, la santé, ...etc.

Les travaux précurseurs remontent à *Delhomme (1976)* en hydrogéologie ou *Guibal (1973)* et *Marbeau (1976)*, en agronomie forestière, (*Webster et al., 1989 ; Almeida et al. 2001, Pereira et al., 1999*) dans le recensement de certaines espèces végétales ou animales, en halieutique par *Petitgas (1991)*, et *Grzebyk et al. (1994)* en pédologie afin cartographier la profondeur de différents horizons, classifier des sols sur une parcelle ou quantifier des paramètres physico-chimiques pour l'agriculture de précision ; et également en climatologie pour cartographier des champs de températures (*Gohin, 1989*) ou de pluies (*Biau et al. 1999 ; Raspa et al. 1997*). Le couplage des techniques de SIG et la géostatistique offrent des outils puissant et précis pour la cartographie et l'analyse spatiale des propriétés des eaux et de leurs indicateurs. (*Escadafal et al, 1988 et 1991; Merzouk et al., 1990; Chikhaoui et al., 2004; Bannari et al., 2008 in Koussa 2018*)

Selon *Djoudar (2010)*, La mise en œuvre des techniques d'estimation géostatistiques exige une analyse préalable approfondie des données expérimentales, afin de bien cerner les caractéristiques de ces données, et de décrire et modéliser la structure spatiale de la variable étudiée.

La géostatistique nous donne comme résultats principaux une analyse cohérente des données, les incertitudes et les erreurs qui les entachent. Ce qui nous permettra à la fin de pouvoir établir des cartes par krigeage et de quantifier l'incertitude des estimations des différents points analysés.

*Géosipol (2005)* a défini quatre (04) étapes importantes dans une étude géostatistique :

- **Analyse structurale** (*Analyse exploratoire de données*)
- **Analyse variographique.**
- **Interpolation (généralement, par Krigeage).**
- **Génération des cartes des teneurs et des incertitudes :** *La carte de teneur permet d'avoir un outil d'aide à la décision concernant la répartition spatiale de cette*

teneur. La carte des incertitudes donne une appréciation (estimation) de l'erreur de la teneur concernant les différents points.

## IV.2. LE KRIGEAGE :

Le Krigeage est une méthode d'estimation et d'interpolation linéaire qui porte le nom de famille de l'ingénieur minier sud-africain [Danie G. Krige](#). Il représente un estimateur linéaire sans biais optimal obtenue par combinaison linéaire des informations disponibles.

Cette méthode permet d'estimer la valeur du phénomène étudié en d'autres points que ceux échantillonnés sur le terrain. La précision de cette estimation dépend de plusieurs facteurs :

- Nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point ;
- Position des échantillons ;
- Distance entre les échantillons et le point ou le bloc dont on veut estimer la valeur ;
- Continuité spatiale de la variable étudiée.

Il existe plusieurs types de krigeage : krigeage universel, krigeage simple, et krigeage ordinaire. Le krigeage ordinaire est le plus fréquemment utilisé en pratique car les hypothèses de départ sont moins contraignantes par rapport aux autres.

La théorie se développe d'abord dans un monde idéal où la moyenne et la covariance sont connues ; le krigeage simple jouit alors d'un certain nombre de bonnes propriétés : orthogonalité de l'estimateur et de l'erreur d'estimation, non biais conditionnel, identité avec l'espérance conditionnelle dans le cas gaussien. Avec le krigeage ordinaire et le krigeage universel elle se généralise à des cas où la moyenne n'est plus connue, avec une perte toutefois de certaines bonnes propriétés du krigeage simple.

La pertinence d'un modèle géostatistique est souvent analysée par « validation croisée ». Cela consiste à effacer certaines données pour en effectuer l'estimation à partir des données conservées. L'erreur d'estimation et l'erreur quadratique « expérimentale » sont alors comparées aux prévisions du modèle géostatistique suivant différents critères.

Le variogramme expérimental c'est une forme simplifiée d'outils d'analyse exploratoire des données plus élaborés, tel le nuage variographique. Si ce dernier n'est pas nouveau, l'informatique permet d'obtenir de façon quasi instantanée des graphiques dont l'élaboration pouvait demander une année de calcul à la main dans les années 50 (*Gandin, 1963*).

Selon *Chiles (2004)*, les propriétés physiques du variogramme expérimental ne présentent pas d'originalité particulière. Concernant les propriétés mathématiques de la covariance ou du variogramme théorique.

Le variogramme peut être interprété en terme de continuité ou de corrélation spatiale si on l'inverse graphiquement pour obtenir une fonction décroissante : plus la distance entre deux mesures est importante moins les mesures sont corrélées. Le variogramme est la clé de route de l'analyse spatiale par Krigeage, il permet de détecter les points d'anomalie par leur position par rapport aux autres. Les points isolés sont à supprimer pour avoir une bonne corrélation spatiale. Une fois que le variogramme expérimental établi, il faut lui caler un modèle qui lui convient le mieux, il n'est pas toujours facile de trouver le modèle théorique qui lui correspond. Les figures 3 et 4 présentes les variogrammes expérimentaux et le modèle de variogramme ajusté aux données.

Le krigeage ordinaire, que nous avons utilisé dans notre travail, est très utilisée et est considérée comme étant une méthode optimale d'estimation minimisant la variance de l'erreur de prédiction et associant une mesure de qualité aux valeurs prédites. L'utilisation de cette méthode permet d'optimiser les réseaux d'échantillonnage par l'ajout de mesures aux endroits où la variance d'estimation est élevée. L'analyse des variogrammes permet d'évaluer la variabilité spatiale telles que la concentration en nitrate et l'évolution des niveaux piézométriques (objet de l'étude), et de modéliser ces variabilités.

Le krigeage permet de tenir compte non seulement des irrégularités d'échantillonnage mais aussi de la corrélation temporelle (*Chilès and Delfiner, 1999 ; Emery and Arnaud, 2000*). L'avantage de cette méthode est qu'elle propose le meilleur estimateur linéaire au sens de la minimisation de la variance d'estimation. Les biais des échantillonnages préférentiels sont corrigés et les intervalles de confiance annoncés sont plus précis que ceux prédits par statistique classique.

De manière pratique, le krigeage est un peu plus compliqué à implanter que les statistiques classiques puisqu'il demande le calcul du variogramme expérimental et sa modélisation, Mais il permet la cohérence avec l'estimation « optimale » de la moyenne annuelle recherchée et le calcul de la précision de cette estimation. (*Bernard-michel,2006*)

#### **IV.2.1. Modélisation :**

Selon *Bernard-Michel et de Fouquet, 2003* dans la majorité des cas, les concentrations en nitrate montrent une périodicité qui se retrouve dans les variogrammes, cette composante périodique étant moins marquée pour les nitrites et les orthophosphates. Un autre modèle est donc envisageable lorsque la concentration semble stationnaire durant plusieurs années. Il consiste à modéliser la concentration  $Z(t)$  comme étant la somme de deux termes, une « moyenne périodique » ( $m(t)$ ) et un résidu ( $R(t)$ ) :

$$Z(t) = m(t) + R(t) \dots\dots\dots (20)$$

#### **IV.2.2. Validation :**

Pour s'assurer du meilleur choix d'ajustement qui satisfait l'utilisation du krigeage, on peut procéder de deux manières :

- Soit en retirant la fonction qui donne le meilleur résultat dans un test de validation croisé ; dans ce cas, on supprime un des points, on calcule l'estimation en ce point de mesure. Le travail se fait pour tous les points de mesure. On peut alors vérifier qu'en moyenne les valeurs estimées sont proches des valeurs expérimentales et les comparer à leur variance d'estimation respective (*Beucher et al, 1981 ; Voltz, 1986 ; Walter, 1990 ; Douaoui, 1993 ; Aubry, 2000*).
- Soit par la fonction qui s'ajuste le mieux aux points expérimentaux du variogramme (*Webster, 1985*). Pour cela, on procède par le calcul des écarts entre les points expérimentaux du variogramme et les fonctions d'ajustement. L'importance de ces écarts peut être quantifiée par leur moyenne quadratique (*Walter, 1990 ; Douaoui, 1993*).

### **IV.3. Application d'une approche géostatistique à l'évolution conjuguée des nitrates et des niveaux piézométriques dans la Mitidja :**

Dans cette partie nous nous intéresserons à l'étude de l'évolution du niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine ainsi que les nitrates, à travers l'interprétation des résultats d'analyse des échantillons d'eau prélevés par les techniciens de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) durant les périodes de 2006 et 2016 dans la Mitidja Est (figure IV.01), ainsi que 2008 et 2018 dans la Mitidja Ouest (figure IV.02). Ces derniers ont fait l'objet d'une approche statistique et géostatistique afin de mieux comprendre les phénomènes de contamination par les nitrates et le rabattement de la nappe.

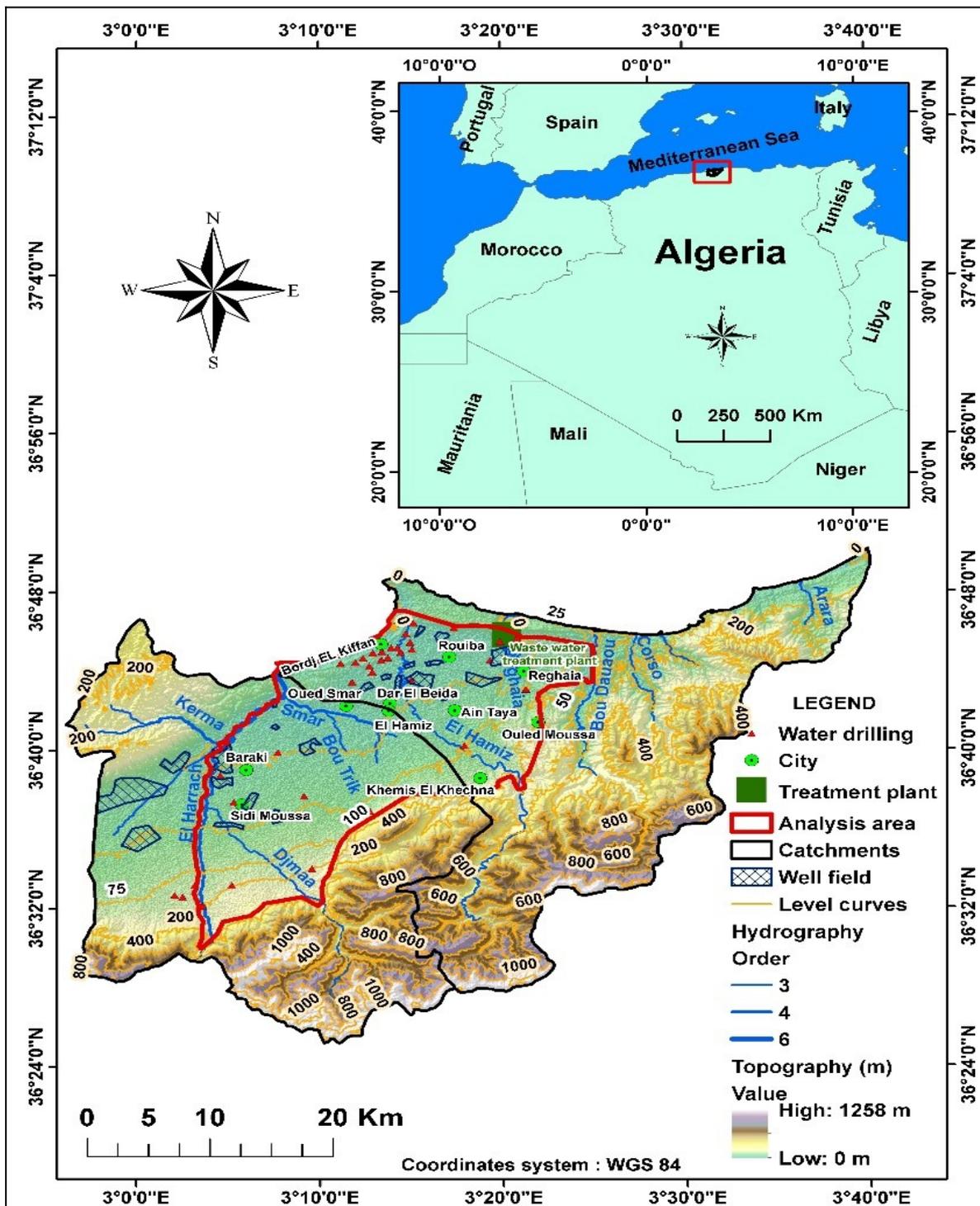


Figure IV.01 : Zone d'étude (Mitidja Est)

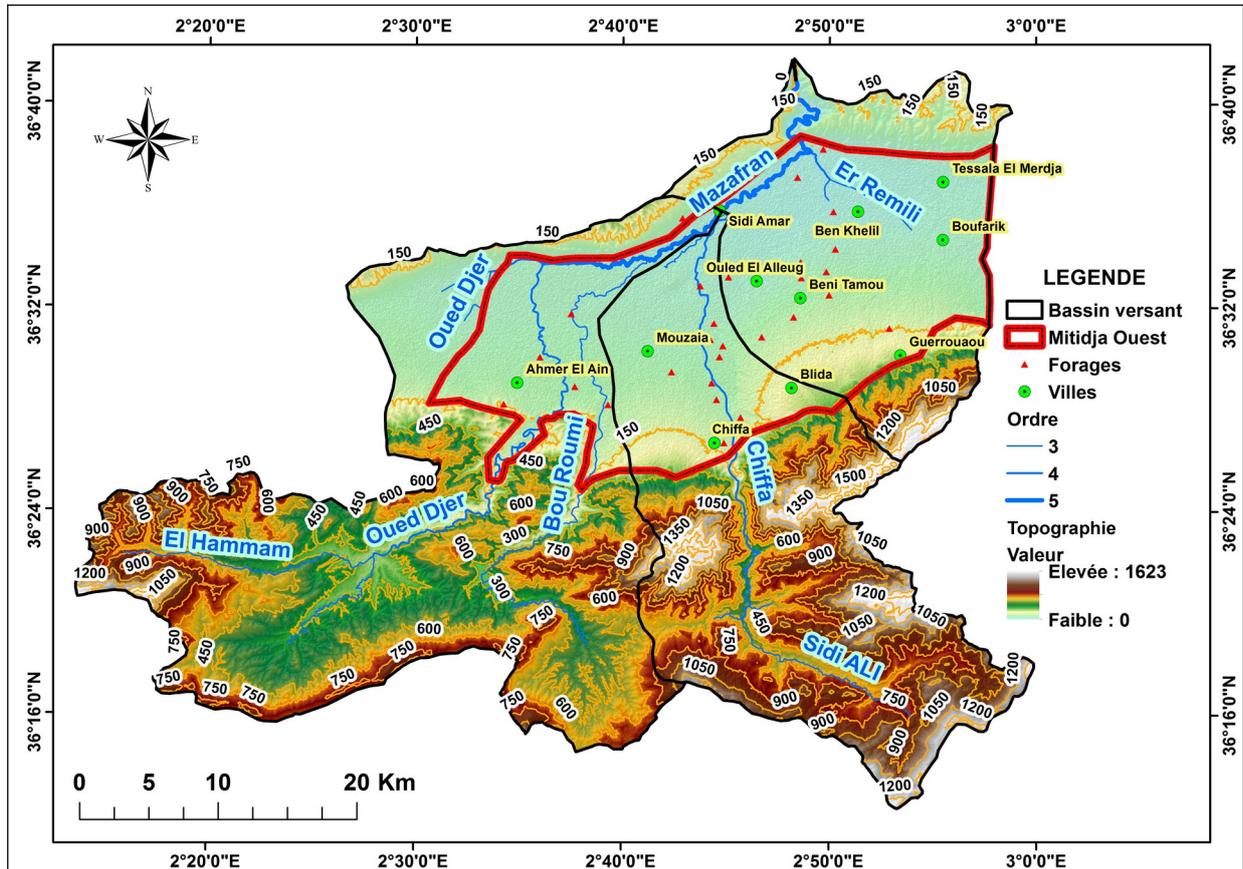


Figure IV.02 : Zone d'étude (Mitidja Ouest)

A l'issue des constats établis par les différents travaux de recherche précités, il s'est avéré incontournable d'actualiser l'état de la contamination de la nappe par les nitrates, en la confrontant à la fluctuation de la nappe pour les années prises en considération, à savoir l'année 2006, 2008, 2016 et 2018. A cet égard, une analyse des teneurs en nitrates et des niveaux piézométriques dans la plaine de la Mitidja (Est et Ouest), s'avère indispensable. Cette analyse sera basée sur une approche géostatistique des différents paramètres (nitrates et niveaux piézométriques).

Ceci nous a permis de procéder à une cartographie assistée par le SIG des teneurs en nitrates contenus dans l'eau et des fluctuations des niveaux piézométriques, et de dresser un constat exhaustif sur l'état actuel de la relation fluctuation de la nappe – teneurs en nitrates .

L'approche géostatistique nous a permis l'établissement des cartes krigées de la répartition spatiale des teneurs en nitrates pour les années 2006, 2008, 2016 et 2018 des eaux souterraines ainsi que les cartes de fluctuation de la nappe pour les deux périodes prises en considération (hautes et basses eaux).

Ce document vise, donc, à caractériser et à mettre en évidence, la variabilité spatio-temporelle, de l'évolution des nitrates et des niveaux piézométriques, basée sur une modélisation géostatistique. Cette dernière permettra ainsi de mieux cerner la problématique de la pollution des eaux souterraines par les nitrates, par l'établissement de différents modèles de variogramme mettant en évidence l'évolution des paramètres étudiés.

Nous présenterons, donc, dans ce qui suit une étude cartographique effectuée sur la Mitidja (Est et Ouest), et qui concerne les fluctuations des niveaux piézométriques ainsi que l'évolution des teneurs en nitrates, à travers une approche géostatistique (Krigage). Etant une méthode d'estimation linéaire garantissant le minimum de variance, le krigage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental, Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux-à-deux. Il repose sur le principe que deux observations séparées par une faible distance ont une moyenne qui se ressemble davantage, que deux observations séparées par une plus grande distance. La formulation théorique du semi-variogramme  $\gamma(h)$  fait appel à la notion de variance appliquée à la différence entre deux observations  $b(x)$  séparées par une distance  $h$  (Cressie. 1993).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[b(h) - b(X + h)] \dots\dots\dots(21)$$

Cependant, en pratique,  $\gamma(h)$  n'est pas connue. Cette fonction est donc estimée, depuis le semi-variogramme expérimental. L'estimateur du semi-variogramme le plus commun est celui des moments (Cressie. 1993).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(b_i) - z(b_i + h)]^2 \dots\dots\dots(22)$$

$N(h)$  et le nombre des paires dans la classe de distance  $h$ .  $Z(b_i)$  et la variable régionalisée (niveaux piézométriques, teneurs en nitrates) au site.

Le semi-variogramme expérimental n'est pas fiable pour de trop grandes distances. Il est conseillé donc de le calculer pour les distances inférieures à la moitié de la distance maximale entre deux points d'observations (Arnaud et Emery, 2000).

L'analyse géostatistique a été effectuée en deux étapes afin de nous permettre d'établir les cartes Krigées :

- La première étape consistait à calculer et à modéliser les semi-variogrammes expérimentaux de chaque variable dans la zone échantillonnée.
- La seconde consiste en l'utilisation de l'outil « krigage » dans la prédiction spatiale.

Quatre années (2006, 2008, 2016 et 2018), ont été analysées à travers le suivi et la confrontation de la fluctuation des niveaux piézométriques et l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines.

Ceci nous permettra de dresser un constat exhaustif sur l'état actuel de la pollution aux nitrates des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja (Est et Ouest). Un traitement statistique et géostatistique sera appliqué à deux paramètres essentiels ; les nitrates et les niveaux piézométriques (hautes et basses eaux) à travers une modélisation par ArcGis, dans le but de mettre en évidence la relation entre les deux paramètres.

Les semi-variogrammes expérimentaux omnidirectionnels (EVS) (Figure IV.16 et IV.17) ont été établis pour l'analyse de deux variables : la concentration en nitrates, et les niveaux

piézométriques. Ces ESV ont été calculés dans le cas isotrope en raison du comportement irrégulier des structures directionnelles.

Les distances des EVS varient entre 10000 et 30000 m pour les concentrations en nitrates, et entre 1500 et 10000 m pour le niveau piézométrique. Les détails de ces calculs sont résumés dans le tableau IV.01.

A travers l'analyse que nous avons effectuée, on peut constater que les meilleurs semi-variogrammes omnidirectionnels expérimentaux (ESV directe) ont été obtenus par des valeurs de concentration en nitrates (distance de latence) de 30000 m, 10000 m, 10000 m et 10000 m, et par des valeurs de niveau piézométrique de 1500m, 1700 m, 7500 m et 10000 m, respectivement, pendant les basses et hautes eaux, de 2006 à 2016 et de 2008 à 2018 (tableaux IV.01 et IV.02 respectivement).

En pratique, le semi-variogramme omnidirectionnel permet de voir s'il existe des directions plus continues que d'autres pour une variable considérée dans l'espace d'étude. Ceci est possible en cartographiant les semi-variogrammes omnidirectionnels dans le plan (carte de variogrammes) puis en analysant leurs gammes.

Le tableau IV.01 récapitule les résultats de calcul des de semi-variogrammes expérimentaux ainsi que les modèles ajustés pour chaque variable (concentration en nitrates et niveaux piézométriques).

Les deux variables ont montré une corrélation spatiale plus ou moins structurée avec des modèles généralement sphériques et exponentiels de faible effet nugget. Il existe un niveau piézométrique exceptionnel pour 2006 qui est modélisé en Gaussien avec un effet nugget nul. Le résultat est vérifié par la procédure de validation croisée.

En fait, la distribution des erreurs normalisées est gaussienne, avec une moyenne des erreurs Standards (MES) proche de zéro et une variance des erreurs Standards (VES) autour de '1' (tableau IV.01). Cela implique que les modèles ajustés sont statistiquement robustes et satisfaisants.

**Table IV.01** : Paramètres de modélisation (ajustement et validation) – Mitidja Est.

Variables	Années	Périodes	Semi-Variogramme Expérimental Omnidirectionnel (ESV)		Type de structure	Rang (m)	Sill	validation	
			Lag distance (m)	Number of lag distance				MES	VES
Niveau Piézométrique (m)	2006	Basses eaux	1500	7	Nuggeteffect model	-	70	0.15	1.06
					Gaussian model	9000	920		
		Hautes eaux	1700	5	Nuggeteffect model	-	100	0.12	1.07
					Gaussian model	8500	930		
	2016	Basses eaux	7500	5	Nuggeteffect model	-	5	0.043	0.99
					Spherical model	26000	1370		
		Hautes eaux	10000	5	Nuggeteffect model	-	5	0.064	0.97
					Spherical model	24700	1400		
Nitrates (mg/l)	2006	Basses eaux	30000	5	Nuggeteffect model	-	6	0.014	1.66
					Exponential model	40000	3500		
		Hautes eaux	10000	5	Nuggeteffect model	-	700	0.07	1.16
					Spherical model	10000	25000		
	2016	Basses eaux	10000	5	Nuggeteffect model	-	10	0.1	0.93
					Exponential model	10000	600		
		Hautes eaux	10000	5	Nuggeteffect model	-	20	0.14	1.12
					Spherical model	7000	360		

MES: Mean of Standardized Errors  
 VES: Variance of Standardized Error

**Table IV.02:** Paramètres de modélisation (ajustement et validation) – Mitidja Ouest.

Variables	Années	Périodes	Semi-Variogramme Expérimental Omnidirectionnel (ESV)		Type de structure	Rang (m)	Sill	validation	
			Lag distance (m)	Number of lag distance				MES	VES
Niveau Piézométrique (m)	2008	Basses eaux	1500	5	Nuggeteffect model	-	100	0.012	0.22
					Gaussian model	8000	1150		
		Hautes eaux	1200	7	Nuggeteffect model	-	1.28	0.087	0.20
					Gaussian model	8400	1281		
	2018	Basses eaux	2500	5	Nuggeteffect model	-	25.5	-0.045	0.18
					Gaussian model	8500	1050		
		Hautes eaux	2550	7	Nuggeteffect model	-	86.5	-0.031	0.17
					Gaussian model	13910	1577.9		
Nitrates (mg/l)	2008	Basses eaux	2000	5	Nuggeteffect model	-	10	0.012	0.32
					Gaussian model	6700	1820		
		Hautes eaux	1300	5	Nuggeteffect model	-	3	-0.043	0.21
					Gaussian model	5000	1600		
	2018	Basses eaux	1500	5	Nuggeteffect model	-	62.9	-0.029	0.25
					Gaussian model	6500	850		
		Hautes eaux	7000	5	Nuggeteffect model	-	20	-0.05	0.22
					Spherical model	5000	350		

MES: Mean of Standardized Errors  
VES: Variance of Standardized Error

Le krigeage nous a permis d'établir les cartes isovaleurs des nitrates et des niveaux piézométriques pour quatre années d'étude (2006, 2008, 2016 et 2018) et deux périodes : basses et hautes eaux (*Figures IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15*), afin de mieux interpréter le comportement hydrodynamique de la nappe au niveau de la Mitidja et étudier 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 (figures IV.03 et IV.04). Ceci peut être expliqué par la surexploitation de la nappe et le manque de précipitations (ou recharge naturelle de la nappe par infiltration).
- L'analyse des deux cartes 2006 et 2016 (figures IV.12 et IV.13), montre que les lignes de courant indiquent des écoulements en direction des champs de captage : Haouch Flit, Beraki, Bordj el kifan (Stambouli).
- A partir des cartes 2008 et 2018 (figures IV.14 et IV.15), nous constatons que le rabattement de la nappe est considérable avec un sens d'écoulement vers les champs de captage du Mazafran (I et II), expliqué par le pompage excessif durant cette période (surexploitation des eaux souterraines) et à la sécheresse enregistrée dans la région. En confrontant ces cartes avec celle établie en 1998 (Annexe 03) nous remarquons que le niveau piézométrique a, effectivement, subi une baisse considérable.

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 0 à 180 mg/l en basses eaux et atteignant plus de 600 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 90 mg /l, du côté Est et Ouest de la zone d'étude. Au niveau de la partie centrale, nous notons des concentrations entre 18 et 50 mg/l.
- L'année 2008, montre que les teneurs en nitrates sont importantes au niveau central et à l'Ouest de la Mitidja Ouest durant la période des basses eaux, avec des valeurs dépassant les 50 mg/l et atteignant parfois les 120 mg/l. En hautes eaux nous remarquons de très faibles concentrations en nitrates (< 50mg/l) sur toute la zone d'étude.
- L'année 2018, par contre, illustre qu'en basses eaux les concentrations en nitrates sont élevées (entre 50 et 94 mg/l) dans les parties Ouest et Est de la zone d'étude (Mitidja Ouest). La période des hautes met en évidence la présence d'une légère contamination de la nappe par les nitrates sur une grande partie de la Mitidja Ouest avec des valeurs variant entre 50 et 67 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

entre 18 et 50 mg/l en 2016, contre des teneurs variant entre 51 et plus de 600 mg/l en 2006.

Les fortes concentrations en nitrates notées en 2006 et 2008 (basses et hautes eaux), présentées sur les figures IV.09 et IV.10, respectivement, au niveau du point d'eau P021-5 (E008-48583 : *Sud Ain Taya*) et w062-251, sont dues probablement, à 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. En plus des déversements directs des rejets urbains dans les milieux naturels (les Oueds).

L'allure générale de la confrontation des niveaux piézométriques à l'évolution des nitrates des quatre campagnes d'étude 2006, 2008, 2016, et 2018 en basses et hautes eaux (figures : IV.07 et IV.08), montre clairement, que les teneurs en nitrates évoluent à l'inverse des niveaux piézométriques, ce qui met en exergue que plus le niveau de la nappe augmente plus la concentration en nitrates diminue.

Les concentrations en nitrates varient selon le sens de l'écoulement des trois oueds principaux, qui acheminent les composés azotés issus des épandages d'engrais chimiques azotés dans les terres agricoles du Sud vers le Nord, et augmentent par la suite leurs concentrations aux embouchures. (*Djoudar, 2010*)

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 sensibilisation), et à la réhabilitation des stations d'épuration de Baraki et de Réghaia, permettant ainsi le rejet d'une eau usée épurée d'origine, principalement, industrielle de meilleure qualité.

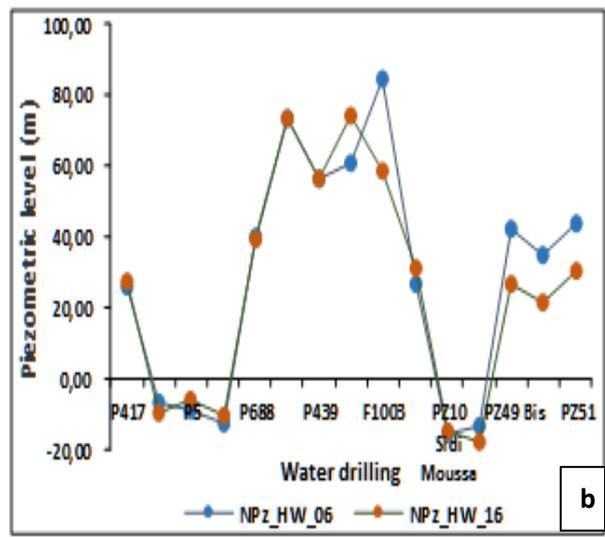
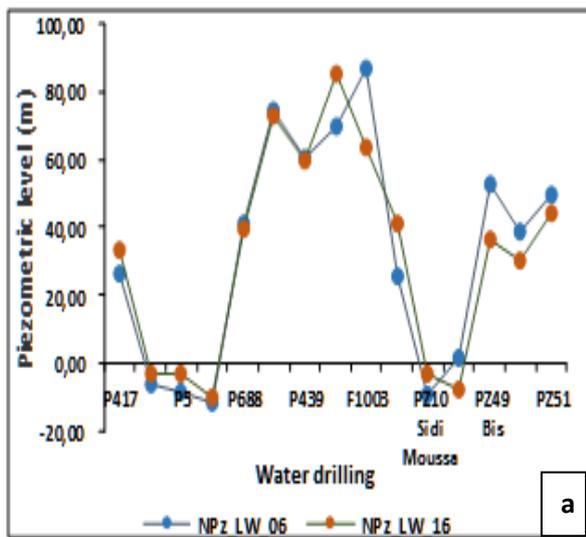
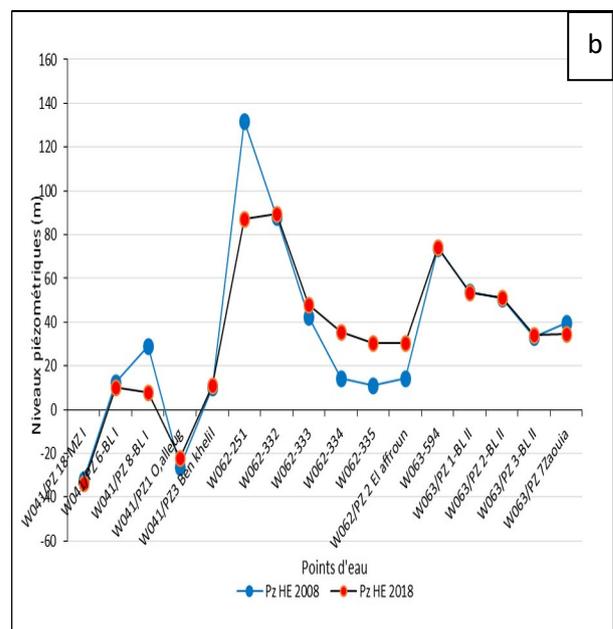
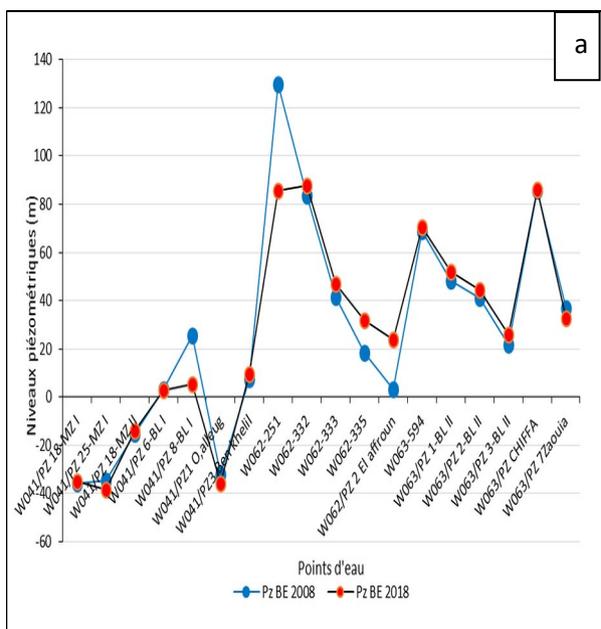
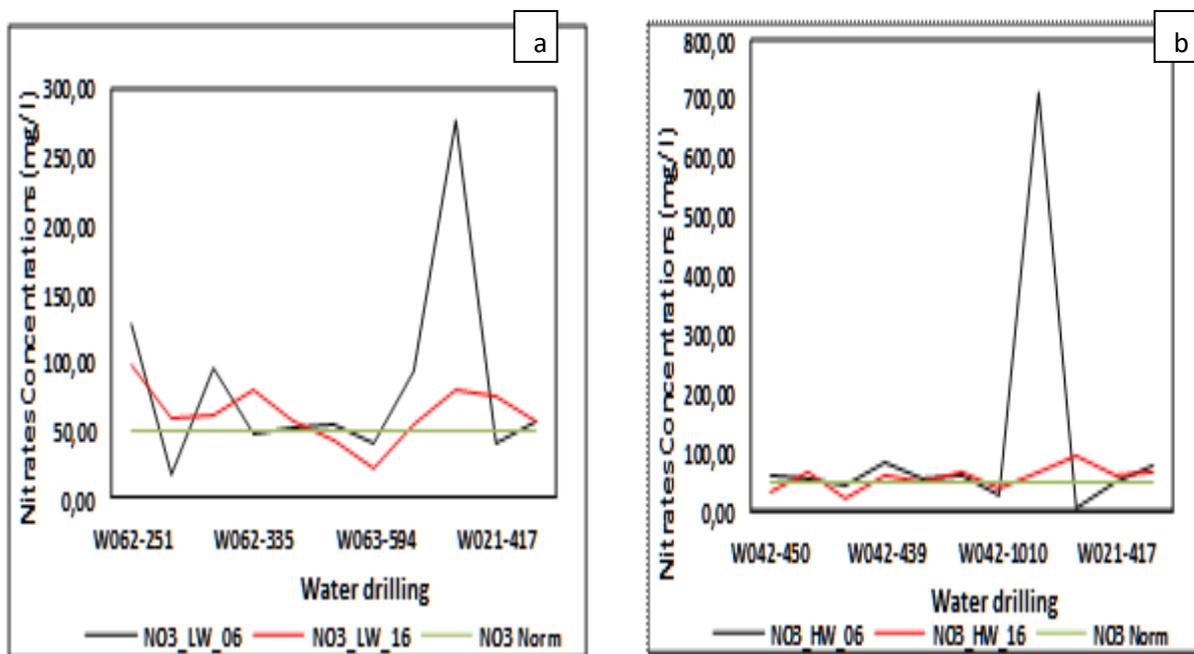


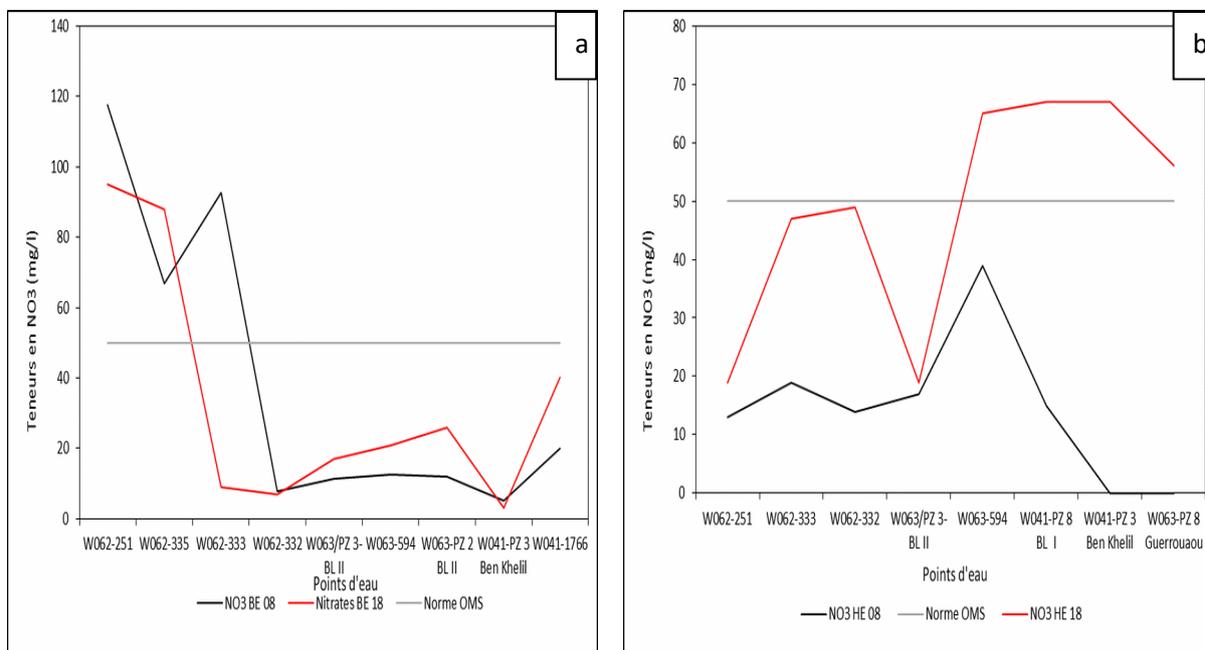
Figure IV.03 : Evolution des niveaux piézométriques durant 2006 et 2016 (Mitidja Est) ( basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b' )



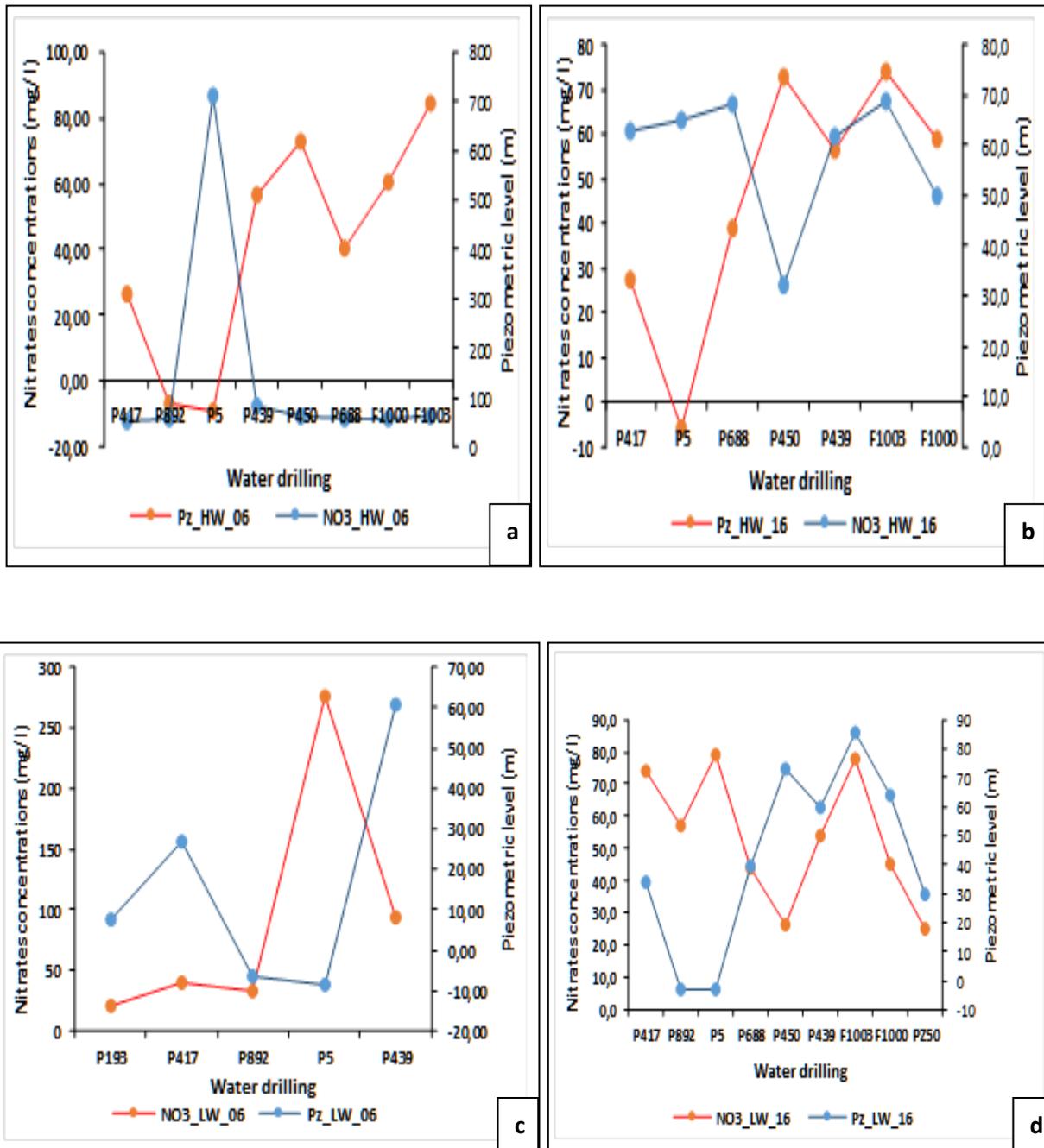
**Figure IV.04 :** Evolution des niveaux piézométriques durant 2008 et 2018 (Mitidja Ouest)  
( basses et hautes eaux, respectivement 'a' et 'b')



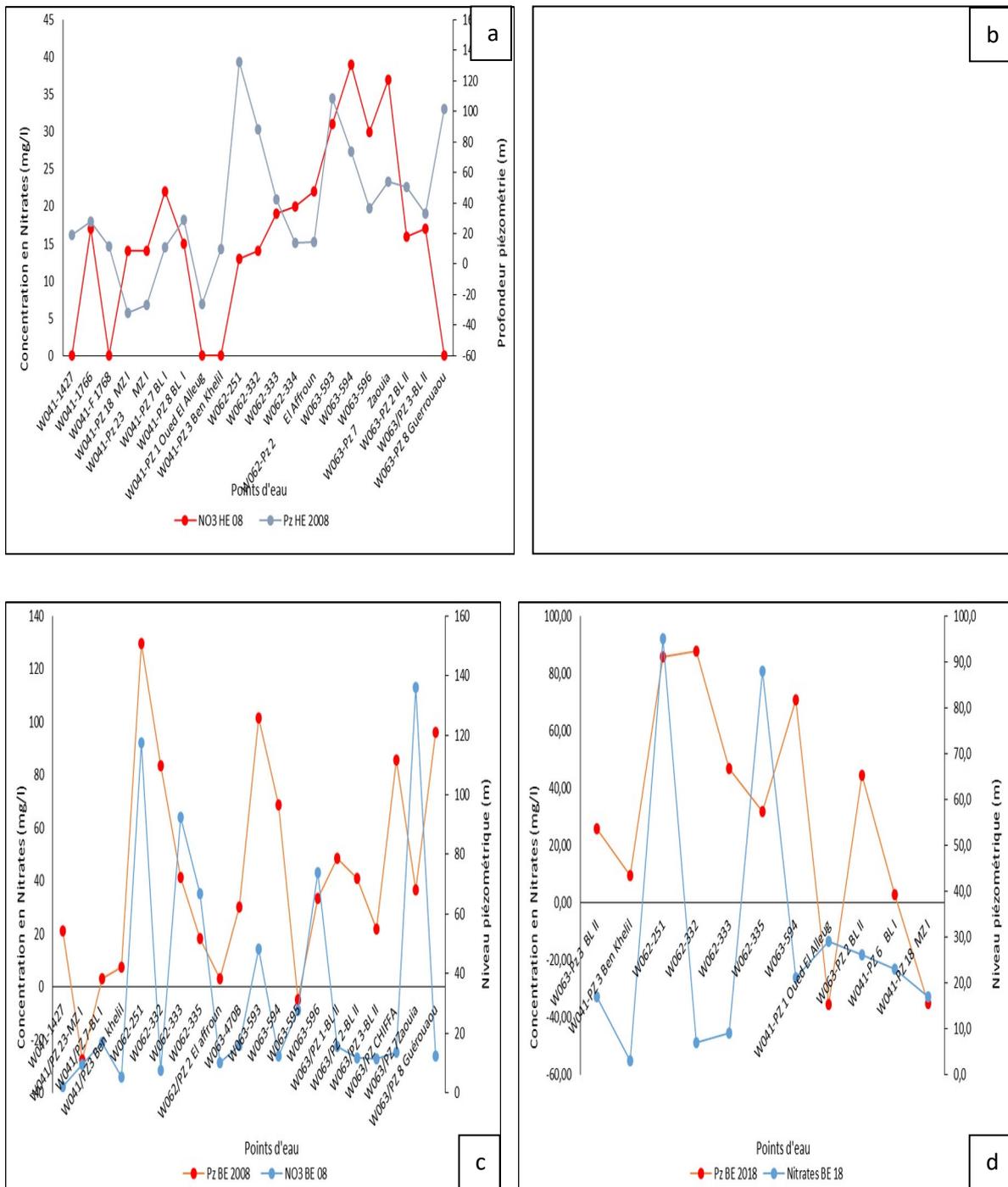
**Figure IV.05 :** Evolution de la concentration en nitrates dans la nappe (Mitidja Est)  
(périodes : Basses 'a' et hautes 'b' eaux, durant 2006 et 2016)



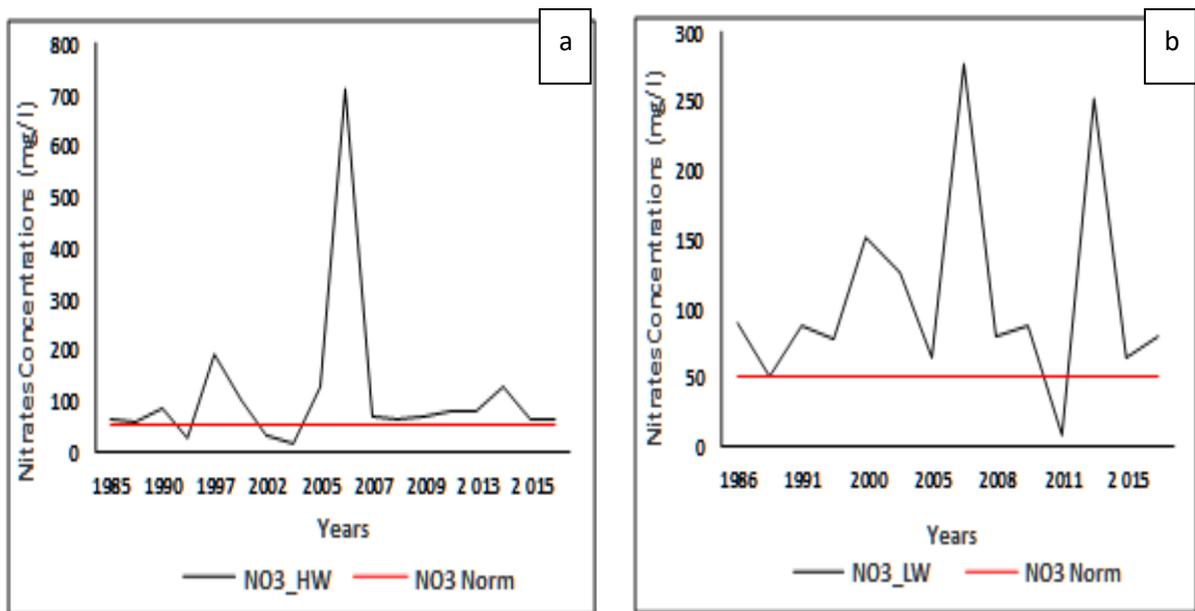
**Figure IV.06** : Evolution de la concentration en nitrates dans la nappe (Mitidja Ouest)  
 (périodes : Basses 'a' et hautes 'b' eaux, durant 2008 et 2018)



**Figure IV.07 : Evolution des nitrates et des niveaux piézométriques (Mitidja Est)**  
 Hautes eaux : 2006 (a), 2016 (b), basses eaux : 2006 (c), 2016 (d).



**Figure IV.08 :** Evolution des nitrates et des niveaux piézométriques (Mitidja Ouest)  
Hautes eaux : 2008 (a), 2018 (b), basses eaux : 2008 (c), 2018 (d).



**Figure IV.09 :** Evolution des concentrations en nitrates dans le point d'eau P021-5 (E008-48583: Sud Ain Taya), basses et hautes eaux, respectivement 'a' and 'b'- de 1985 à 2016.

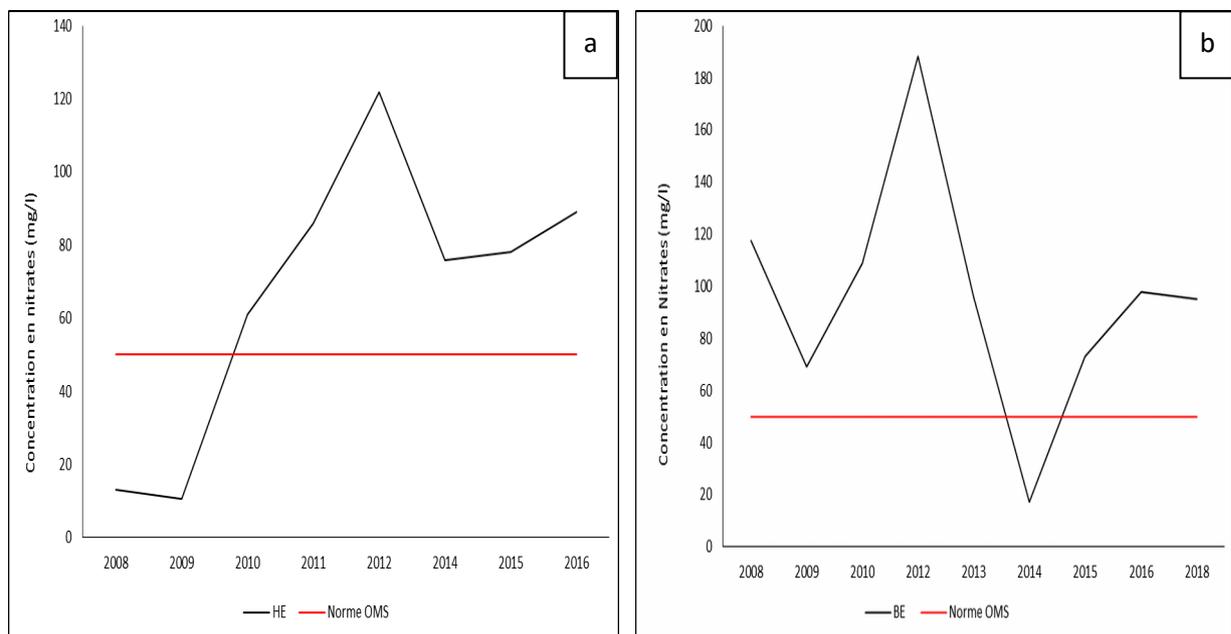
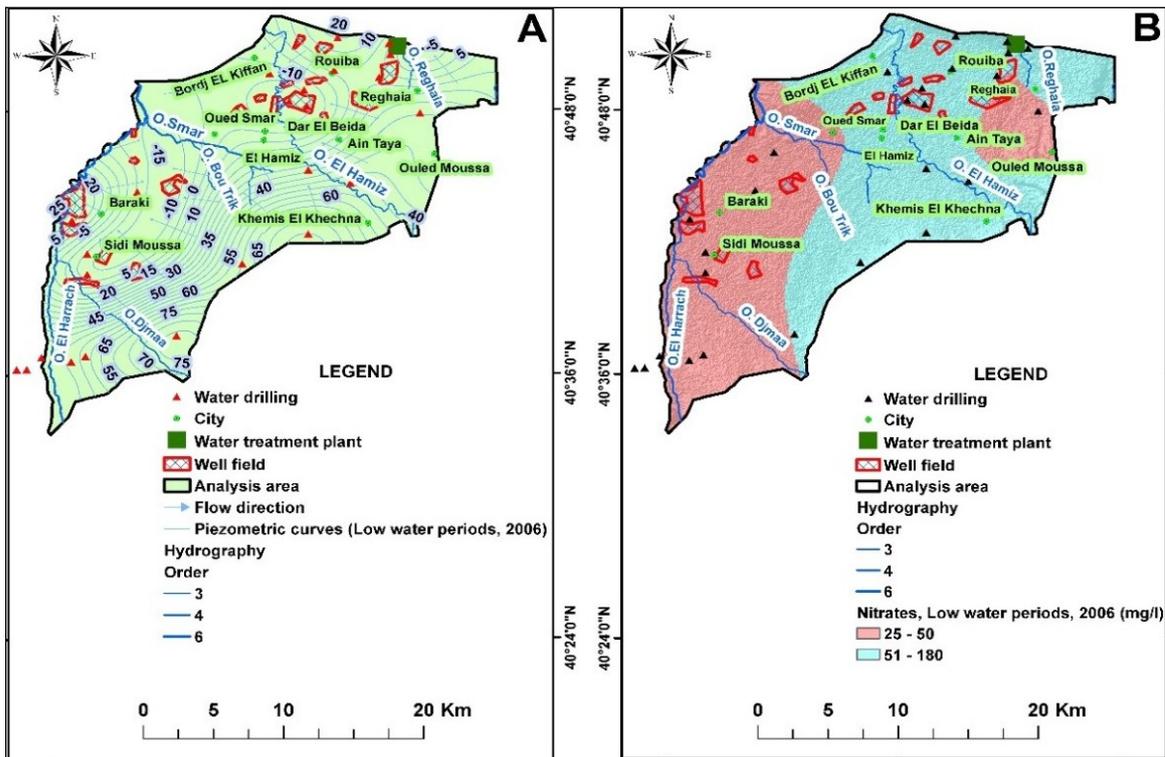


Figure IV.10 : Evolution des concentrations en nitrates dans le point d'eau W062-251 basses et hautes eaux, respectivement 'a' and 'b'- de 2008 à 2018.



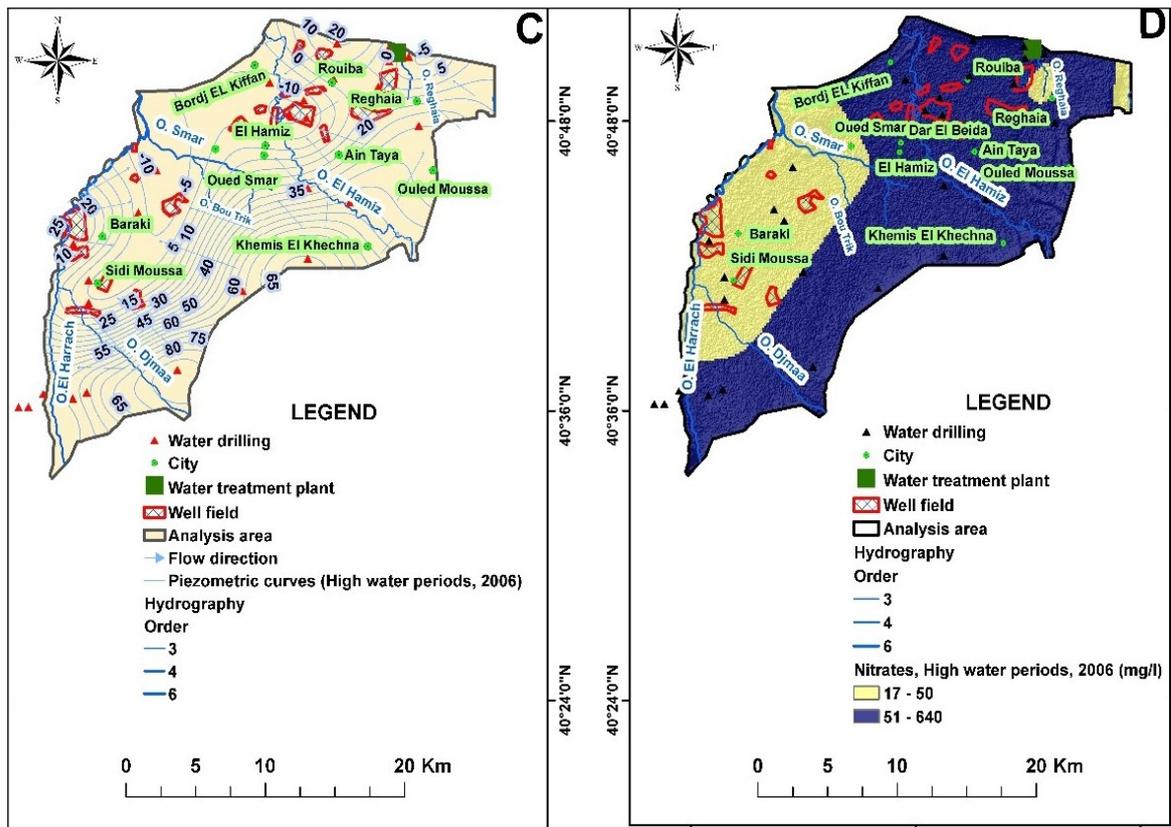
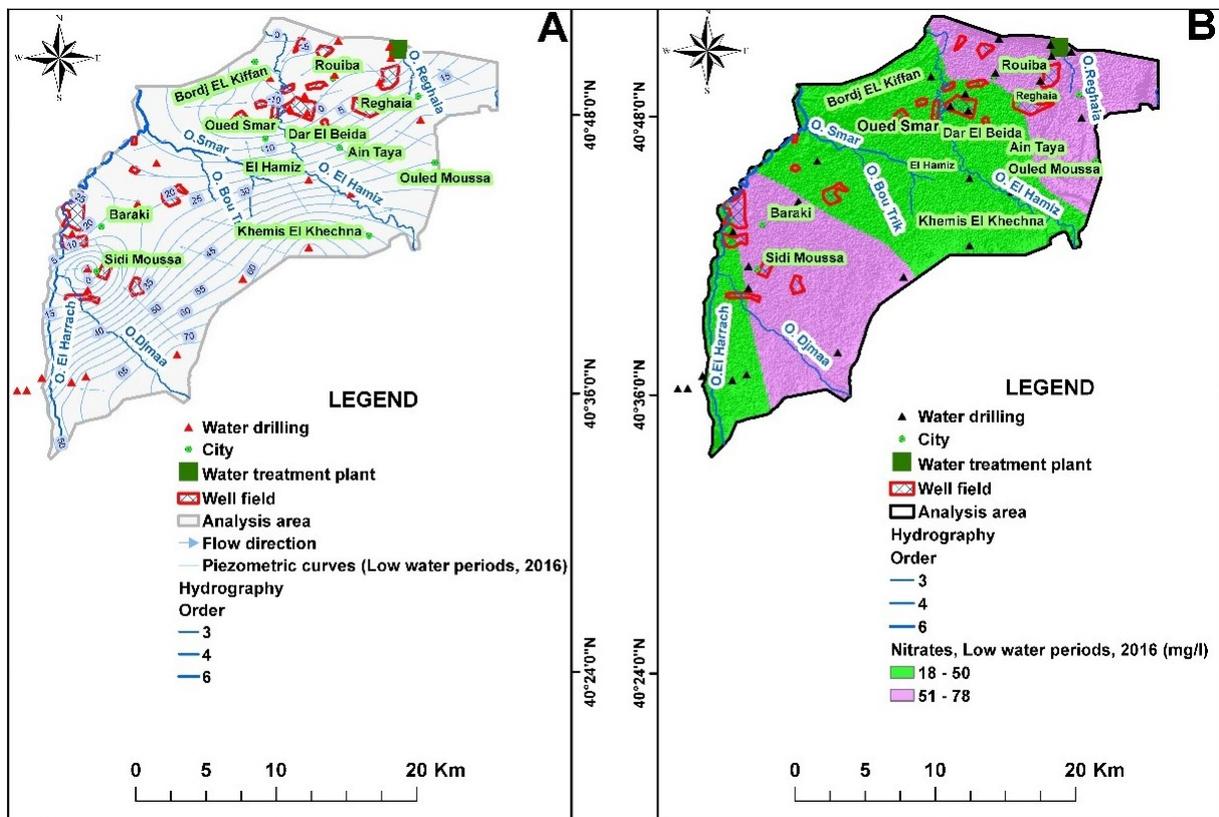


Figure IV.11 : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2006) – Mitidja Est.



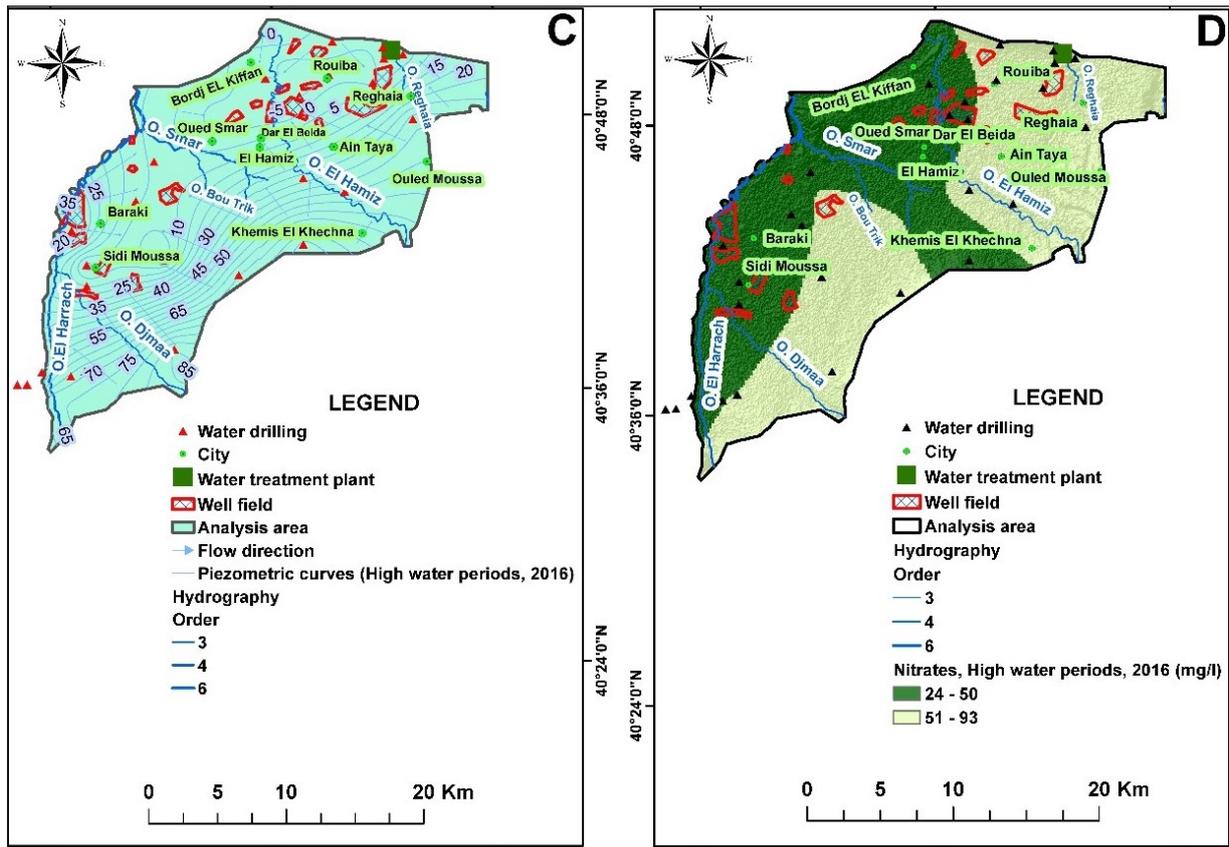
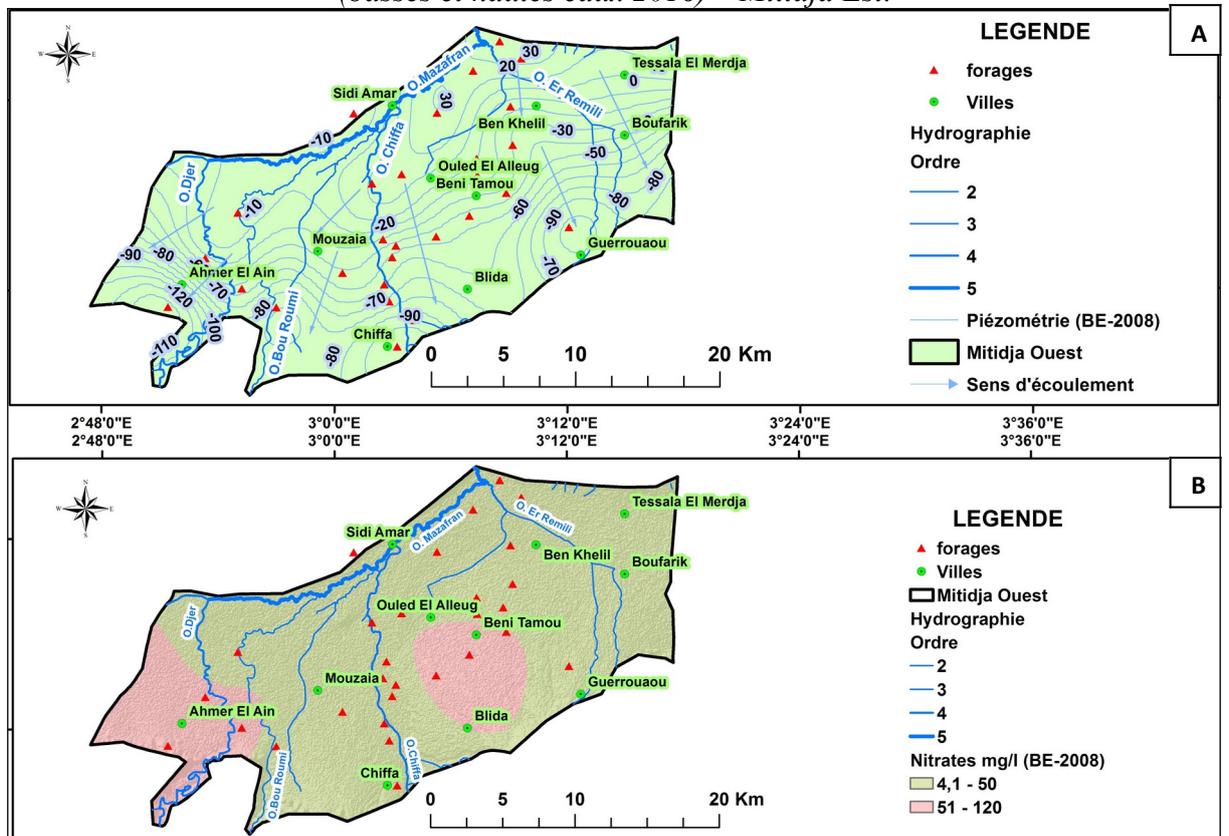
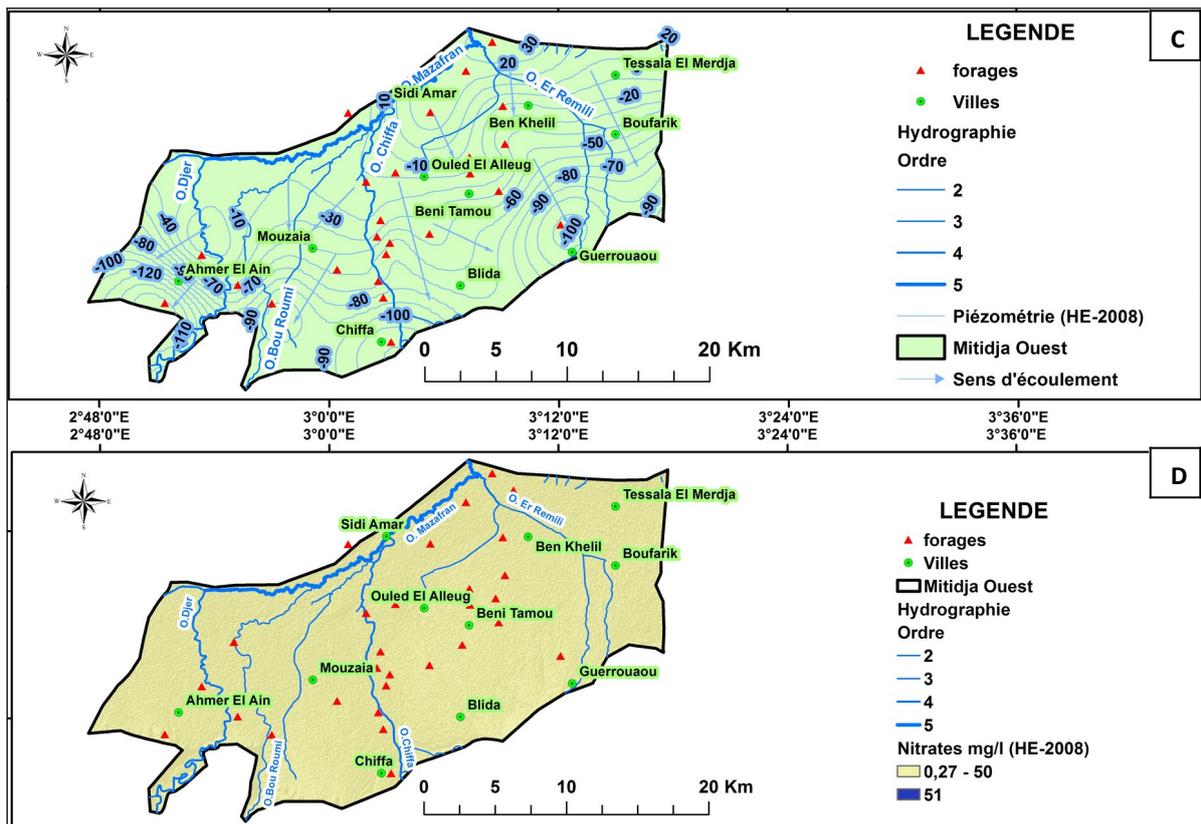


Figure IV.12 : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D) (basses et hautes eaux 2016) – Mitidja Est.





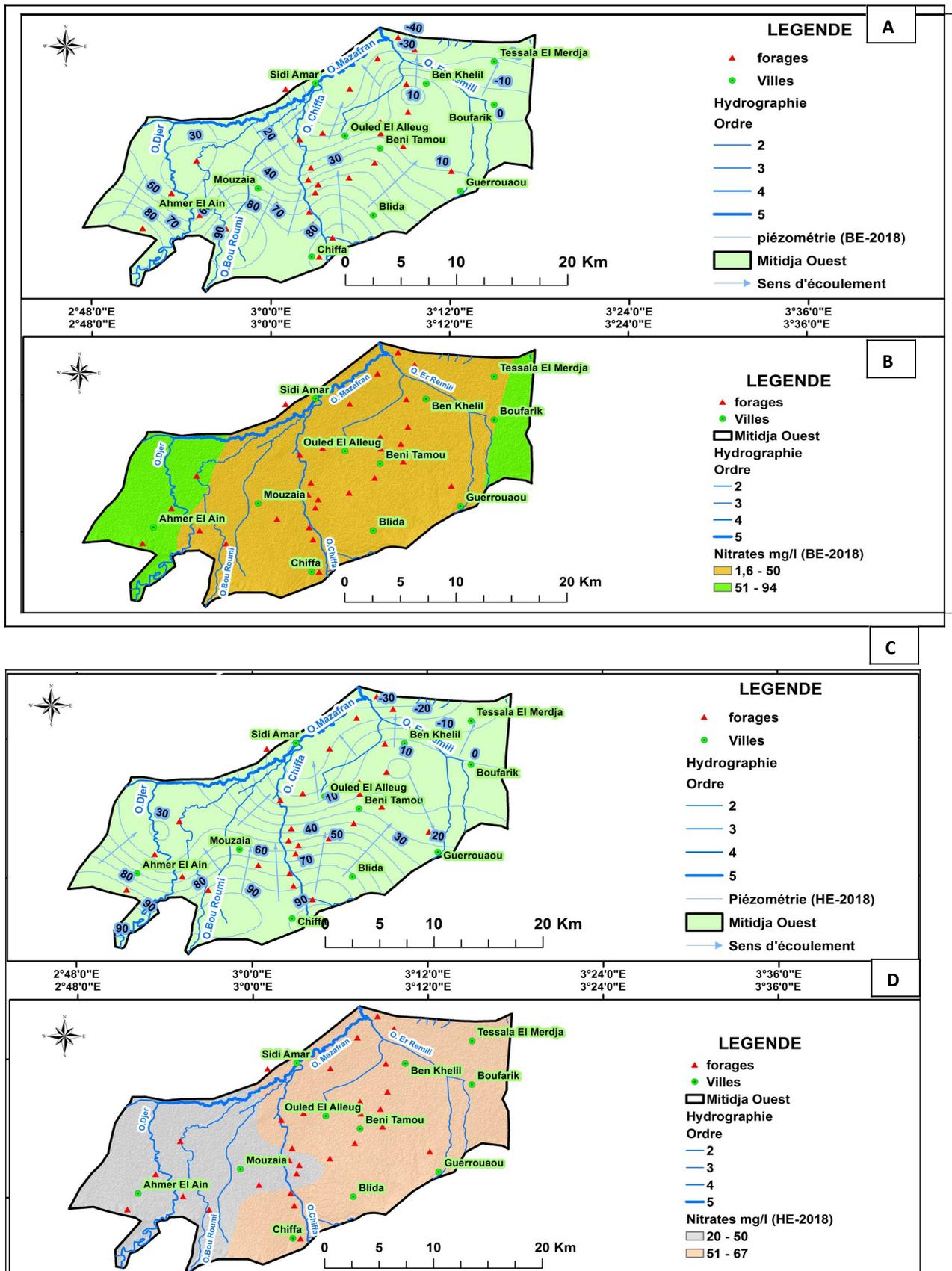
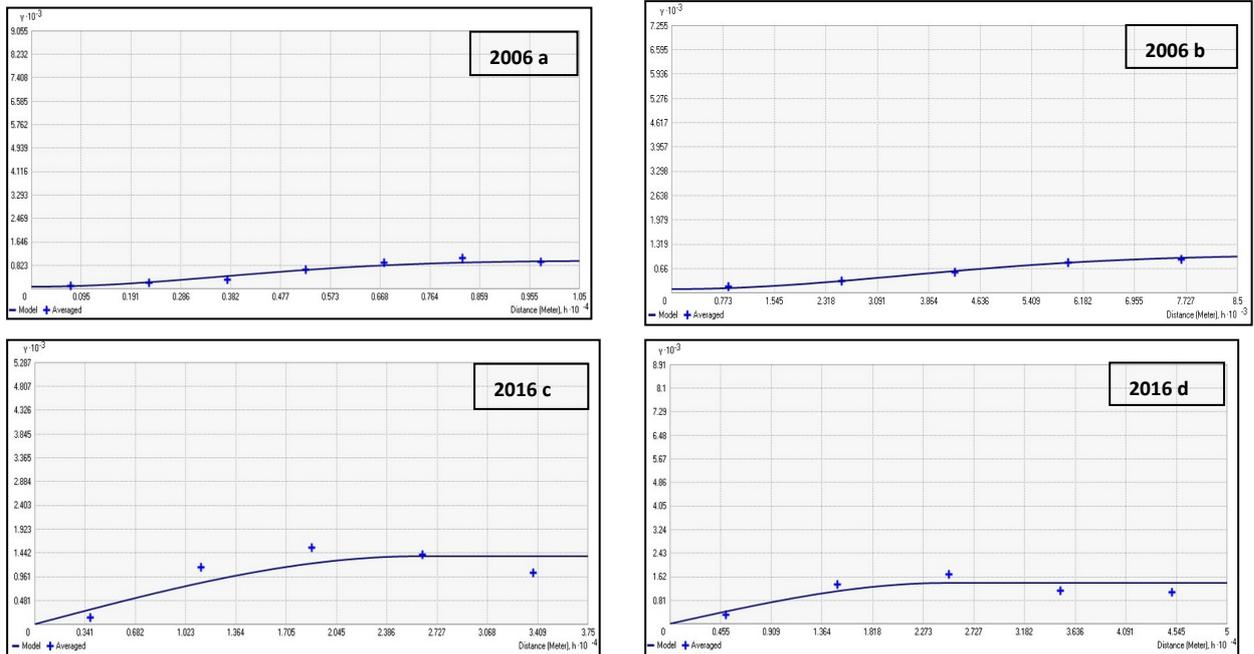
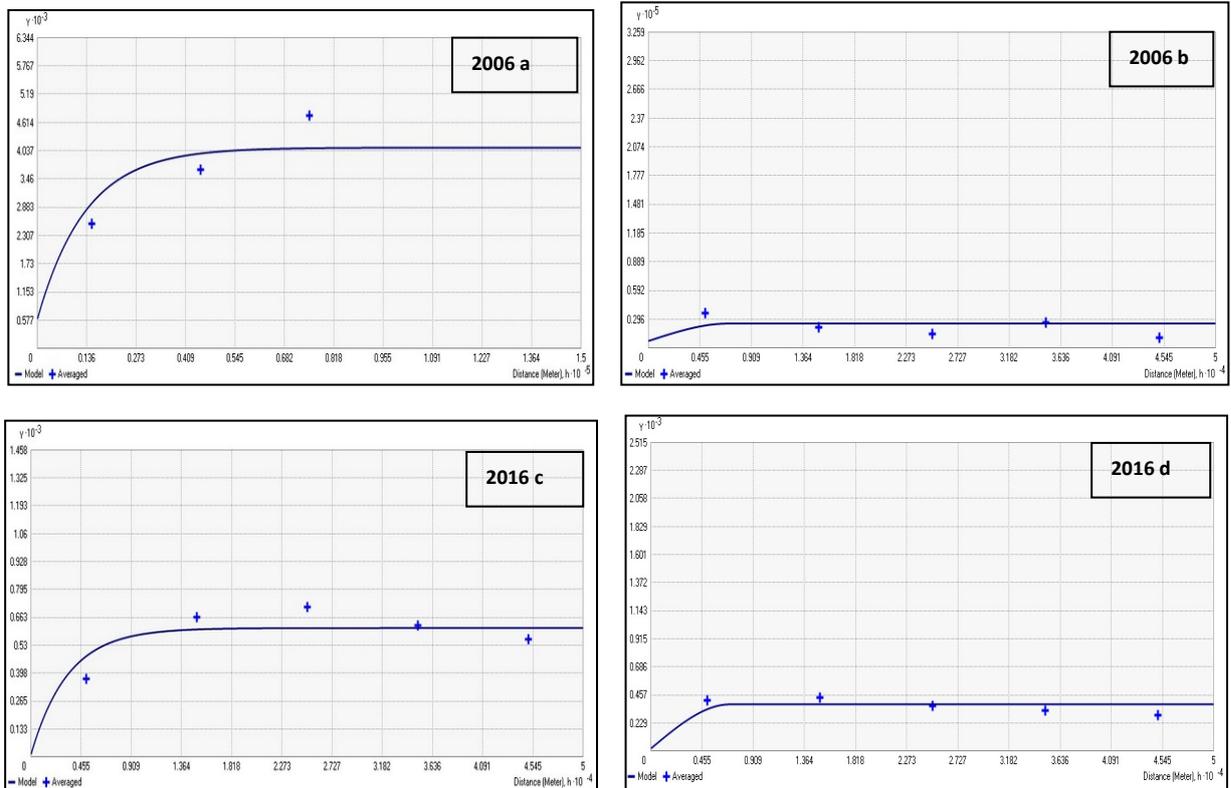


Figure IV.14 : Cartes Krigées des niveaux piézométriques (A et C) et des nitrates (B et D)

(basses et hautes eaux 2018) – Mitidja Ouest.

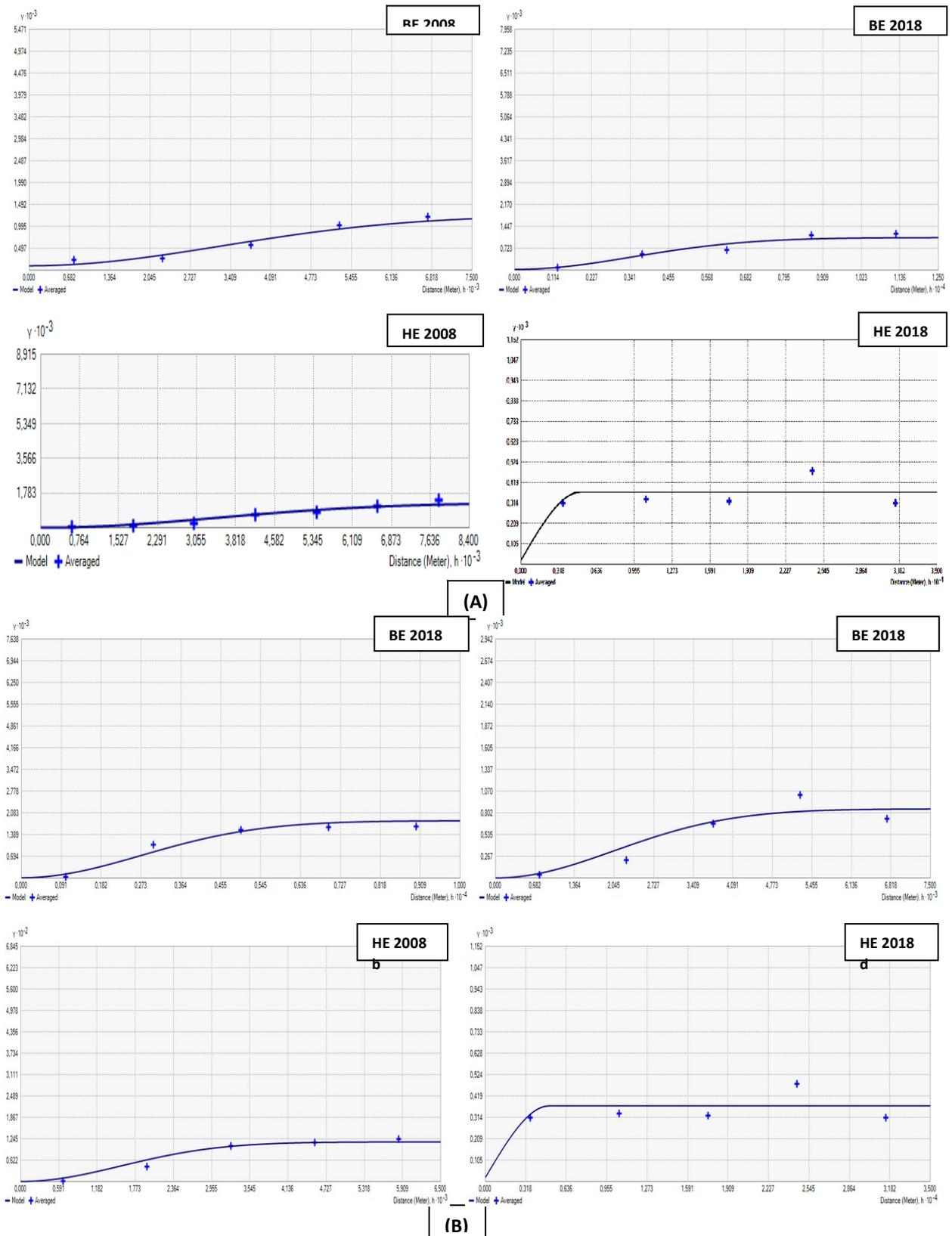


(A)



(B)

**Figure IV.15 :** Semivariogramme des niveaux piézométriques (A) et des Nitrates (B) (Périodes : basses et hautes eaux, de l'année 2006 (a et b) et 2016 (c et d)) – Mitidja Est.



**Figure IV.16 :** Semivariogramme des niveaux piézométriques (A) et des Nitrates (B) (Périodes : basses et hautes eaux, de l'année 2008 (a et b) et 2018 (c et d) – Mitidja Ouest.

## Conclusion :

Nous avons abordé dans ce chapitre, une approche géostatistique appliquée à l'évolution des nitrates dans les eaux souterraines comparée aux niveaux piézométriques, dans la plaine de la Mitidja, et ce à travers une analyse des mesures des nitrates et des niveaux piézométriques de ... points d'eau (puits, forage et piézomètres, réseau de surveillance de l'ANRH) effectuées pour les quatre campagnes 2006 et 2016 (Mitidja Est), 2008 et 2018 (Mitidja Ouest).

L'étude nous a permis de tirer les constatations suivantes :

- Les deux variables ont montré une corrélation spatiale plus ou moins structurée avec des modèles généralement sphériques et exponentiels de faible effet nugget. On peut dire que les modèles ajustés sont statistiquement robustes et satisfaisants, puisque nous avons obtenu une moyenne des Erreurs Standards (MES) proche de zéro '0' et une variance des erreurs Standards (VES) autour de '1'.
- Présence d'un sens d'écoulement convergeant vers les champs de captage de Baraki et d'El Hamiz avec des niveaux variant entre 10 et 15 m au-dessous du niveau de la mer. Ceci s'explique par une surexploitation de la nappe et le manque de la recharge naturelle de la nappe par infiltration dues aux faibles voir absences des pluies enregistrées durant la dernière décennie.
- L'analyse des cartes établies pour la Mitidja Est et Ouest, montre un rabattement de la nappe est assez important, en direction des champs de captage. Ceci est expliqué par le pompage excessif durant ces périodes induisant une sécheresse enregistrée dans la région. En confrontant ces cartes à celle établie en 1998 à nous remarquons que le niveau piézométrique a, effectivement, subit une baisse considérable.
- En ce qui concerne l'évolution des nitrates pour les campagnes 2006 et 2008, les résultats obtenus montrent, qu'en général, de fortes concentrations en nitrates dépassant les 50 mg/l au Sud- Ouest de la Mitidja Est, Central et Ouest de la Mitidja Ouest en période des basses eaux. Cependant, en période des hautes eaux les teneurs en nitrates atteignent dans la Mitidja Est de très fortes concentrations allant jusqu'à dépasser les 600 mg/l.
- L'année 2016 présente des teneurs importantes en nitrates dépassant les 50 mg/l, du côté Est et Ouest de la zone d'étude (Mitidja Est), et L'année 2018 par contre, présente (basses eaux) des concentrations en nitrates élevées (entre 50 et 94 mg/l) dans les parties Ouest et Est de la Mitidja Ouest. nous notons, qu'en période des basses eaux, une légère contamination de la nappe par les nitrates sur une grande partie de la Mitidja Ouest avec des valeurs variant entre 50 et 67 mg/l.
- Une diminution remarquable des concentrations en nitrates dans la zone centrale de la Mitidja Est, est expliquée probablement par la diminution de l'utilisation des fertilisants azotés de façon excessive par les agriculteurs, ainsi que la réhabilitation des stations d'épuration de Baraki et de Réghaia, permettant ainsi le rejet d'une eau usée épurée (d'origine industrielle) de meilleur qualité.
- Par contre, en Mitidja Ouest, nous remarquons une augmentation de la teneur en nitrates en période des hautes eaux en comparant les deux campagnes 2008 et 2018. Cette élévation est probablement due à l'utilisation excessif des fertilisants azotés par les agriculteurs dans cette région, connue pour sa vocation agricole.

**CHAPITRE V : « Actualisation de l'étude de vulnérabilité des eaux  
souterraines à la pollution, de la nappe alluviale de la Mitidja, par approche  
DRASTIC »**

**CHAPITRE V : « Actualisation de l'étude de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, de la nappe alluviale de la Mitidja, par approche DRASTIC »**

## **Introduction :**

La préservation de la qualité des eaux superficielles ou souterraines est devenue une nécessité devant l'accroissement alarmant des teneurs en éléments chimiques dans ces eaux. Il est donc, impératif de trouver des solutions afin de palier à cette problématique qui est la pollution, en particulier par les nitrates qui a fait l'objet de notre étude.

Pour se faire, il existe diverses méthodes. Dans ce chapitre, nous nous intéresseront à l'établissement d'un constat de la vulnérabilité de la nappe de la plaine de la Mitidja à la pollution par les nitrates. Cette approche va nous permettre de contrôler les risques de dégradation de la qualité des eaux, et de prendre des mesures assurant la protection des ressources en eau.

La vulnérabilité est définie comme étant la capacité de l'eau de surface à se transférée dans la zone saturée.

Selon *Schnebelen et al.*, (2002), il existe deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique :

- **La vulnérabilité intrinsèque** : c'est la représentation des caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines. La détermination de vulnérabilité requiert la connaissance des caractéristiques pédologiques, géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu naturel. L'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est calculée en fonction des sources externes de pollution, sans tenir compte des causes naturelles de contamination.
- **La vulnérabilité spécifique** : représente la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

### **V.1. Critère de la pollution des eaux souterraines :**

On parle d'une eau contaminée (polluée) lorsque celle-ci contient des substances autres que celles qui sont liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné. Et que les teneurs en éléments chimiques dépassent les seuils limites fixées par les normes nationales et internationales. Généralement, cette contamination des eaux est d'origine anthropique.

### **V.2. Principaux types et origines des pollutions :**

Selon la densité et la solubilité du polluant, sa propagation dans l'espace et dans le temps et la nature des polluants, on distingue trois (03) types de pollution :

- **la Pollution diffuse** : pouvant se produire sur une grande étendue de l'aire d'alimentation d'un aquifère.

- **la Pollution ponctuelle** : se produit instantanément au niveau d'un site donné.

- **la Pollution linéaire** : L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation...), peut entraîner un transfert à la nappe et, donc, sa pollution, dont la durée dépend de son pouvoir d'autoépuration et de la vitesse de percolation. On y distingue aussi trois cas :

-- **Pollutions permanentes (chronique)** : se produisant de façon continue dans temps.

-- **Pollution accidentelle (temporaire)** : se produisant par une erreur humaine comme la rupture d'une canalisation transportant une substance polluante.

-- **Pollutions saisonnières** : liées à une activité humaine saisonnière, comme l'utilisation des engrais azotés.

Selon le type de pollution, on distingue cinq (05) principales origines :

- **Origine domestique :**

Dans le cas d'un assainissement défectueux, les substances indésirables contenues dans les eaux ménagères, les eaux des stations d'épuration urbaines surchargées et dans les ordures ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes...).

- **Origine industrielle :**

Les polluants d'origine industrielle sont très variés, selon le type d'activité (produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds, etc.). Les pollutions sont exceptionnelles, mais souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations...).

- **Origine agricole :**

La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps. Elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend les eaux superficielles et souterraines impropres à la consommation humaine et parfois animale.

- **Origine urbaine et routière :**

Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident...). En ville, en plus des polluants de la voirie, on note la possibilité de contamination des nappes par les eaux usées (raccordement défectueux, surcharge ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration...), par les fuites de cuves de carburants (essence, fioul) et enfin par les cimetières.

- **Origine accidentelle :**

Elle est caractérisée par son aspect brutal et massif, on peut citer comme exemple le cas du déversement d'un camion transportant des matières polluantes ou toxiques comme les hydrocarbures.

Les facteurs prépondérants à la recharge des eaux souterraines sont essentiellement représentés par l'infiltration des eaux de précipitation, l'irrigation de surface et les différences de charges hydrauliques. Dans la zone saturée, les polluants sont transportés uniquement sous formes dissoutes. Contrairement à la zone non saturée, où les processus responsables du transport sont plus variés et représentés essentiellement par : l'advection, la dispersion mécanique et la diffusion moléculaire (*Villeneuve et al., 1985, in Touileb, 1997*).

### **V.3. Vulnérabilité des eaux à la pollution :**

La préservation de la qualité de l'eau souterraine est d'autant plus importante, du fait que cette ressource, une fois contaminée, est difficile à être réhabilitée (*Banton et Bangoy, 1997*).

Il est nécessaire d'entreprendre des mesures de protection des aquifères, et ceci à travers une estimation de la vulnérabilité de la nappe à la pollution.

La vulnérabilité est un terme introduit en hydrogéologie par MARGAT dans les années 60, il est défini et utilisé de manière très diverse. Certains auteurs le définissent comme étant : "*Une propriété intrinsèque des aquifères*"; D'autres considèrent que : "*La vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant*"; Tandis que, d'autres auteurs : "*L'associent aux activités humaines et à la qualité agropédologique des terrains de surface*". (*Gogo et Dassargues, 1998; Lallemand-Bares, 1994; Vrba et Zaporozec, 1994. In Amharef M., 2007*).

La vulnérabilité d'une nappe matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol. Cette vulnérabilité est une notion relative, non

mesurable et sans dimension. Sa caractérisation est basée sur la quantification d'un certains nombres de paramètres pris en compte, selon la méthode utilisée. On cite par exemple, la recharge, la nature et l'épaisseur du sol et les caractéristiques de la zone non saturée de l'aquifère.

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un certain degré de protection vis-à-vis des pollutions et cela, en fonction des caractéristiques de ce milieu. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées.

Le résultat final d'une étude de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine se matérialise par des cartes dites "cartes de vulnérabilité", qui constituent le meilleur moyen de protection et de prévention des aquifères contre la pollution. Elles permettent de :

- Caractériser le degré de protection naturelle des nappes d'eau souterraines ;
- Estimer le risque de pollution des aquifères par les rejets des activités humaines, industrielles et agricoles ;
- Orienter la prise de décision vis-à-vis des projets susceptibles d'engendrer des conséquences néfastes sur la qualité des ressources en eau.

De façon schématique, on considère qu'une nappe est peu vulnérable à une pollution directe lorsqu'elle est surmontée par, au moins, une dizaine de mètres de terrain peu perméables. Cependant elle est très vulnérable lorsqu'elle n'est surmontée d'aucun terrain clairement à faible perméabilité.

#### **V.4. Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines :**

*Jourda et al., (2006)*, pensent qu'étant donné les coûts importants engendrés par la restauration des aquifères contaminés, la protection des eaux souterraines devient alors primordiale afin de sauvegarder, à court et à long terme, sa qualité. Une des approches d'aide à la protection et à la préservation contre la pollution des eaux souterraines est la cartographie des zones vulnérables à la pollution (*Champagne et Chapuis, 1993*).

Plusieurs méthodes, dévaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines, ont été développées dans le monde. On peut classer ces méthodes, comme suit, en trois grandes catégories :

##### **V.4.1. Méthodes basées sur les documents cartographiques :**

La réalisation des cartes de vulnérabilité repose, généralement, sur la classification des sites en fonction des propriétés et de la géométrie des aquifères, en caractérisant la vulnérabilité à partir des divers paramètres de terrain. Pour simplifier le travail de cartographie et synthétiser l'information, on identifie, par classes, les paramètres de terrains les plus importants.

La plupart des méthodes proposées, sont basées sur les paramètres suivants :

- La nature géologique du sous-sol (zone non saturée).
- La profondeur de la surface libre.
- La nature et caractéristiques de l'aquifère.

*Albinet et Margat (1970)*, considèrent que dans les étapes de cartographie de la vulnérabilité, les impacts dans l'environnement (présence d'un égout ou d'un dépotoir...) et des aménagements physiques perturbent le milieu souterrain (puits de captage, sablier, etc.).

##### **V.4.2. Méthodes basées sur un système de cotation numérique :**

Ce modèle donne un cadre plus rigoureux aux méthodes cartographiques afin de favoriser la gestion des eaux souterraines.

Le système de cotation comporte l'analyse de certains paramètres, qui sont retenus et jugés nécessaires pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. Par la suite, une cote

numérique est attribuée pour chaque paramètre. La valeur de chacune de ces cotes sera en fonction de l'importance du paramètre dans l'évaluation de la vulnérabilité. Si la cote est plus élevée la vulnérabilité sera grande en regard de ce paramètre.

#### **V.4.3. Méthodes basées sur la caractérisation du polluant :**

Est basée sur la caractérisation des aquifères localisés sous des sites de rejets ponctuels. La caractérisation des sites ponctuels se fait plutôt à l'aide de modèles numériques de cotation. Ces systèmes présentent l'avantage d'assigner une cote pour chaque site, et ils favorisent l'évaluation et la comparaison de la vulnérabilité entre les régions.

#### **V.5. La méthode DRASTIC (USEPA et NWWA, 1987)**

Selon *Djoudar (2010)*, la méthode de l'indice DRASTIC est une méthode américaine de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. C'est une méthode de cotation numérique, développée par les services de l'agence américaine de protection de l'environnement (*the US Environmental Protection Agency "USEPA"*) et le (*National Water Well Association "NWWA"*) en 1987. DRASTIC, correspond aux initiales des sept paramètres hydrogéologiques et physico-graphiques pris en considération :

- **D** : **Depth to water**: la profondeur de la nappe;
- **R** : **net Recharge** : recharge efficace de l'aquifère;
- **A** : **Aquifer media**: la lithologie de l'aquifère;
- **S** : **Soil media** : type de sol;
- **T** : **Topography** : pente topographique du terrain;
- **I** : **Impact of vadose zone** : impact de la zone vadose (la zone non saturée);
- **C** : **hydraulic Conductivity of the aquifer** : conductivité hydraulique de l'aquifère.

L'indice de vulnérabilité DRASTIC (ID) (ou DRASTIC Pollution Index "DPI") est une valeur numérique décrivant le degré de vulnérabilité de chaque unité hydrogéologique. Cet indice est déterminé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants.

Les sept paramètres hydrogéologiques seront portés sur sept cartes, grâce à la superposition de ces dernières, on aura comme produit finale la carte de vulnérabilité.

Cette méthode est la plus utilisée afin de permettre l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe à la pollution.

Les concepteurs emploient sept paramètres hydrogéologiques et physico-graphiques. Ces paramètres influencent différemment sur les processus de transport et d'atténuation des contaminants dans le sol, ainsi que le temps de transport. Les propriétés de ces paramètres sont représentées sur le tableau Annexe 07.

Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe, dont la valeur comprise entre 1 et 5 et d'une cote variante de 1 à 10, qui correspond à son importance dans la définition de degré de vulnérabilité. Ces poids correspondent à l'importance dans le processus d'atténuation des substances contaminantes. Une cote basse implique une faible vulnérabilité à la pollution. Les tableaux présentés en Annexe 06, montrent les cotes typiques attribuées à chacun des sept paramètres.

#### **V.5.1. Calcul de d'indice de vulnérabilité :**

L'indice DRASTIC de vulnérabilité final (ID) est, la somme pondérée des sept paramètres, calculés selon la formule suivante :

$$ID = Dp Dn + Rp Rn + Ap An + Sp Sn+ Tp Tn+ Ip In+ Cp Cn$$

Où : D, R, A, S, T, I C. : sont les paramètres cités plus haut.

**p** : facteur de pondération accordé à chaque paramètre ; et **n** : notation accordée à chaque paramètre.

### V.5.2. Interprétation de l'indice de vulnérabilité « DRASTIC » :

La valeur de l'indice DRASTIC augmente avec le niveau de risque de contamination de la nappe. Variant ainsi entre un minimum de 23 et un maximum de 226. On distingue, donc, cinq classes de vulnérabilité :

Tableau V.01. : Critère d'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC (*ALLER et al., 1987*)

Indice DRASTIC	Degré de vulnérabilité
<80	Très faible
80-120	Faible
121-160	Moyen
161-200	Élevé
>200	Très élevé

L'application de la méthode DRASTIC permet d'identifier plusieurs unités hydrogéologiques pour une région donnée.

L'utilisation des SIG (Système d'Information Géographique), permet de représenter chaque paramètre sur une couche (on obtiendra, donc, sept cartes). Les couches seront ensuite superposées sur une même carte qui représentera la carte de l'indice de vulnérabilité DRASTIC.

- L'établissement de la carte de l'Indice DRASTIC se fait comme suit : Collecte des données de la région d'étude basée sur une bonne recherche bibliographique, permettant d'évaluer les paramètres et actualiser certaines données de terrain.
- Attribution d'une cote à chaque paramètre, multipliée par un poids relatif.
- Élaboration d'une carte thématique pour chacun des paramètres considérés.
- Délimitation sur la carte des zones en fonction des intervalles établis par le système de notation DRASTIC.
- Affectation d'une couleur pour chaque carte thématique des sept paramètres.
- Réalisation d'une série de superposition de sept couches afin de visualiser les intersections des grandes unités hydrogéologiques ainsi que les sous-unités correspondantes.
- Calcul de l'indice de vulnérabilité générale pour chaque unité hydrogéologique obtenue et chaque sous-unité déduite.
- L'attribution des couleurs conventionnelles aux différentes unités hydrogéologiques, permettra de lire la carte synthétique de la vulnérabilité, ainsi qu'une visualisation graduelle du degré de vulnérabilité. Les couleurs : rouge, orange et jaune indiquent les sites ayant un fort potentiel de vulnérabilité. Les couleurs : Bleu, indigo et violet caractérisent les zones moins sensibles.

La réalisation des cartes de vulnérabilité nécessite un grand nombre d'informations et de données difficiles à obtenir par investigation sur le terrain. Il est donc important d'utiliser les données anciennes et de consulter les études ayant trait à la géologie, l'hydrogéologie, la morphologie, la climatologie, la pédologie...etc.

Le traitement de ces cartes a été réalisé avec le logiciel ArcGis10.2, afin d'établir des cartes krigées qui constituent des éléments de base dans la cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution.

Dans un premier temps, nous avons établi des cartes krigées pour chaque paramètre, en se basant sur les notations et les coefficients de pondération de chaque paramètre.

#### V.5.2.1. Carte de l'indice « D » : Profondeur de la nappe

Cette carte qui représente la carte de la profondeur de la nappe a été élaborée à partir de mesures piézométriques de la campagne 2018 et les informations obtenues de l'ANRH-Blida concernant 244 fiches de forages (analysées en détail par *Djoudar en 2010*).

Nous avons donc, introduit les valeurs des points d'eau analysés dans un outil SIG qui ArcGis, où nous avons appliqué un krigeage nous permettant ainsi d'améliorer la qualité et corriger les points d'eau analysés. Une carte krigée de l'indice D a donc, été établie (figure V. ...).

A partir de cette carte, on distingue trois catégories de vulnérabilité :

- **Moyenne vulnérabilité** : pour cette catégorie, les profondeurs de la surface de l'eau varient entre 9 et 15 m, avec un indice partiel de 25. Elle caractérise la région centre, Est et Ouest de la plaine de la Mitidja.
- **Faible vulnérabilité** : pour les profondeurs allant de 15 m à 30 m, et un indice partiel variant de 10 à 25. Nous retrouvons cette catégorie dans une partie de la Mitidja Est et une petite partie de la Mitidja Ouest. Contrairement à l'année 2010, où elle couvrait les principaux champs de captage (el Affroun, Mouzata, Blida I, Mazafran I et II, et enfin Chebli au Centre).
- **Très faible vulnérabilité** : les profondeurs du plan d'eau de cette catégorie sont supérieures à 30 m, avec un indice partiel inférieur ou égal à 10. On trouve cette partie dans une fine partie de la Mitidja Est et ouest. Contrairement à la campagne 2010, où elle occupait la partie centrale au voisinage des champs de captage, la partie Nord Est et l'extrême Ouest.

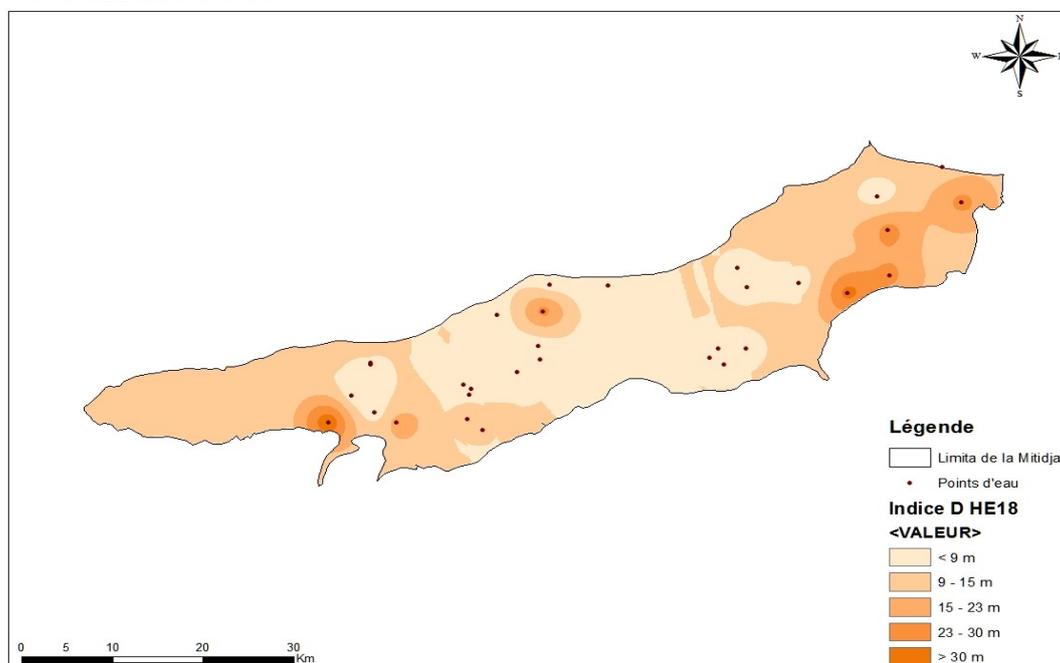


Figure V.1. : Carte de profondeur de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « D »)

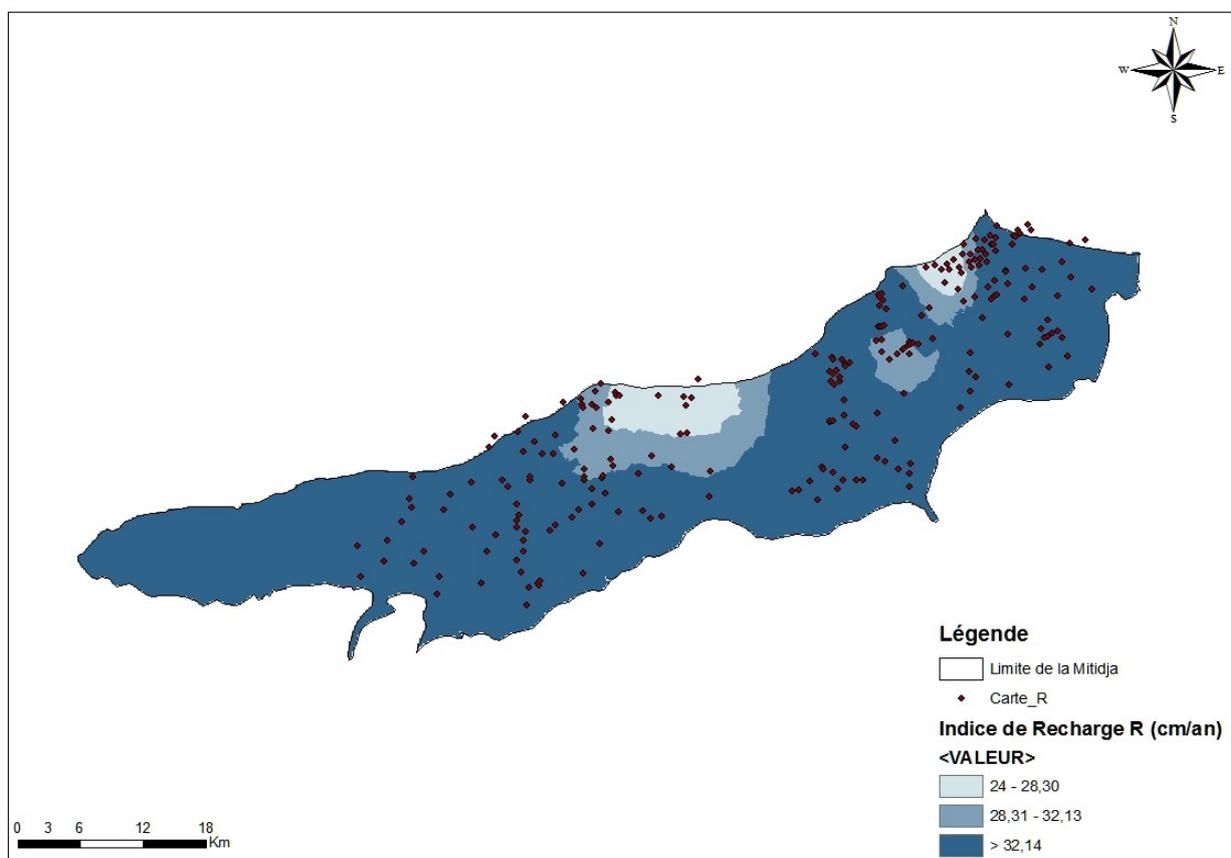
#### V.5.2.2. Carte de l'indice « R » : Recharge de la nappe

Etant donnée sa dépendance à plusieurs facteurs (tels que : la climatologie, la géologie et la topographie du terrain), la recharge de la nappe reste très difficile à estimer.

Les valeurs de la recharge au niveau de la plaine de la Mitidja est très variable, en distinguant trois classes (très forte, forte et moyenne) qui s'étendent du Sud vers le Nord.

La plus grande partie de la plaine présente des zones à fortes et à très fortes recharges, avec une lame infiltrée (provenant des pluies, des oueds et du massif Blidéen) estimée entre 18 et 25 cm/an et un indice partiel supérieur 32. Ces zones s'étendent du Sud-Ouest : Mazafran, Blida et le Nord de Oued Chiffa et Oued Mazafran ; et Sud Est : du côté de Khemis El Khechna et allant jusqu'à Réghaia.

Occupant des superficies plus petites, les zones à recharge moyenne présentent une recharge variant entre 10 et 18 cm/an, avec un indice partiel de 24. Nous retrouvons ces zones au niveau de la Mitidja Ouest du côté de Ahmer El Ain, au Nord de Boufarik et Chiffa ; et au Nord Est dans la région de Bordj El Kifen.



**Figure V.2. :** Carte de Recharge de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « R »)

### V.5.2.3. Carte de l'indice « A » : zone saturée

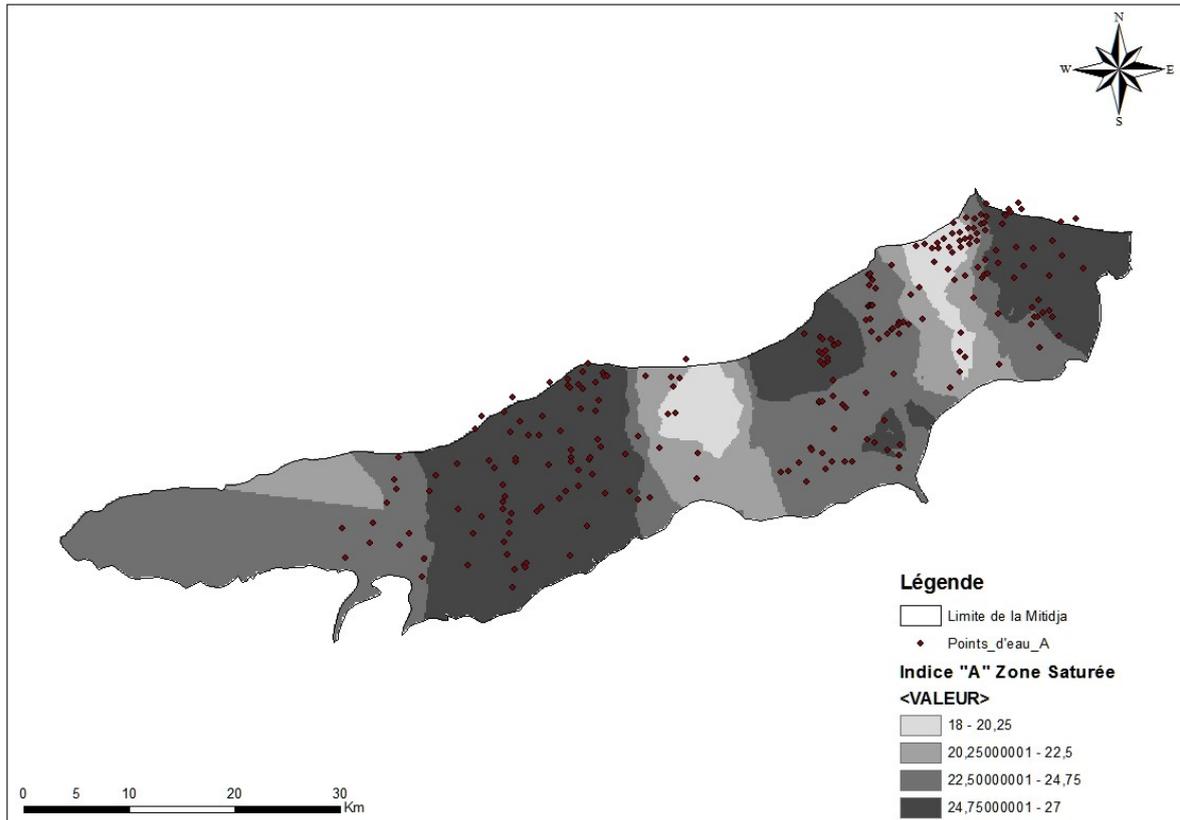
L'analyse des 244 logs lithologiques (ANRH) effectué par Djoudar en 2010, combinée à l'étude de la carte krigée de la transmissivité de la nappe alluviale de la Mitidja, établie par Toubal en 1998, ont permis de tracer une carte de l'indice « A » représentant la zone saturée de la plaine alluviale de la plaine de la Mitidja (figure V. 3).

On y distingue, donc, quatre classes :

- Les classes de Très forte et de forte vulnérabilité : représentée par une première classe (très forte vulnérabilité) constituée de graviers grossiers et moyens appauvri en particules fines avec un indice partiel de 27, et une seconde classe (à forte

vulnérabilité) qui correspond aux graviers et sables avec peu d'argile et s'étale sur la majorité des champs de captage d'Est en Ouest ainsi que les zones de très fortes vulnérabilité, avec un indice partiel égale à 24.

- La classe de moyenne vulnérabilité qu'on retrouve du côté de Mouzaia, Htatba, Oued el Alleug et Mefteh. Ces classes est moins importante, et présente un indice partiel variant entre 18 et 21.
- La classe de faible vulnérabilité présente un indice partiel inférieur à 18. Cette dernière englobe l'Ouest du côté de Ahmer el Ain, le Centre entre Soumaa et Boufarik, et l'Est entre Mefteh et Dar el Baida allant jusqu'à Borj el Kifen.



*Figure V.3. : Carte de la zone saturée de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « A »)*

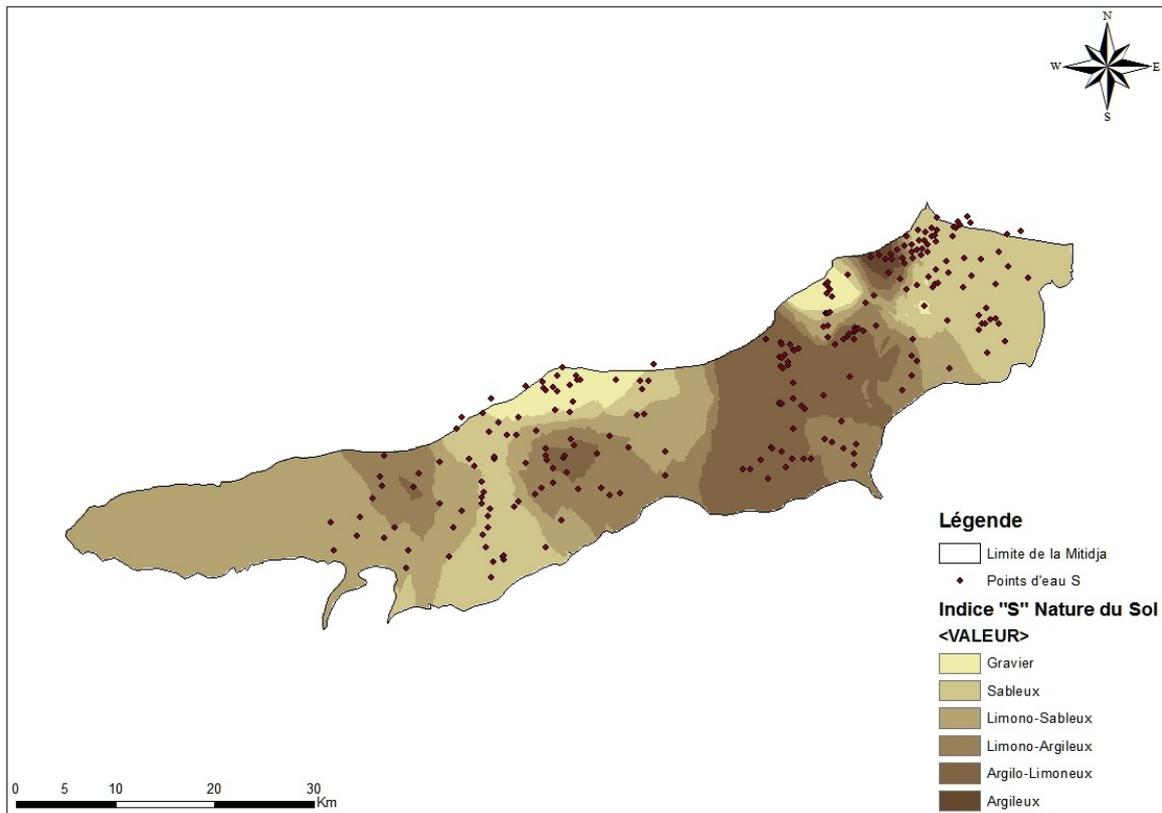
#### V.5.2.4. Carte de l'indice « S » : nature du sol

A travers l'analyse des logs de forages et de la carte agro-pédologique établie par Ecrément en 1971, nous avons pu établir une carte de l'indice « S » représentant la nature du sol de la plaine alluviale de la Mitidja (figure V. ...).

Cette carte nous a permis de distinguer cinq types de sol :

- Le Gravier : on le retrouve du côté de Borj el Kifen et présente un indice partiel de 18 indiquant une forte vulnérabilité.
- Les sols sableux : on les retrouve dans la région Ouest de la Mitidja (H'tatba), au centre (au niveau des champs de captage Blida1, Boufarik et Béni Mered), et à l'Est de la plaine au niveau du bassin versant d'El Harrach (entre Bougara, Larbaa et Mefteh. Ces types de sol sont représentés par un indice partiel important égale à 12.
- Les sols Limono-Sableux : présentant une vulnérabilité moyenne et un indice partiel de 6, et qui occupent la plus grande partie de la plaine d'Ouest à l'Est.

- Les sols Limono-Argileux : caractérisés par de faibles teneurs en Argile et un indice partiel inférieur à 4. Ces sols correspondent à un degrés de vulnérabilité moyen, et on les retrouve au Sud Ouest, au Nord de Ahmer el Ain, au Nord de Boufarik et dans les régions de Dar El Baida, Rouiba et Réghaia.

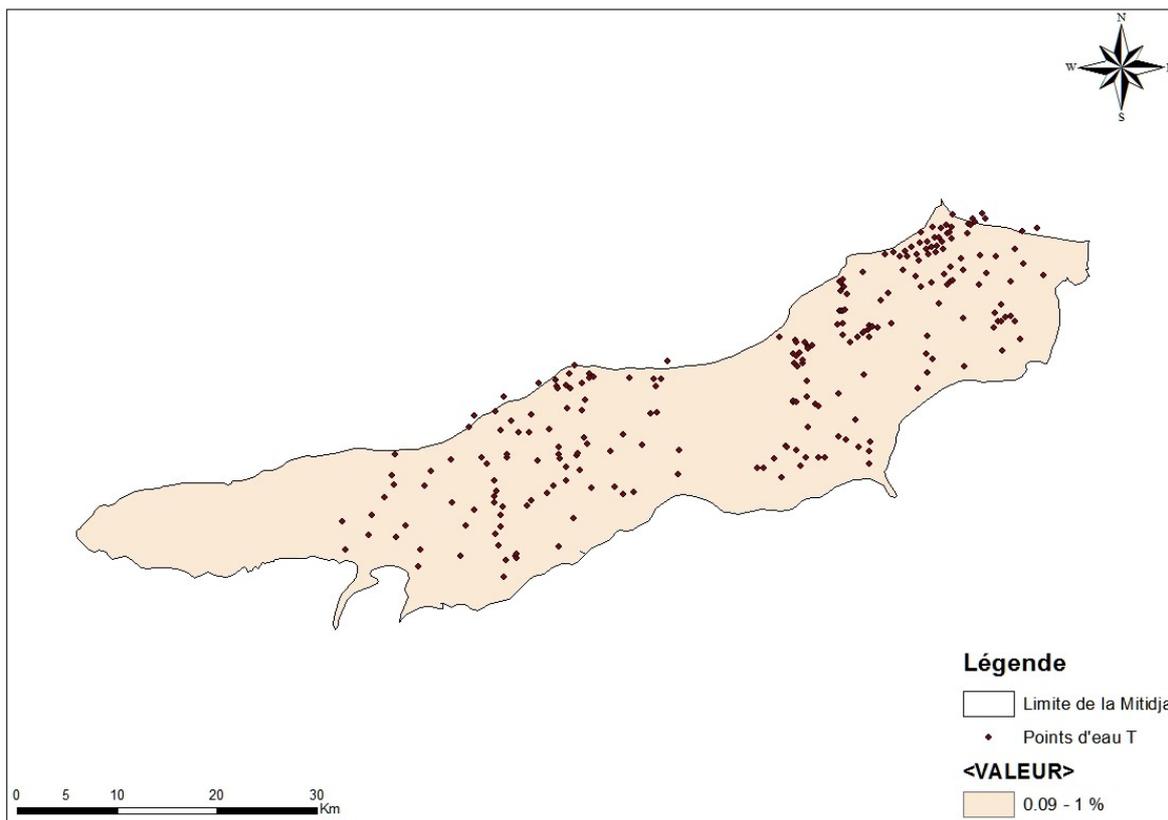


*Figure V.4. : Carte de la nature du sol de la plaine de la Mitidja (l'indice « S »)*

#### **V.5.2.5. Carte de l'indice « T » : Topographie**

La plaine de la Mitidja est caractérisée par une topographie plane avec une pente d'environ 0.5% et une élévation comprise entre 100 m et 150 m par rapport au niveau de la mer sur la limite Sud, et à environ 20 m sur la limite Nord.

Eu égard du degré de vulnérabilité qui fort, ainsi que de l'indice partiel élevé qui est égale à 10, nous pouvons conclure à partir de la carte de l'indice « S » de la nature du sol (figure V. ...), que la quasi-totalité de la plaine est favorable aux transferts de polluants de la surface vers les eaux souterraines.

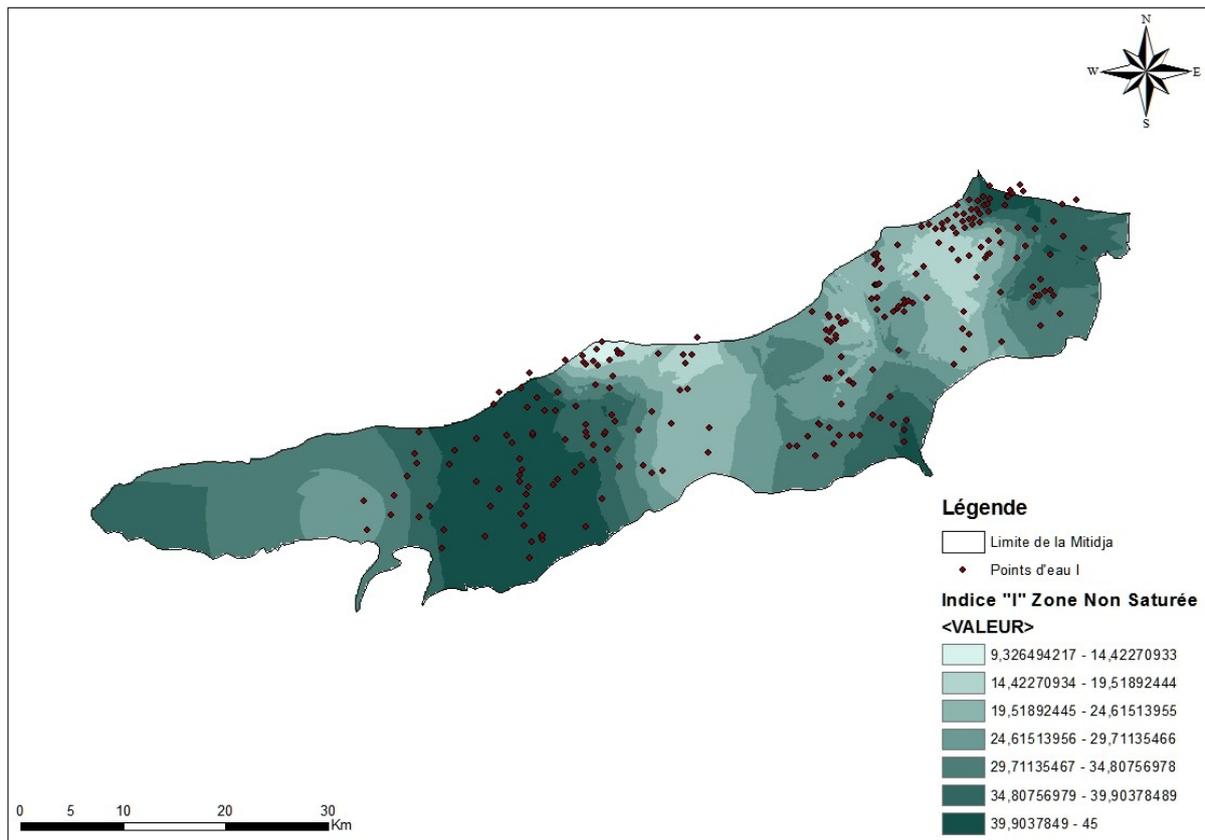


*Figure V.5. : Carte de la topographique de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « T »)*

#### **V.5.2.6. Carte de l'indice « I » : zone non saturée**

Cet indice est très important à connaître puisque la nature et l'épaisseur de la zone non saturée contrôlent d'une certaine manière la pollution des eaux souterraines. L'analyse détaillée des forages a permis la distinction des trois classes (C1, C2 et C3 présentées ci-après), réparties sur toute la plaine, avec de très fortes vulnérabilités caractérisant les champs de captage (figure V. 6) :

- **C1** : étant donnée la nature perméable de ces sols permettant ainsi un taux d'infiltration élevée, et donc un transfert important de polluants vers les eaux souterraines, nous pouvons dire que cette classe est caractérisée par une forte vulnérabilité, avec un indice partiel dépassant 40.
- **C2** : cette classe caractérise les zones à vulnérabilité moyennes, avec un indice partiel variant de 20 à 40.
- **C3** : se caractérise par un indice de vulnérabilité faible, et un indice partiel inférieur à 20, ce qui rend le transfert de polluants vers les eaux souterraines difficile.



**Figure V.6. :** Carte de la zone non saturée de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « I »)

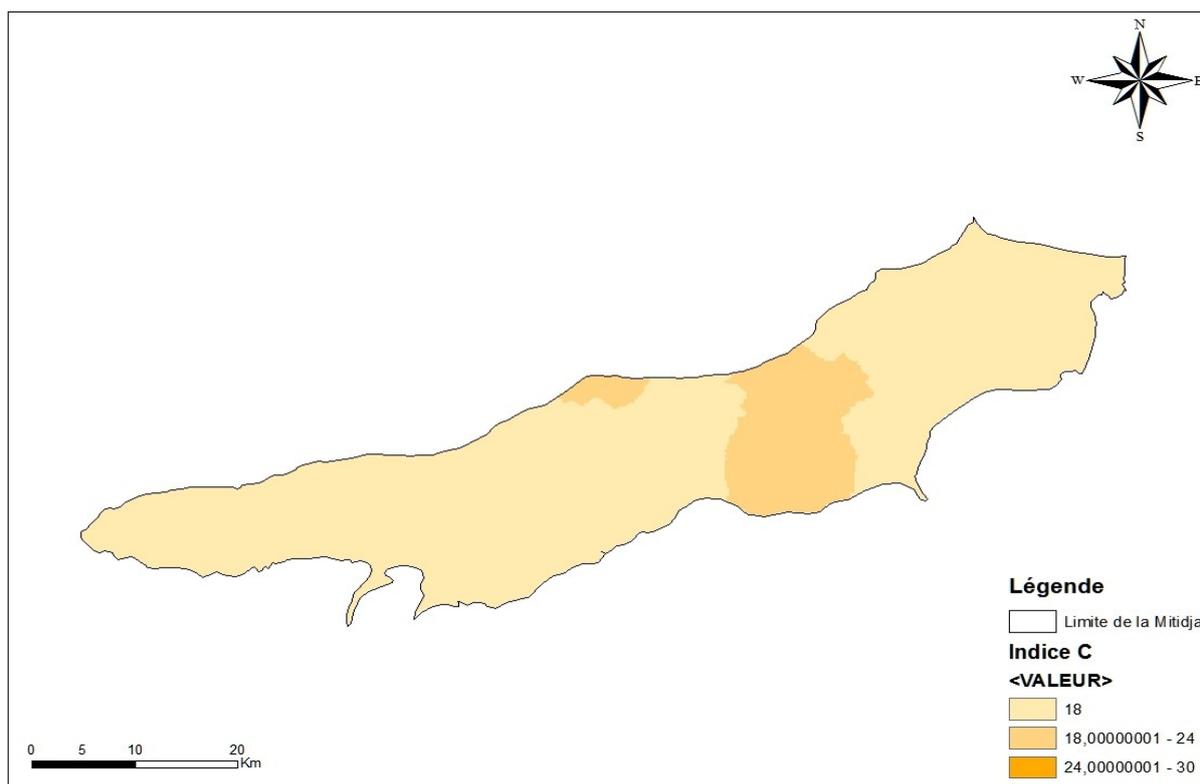
#### V.5.2.7. Carte de l'indice « C » : conductivité hydraulique

Etant donné que la conductivité hydraulique est un paramètre difficile à évaluer, et afin d'élaborer la carte de l'indice « C », le recours à la base de données du modèle mathématique construit par SOGREAH en 2008, la carte des résistances transversales, ainsi que les abaques d'estimation de la perméabilité prenant en considération la nature lithologique des aquifères (*Abaques de Freeze et Cherry, 1979*) présentée en Annexe 07 était nécessaire.

La conductivité hydraulique est comprise entre  $4.7 \cdot 10^{-7}$  et  $9.4 \cdot 10^{-4}$  m/s à l'exception de la région de Rouiba où la valeur de la perméabilité est comprise entre  $10^{-7}$  et  $10^{-8}$  m/s. (*Djoudar, 2010*).

A partir de la carte de l'indice « C » (figure V. 7), on peut distinguer trois zones (Z1, Z2 et Z3) de différents degrés de vulnérabilité :

- **Z1** et **Z2** : zones à très fortes et fortes vulnérabilités, présentant respectivement un indice partiel de 30 et 24, et une conductivité hydraulique supérieure à  $9,44 \cdot 10^{-4}$  m/s et variant entre  $4,720 \cdot 10^{-4}$  m/s et  $9,44 \cdot 10^{-4}$  m/s, respectivement, pour les Z1 et Z2. Ces zones s'étendent du champ de captage de Baraki au champ de captage d'Oued Adda, et légèrement au niveau du Mazafran I et le Nord de Bougara.
- **Z3** : est une zone à vulnérabilité moyenne caractérisée par une conductivité hydraulique variant entre  $3,30 \cdot 10^{-4}$  m/s et  $4,72 \cdot 10^{-4}$  m/s, et un indice partiel de 18. Cette zone s'étale sur la majeure partie de la plaine de la Mitidja.



*Figure V.7. : Carte de la conductivité hydraulique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja (l'indice « C »)*

### V.5.3. Indice de vulnérabilité DRASTIC :

La superposition des quatre cartes paramétriques de la méthode appliquée « DRASTIC », nous a permis d'établir la carte de vulnérabilité de la nappe de la Mitidja à la pollution (figure V.8).

La carte montre que plus de 50% de la surface totale présente une très forte vulnérabilité, avec des valeurs de l'indice DRASTIC dépassant les 200.

Ces zones sont concentrées, en particulier, sur toute la Mitidja Ouest, et une bonne partie de la Mitidja Est.

Il est, donc, nécessaire d'assurer la protection des ressources en eau souterraines en se basant sur une identification des zones à risque et à forte voir très forte vulnérabilité.

A travers l'analyse de la carte de vulnérabilité, nous avons pu identifier trois (03) zones :

- **Zones à vulnérabilité très élevée :**

Occupant la majeure partie de la superficie totale de la Mitidja, elle est caractérisée par un indice DRASTIC supérieure à 200.

Ces zones se localisent à l'Ouest du côté de Oued El Alleug, au Nord de Chiffa et de Blida, et dans la partie Est notamment du côté du champ de captage de Baraki et du Hamiz. Et sont caractérisée par une structure poreuse et perméable, la profondeur de l'eau ne dépasse pas les 30 m, et une recharge supérieure à 25 cm/an.

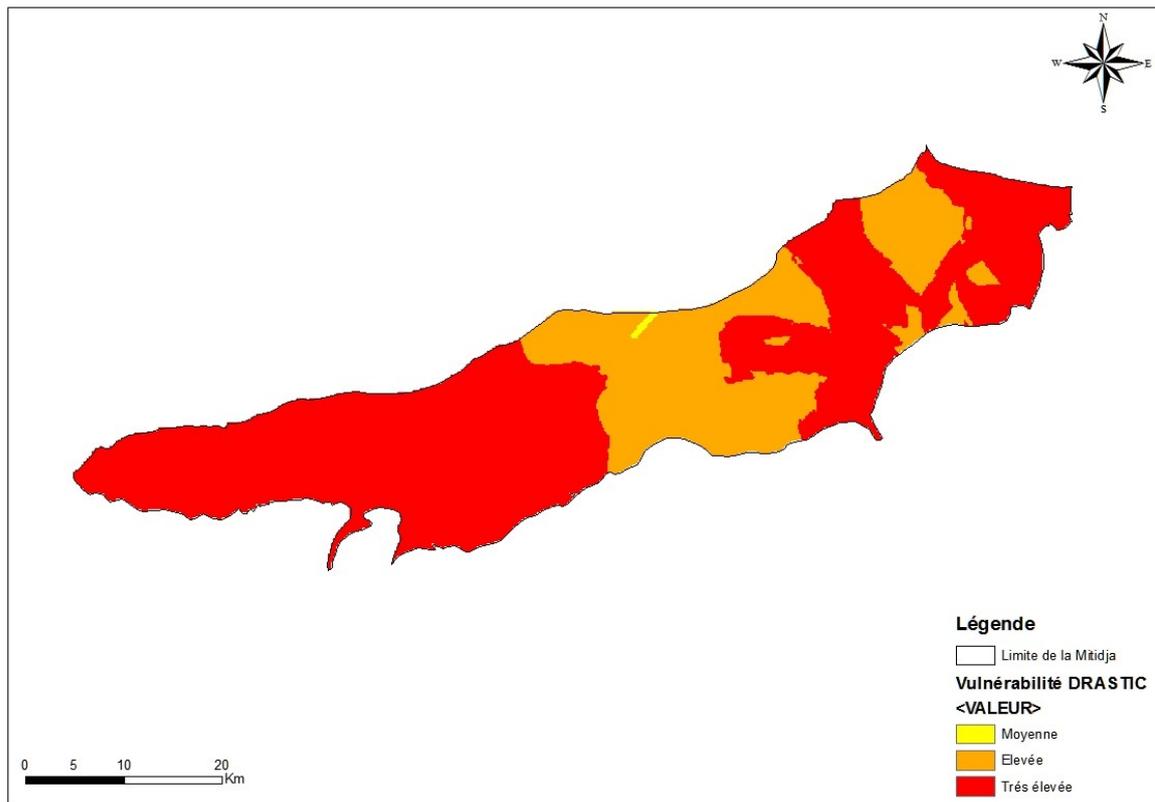
- **Zones à vulnérabilité élevée :**

Ces zones occupent une superficie assez importante dans les parties Centre et Est de la Mitidja (environ 35% de la superficie totale).

Elle couvre surtout les zones des champs de captages les plus importants de la nappe alluviale de la Mitidja (Baraki, Haouch Fellit et Hamiz dans la Mitidja Est, et une bonne partie de la Mitidja centre). Ces zones sont caractérisées par un taux de recharge variant de 18 à 25 cm/an.

- **Zones à vulnérabilité moyenne :**

Ces zones ne sont pas vraiment marquées sur la carte, puisqu'elles représentent une superficie négligeable par rapport à la superficie totale.



*Figure V.8 : Carte de la vulnérabilité DRASTIC des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja à la pollution*

### V.6. Validation de la méthode DRASTIC par la méthode chimique :

Afin de valider la carte de vulnérabilité DRASTIC, un recours à une analyse chimique de l'eau souterraine s'impose. Nous nous sommes intéressées dans cette partie, en particulier à la pollution par les nitrates qui constituent un risque majeur.

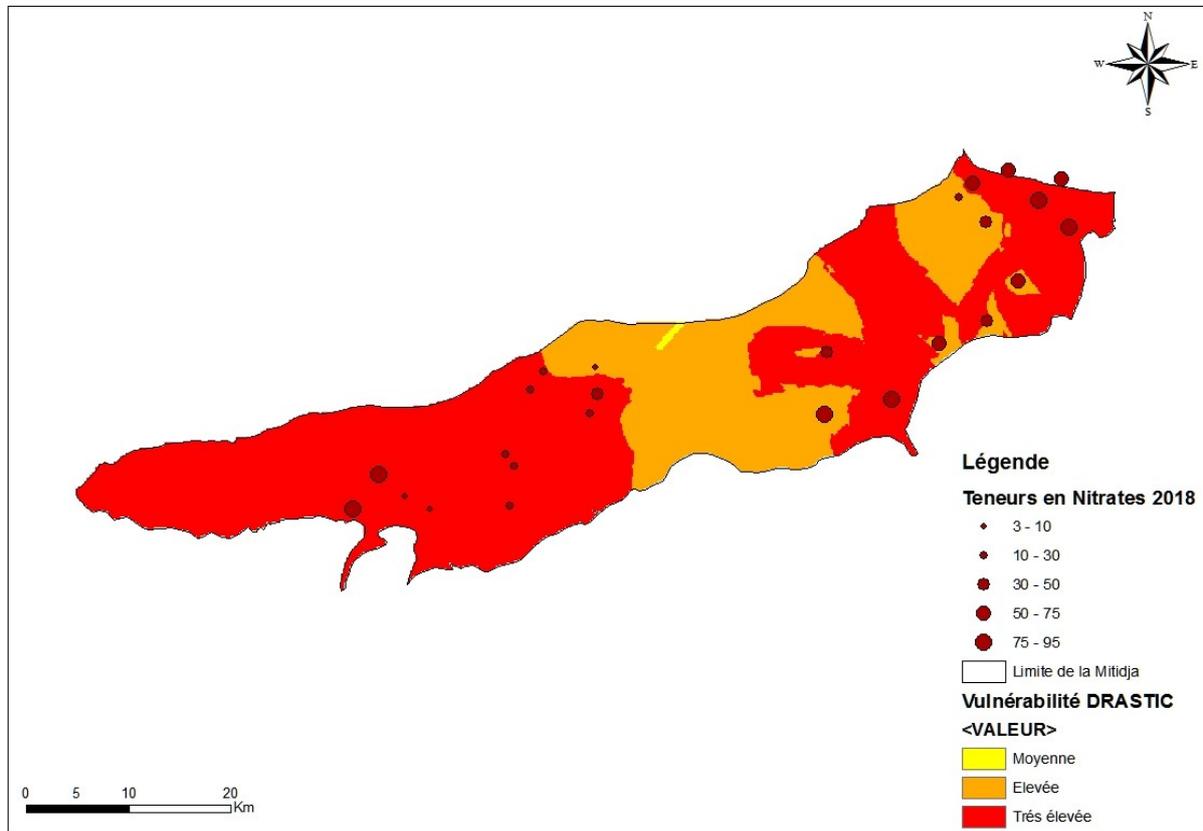
Pour se faire, un échantillonnage a été effectué dans 25 points d'eau. En effet, plusieurs auteurs *Isabel et al, (1990) ; Jourda et al, (2006) ; Gabriel et al. (2008) ; Saidi ., (2011) ; Sathish et Elango., (2011)*; ont vérifié la validité des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité à la pollution en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines (*Djoudar, 2010*).

Nous avons, donc, rajouter une carte représentant les teneurs en nitrates des eaux de la nappe, que nous avons superposé à la carte de Vulnérabilité DRASTIC.

A partir de la carte, nous pouvons constater que la répartition spatiale des teneurs en nitrates de la nappe alluviale de la Mitidja sur la carte de vulnérabilité DRASTIC, présente une bonne concordance avec la réalité du terrain, les valeurs élevées se répartissent sur les périmètres irrigués du côté du Mazafran, Blida et Hamiz, et sur les zones proches des zones industrielles de Rouiba et Réghaia au Nord Est. En notant, que l'agriculture n'est pas la seule source de

pollution par les nitrates dans la zone d'étude, puisque l'industrie et les réseaux de collecte des eaux usées défectueux, y jouent un rôle important.

Les fortes concentrations en nitrates (dépassant les 50 mg/l) se localisent, en particulier, au niveau de la Mitidja Ouest (connue pour sa vocation agricole) et dans la Mitidja Est (où on trouve des zones industrielles importantes).



**Figure V.9 :** Répartition spatiale des concentrations en nitrates des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja sur la carte de vulnérabilité à la pollution DRASTIC.

Le test de validation de la méthode DRASTIC par les nitrates appliquée à la nappe alluviale de la plaine de la Mitidja, nous permet de conclure que la carte établie pour cette approche présente une bonne concordance avec les teneurs en nitrates issus des analyses de l'eau. En effet, le taux de concordance est estimé à plus de 50% des zones à très forte et forte vulnérabilité.

Cependant, afin d'obtenir des résultats plus précis et représentatifs, il est nécessaire d'effectuer des analyses des eaux souterraines sur un nombre plus important de points d'eau et que ces derniers soient bien réparties sur la zone d'étude.

## CONCLUSION GENERALE

Connue pour son climat semi-aride et aride, l'Algérie souffre ces dernières années d'une pénurie d'eau persistante. Le facteur anthropique est, en majeure partie, la principale origine de ce manque à cause de l'accroissement des besoins et du gaspillage inconscient de cette denrée rare.

Comme toutes les régions du pays, la plaine de la Mitidja, connue autrefois pour sa vocation agricole par excellence, souffre énormément de ce problème de manque d'eau. Le recours aux ressources non renouvelables est problématique, en effet la nappe de la plaine de la Mitidja a observé un rabattement considérable du niveau de la nappe. Ce dernier est dû principalement à l'utilisation des ressources en eau souterraines de façon excessive, à travers des pompages des forages licites et surtout illicites.

La méthodologie présentée dans ce travail nous a permis de faire des constats sur les principales caractéristiques hydrogéologiques de la Mitidja et d'évaluer les effets des actions anthropiques sur la nappe tant d'un point de vue quantitatif (niveaux de la nappe) et qualitatif (analyses hydrochimique de la nappe).

A l'issue de cette étude, on peut dire que la plaine de la Mitidja s'étant sur quatre wilayates, et on y distingue quatre (04) sous bassins versants, avec un réseau hydrographique très fourni. La détérioration de la qualité de l'eau et le rabattement du niveau de la nappe, a pour cause l'intensification agricole d'une part et la prolifération industrielle d'autre part, ainsi que le nombre indéfini de forage (surtout illicites).

La plaine de la Mitidja jouit d'une superficie de 1450 km<sup>2</sup>, divisée en quatre sous bassins versants (El harrach, Hamiz, Mazafran et Nador de forme allongés (exception faite du Mazafran qui présente une forme ramassée), ce qui permet une bonne infiltration des eaux de pluie (ruissellement lent). La plaine est caractérisée par un important réseau hydrographique. Les altitudes se comprises entre 0 et 1 600 m avec un couvert végétal forestier abondant en amont, et une zone agricole sur la plaine, en plus de l'industrie et de la population (1287.3 hab/Km<sup>2</sup>).

Dans la partie présentation de la zone d'étude nous avons pu, définir les caractéristiques de la plaine de la Mitidja du point de vu morphologique, climatique, piézométrique et hydrochimique, en ayant effectué des analyses détaillées de ces derniers.

Le climat de la région d'étude est de type méditerranéen, avec une saison sèche (mai à septembre) et une saison froide et humide (octobre à avril).

L'étude de la piézométrie nous a permis de mettre en évidence la surexploitation de la nappe alluviale. Cette dépression est due principalement, à une importante prolifération des forages et puits qui est passé, selon l'ANRH, de 1492 en 1970 à 4193 en 1997 (voir le triple). En plus l'augmentation du nombre de forages illicites (non inventoriés).

En ce qui concerne l'analyse hydrochimique, les campagnes d'études 2006, 2008, 2016 et 2018, ont montrées que la nappe de la Mitidja se caractérise par un faciès chimique de type Chloruré, sulfaté calcique et magnésien.

Il est à noter que le phénomène d'intrusion marine persiste dans zone Est de la Mitidja, ce qui influe sur la qualité des eaux souterraines et les sols agricoles da la région.

De même pour les nitrates, puisque nous notons des valeurs élevées sur pratiquement toute la plaine, d'Est à l'Ouest, en notons des concentrations alarmantes dépassant la norme de potabilité de l'OMS qui est de 50mg/l. Cette pollution par les nitrates est d'origine anthropique, et est expliquée par une intensification agricole (application excessive des engrais azotés) surtout dans la partie Ouest, ainsi que les rejets urbains et industriels qui sont déversés directement dans les Oueds et en mer.

L'approche géostatistique nous a permis de mettre en exergue l'état de la nappe, du point de vue niveaux piézométriques et teneurs en nitrates, à travers les résultats d'analyse obtenus pour quatre campagnes 2006 et 2016 (Mitidja Est), 2008 et 2018 (Mitidja Ouest).

L'étude nous a permis de tirer les constatations suivantes :

- Les deux variables ont montré une corrélation spatiale plus ou moins structurée avec des modèles généralement sphériques et exponentiels de faible effet nugget. On peut dire que les modèles ajustés sont statistiquement robustes et satisfaisants, puisque nous avons obtenu une moyenne des Erreurs Standards (MES) proche de zéro '0' et une variance des erreurs Standards (VES) autour de '1'.
- Présence d'un sens d'écoulement convergeant vers les champs de captage de Baraki et d'El Hamiz avec des niveaux variant entre 10 et 15 m au-dessous du niveau de la mer. Ceci s'explique par une surexploitation de la nappe et le manque de la recharge naturelle de la nappe par infiltration dues aux faibles voir absences des pluies enregistrées durant la dernière décennie.
- L'analyse des cartes établies pour la Mitidja Est et Ouest, montre un rabattement de la nappe est assez important, en direction des champs de captage. Ceci est expliqué par le pompage excessif durant ces périodes induisant une sécheresse enregistrée dans la région. En confrontant ces cartes à celle établie en 1998 à nous remarquons que le niveau piézométrique a, effectivement, subit une baisse considérable.
- En ce qui concerne l'évolution des nitrates pour les campagnes 2006 et 2008, les résultats obtenus montrent, qu'en général, de fortes concentrations en nitrates dépassant les 50 mg/l au Sud- Ouest de la Mitidja Est, Central et Ouest de la Mitidja Ouest en période des basses eaux. Cependant, en période des hautes eaux les teneurs en nitrates atteignent dans la Mitidja Est de très fortes concentrations allant jusqu'à dépasser les 600 mg/l.
- L'année 2016 présente des teneurs importantes en nitrates dépassant les 50 mg/l, du côté Est et Ouest de la zone d'étude (Mitidja Est), et L'année 2018 par contre, présente (basses eaux) des concentrations en nitrates élevées (entre 50 et 94 mg/l) dans les parties Ouest et Est de la Mitidja Ouest. nous notons, qu'en période des basses eaux, une légère contamination de la nappe par les nitrates sur une grande partie de la Mitidja Ouest avec des valeurs variant entre 50 et 67 mg/l.
- Une diminution remarquable des concentrations en nitrates dans la zone centrale de la Mitidja Est, est expliquée probablement par la diminution de l'utilisation des fertilisants azotés de façon excessive par les agriculteurs, ainsi que la réhabilitation des stations d'épuration de Baraki et de Réghaia, permettant ainsi le rejet d'une eau usée épurée (d'origine industrielle) de meilleur qualité.
- Par contre, en Mitidja Ouest, nous remarquons une augmentation de la teneur en nitrates en période des hautes eaux en comparant les deux campagnes 2008 et 2018. Cette élévation est probablement due à l'utilisation excessif des fertilisant azotés par les agriculteurs dans cette région, connue pour sa vocation agricole.

La méthode DRASTIC nous a permis d'établir une carte de vulnérabilité de la nappe à la pollution, en particulier, par les nitrates (qui a fait l'objet de la validation de la méthode DRASTIC).

A travers la carte finale obtenue (après superposition des différentes cartes paramétriques DRASTIC), nous pouvons constater que la situation est alarmante, quant au risque de pollution des eaux souterraines, puisque plus de 50% de la surface totale de la plaine de la Mitidja est considérée comme zone à vulnérabilité très élevée. Ceci est également confirmé, à travers la

validation de la méthode DRASTIC par les teneurs en nitrates obtenues à partir d'analyse chimique de différents points d'eau échantillonnés.

### **Recommandations**

Afin d'arriver un équilibre de la balance offre-demande, dans la plaine de la Mitidja, il primordial de mettre au point des mesures permettant une exploitation optimale de la nappe. Ces derniers vont permettre de mieux gérer les ressources et de les protéger. Pour cela, il nécessaire d'opter pour des méthodes de gestion de la ressource en suivant un certain nombre de recommandations (citées plus bas), afin d'améliorer l'état de la nappe tant du point de quantitatif que qualitatif.

- Mettre en place un bon réseau de surveillance permettant le contrôle régulier des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et superficielles, afin d'évaluer la qualité des eaux.
- Un réseau d'observation piézométrique est, également nécessaire, avec des mesures mensuelles du niveau de la nappe de façon régulières.
- Sécuriser les champs de captage et éviter l'implantation des ouvrages d'AEP au niveau des berges des oueds, car cela produirait un abaissement du niveau piézométrique dans l'ouvrage et donc provoque un écoulement des eaux de l'oued vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité des eaux de la nappe.
- Obliger les industriels à installer des systèmes d'épurations des rejets de leurs usines avant de les rejeter dans le milieu naturel, surtout dans les régions où la présente une forte vulnérabilité à la pollution.
- Favoriser la méthode de recharge artificielle de la nappe à travers l'installation de bassins d'infiltration.
- Mettre fin au pompage des eaux souterraine dans la zone de la Mitidja Est (Baie d'Alger), puisque le phénomène d'intrusion marine dans cette région prend de l'ampleur, se répercutant sur la qualité des eaux souterraines et sur la qualité des sols "agricoles".

## **Références Bibliographiques**

- ABH, (2000)** : Rapport de l'Agence des Bassins Hydrographiques.
- Achi K., Salem A., Combes P., Couchot A., Grenet B., Pradines D. (1973).** Carte hydrogéologique d'Alger à 1/200 000. ANRH. Alger.
- Ait Ouali, AEK. (2007).** Synthèse hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution du système aquifère quaternaire de la Mitidja. Mémoire de magistère, IST\_USTHB.Alger, 123p.
- ANRH (2013).** Evolution of the piezometric Mitidja aquifer Note. ANRH Report, 46p.
- ANRH-SOGREAH (2008)** : Etude de lutte contre l'intrusion marine dans la baie d'Alger. Coopération Algéro-Belge, Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin hydrographique Algérois. 31 p.
- Appelo C.A.J., Postma D. (2005).** Geochemistry, groundwater and pollution (2nd ed.). Balkema: Rotterdam, the Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>.
- Arnaud M., Emery X. (2000).** Estimation and spatial interpolation. Hermes Science Publications, Paris. 221p
- Arrate I., Sanchez-Perez J.-M., Antiguada I., Vallecillo M.A., Iribar V., Ruiz M. (1997).** Groundwater pollution in Quaternary aquifer of Vitoria-Gasteiz (Basque Country, Spain). Environ. Geol. 30, 257–265. <https://doi.org/10.1007/s002540050155>.
- AYME, A. (1956).** Contribution à l'étude de la plaine de la Mitidja occidentale et de sa bordure. Atlasique. Bul. Serv. cartes. Géol. D'Algérie. N° 347-362.
- Babiker I, Mohamed AA, Tetsuya H, Kikuo K. (2005).** A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Sc. Tot. Env. 345 : P 127-140.
- Ben cheikh N. (2010).** Cartographie hydrogéologique de la Mitidja Est. MFE d'ingénieur d'état en Géologie appliquée. USTHB Alger.
- Ben Moussa A., Zouari K. (2011).** Hydrochemical Investigation of Groundwater Contamination in the Grombalia Shallow Aquifer, Cap Bon Peninsula, Tunisia: Impact of Irrigation with Industrial Waste Water. Waste Water - Evaluation and Management. ISBN 978-953-307-233-3.
- Bennie & Partners, (1983)** : Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger.
- Benziada M. (2003)** : Hydrologie de la plaine de la Mitidja Orientale (Algérie). Bulletin des Sciences Géographiques N° 11, Avril 2003. Pp 43 - 52.
- Bernard-Michel C, (2006)** : Indicateurs géostatistiques de la pollution dans les cours d'eau. 194p. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris .Spécialité «Géostatistique».
- Bettahar N., Benamara A. A., Kettab A., Douaoui A. (2009).** Risque de pollution nitratée des zones semi-arides : cas de la vallée du moyen Cheliff occidental (Nord Algérien). Revue des sciences de l'eau. Volume 22, numéro 1. p 69-78.
- Bijay-Singh, Yadvinder-Singh, Sekhon G.S. (1995).** Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. J. Contam. Hydrol. 20, 167–184, [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722\(95\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722(95)00067-4).
- Bijay-Singh, Yadvinder-Singh, Sekhon G.S. (1995).** Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. J. Contam. Hydrol. 20, 167–184, [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722\(95\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7722(95)00067-4).
- Bose, B., Srivastava, H.S. (2001).** Absorption and accumulation of nitrate in plants: influence of environmental factors. Indian J. Exp. Biol. 39, 101–110.
- Boufekane A. (2017).** Hydrologie et hydrogéologie de la région de Jijel Etude de la pollution des nappes et méthodologie de protection des ressources. 279p. THESE Présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences. Sciences de la Terre, Spécialité : Hydrogéologie. USTHB
- Bouguechtouli Mebarka (2011)** : Aquifère côtier en zone fortement urbanisée. Evolution du comportement hydrodynamique et hydrochimique : Cas de la Mitidja orientale. Mémoire de Magister. Univ USTHB. 182 p.
- Braham Massinissa (2011)** : Approche intégrée de la vulnérabilité des aquifères par utilisation des données spatio-temporaires, de la géostatistique et des systèmes d'information géostatistiques. Mémoire de Magister. USTHB 225 p.
- Carpenter S.R., Caraco N.F., Correll D.L., Howarth R.W., Sharpley A.N., Smith V.H. (1998).** Non point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecol. Appl. 8, 559–568. [http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008](http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008).
- Castany G. (1982).** Principe de l'hydrogéologie Ed. Dunod Université – Bordas, Paris, 238p.

- CGG, (1967)** Etude par prospection électrique de la plaine de la Mitidja. Compagnie générale de géophysique .Paris .rapport ,ANRH,Alger.
- CGG, (1968)** Etude par prospection électrique dans la plaine du Hamiz.
- Charfi S., Zouari K., Feki S., Mami E. (2013).** Study of variation in groundwater quality in a coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis. Quaternary International. [Volume 302](#), 17 July 2013, Pages 199-209.
- Chenini, I., Zghibi, A., Kouzana, L. (2015).** Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resources protection and management: state of the art and a case study. J. Afr. Earth Sci. 109, 11–26.)
- Chilès Jean-Paul, (2004) :** « La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications » Mémoires des Sciences de la Terre N° 2004.01Habilitation à diriger des recherches, 71p.
- Cressie N.E. (1993).** Statistics for Spatial Data, revised edition. ed. Wiley & Sons Inc., New York. 900pp. ISBN: 978-1-119-11461-1
- Debieche T.H (2002).** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azoté et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat. U. F. R. des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté.
- Delhomme J.P., (1976) :** « Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. (Variabilité spatiale des grandeurs hydroclimatiques et hydrogéologiques & précision de leur connaissance) ». Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 1976, p167.
- Deme I., Tandia A.A., Faye A., Malou R., Dia I., Diallo M.S., Sarr M. (2006).** Management of nitrate pollution of groundwater in African cities: the case of Dakar, Senegal. In: Xu, Y., Usher, B.H. (Eds.), Groundwater Pollution in Africa. Balkema, Leiden, The Netherlands, pp. 181–192.
- Deramchi, (2014).** La gestion intégrée de la ressource en eau. International integrated Basin management Workshop, p19.
- Diédhiou M., Cissé Faye S., Diouf O.C., Faye S., Faye A., Re V., Wohnlich S., Wisotzky F., Schulte U., Maloszewski P. (2012).** Tracing groundwater nitrate sources in the Dakar suburban area: an isotopic multi-tracer approach. Hydrol. Process. 26:760–770. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8172>.
- Djouidar/Hallal D. et Toubal AC., (2010) :** «Application de la méthode « DRASTIC modifiée» à la cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale du Sébaou » 5ème Conférence internationale « sur les ressources en eau du bassin méditerranéen » du 26-28 mai 2010, Polytech 'LILLE, cité scientifique, Villeneuve d'Ascq, France.
- Djouidar D. (2010).** Methodological approach of the vulnerability of the underground water resource in a strongly urban area : example in Algeria of the coastal plains (Mitidja). Doctorate Es-Sciences Thesis, USTHB, Alger.
- Djouidar Dahbia (2014) :** Approche méthodologique de la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine en milieu fortement urbanisé : exemple en Algérie des plaines littorales (Mitidja). Thèse de doctorat. USTHB.196 p.
- Djouidar/Hallal D. et Toubal AC., (2014) :** « Geostatistical modeling of nitrate pollution of groundwater in the Mitidja ». 6th IAHS International Symposium on Integrated Water Resources Management 4-6 juin Bologna, Italie.
- Djouidar D. (2019).** Khelfi M.A., Zahouani S., Benamghar A., Haddad O., Ammari A., Lobo-Ferreira J.P.. Application of the GALDIT method combined with geostatistics at th Bouteldja aquifer (Algeria). Environment Earth Sciences. 78:22, p.6-18.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990).** Physical and chemical hydrogeology (p. 824). New York: Wiley. ISBN: 978-0-471-59762-9.
- Douaoui A. (1993).** Variabilité spatiale de quelques propriétés physico-chimiques des sols du moyen Cheliff, incidences cartographiques. Thèse de Magister. INA Alger. 210 P.
- Durand – Delga. M. (1961)** Esquisse structural de l'Algérie. lexique stratigraphique international Vol IV,Afrique Vol. 16, Algérie.
- Durand Delga, M. (1969)** Mise au point sur la structure du NE de la Berbérie. Publ. Serv .Carte géologique .Algérie, nouv. sér., 39, 85-131

- Ecrement.Y., Seghir.B , (1971)** : Etude agro-pédologique de la plaine de la Mitidja. Rapport ANRH. Alger.
- Energoprojekt (2011)**. 60 years of success (pdf). Beograd : Energoprojekt. Available at “www.Energoprojekt.rs/pdf/monografija\_60\_god\_web.pdf”. Accessed 1 November 2013.
- FAO Irrigation and drainage** paper No. 56. January 1998.
- Gabriel E.A., Kouassi Dongo, H, K, Boyossoro, Brou Dibi, B.S Mahaman, J. Biemi., (2009)** : Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171
- GéoSiPol, (2005)** : Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués ; « Manuel méthodologique et exemples d'applications », Version 1, novembre 2005.
- Glangeaud, A., (1952)** : Etude géologique de la région littorale d'Alger. Bull. Serv. Carte. Géol. Algérie., 2ème série, n°8, 2 tomes.
- Glangeaud, L. et Ayme, A., 1952** : Histoire géologique de la province d'Alger. XIX Congrès international, Alger. Monographies régionales, première série, Algérie, N°25 (SGA), ALGER.
- Goovaerts P (2000)**. Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. Geoderma 97:165–186. doi:10.1016/S0016-7061(00)00037-9.
- Gouaidia, L., (2008)**. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana, nord-est algérien (Ph.D. thesis). Badji Mokhtar-Annaba University, Algeria.
- Grizzetti, B., (2011)**. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press.
- Guler, C., & Thyne, G. D. (2004)**. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells–Owens Valley area, southeastern California, USA. Journal Hydrology, 285, 177–198.
- Haddouche A., Toubal A.C. (2011)**. Approche comparative de la vulnérabilité intrinsèque d'aquifères soumis à des climats contrastés : Plaine de la Mitidja au Nord et Vallée de Oued M'ya au Sud de l'Algérie. Thèse de Magistère. USTHB, Alger.
- Hadjoudj O. (2008)**. Nitrates Pollution of the Mitidja aquifer. Doctoral Thesis, Algiers University, Benyoucef BENKHEDDA. 370 p.
- Hadjoudj O., Bensemmane R., Saoud Z., Reggabi M. (2014)**. Pollution des eaux souterraines de la mitidja par les nitrates : État des lieux et mesures correctives. European Journal of Water Quality. p57-68.
- Hartani, (2004)**. La réutilisation des eaux usées en irrigation : cas de la Mitidja en Algérie. Project: [SICMED REUT Med project](#)
- Jégo, G., Sánchez-Pérez, J.M., Justes, E. (2012)**. Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. Agric. Water Manage. 107, 54–65, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.007>
- Joseph J, Sharif HO, Sunil T, Alamgir H (2013)** Application of validation data for assessing spatial interpolation methods for 8-h ozone or other sparsely monitored constituents. Environ Pollut 178:411–418. doi:10.1016/j.envpol.2013.03.035.
- Jourda J.P., M.B. Saley, J. Kouame, B. H. Kouadio, J. Biemi, M. Razack, (2005)** : Université de Poitiers « Gestion et protection des ressources en eaux souterraines : contribution d'un SIG à la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères fissures de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) selon la méthode DRASTIC ».
- Kaben O. (2012)**. Identification hydrodynamique d'un système aquifère hétérogène. Magister. USTHB Alger.
- Kafia S. et TOUAT F. (2012)**. Etude hydrochimique et suivi de l'évolution de la qualité des eaux de la nappe alluviale de Mitidja. Master. USTHB, Alger.
- Keblouti M, Ouerdachi L, Boutaghane H (2012)** Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria—comparison and evaluation of methods. Energy Procedia 18:468–475. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.058.
- Khalili K, (2014)** Comparison of Geostatistical Methods for Interpolation Groundwater Level (Case study: Lake Urmia Basin) J. Appl. Environ. Biol. Sci., 4(1s)15-23, ISSN: 2090-4274.

- Kherbach M & Khaladi N (2014)** La problématique de l'eau en Algérie : Enjeux et contraintes ; These de doctorat Univ Abderrahmane MIRA, Bejaia Pp268.
- KOUSSA M. (2018)** : Étude comparative entre les méthodes d'interpolation pour la cartographie des Nitrates : Cas d'application les eaux souterraines de Djelfa, Algérie. Agriculture and Forestry Journal. Vol. 2, Issue 1, pp. 18-25, June, 2018. E-ISSN 2602-5795. Published by university of Tlemcen – ALGERIA
- Kravchenko AN (2003)** Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods.
- Léonard Bernard-Jannin (2015)**. Spatio-temporal analysis of factors controlling nitrate dynamics and potential denitrification hot spots and hot moments in groundwater of an alluvial floodplain. Ecological Engineering. 13p. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.12.031>.
- Liu, G.D., Wu, W.L., Zhang, J. (2005)**. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture nitrate nitrogen in groundwater in northern China. Agric. Ecosyst. Environ. 107, 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.11.010>.
- LOUATI B. (2015)**. Magister, en hydrogéologie ,208pages. Faculté des sciences de la terre Département de Géologie. Université Badji Mokhtar-Annaba.
- Mac Donald, M. et partIners limited Cambridge (1992)**. Angleterre en association avec W.S. Atkins et partners, BNEDER (1992) Étude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja.
- Mac Donald, M., partners limited Cambridge (1997)**. Angleterre en association avec W.S. Atkins et partners, BNEDER 1997 : Etude de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de la Mitidja.
- Macko S. A. and Ostrom N. E. (1994)**. Pollution studies using stable isotopes. In : Lajtha K. and Michener R., Stable isotopes in ecology. Blackwell, Oxford, pp. 45-62.
- Makhlouf Nouara (2012)** : Cartographie et évolution de l'état actuel du biseau salé de la baie d'Alger et son impact sur l'AEP (champ de captage du Hamiz) et l'industrie (champ de captage de Rouiba). Mémoire de Magister. Univ USTHB 151 p.
- Mamadou Sall, (2010)**. Transfert de nitrate à travers la zone non saturée du sol vers la nappe phréatique de la zone des Niayes : caractérisation et modélisation. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique. 347p. Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale, Université Catholique de Louvain
- Mania J., Imersoukene S., Braillon JM. (1985)**. la pollution saline de la nappe côtière à l'Est d'Alger. Hydrogéologie, n°3. pp. 213-226.
- Meddi M., Boufekane A., Meddi H., Saidi H., Chebah M., et Moumtz R. (2016)** Rapport général du projet PNR, Recharge artificielle de la nappe de la Mitidja. Pp 39.
- Minister des Ressources en Eau**, l'agence de bassin Algérois – Houdna - Soummam (2002) Bassin de l'Algérois carnet N°1 : 1-37. <http://www.abhahs.org/media/documents/carnet02.pdf>.
- Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement : MATE, avril 2005.**
- Mutin G., (1977)**. La Mitidja, décolonisation et espace géographique, Paris, CNRS, 607 p.
- Ohou-Yao M. J. A., Séka A. M., Mambo V., Yapo O. B., Konan K. F., Houéno P. V. (2014)**. Contamination des eaux de puits traditionnels par les nitrates sur le bassin versant de la Lobo (Buyo, sudouest de la Côte d'Ivoire). Journal of Applied Biosciences 78:6654 – 6665.
- PAC, (2004)** : Maitrise de l'urbanisation et de l'artificialisation des sols. Projet d'aménagement. Rapport : Etude prospective de l'urbanisation Phase 2. 2004. 66 pages.
- Pierre Penant, (2016)**. Caractérisation des sources de nitrate dans les aquifères cristallins du Centre du Bénin. Master. 97p
- Power, J.F., Schepers, J.S. (1989)**. Nitrate contamination of groundwater in North America. Agric. Ecosyst. Environ. 26, 165–187, [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90012-1](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(89)90012-1).
- Re V., Cissé Faye, S., Faye, A., Faye, S., Gaye, C.B., Sacchi, E., Zuppi, G.M. (2011)**. Water quality decline in coastal aquifers under anthropic pressure: the case of a suburban area of Dakar (Senegal). Environ. Monit. Assess. 172:605–622. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1359-x>.
- Re V., Sacchi E., Kammoun S., Tringali C., Trabelsi R., Zouari K., Daniele S. (2017)**. Integrated socio-hydrogeological approach to tackle nitrate contamination in groundwater resources. The case of Grombalia Basin (Tunisia). Science of the Total Environment, p664-676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.151>

- Re V., Sacchi E., Kammoun S., Tringali C., Trabelsi R., Zouari K., Daniele S. (2017).** Integrated socio-hydrogeological approach to tackle nitrate contamination in groundwater resources. The case of Grombalia Basin (Tunisia). *Science of the Total Environment*, p664-676.
- Reddy, K. S. (2013).** Assessment of groundwater quality for irrigation of Bhaskar Rao Kunta watershed, Nalgonda District, India. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5, 418–425. . <http://dx.doi.org/10.5897/IJWREE2012.0375>.
- Rivoirard, J. (2001).** Which Models for Collocated Cokriging? *Mathematical Geology*,33(2), 117–131. <https://doi.org/10.1023/A:1007530600152>.
- Rouabhia A., Baali F., Hani A., Djabri L. (2009).** Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines d'un aquifère en zone semi-aride, Cas de la plaine de la Merdja, Nord Est de l'Algérie. *Sécheresse* vol. 20, n° 3, p279-285.
- Saidi S., (2011) :** Contribution des approches paramétriques, cartographiques et statistiques à l'étude de la vulnérabilité du système aquifère phréatique de Mahdia (Tunisie orientale). Thèse de doctorat, 255p, Faculté des sciences de Sfax, département des sciences de la terre (Tunisie).
- Sathish S, and L. Elango (2011) :** "Groundwater Quality and Vulnerability Mapping of an Unconfined Coastal Aquifer" *Journal of Spatial Hydrology*.Vol.11, No.1. Spring 2011
- Schnebelen et al., (2002) :** Gestion des eaux souterraines en Aquitaine : Protection de la nappe de l'oligocène en région Bordelaise. Rapport BRGM.
- Semroud B. et Ladhem A., (2015).** L'agriculture périurbaine face aux vulnérabilités foncières en Algérie. DOI: [10.4000/tem.2845](https://doi.org/10.4000/tem.2845)
- Sghir K. and Touat F. (2012).** Hydrochemical study and monitoring of the water quality of the Mitidja alluvial aquifer. Master 2 in Geology. USTHB, Algiers. 62p..
- Shirazi, S. M., Imran, M. H., Akib, S., Yusop, Z., & Harun, Z. B. (2013).** Groundwater vulnerability assessment in Melaka state of Malaysia using DRASTIC and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 70, 2293–2304. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2360-9>
- SOGREAH 2008.** Modélisation du système aquifère de la Mitidja. Rapport final.
- SOGREAH, avril 2004 :** Rapport final « Etude d'Actualisation et de Finalisation du Plan National de l'Eau .Régions hydrographiques Centre et Est ». Groupement BCEOM – BG.
- Stumm W., Morgan J. J., 1996.** Aquatic chemistry, 3rd edn. Wiley-Interscience, New York, 1022 p.
- Sutton & al. (2011),** The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988>
- Touati M., Benhamza M., Bouhafs F (2018).** Impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines dans le périmètre irrigué Guelma-Boucheougouf (Nord Est Algérien). *Revue Science et Technologie, Synthèse* 37: 103-112.
- Toubal A. C. (1998).** Apport de la géophysique à l'étude des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger. Thèse de Doctorat d'état. USTHB Alger. 226p.
- Touileb, M., (1997) :** Utilisation de la méthode DRASTIC et des SIG pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution. Cas de la Mitidja Est. Mémoire de magistère ENSH, Blida ,96p.
- Tredoux, G., Engelbrecht, P., Israel, S. (2009).** Nitrate in groundwater – Why is it a hazard and how to control it? Report to the Water Research Commission by CSIR. *Natural Resources and the Environment*, Stellenbosch
- Triki I, Zairi M, Dhia HB (2012)** A geostatistical approach for groundwater head monitoring, network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water Environ J* 27:362–372. doi: 10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x
- Webster, R., Oliver, M., (2001).** Geostatistics for natural environmental scientists. Chichester:John Wiley & Sons, ISBN 0-471-96553-7.
- WHO, 2011. World Health Organization (2011).** Guidelines for Drinking-water Quality. fourth ed. ISBN : 978 92 4 154815 1.
- Yu, X., Geng, Y., Heck, P., Xue, B. (2015).** A review of China's rural water management. *Sustainability* 7:5773–5792. <http://dx.doi.org/10.3390/su7055773>.

- Zamiche S., Hamaidi-Chergui F., Demiai A. (2018)** : Pollution of the quaternary Aquifer of Mitidja (Algérie) by nitrates : Origins and impacts the quality of water for Human consumption. Journal of fundamental and applied sciences. ISSN 1112-9867. 19p.
- Zhang, W.L., Tian, Z.X., Zhang, N., Li, X.Q. (1996)**. Nitrate pollution of groundwater in northern China. Agric. Ecosyst. Envir
- Zheng, D., Wang, P. P. 1999** : Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contamination in Groundwater System. The Hydrogeology Group The University of Alabama. 239 P.
- Zouahri A., Dakak H., Douaik A., El Khadir M., Moussadek R. (2015)**. Evaluation of groundwater suitability for irrigation in the Skhirat region, Northwest of Morocco. Environ Monit Assess, 15p.

## **ANNEXES**

## Annexe 01 : Analyse hydrochimiques des eaux souterraines, campagne 2008 (basses et hautes eaux)

### • Basses eaux

Point d'eau	x	Y	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	pH	CE	R.Sec	TH	TAC
PZ 50	530 100	360 550	165	66	142	2	286	236	305	47,0	7,9	1 898	1 405	69	25
W021-04212	550 550	380 450	173	21	59	1	100	174	290	43,0	7,6	1 195	820	52	24
W021-417	558 620	379 920	161	45	132	1	142	210	366	94,0	7,6	1 590	922	59	30
W021-5	552 750	385 600	165	42	186	2	313	217	275	73,0	7,7	1 952	1 303	59	23
W021-890	549 200	383 070	192	68	135	1	314	266	244	67,0	7,9	1 990	1 262	76	20
W021-893	547 900	382 900	251	33	196	10	258	223	580	25,0	7,6	2 100	1 253	76	48
W041-1769	526 700	361 300	162	53	47	0	76	150	427	70,0	8,3	1 320	904	63	35
W042-1000	534 770	361 500	153	26	29	1	47	147	275	87,0	7,9	1 024	560	49	23
W042-1003	541 270	363 070	188	47	95	1	109	241	397	88,0	7,7	1 593	1 005	67	33
W042-439	545 950	368 500	204	38	92	1	126	171	458	74,0	7,4	1 501	914	67	38
W062-251	488 600	352 230	234	53	248	1	275	394	458	95,0	8,0	2 440	1 635	81	38
W062-332	496 120	352 200	186	58	135	4	173	362	366	7,0	7,9	1 810	1 305	71	30
W062-333	493 720	353 500	89	68	117	7	111	361	198	9,0	8,3	1 398	971	51	16
W062-335	491 200	355 640	174	58	128	3	225	186	397	88,0	7,7	1 833	1 184	68	33
W063-594	503 950	352 600	125	51	32	0	85	170	305	21,0	8,0	1 113	787	53	25
W41-08153	503 500	356 950	109	24	29	1	82	69	244	17,0	8,2	817	567	37	20
W41-09121	512 350	366 250	44	17	58	1	103	3	168	3,0	8,3	590	367	18	14

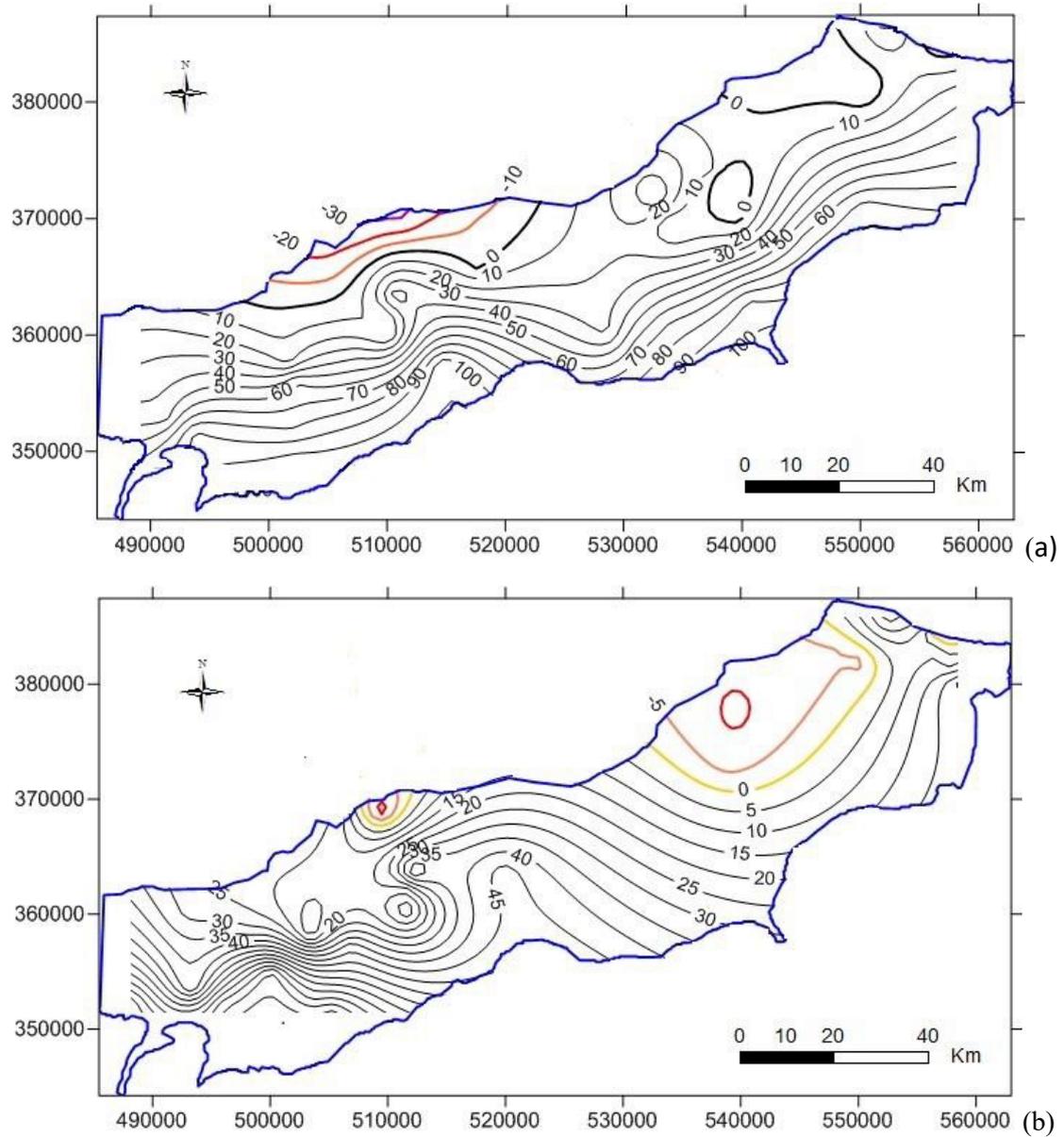
### • Hautes eaux

Point d'eau	x	Y	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	CO3H	NO3	pH	CE	R.Sec	TH	TAC
PZ 50	530 100	360 550	183	81	163	2	326	301	336	54,0	8,0	2 185	1 409	79	28
W021-04212	550 550	380 450	139	39	54	1	112	128	320	28,0	8,0	1 109	662	51	26
W021-417	558 620	379 920	130	52	185	1	198	169	427	99,0	8,1	1 724	965	54	35
W021-5	552 750	385 600	200	55	193	2	275	270	397	71,0	7,7	2 120	1 315	73	33
W021-890	549 200	383 070	196	78	140	2	262	246	427	64,0	8,0	2 029	1 366	82	35
W021-893	547 900	382 900	249	39	198	9	249	191	824	28,0	7,4	2 350	1 521	78	68
W041-1769	526 700	361 300	152	39	58	1	71	107	427	64,0	7,6	1 284	1 003	54	35
W042-1000	534 770	361 500	139	37	29	0	50	166	259	76,0	7,9	998	691	50	21
W042-1003	541 270	363 070	187	57	89	1	128	187	473	76,0	7,9	1 548	900	71	39
W042-439	545 950	368 500	232	26	100	0	141	159	488	79,0	7,6	1 588	1 039	69	40
W062-251	488 600	352 230	243	39	226	1	259	445	427	19,0	7,9	2 390	1 660	77	35
W062-332	496 120	352 200	183	94	128	4	158	363	473	49,0	7,8	2 071	1 419	85	39
W062-333	493 720	353 500	196	55	135	7	171	318	412	47,0	8,1	1 876	1 148	72	34
W062-335	491 200	355 640	183	47	157	1	240	199	412	27,0	7,8	1 783	1 378	65	34
W063-594	503 950	352 600	157	52	41	1	90	257	397	65,0	7,7	1 398	1 052	61	33
W41-08153	503 500	356 950	91	23	36	1	70	40	275	19,0	8,0	855	637	33	23
W41-09121	512 350	366 250	48	3	72	2	94	8	92	67,0	8,3	530	320	13	8

## Annexe 02 : Niveaux piézométriques, campagne 2018 (basses et hautes eaux)

Points	X	Y	Z	HE18	BE18
W021-4211- Pz 2 Hamiz	549300	380750	27,34	36,65	37,45
W021-P 417	558620	379920	37,03	8,75	9,81
W021-P 892	556500	384350	10,04	18,75	19,36
W041-Pz 6 Tessala.el Mardja	519500	369500	35,46	50,50	55,00
W042-F 1000	534770	361500	106,53	47,71	47,77
W042-P 439	545950	368500	65,03	4,10	8,35
W042-P 450	550650	370750	78,48	4,80	4,85
W042-P 688	550479	376442	48,88	8,10	9,35
W042-Pz 10 Sidi Moussa	534900	369250	45,24	53,17	62,70
W042-Pz 4 Ecalyptus	540600	369850	51,19	55,27	60,73
W042-Pz 9 Baraki	533800	371750	79,24	46,32	52,40
W041/PZ 18-MZ I	513100	369600	17,42	51,10	52,50
W041/PZ 6-BL I	511850	361900	66,70	56,30	64,00
W041/PZ 8-BL I	512050	360200	71,70	63,85	66,40
W041/PZ1 O,alleug	507250	365800	21,31	43,22	57,00
W041/PZ3 Ben khelil	512350	366250	15,99	4,75	6,43
W041-Pz 49	530750	360400	89,97	56,44	58,93
W042-Pz 51	531750	361500	87,70	46,82	55,65
W042-Pz 7 Tabainet	532375	359550	99,49	34,37	44,50
W062/PZ 2 El affroun	493300	359500	64,52	34,20	40,80
W062-251	488600	352230	87,70	0,66	1,89
W062-332	496120	352200	100,00	10,70	12,18
W062-333	493720	353500	86,95	38,75	40,10
W062-334	493250	359700	59,42	23,65	27,90
W062-335	491200	355640	72,85	42,29	41,00
W063/PZ 1-BL II	504150	355700	78,03	24,32	26,20
W063/PZ 2-BL II	504400	356500	83,71	32,42	39,22
W063/PZ 3-BL II	503500	356950	65,49	31,45	39,60
W063/PZ 7Zaouia	509500	358600	126,74	91,95	94,20
W063/PZ CHIFFA	505700	351300	112,81	20,10	26,56
W063-594	503950	352600	93,21	18,81	22,60

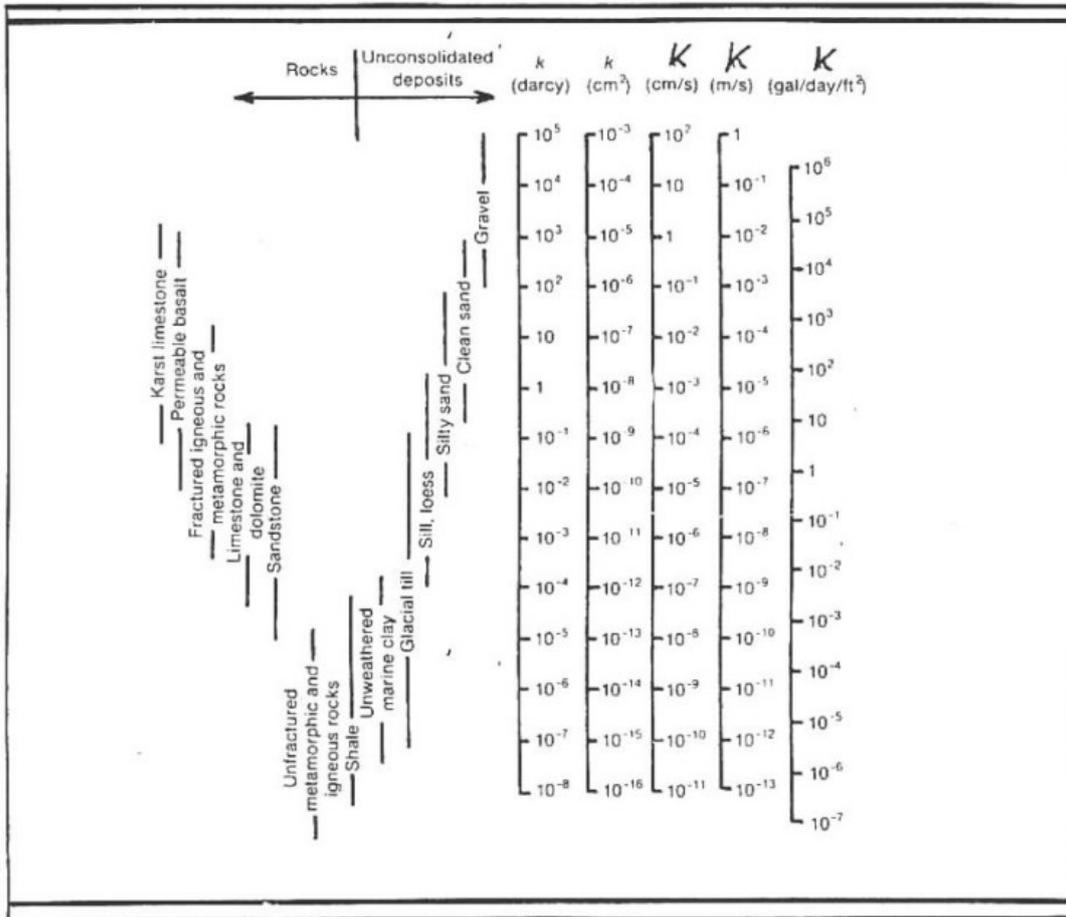
**Annexes 03 : Carte piézométriques 1998 (basses et hautes eaux)**



**Figure A :** Carte piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja (a) hautes eaux 1998, (b) basses eaux 1998. (Aziez, 2021)

**Annexe 04 :** Carte des sols de la Mitidja

**RANGE OF VALUES OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND PERMEABILITY  
(FREEZE AND CHERRY, 1979)**



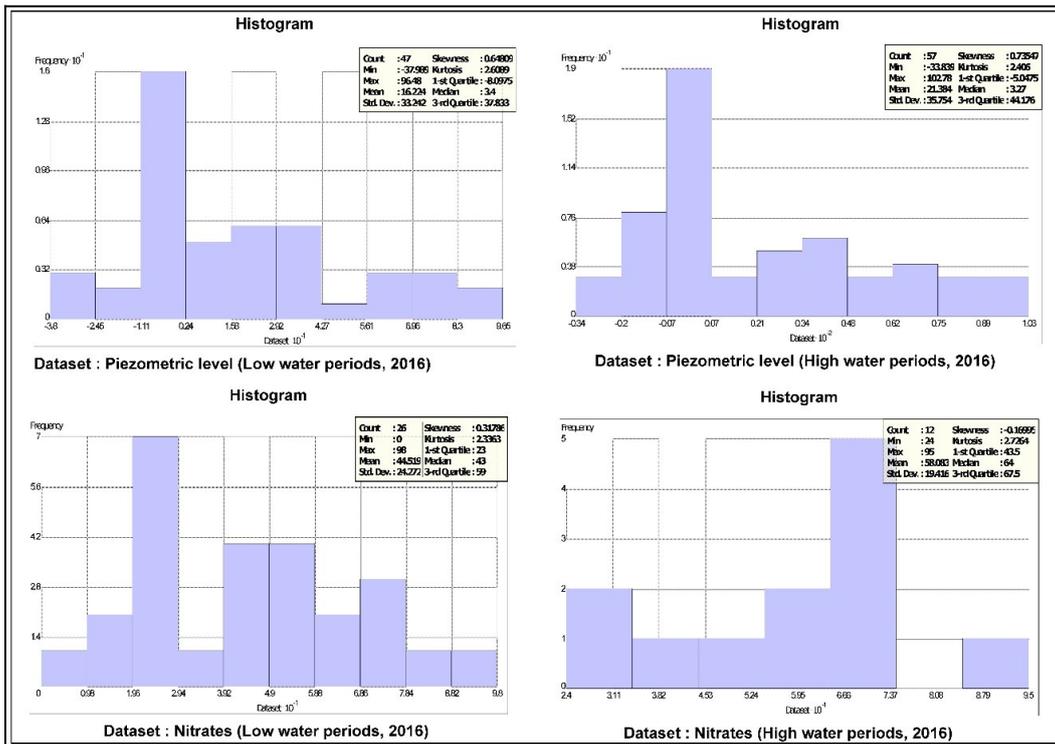
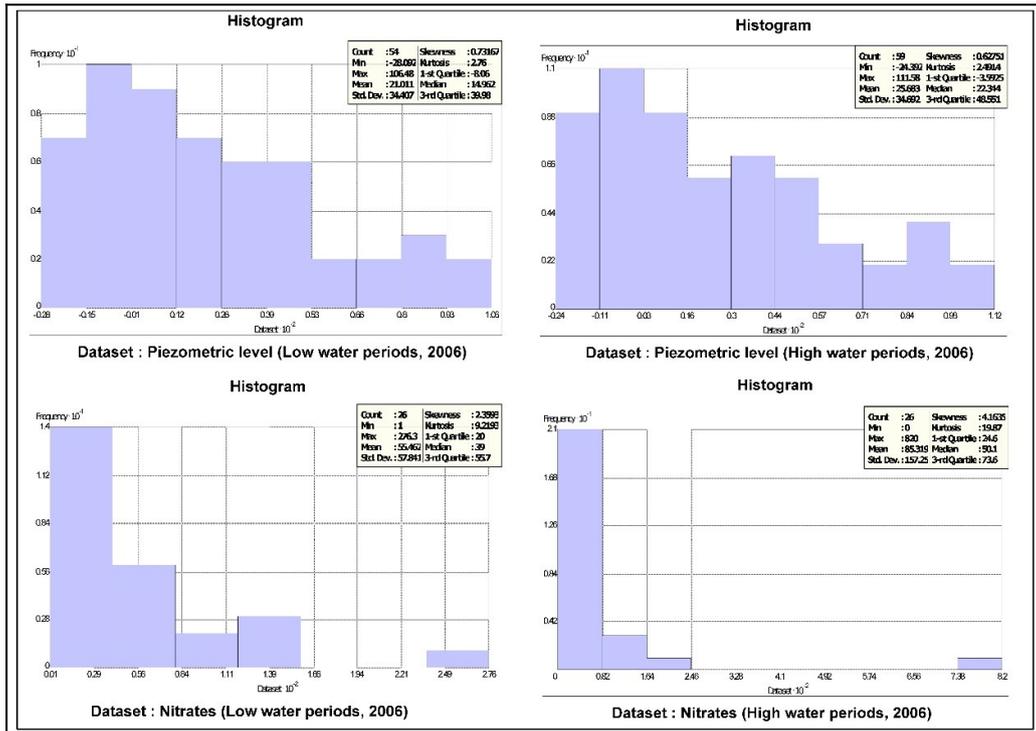
**CONVERSION FACTORS FOR PERMEABILITY AND HYDRAULIC CONDUCTIVITY  
UNITS (FREEZE AND CHERRY, 1979)**

	Permeability, k*			Hydraulic conductivity, K		
	cm <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	darcy	m/s	ft/s	U.S. gal/day/ft <sup>2</sup>
cm <sup>2</sup>	1	1.08 × 10 <sup>-3</sup>	1.01 × 10 <sup>8</sup>	9.80 × 10 <sup>2</sup>	3.22 × 10 <sup>3</sup>	* 1.85 × 10 <sup>9</sup>
ft <sup>2</sup>	9.29 × 10 <sup>2</sup>	1	9.42 × 10 <sup>10</sup>	9.11 × 10 <sup>5</sup>	2.99 × 10 <sup>6</sup>	1.71 × 10 <sup>12</sup>
darcy	9.87 × 10 <sup>-9</sup>	1.06 × 10 <sup>-11</sup>	1	9.66 × 10 <sup>-6</sup>	3.17 × 10 <sup>-5</sup>	1.82 × 10 <sup>1</sup>
m/s	1.02 × 10 <sup>-3</sup>	1.10 × 10 <sup>-6</sup>	1.04 × 10 <sup>5</sup>	1	3.28	2.12 × 10 <sup>6</sup>
ft/s	3.11 × 10 <sup>-4</sup>	3.35 × 10 <sup>-7</sup>	3.15 × 10 <sup>4</sup>	3.05 × 10 <sup>-1</sup>	1	6.46 × 10 <sup>5</sup>
U.S. gal/day/ft <sup>2</sup>	5.42 × 10 <sup>-10</sup>	5.83 × 10 <sup>-13</sup>	5.49 × 10 <sup>-7</sup>	4.72 × 10 <sup>-7</sup>	1.55 × 10 <sup>-6</sup>	1

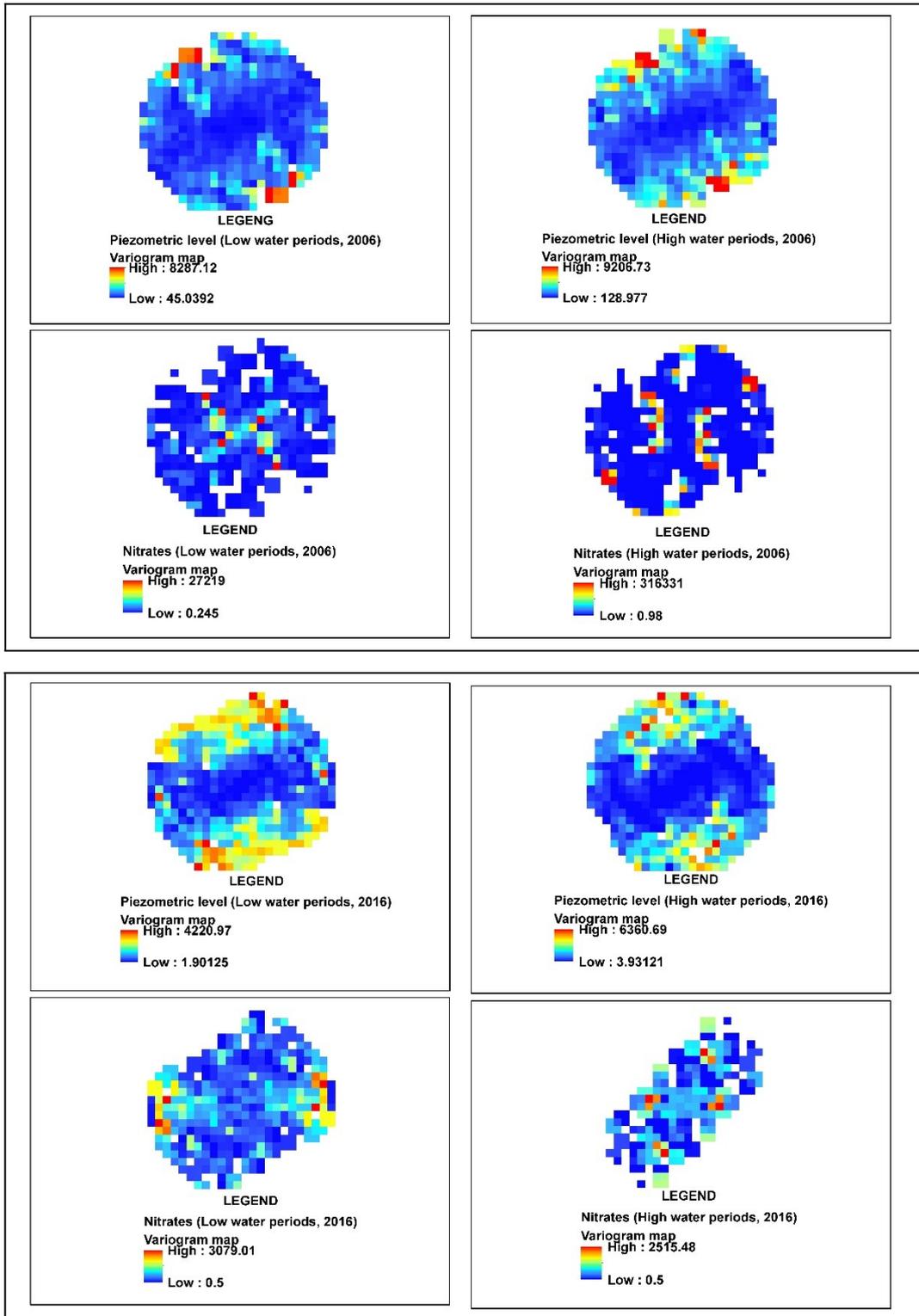
\*To obtain k in ft<sup>2</sup>, multiply k in cm<sup>2</sup> by 1.08 × 10<sup>-3</sup>.

Annexe 05 : Valeurs de la conductivité hydraulique et de la perméabilité

**Annexe 06** : Frequence de distribution et parametres statistiques. (2006 et 2016, Basses et hautes eaux)



**Annexe 06bis : Variogram map of nitrates and piezometric level (low and high water period for 2006 (a) and 2016 (b))**



**Annexe 07 : Table DRASTIC**

MILIEU AQUIFERE		
Nature du milieu aquifère	COTE	Cote type
Schiste massif	1 – 3	2

Roches métamorphiques/ignées	2 – 5	3
Roches métamorphiques/ignées altérées	3 – 5	4
Lits de grès, calcaire et argile schisteuse	5 – 9	6
Grès massif	4 – 9	6
Calcaire massif	4 – 9	6
Sable et gravier	6 – 9	8
Basalte	2 – 10	9
Calcaire karstique	9 - 10	10

PROFONDEUR DE LA NAPPE (m)		RECHARGE NETTE (cm)	
INTERVALLE	COTE	INTERVALLE	COTE
0 – 1,5	10	0 – 5	1
1,5 – 4,5	9	5 – 10	3
4,5 - 9	7	10 – 18	6
9 - 15	5	18 – 25	8
15 - 23	3	25 +	9
23 – 31	2	Poids : 4	Poids pour Pesticides : 4
31 +	1		

TYPE DE SOL		TOPOGRAPHIE (%)	
NATURE DU SOL	COTE	INTERVALLE	COTE
Soil mince	10	0 - 2	10
Gravier	10	2 - 6	9
Sable	9	6 - 12	5
Argile fissurée	7	12 - 18	3
Terre grasse sableuse	6	18 +	1
Terre grasse	5	Poids : 1	Poids pour Pesticides : 3
Terre limoneuse	4		
Terre argileuse	3		
Argile non fissurée	1		
Poids : 2	Poids pour Pesticides : 5		

Nature de la zone non saturée	COTE	Cote type	CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE	
			INTERVALLE (m/s)	COTE
Limon / Argile	1 - 2	1	$4,72.10^{-7} - 4,72.10^{-5}$	1
Argile schisteuse	2 - 5	3	$4,72.10^{-5} - 1,416.10^{-4}$	2
Calcaire	2 - 7	6	$1,416.10^{-4} - 3,304.10^{-4}$	4
Grès	4 - 8	6	$3,304.10^{-4} - 4,720.10^{-4}$	6
Lits de grès, calcaire et argile schisteuse	4 - 8	6	$4,720.10^{-4} - 9,44.10^{-4}$	8
Sable et gravier avec limon et argile	4 - 8	6	$>9,44.10^{-4}$	10
Roches métamorphiques/ignées	2 - 8	4		
Sable et gravier	6 - 9	8		

Basalte	2 - 10	9	
Calcaire karstique	8 - 10	Paramètre DRASTIC	
Poids : 5	Poids pour Pesticides : 4		
POIDS			
Paramètres	Poids (général)	Poids (Pesticides)	
D. Profondeur de la nappe	5	3	
R. Recharge annuelle	4	4	
A. Milieu aquifère	3	3	
S. Type de sol	2	5	
T. Topographie	1	3	
I. Impact de la zone non saturée	5	4	
C. Conductivité hydraulique	3	2	

**Annexe 08 :** Tableau des Principales sources d'information pour la construction de la base de données.

Paramètres	Principales sources d'information
<b>Profondeur de nappe (D)</b>	Campagne piézométrique 2010 (A.N.R.H. Blida) Etudes, mémoires et thèses hydrogéologiques ANRH, USTHB, ENSH....
<b>Recharge nette (R)</b>	Déduite à partir du bilan hydrique  Données pluviométriques (période 1975-2007)  Projet : recharge artificielle de la Mitidja (ANRH, 2005) Rapports et articles (ANRH d'Alger) Etudes de l'aménagement hydro-Agricole de la plaine de la Mitidja (AGID (El Mars Alger)), Sir Mac Donald & Partners Limited, 1992) + ALGEO 1978 (ANRH de Blida  Etudes géophysiques (CGG, 1969)  Modèle mathématique de la nappe alluviale de la Mitidja (SOGREAH, 2008),  Carte krigée de la transmissivité de la nappe alluviale de la Mitidja établie par Toub A.C, en 1998.

<b>Matériaux l'Aquifère (A)</b>	244 logs lithologiques de forages analysés. (ANRH Blida) Modèle mathématique de Bennie and Partners, 1983) Thèse d'état (Toubal, 1998 ; Benziada, 1994)
<b>Type de sol (S)</b>	Cartes pédologiques de la plaine de la Mitidja (carte au 1/50000e) ANRH Alge (Ecrement, 1971) Etude Pédologique (Ecrement, 1971) ANRH Alger, Rapport étude prospective de l'urbanisation-phase 2- (PAC.2004)
<b>Topographie (T)</b>	Cartes topographiques au 1/50000e (Alger, Larbaa, Koléa, Blida, Tipaza et Hadjout)
<b>Impact de la ZNS (I)</b>	244 logs lithologiques de forages analysés. (ANRH), Mémoires et thèses hydrogéologiques, USTHB. Thèses d'état (Toubal, 1998 ; Benziada, 1994)
<b>Conductivité hydraulique (C)</b>	Etudes hydrogéologiques de la nappe de la Mitidja (ANRH) Mémoires et thèses citées en bibliographie Modèle mathématique (SOGREAH, 2008) Abaques de Freeze et Cherry, 1979 (annexe III.1)

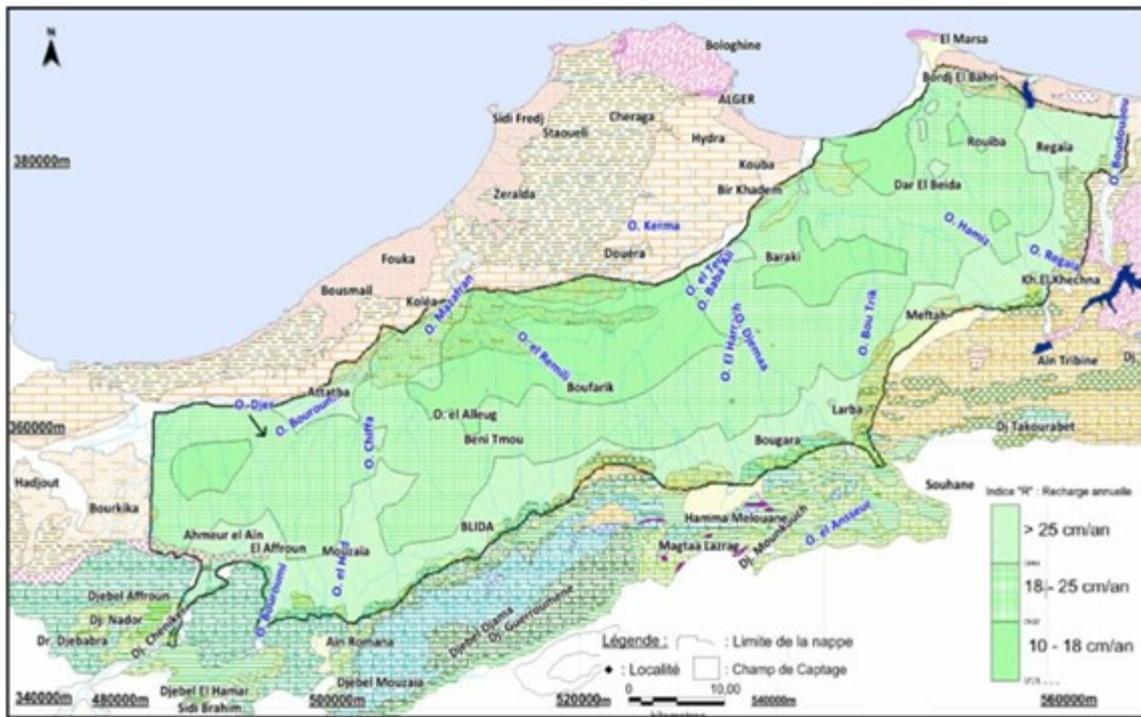
### **Annexe 09 : Carte des indices DRASTIC**

Ces cartes présentées ci-dessous ont été établies par *Djoudar en 2010*.

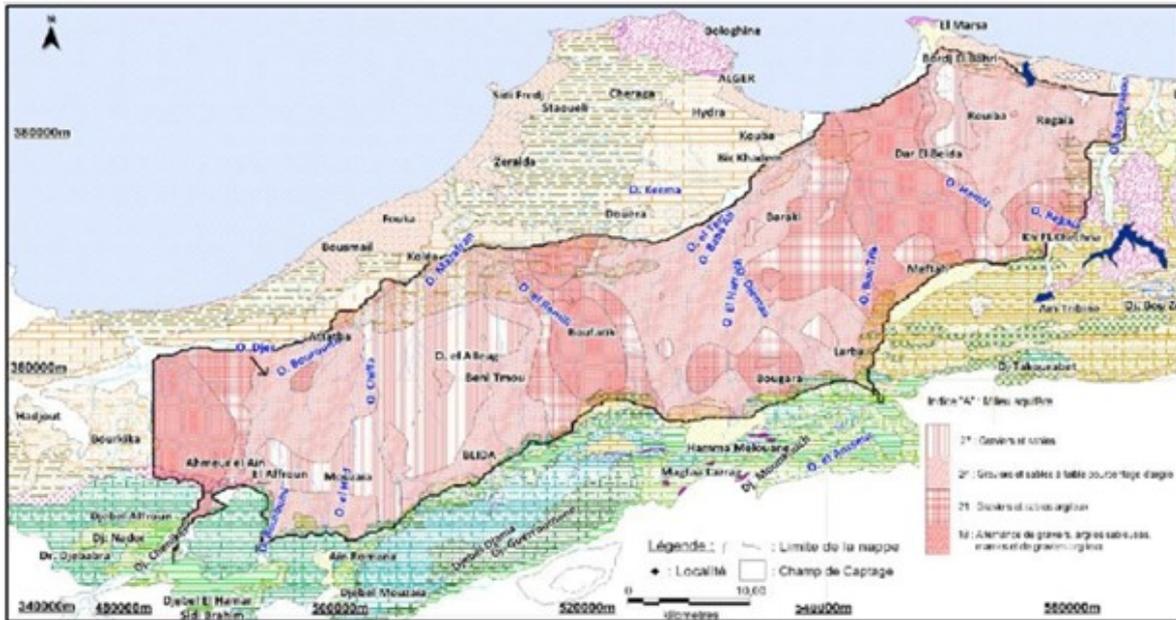
- **Carte de l'Indice « D » : Profondeur de la nappe**



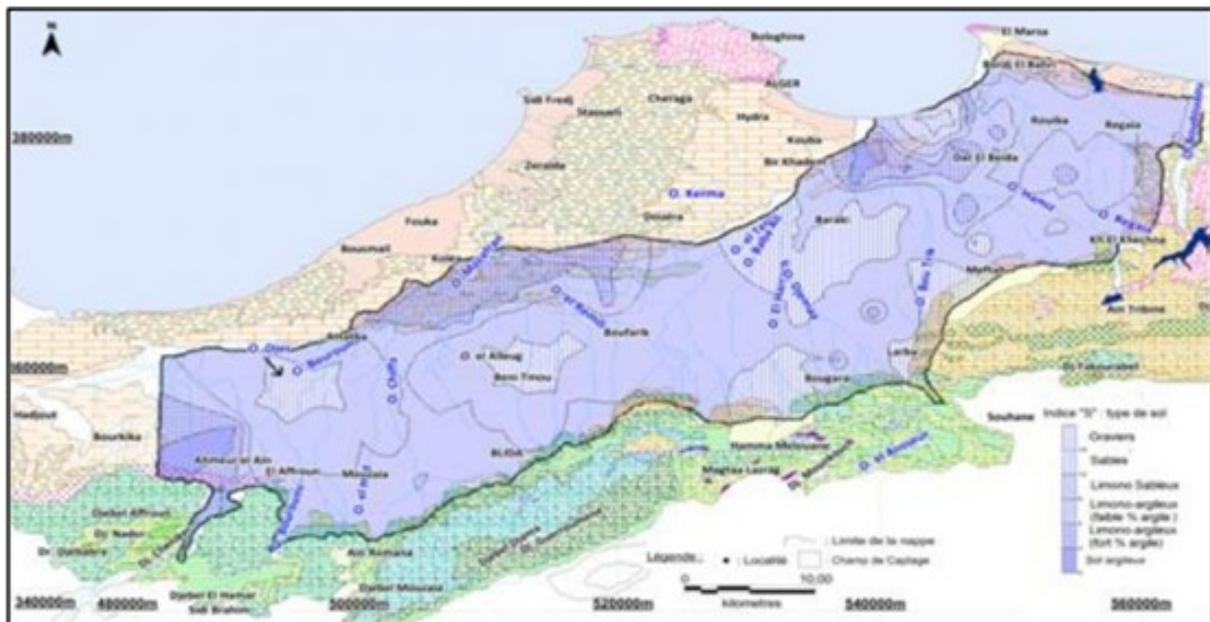
- Carte de l'Indice « R » : Recharge de la nappe



- Carte de l'Indice « A » : Zones Saturées

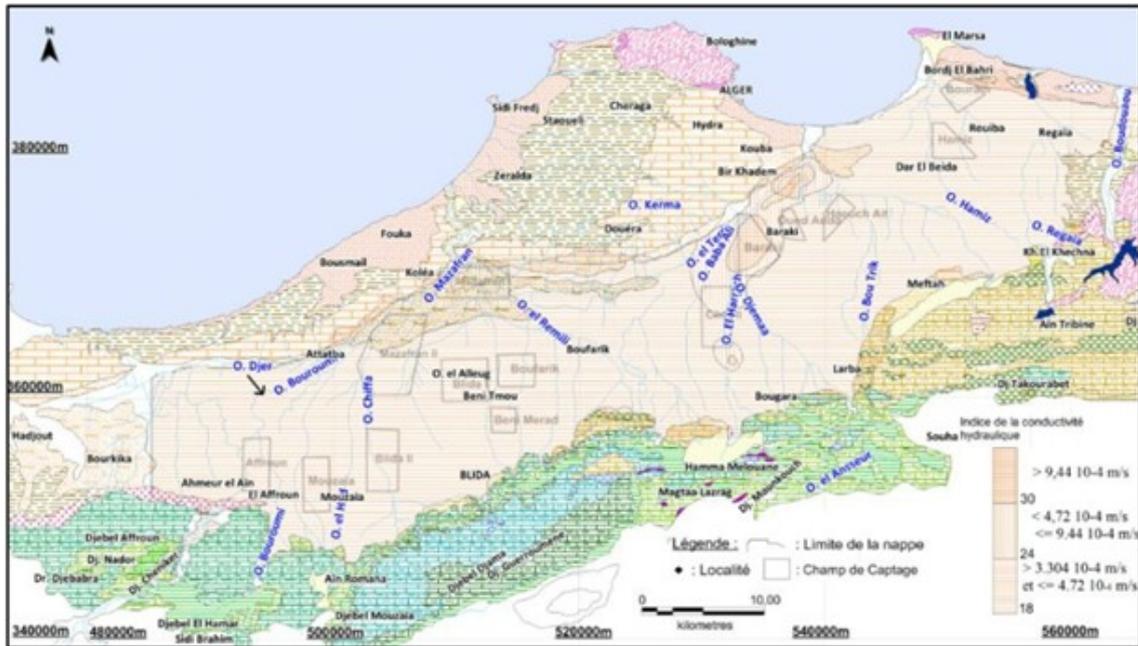


- Carte de l'Index « S » : Type de Sol

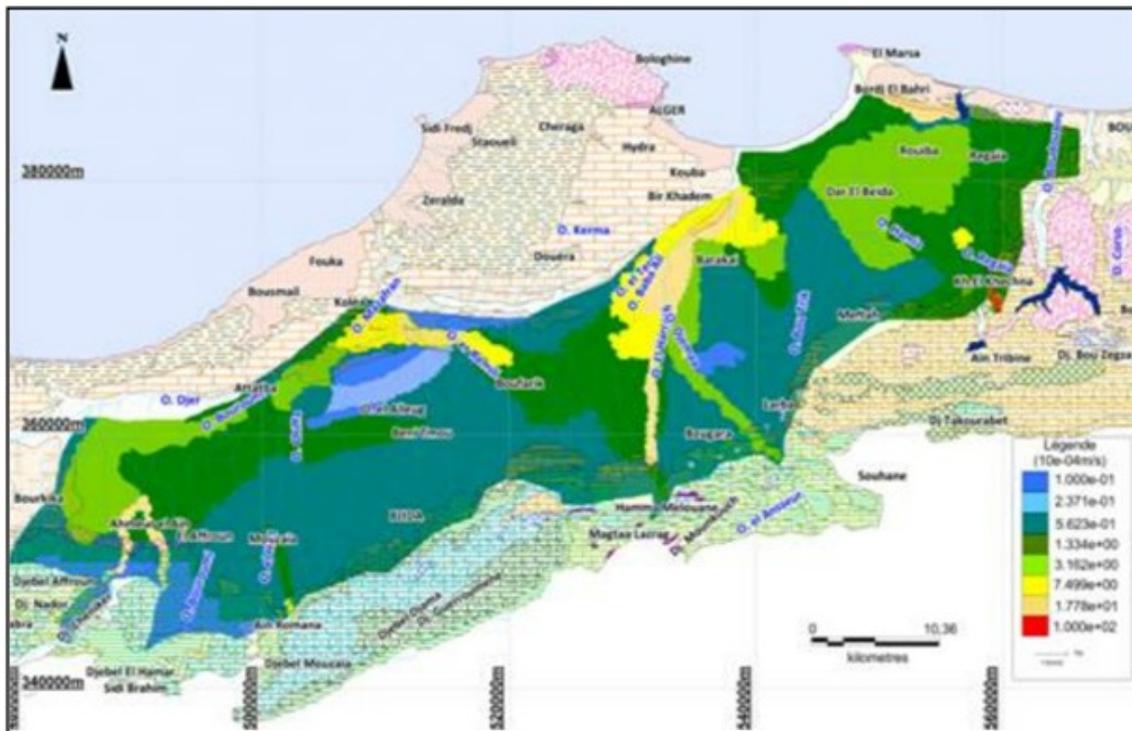


- Carte de l'Index « T » : Topographie du terrain





- Carte de la perméabilité de la nappe alluviale de la Mitidja (SOGREAH, 2008)



- Carte de l'Indice de Vulnérabilité DRASTIC (campagne 2010)

