

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Géologiques



MEMOIRE

de fin d'étude

Présenté Pour l'obtention du diplôme du

MASTER

En : Géologie appliquée

Spécialité : Hydrogéologie

Sous le thème :

**Protection et préservation des ressources en eaux
souterraines à l'extrême Nord-Est Algérien (El-Taref)**

Réalisé Par : M^{elle} SAIS Ghania

Soutenue devant le jury composé de :

M. AMROUCHE Farid	MAA, DSG/UMMTO	Président
Mme. YAHIAOUI Salima	MAA, DSG/UMMTO	Promotrice
M. KARDACHE Ramedane	MCA, DSG/UMMTO	Examineur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage.

Nos plus vifs remerciements vont à :

Ma promotrice Mme .YAHIAOUI Salima pour ses précieux conseils ainsi que pour la confiance et l'aide qu'elle m'a accordée pour mener ce travail à terme.

Que le président et les membres de jury trouvent ici mes sincères remerciements d'avoir accepté de juger mon travail.

En fin, nos vifs remerciements à tous les enseignants qui ont assurés ma formation durant les cinq années d'études au département géologie et tout le personnel de l'université.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A l'amour de ma vie mon père

Je lui dédie avec fierté ce mémoire qui reflète le fruit de l'éducation et de l'attention qu'il m'a tant réservé, je lui suis très reconnaissante

A la prunelle de mes yeux ma mère

Pour son affection, sa patience, sa compréhension, sa disponibilité, son écoute permanente et son soutien sans égal dans les moments les plus difficiles de ma vie.

Au battement de mon cœur mon frère: «Smail»

A mes chers sœurs : « Fatima, Fariel, Amel »

A toute la famille SAIS de près ou de loin

*Aussi je le dédie à tous les géologues, hydrogéologues, en particulier mes chers amis :
« Thamilá, Yanis, Hakim, Amokrane, Syfaks »*

Et toutes les personnes que je connais et que j'aime.

Ghania

Résumé :

Cette étude s'intéresse à la protection et la préservation de la ressource en eau souterraines à l'Extrême Nord-Est algérien et son application à la nappe du massif dunaire de Bouteldja situé dans le sous bassin versant de Mafragh dans la wilaya d'El-Taref.

L'exploitation intensive de cet aquifère et sa position côtières, l'exposent au phénomène de l'intrusion marine. Sa mise en évidence dans cette étude, a nécessité l'utilisation de la méthode cartographique de pondération et de cotation, GALDIT, efficace pour l'estimation de la pollution latérale, combiné aux outils du système d'information géographique "SIG" et les méthodes géostatistiques. Les résultats reflètent trois zones de vulnérabilité, très faible, faible et moyenne, qui se situent généralement dans les zones côtières et les champs de captage et des marécages salés.

Mots clés : Bouteldja, massif dunaire, pollution, intrusion marine, protection, préservation, GALDIT

Tables des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	01

Chapitre I : Généralités sur la région d'étude

I.1.Introduction.....	02
I.2.Présentation de la région d'étude.....	02
I.3.Les caractéristiques hydro- morpho-géographiques.....	04
I.4.Paramètres morpho-métriques.....	06
I.4.1.La superficie « A » en (km ²) et le périmètre « P » en (Km)	06
I.4.2.Indice de capacité de Gravelius (Kc).....	06
I.4.3.Dimension de rectangle équivalent.....	07
I.4.4. La courbe hypsométrique	07
I.4.5. Les altitudes caractéristiques	09
I.4.6.Indice de pente globale Ig... ..	09
I.4.7.Dénivelée spécifique DS.....	10
I.5. Conclusion.....	10

Chapitre II : Hydroclimatologie

II.1.Introduction	12
II.2. Facteurs climatiques.....	13
II.2.1. La Températures (T ((°C)).....	13
II.2.1.1.La Température moyenne mensuelle	13
II.2.2. Etude de la pluviométrie.....	14
II.2.2.1 La pluviométrie moyenne mensuelle.....	14
II.2.2.2 La pluviométrie moyenne annuelle	15
II.3. Diagramme Ombrothermique	16
II.3.1.Indice d'aridité 'A'.....	18
II.4. Estimation de l'Evapotranspiration.....	18
II.4.1.Estimation de l'Evapotranspiration Potentielle ETPc (mm)	19
II.4.1.1. Formule de Thornthwaite	19
II.4.1.2. Formule de Serra	20
II.4.2. Estimation de l'Evapotranspiration Réelle ETR (mm)	20
II.4.2.1. Formule de Truc.....	20
II.4.2.2. Formule de Coutagne	21
II.4.2.3. Le calcul de l'ETR par méthode de Thornthwaite.....	21
II. 4.2.3.1. Bilan hydrologique en fonction de l'ETP de Thornthwaite.....	22
II. 4.2.3.2. Bilan hydrologique en fonction de l'ETP de Serra	23
II.5. Estimation de l'infiltration « I » avec l'équation du bilan hydrologique	25

II.6 .Estimation du Ruissellement « R ».....	25
II.7. Conclusion.....	26

Chapitre III : La Géologie de la région d’El-Taref

III.1. Introduction.....	27
III.2. L’échelle stratigraphique.....	27
III.3. La description lithologique	27
III.3.1.Le Mésozoïque.....	27
III.3.1.1Crétacé supérieur.....	28
III.3.2.Cénozoïque.....	28
III.3.2.1Le Tertiaire.....	28
III.3.2.1.1Paléogène	28
III.3.2.1.2 Néogène	29
III.3.3 Le Quaternaire.....	29
III.3.3.1Quaternaire ancien.....	29
III.3.3.2.Quaternaire moyen.....	29
III.3.3.3.Quaternaire récent.....	30
III.3.3.4.Quaternaire actuel.....	30
III.4. Aperçu structurale	32
III.5. Conclusion	33

Chapitre IV: Ressources en eau souterraines de la région d’El-Taref

IV.1. Introduction	34
IV.2. Description des principales ressources en eau souterraines	34
IV.2.1. La nappe des graviers.....	34
IV.2.1.1. Localisation	34
IV.2.1.2. Description hydrogéologiques.....	34
IV.2.1.2.1 Géométrie de l’aquifère.....	34
IV.2.1.3.Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe	35
IV.2.1.4.La zone d’alimentation de la nappe	35
IV.2.2.La nappe libre.....	36
IV.2.2.1 Quelques caractéristiques de la nappe libre.....	36
IV.2.3.Le Cordon dunaire	37
IV.2.3.1.Localisation de l’aquifère	37
IV.2.3.2. Description hydrogéologiques	37
IV.2.3.3.Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du Cordon dunaire.....	37
IV.2.4. La nappe du massif dunaire de Bouteldja.....	38
IV.2.4.1. Localisation de l’aquifère du massif dunaire de Bouteldja.....	38
IV.2.4.2.Description hydrogéologiques.....	38
IV.2.4.2.1.Géométrie de l’aquifère.....	38
IV.2.4.3. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe.....	40
IV.2.4.3.1. La piézométrie	40
IV.2.4.3.2. La Perméabilité.....	40
IV.2.4.3.4. La Transmissivité	40
IV.2.4.3.5. Coefficient d’emmagasinement.....	41
IV.3. Conclusion	42

Chapitre V : Qualité des eaux de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja

V.1.Introduction	43
V.2.Analyse des paramètres physico-chimiques	43
V.2.1Analyses des paramètres physiques	43
V.2.2.Analyses des paramètres chimiques	44
V.3.Le faciès chimique	46
V.3.1.Evolution annuelle des faciès	46
V.3.2 Evolution des faciès entre les basses eaux et hautes eaux	49
V.4.Interprétation des graphes	50
V.5.Origines de la minéralisation observée	51
V.6. Conclusion	51

Chapitre VI : Protection des eaux souterraines et intrusion marine

V.1.Introduction	52
VI.2. La protection des eaux souterraines, Objectif	52
VI.3. Principale sources de pollution des eaux souterraines	53
VI.4. Les outils d'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines	54
VI.4.1.Les méthodes numériques	54
VI.4.2 Les méthodes cartographiques basées sur les SIG	54
VI.4.2 .1. La méthode Wipp (environnement Ontario)	55
VI.4.2.2. Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères	55
A. Cas d'un milieu discontinu (fracturé)	55
B. Cas d'un milieu continu	56
B.1.Méthode par infiltration verticale	56
B. 2.Méthode par diffusion latérale	57
VI.5. L'intrusion marine dans les aquifères côtiers	57
VI.5.1. Les principales causes de l'intrusion marines	58
VI.5.1.1. Changement climatique	58
VI.5.1.2 Le facteur anthropique	58
A. Les Pompages excessifs	59
B. Puits mal positionné	59
VI.5.2.Impact de l'intrusion marine sur les eaux souterraines	60
VI.5.2.1. impact sur l'économie	60
VI.5.2.2. Impact sur la santé des consommateurs	60
VI.5.3. Les méthodes d'évaluation de l'intrusion marine	60
VI.5.3.1. Les Méthodes géophysiques	60
VI.5.3.2. Les méthodes de vulnérabilité d'indexation et de pondération	60
A. La méthode GALDIT	60
VI.5.4. Les préventions de l'intrusion marine	61
VI.5.4.1. Les périmètres de protection	61
VI.5.4.2. La vérification des quantités de prélèvement	61
VI.5.4.3. La protection des littorales	61
VI.6. Les outils Juridiques de la protection des eaux souterraines	62
VI.6. 1. Cadre législatif Européen	62
VI.6.1.1. Dispositions législatives et réglementaires pour la Sauvegardé des eaux souterraines	62

VI.6.1.2. Dispositions Législatives et réglementaires spécifiques à la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine	63
VI.6. 2. Cadre législatif Algérien	63
VI.6. 2.1 Historique du droit de l'eau en Algérie.....	63
A. L'eau dans la Constitution	63
B. L'eau à travers la législation.....	64
VI.6.2.2. Dispositions législatives et réglementaires algérienne pour la protection des eaux souterraines	64
VI.5. L'évaluation des risques de pollution des eaux souterraine	65
VI.7. Conclusion.....	66

Chapitre VII : Application de la méthode GALDIT

VII.1. Introduction.....	67
VII.2. Présentation de la méthode de GALDIT.....	67
VII.3. Description des paramètres de la GALDIT.....	68
VII.3.1. Type de l'aquifère (G).....	68
VII.3.2. La conductivité hydraulique de l'aquifère (A)	68
VII.3.3. Profondeur du plan d'eau (Depth of groundwater Level above sea) (L).....	68
VII.3.4. Distance par rapport à la côte (Distance from the coastline) (D).....	68
VII.3.5. Impact de l'état de l'intrusion marine existante (Impact of existing status of seawater intrusion) (I).....	69
VII.3.6. L'épaisseur de la nappe phréatique (T).....	69
VII.4. Méthodologie d'application.....	70
VII.5. Echelle des risques	71
VII.6. Résultats d'application et d'interprétation	71
VII.6. 1. Carte d'indice 'IG' Type d'aquifère.....	71
VII.6. 2. Carte d'indice 'IA' La conductivité hydraulique.....	72
VII.6. 3. Carte d'indice 'IL' La Profondeur de la nappe.....	73
VII.6. 4. Carte d'indice 'ID' Distance du rivage.....	74
VII.6. 5. Carte d'indice 'IP' l'impact de l'intrusion d'eau de mer.....	75
VII.6. 6. Carte d'indice 'IT' L'épaisseur de la couche aquifère.....	76
VII.6.7. Carte finale d'indice "Indice GALDIT" de vulnérabilité à la pollution	76
VII.7. Conclusion.....	77
Conclusion générale et recommandations	78
Références bibliographiques	80
Annexe	84

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur la région d'étude

Figure I.1 :	Situation géographique de la région d'El Taref et limites administratives.....	03
Figure I.2 :	Situation de la zone d'étude. Avec BV : Bassin versant et Sous bassins versants (Sbv) : Mafragh (0317), La Calle (0318), El-Kebir-Est (0316) et Bounamoussa (0315).....	03
Figure I.3 :	Carte des unités morphologiques dans la wilaya d'El Taref.....	05
Figure I.4 :	Courbe hypsométrique de bassins versants de Mafragh.....	08

Chapitre II : Hydroclimatologie

Figure II.1:	histogramme des Températures moyennes mensuelles T (°C) période (2000-2013).....	13
Figure II.2:	La pluviométrie moyenne mensuelle (mm) des stations d'El-Taref pour la période (2000-2013).....	14
Figure II.3:	Histogramme de la pluviométrie moyenne interannuelle des stations climatiques période (2000-2013).....	16
Figure II.4:	Diagramme Ombrothermique de la station de Bouteldja période (2000-2013).....	17
Figure II.5:	Bilan hydrologique en fonction de l'ETP de Thornthwaite période (2000-2013) station de Bouteldja.....	23
Figure II.6:	Bilan de Serra en fonction de l'ETP de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.....	24

Chapitre III : La Géologie de la région d'El-Taref

Figure III.1 :	Carte géologiques représentant la nappe de Bouteldja digitalisée à partir de la carte 1/500 000 de la carte géologique BLANDAN.....	31
Figure III.2 :	La colonne stratigraphique de la région d'El- taraf	32

Chapitre IV: Ressources en eau souterraines de la région d'El-Taref

Figure IV.1 :	Coupe schématique du système aquifère d'Annaba El-Taref.....	35
Figure IV.2 :	Carte des isohypses de l'aquifère de la nappe libre.....	36
Figure IV.3 :	Carte piézométrique de la Nappe du Cordon Dunaire d'El-Chatt.....	38
Figure IV.4 :	Situation l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.....	39
Figure IV.5 :	Coupe hydrogéologique dans le massif dunaire de Bouteldja.....	39
Figure IV.6 :	Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja.....	40
Figure IV.7 :	Carte de répartition des valeurs de la transmissivité de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	41
Figure IV.8 :	La carte du coefficient d'emmagasinement de la nappe du massif dunaire de Bouteldja.....	41

Chapitre V : Qualité des eaux de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja

Figure V.1 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2010.....	47
Figure V.2 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2011.....	47
Figure V.3 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2012.....	48
Figure V.4 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2015.....	48
Figure V.5 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja périodes des hautes eaux (Avril 2011).....	49
Figure V.6 :	Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja Périodes des basses eaux (octobre 2011).....	49

Chapitre VI : Protection des eaux souterraines et intrusion marine

Figure VI.1 :	la représentation schématique de l'interface de l'interface « eau douce – eau salée ».....	58
Figure VI.2 :	Salinisation du puits par l'eau marine dans le cas d'un puits mal positionné.....	59

Chapitre VII : Application

Figure VII.1:	Type d'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.....	72
Figure VII.2 :	Conductivité hydraulique de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.....	72
Figure VII.3 :	Carte des profondeurs du plan d'eau du massif dunaire de Bouteldja.....	73
Figure VII.4 :	Carte de la distance du point d'eau de la nappe du massif dunaire de Bouteldja à la côte.....	74
Figure VII.5:	Carte montrant l'impact des intrusions marines existantes sur la qualité des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja par le rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$	75
Figure VII.6 :	Représentation du paramètre (T) l'épaisseur de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.....	76
Figure VII.7 :	Carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif dunaire de par la méthode GALDIT.....	77

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur la région d'étude

Tableau I.1 :	Répartition des tranches d'altitude en fonction de la surface.....	08
Tableau I.2 :	Les altitudes caractéristiques du sous bassin versant de Mafragh.....	09
Tableau I.3 :	les altitudes caractéristiques du bassin versant d'El-Taref.....	09
Tableau I.4 :	Classification du relief selon Ig, Ds par l'ORSTOM.....	10
Tableau I.5 :	Récapitulatif des caractéristiques de la zone d'étude.....	11

Chapitre II : Hydroclimatologie

Tableau II.1:	Caractéristiques des stations climatiques dans la zone d'études.....	12
Tableau II.2:	Températures moyennes mensuelles T (°C) de la station de Bouteldja (ANRH d'Alger).....	13
Tableau II.3:	La pluviométrie moyenne mensuelle (mm) des stations d'El-Taref pour la période (2000-2013).....	14
Tableau II.4 :	La pluviométrie moyenne interannuelle des stations climatiques période (2000-2013) (ANRH Alger).....	15
Tableau II.5:	Les précipitations moyennes mensuelles à la station de Bouteldja Période (2000-2013).....	17
Tableau II.6:	Le résultat du calcul de l'Indice d'aridité.....	18
Tableau II.7 :	Calcul de l'ETP par la méthode de Thornthwaite la période (2000-2013) station de Bouteldja.....	19
Tableau II.8:	Calcul de l'ETP par la méthode de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.....	20
Tableau II.9 :	l'ETR par la formule de Truc période (2000-2013) station de Bouteldja.....	21
Tableau II.10:	Calcul de l'ETR par la formule de Coutagne période (2000-2013) station de Bouteldja.....	21
Tableau II.11:	Bilan de Thornthwaite en fonction de l'ETP de Thornthwaite période (2000-2013) station de Bouteldja.....	22
Tableau II.12:	Bilan de Serra en fonction de l'ETP de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.....	23
Tableau II.13:	récapitulatif des résultats des paramètres du bilan hydrologiques période (2000-2013) station de Bouteldja.....	24
Tableau II.14:	récapitulatif des résultats du bilan hydrologiques période (2000-2013) station de Bouteldja.....	26

Chapitre V : Qualité des eaux de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja

Tableau V.1 :	résultats des paramètres chimiques: Titre alcalimétrique complet (TAC), le Titre alcalimétrique (TA) et dureté totale (TH).....	45
Tableau V.2:	Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du massif dunaire...	50

Chapitre VII : Application

Tableau VII.1 :	synthèses des poids et rangs de la méthode de GALDIT	70
Tableau VII.2 :	Classes de vulnérabilité GALDIT.....	71

Liste des abréviations

A :	La superficie (Km ²).
A :	Indice d'aridité.
ABH :	Agence des bassins hydrographiques.
AGIRE :	Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau.
ANRH:	Agence National des Ressources Hydrauliques.
Bv :	Bassin versent.
DS :	Dénivelée spécifique.
ETP :	L'évapotranspiration potentielle.
ETR :	L'évapotranspiration réelle.
Ie :	Infiltration.
Ig :	Indice de pente globale.
Kc :	Indice de capacité de Gravelius.
Max :	Maximale.
Min :	Minimale.
Moye :	Moyenne.
P :	Le périmètre (km)
PH :	Le Potentiel Hydrogène.
R :	Ruissèlement.
Sbv :	Sous bassin versent.
TA :	le Titre alcalimétrique.
TAC :	Titre alcalimétrique complet.
TH :	Dureté totale.

Introduction générale

La wilaya de d'El-Taref contient plusieurs importantes nappes et cette étude va s'intéresser particulièrement à la nappe du massif dunaire de Bouteldja. Située dans le sous bassin versant de Mafragh (0317). Cet l'aquifère par son importance et la bonne qualité de ses eaux est favorisé pour divers exploitation. Cependant sa situation dans la zone côtière et ses diverses sollicitations l'exposent à se que l'on appelle en hydrogéologie le phénomène de « biseau salée » qui mène à la salinisation et à la dégradation de la qualité de ses eaux.

C'est en fonction de ce contexte, que cette étude se penche pour étudier le phénomène de l'intrusion marine, dans le massif dunaire de Bouteldja, qui est la nappe du la plus exposée dans la wilaya d'El-Taref. Elle s'inscrit dans l'application de la méthode de pondération et de cotation GALDIT, dans l'objectif de sa protection et sa préservation.

Pour se faire, une base de données collectée et réalisée et elle est d'ordre bibliographiques, géologiques, géomorphologiques, climatiques, hydrogéologiques et hydrochimique. Traitée en utilisant, les outils : XLSTAT pour la reconstitution des lacunes des données climatique, DIAGRAMME pour l'étude hydrochimique, MapInfo 8.0 (outil des systèmes d'information géographique (SIG)) et les outils de modélisation géostatistiques pour la réalisation de toutes les cartes essentiellement celle des paramètres de la méthode GALDIT.

Afin de réalisée le présent travail, sept (07) Chapitres complémentaires et qui se présentent comme suit :

- Le premier chapitre synthétise les généralités sur la zone d'étude et ces caractéristiques morpho-hydro-géographiques (géomorphologiques et paramètres morphométriques).
- Le deuxième chapitre est consacré à l'aspect hydrolimatologique de la région pour estimée les paramètres suivants :(la précipitation, l'évapotranspiration, le ruissèlement et l'infiltration efficace.
- Le troisième chapitre s'intéressées à la géologie de la région, par la description lithostratigraphique et l'aperçu tectonique.
- Le quatrième chapitre défini les principales nappes du système aquifères El-Taref et ces caractéristiques hydrodynamiques particulièrement le massif dunaire de Bouteldja.
- Le cinquième chapitre s'intéresse à l'étude de la qualité des ressources eaux en particuliers celle de nappe de Bouteldja.
- Le sixième chapitre s'intéresse au terme protection et préservation de la ressource en eau contre la pollution marine (les causes, les méthodes d'évaluation de la pollution, prévention...).
- Le septième chapitre l'essentiel de notre travail, est consacré à l'application de la méthode GALDIT sur la nappe libre du massif dunaire suivi d'une discussion des résultats obtenus.

Chapitre I :
Présentation de la
zone d'étude

Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

I.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à une présentation générale de la région d'étude, à partir de la détermination des caractéristiques géographiques géomorphologiques et les Paramètres morpho-métriques. On se basant sur l'utilisation des connaissances hydrologiques topographique et des outils complémentaires comme les systèmes d'information géographique(SIG).

II.2. Situation de la région d'étude

Notre zone d'étude se localise dans la partie orientale de l'Algérie, à son extrême Nord-Est. Intégrée dans le territoire de la wilaya d'El Taref d'une superficie 2 891.63 km² et elle est découpée administrativement en 22 communes et 07 Daïras pour une population d'environ 334352 habitants en 2011 (**Figure I.1**)

La wilaya d'El-Taref se trouve à environ 461.37 33 km à l'Est de la capitale d'Alger. Elle est localisée entre la longitude 8°18'50'' E et la latitude 36° 46'02''N.

Elle est limitée (**Figure I.1**) :

- Au Nord par la mer Méditerranée
- Au Sud-Est par la wilaya de Souk-Ahras
- Au Sud-Ouest la wilaya de Guelma
- À l'Ouest la wilaya d'Annaba,
- À l'Est la frontière Algéro-tunisienne.

Le système hydrologique appartient essentiellement au grand bassin hydrographique côtiers Constantinois-Est codifié par l'ANRH-Alger '03' s'étend de 7°45 à 8°45 de longitude Est et de 36°20 à 36° 55 de latitude Nord. Le bassin versant d'El-Taref fait l'objet de cette étude et il est constitué de quatre (04) sous-bassins versants qui sont El-Kebir-Est, la Calle, Bounamoussa et celui de Mafragh qui (**Figure I.2**).

Il prend sa nomination du mot arabe dont l'équivalent en français est : exutoire. Il est drainé par deux oueds importants avec l'Oued Bounamoussa à l'ouest et l'Oued El Kebir-Est à l'Est.

I.3. Les caractéristiques hydro-morpho-géographiques (figure I.3). Cette région regroupe

1. La zone des plaines et des piémonts

Une bande littorale caractérisée par des altitudes importantes de l'Est par apport à l'Ouest en direction de la frontière tunisienne : passant du zéro de la mer à 118 m au Mont Hennaya, puis à 346 m au Sud du lac Mellah, pour arriver à 325 m au Kef Segleb et même toucher les 573 m au Kef Radjela à la frontière Tunisienne, elle couvre près de 27.57% de territoire de la wilaya

2. La zone dunaire

Elle sépare de manière discontinue et irrégulière de la plaine du littoral. Elle couvre près de 220.27 % de la surface de la wilaya.

- **Le massif dunaire** prend une orientation NW- SE, qui fait parti du sous bassin versant de Mafragh (0317), d'une superficie de 180 km². Il est caractérisé par une profondeur des dunes qui varie de 2 à 8 m et par une vulnérabilité a cause de la présence de la mer
- **Le cordon dunaire** est situé au Nord de la plaine alluviale de Bouteldja. Il est caractérisé par une grande extension, il s'étend jusqu'aux pieds des Djebels Bourdim et Hadjar Siah à l'Est

3. Les zones de montagnes et des collines

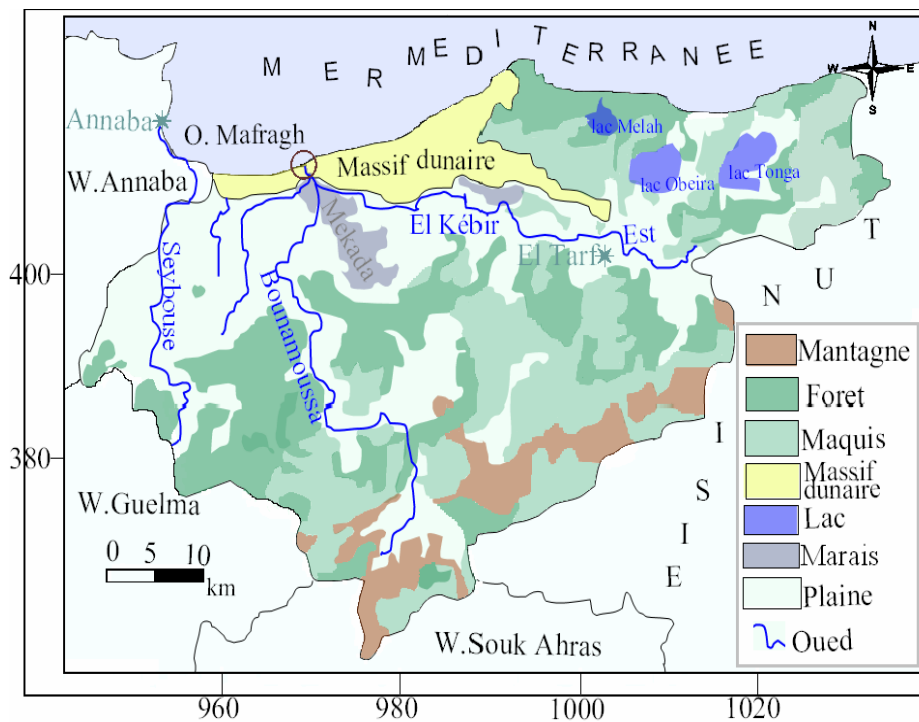
Elle domine le sud de la zone de la plaine ou on trouve des espaces forestiers les plus vastes caractérisée par l'existence de reliefs de 1200 m d'altitude orientés SW-NE au Kef Rokba sur la ligne frontalière.

- Les montagnes ou les monts de la Cheffia représente le principal affleurement surplombant la partie aval du bassin et forment une barrière Est-Ouest ou leurs altitude avoisine les 450 m. Par contre, les massifs d'importante altitude sont représentés par le Djebel Bled Gherfie 996 m à l'Ouest et le Djebel Rhora 1 202 m à l'extrême Est (frontière Algéro-Tunisienne).
- Les collines sont développées à la limite des plaines, au niveau des terrasses déprimées. Au Nord-Est de Bouteldja, ces collines sont représentées par le Hadjar Siah et Dj Bourdim avec des altitudes respectives de 175 m et 177 m.

- Le complexe alluvial de la vallée de l'oued Kébir Est, qui est caractérisé par une série de terrasses à faciès hétérogènes (sables, graviers, limons et surtout argiles).

4. Les zones des marécages et des lacs

- Les marécages et les lacs où leur présence est liée aux différentes phases d'assèchement des zones lacustres de l'Algérie orientale durant le Quaternaire. (Gaud.1975). Elle est due principalement à la réduction progressive des surfaces lacustres avec un remplissage alluvionnaire intensif des zones avales, de nombreux oueds tributaires du bassin comblés surtout au niveau des dépressions internes par les transports solides des différents oueds.
- Les marécages de Mekhada et lac des oiseaux : développés dans la basse vallée du Kébir Est, ils forment un delta commun aux principaux oueds drainant la région.



I.4. Paramètres morpho-métriques

Pour étudier la particularité d'un bassin versant et pour mieux appréhender son comportement hydrologique, il est impératif de connaître ses caractéristiques morpho-métriques qui explique le cycle de transformation des pluies en écoulement et s'appêtent à une analyse quantifiée.

I.4.1. La superficie « A » en (km²) et le périmètre « P » en (Km)

La région d'El-Taref étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être reliés en partie à sa surface et son périmètre. Ces deux paramètres ont été déterminés grâce à l'utilisation de système d'information géographique MapInfo (SIG) et les cartes topographiques.

Pour la wilaya d'El-Taref:

- P= 318.8 (Km) et A=2 891.63 (km²)

Pour le sous bassin versant de Mafragh :

- P= 165.88(Km) et S=802.43 (km²)

I.4.2Indice de capacité de Gravelius (Kc)

Cet indice définit la forme du bassin versant qui est essentiel pour la modalité des écoulements et la concentration des débits. Il représente le rapport du périmètre du bassin sur le périmètre du cercle de surface équivalente. Le calcul se fait avec la formule suivante :

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- Kc : indice de compacité de Gravelius.
- A : surface du bassin versant.
- P : périmètre du sous bassin versant.

Et quand :

- Kc= 1.0 bassin versant forme un cercle.
- Kc= 1.12 bassin versant forme un carré.
- Kc= 1.28 bassin versant forme un triangle équilatéral.

- $K_c \geq 1.5$ bassin versant forme un rectangle allongé.

On trouve que :

- $K_c = 1.74$ Pour la wilaya d'El- Taref.
- $K_c = 1.64$ pour le sous bassin versant de Mafragh.

Donc le bassin versant est de forme d'un rectangle allongé.

I.4.3. Dimension de rectangle équivalent

Afin de comparer les bassins versants entre eux M. ROCHE (1963) a introduit une notion qui est une transformation géométrique des bassins en rectangles de même périmètre, surface, indice de Gravelius K_c et les mêmes conditions d'écoulement que ceux du bassin versant considéré. Les paramètres de la longueur "L" et de la largeur "l" du rectangle équivalent permettent de déterminer les dimensions de ce rectangle, avec les formules qui s'écrivent comme suit :

A. Longueur du rectangle équivalent "L" et largeur du rectangle équivalent "l":

$$L = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

Les résultats :

- $L = 138.65$ km et de $l = 18.78$ km. Pour le bassin versant d'El-Taref.
- $L = 71.08$ km et de $l = 11.28$ km. Pour le sous bassin versant de Mafragh.

On remarque que la longueur est supérieure à la largeur, ce qui confirme que le bassin est de forme allongée.

I.4.4. La courbe hypsométrique (Figure I.4), (Tableau I.1)

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, c'est-à-dire du relief. Elle représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle permet, entre autres, d'obtenir la valeur de l'altitude médiane et l'indice de pente global I_g du bassin versant.

Les données nécessaires à l'établissement de la courbe hypsométrique sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau I.1 : Répartition des tranches d'altitude en fonction de la surface du sous bassin de Mafragh.

Altitude (m)	surface km ²	% S	%S cumulé
0-50	539.06	67.18	100.00
50-100	98.36	12.26	32.82
100-150	48.22	6.01	20.56
150-200	36.10	4.50	14.56
200-250	25.52	3.18	10.06
250-300	19.41	2.42	6.88
300-350	13.96	1.74	4.46
350-400	12.21	1.52	2.72
400-450	6.29	0.78	1.20
450-500	1.73	0.22	0.41
500-550	0.67	0.08	0.20
550-600	0.41	0.05	0.11
600-650	0.34	0.04	0.06
650-700	0.16	0.02	0.02

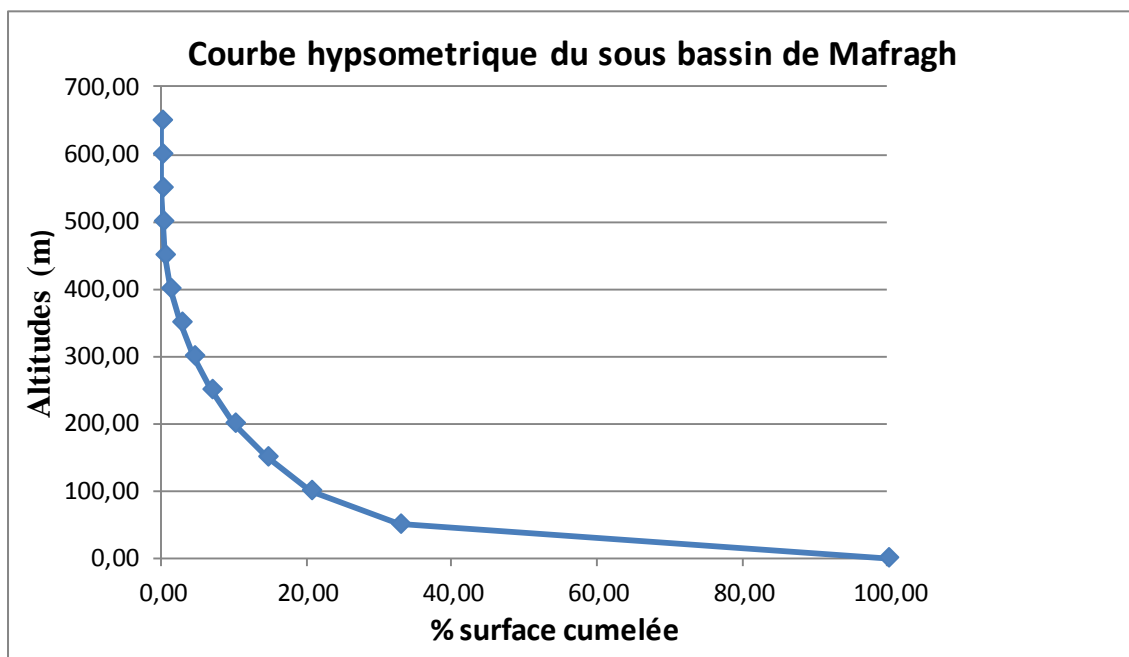


Figure I.4 : Courbe hypsométrique de bassin versants de Mafragh.

I.4.5. Les altitudes caractéristiques

Le tracé de la courbe hypsométrique, nous a permis de déduire certaines altitudes caractéristiques de ce bassin. Celles-ci sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2 : Les altitudes caractéristiques du sous bassin versant de Mafragh

Altitudes caractéristiques	Altitude (m)
Altitude de fréquence H95%	10
Altitude Médiane de fréquence H50%	40
de fréquence H5%	300
Altitude moyenne (H moyenne)	72.03
Altitude maximale (H max)	700
Altitude minimale (H min)	0

Tableau I.3 : les altitudes caractéristiques du bassin versant d'El-Taref

Altitudes caractéristiques	Altitude (m)
Altitude de fréquence H95%	15,62 m
Altitude Médiane de fréquence H50%	257,33 m
de fréquence H5%	829,71 m
Altitude moyenne (H moyenne)	315,19 m
Altitude maximale (H max)	1406
Altitude minimale (H min)	0

I.4.6. Indice de pente globale I_g

L'objet de cet indice est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Il est défini par la relation suivante :

$$I_g = \frac{|H(5\%) - H(95\%)|}{L}$$

Avec :

- D est la différence entre les altitudes, H (5%) est l'altitude de fréquence (95%).
- L est la longueur du rectangle équivalent (km).

Le calcul a donné :

- $I_g=4.11$ m/Km. Pour le sous bassin versant de Mafragh.
- $I_g=5.87$ m/Km. Pour la région d'El-Taref

I.4.7. Dénivelée spécifique DS

Elles dérivent de la pente globale "I_g" en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à La dénivelée spécifique "D_s" ne dépend donc que de l'hypsométrie et de la forme du bassin.

Pour la calculer on utilise cette formule :

Le calcul donne :

$$D_s = I_g \sqrt{S} \leftrightarrow \frac{D}{L} \sqrt{LI} \leftrightarrow D \sqrt{\frac{1}{L}}$$

- D_s=115.57 m. Pour le sous bassin versant de Mafragh.
- D_s=299.54 m. Pour la région d'El-Taref.

La transposition des résultats obtenus, de la dénivelée spécifique "D_s" et de l'indice de pente globale "I_g" avec la classification de l'ORSTOM (Tableau I.4) permet de déceler que :

- Le sous bassin versant de Mafragh est caractérisé par un relief assez fort.
- La région d'El-Taref caractérisé par un Relief fort.

Tableau I.4 : Classification du relief selon I_g, D_s par l'ORSTOM

Première classification	Type de Relief	Deuxième classification
I _g 0.002	Relief très faible (R1)	D _s <10m
0.002 < I _g < 0.005	Relief faible (R2)	10m < D _s < 25m
0.005 < I _g < 0.01	Relief assez faible (R3)	25m < D _s < 50m
0.01 < I _g < 0.02	Relief modéré (R4)	50m < D _s < 100m
0.02 < I _g < 0.05	Relief assez fort (R5)	100m < D _s < 250m
0.05 < I _g < 0.1	Relief fort (R6)	250m < D _s < 500m
0.1 < I _g	Relief très fort (R7)	500m < D _s

I.5. Conclusion

La Wilaya de D'El-Taref appartient à la grande zone hydrographique constantinoise, située à l'extrême Nord-Est d'Algérie à la frontière Algéro-Tunisienne avec de superficie de 2 891.63 km². Les statistiques disponibles estiment en 2011 environs 334 352 habitants pour l'ensemble de la wilaya.

Cette région regroupe plusieurs unités hydro-morpho-géographiques qui se répartissent en : zones des plaines et des piémonts, zone dunaire, zones de montagnes et des collines et les zones des marécages et des lacs.

L'étude morphologique (**Tableau.I.5**) a permis de déterminer les caractéristiques physiographiques du bassin de versant d'El-Taref et de sous bassin versant de Mafragh, ce dernier est de forme allongée, favorisant l'infiltration vers les eaux souterraines. Les altitudes qui sont dans l'ensemble caractérisent un relief fort, elles sont comprises entre 0-700 m pour le sous bassin versant de Mafragh et 0 à 1406 m pour le bassin d'El-Taref avec une pente globale de 5.87 m/Km.

Tableau I.5 : Récapitulatif des caractéristiques de la zone d'étude

Paramètres	Notation	El-Taref (03)	Mafragh (0317)	Unité
Superficies	A	2 891.63	802.43	km ²
Périmètre	P	318.8	165.88	Km
Indice de compacité de Gravelius	K _c	1.74	1.64	/
Longueur du rectangle équivalent	L	138.65	71.08	km
largeur du rectangle équivalent	l	18.78	11.28	m
Altitude maximale	H _{max}	1406	700	m
Altitude minimale	H _{min}	0	0	m
Altitude moyenne	H _{moy}	315.19	72.03	m
Altitude médiane	H _{méd}	275.33	40	m
Altitude 95%	H _{95%}	15.62	10	m
Altitude 5%	H _{5%}	829.71	300	m
Indice de pente global	I _g	5.87	4.11	m/Km
Dénivelé spécifique	D _s	299.54	115.57	m

Chapitre II
Hydroclimatologie

Chapitre II : Hydroclimatologie

II.1.Introduction

L'Algérie est subdivisée en cinq (05) régions hydrographiques gérées par l'Agence nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE) et des Agences de Bassins Hydrographiques (ABH) et ils sont: Oranie- Chott- Chergui, Cheliff- Zahrez. Algérois-Hodna- Soummam, Sahara et Constantinois- Seybouse-Mellègue auquel fait partie notre zone d'étude.

Ils s'étalent sur plusieurs Wilayas et sont subdivisés en unités hydrologiques dites bassins versants (BV). Et un bassin versant est défini, comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau principal et ses affluents. Il est caractérisé par son exutoire, et ses paramètres physiques et climatiques qui le conditionnent.

Ces conditions climatiques jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche, 1963). Une des principales caractéristiques du cycle hydrologique est l'état de mouvement de l'eau depuis la surface vers les aquifères. Cet échange se fait par infiltration efficace qui conditionne la qualité de la nappe.

Et dans cette étude, nous allons essayer de déterminer cette infiltration efficace à travers l'établissement du bilan hydrologique au niveau bassin versant d'El-Taref (03) et son sous bassin versant Mafragh (0317). Cela en fonction de ses paramètres climatiques: précipitations, températures et de l'évaporation.

Autour du bassin versant d'il existe, plusieurs stations pluviométriques gérées par l'ANRH d'Alger et nous avons choisi d'utiliser les données climatiques des stations regroupées dans le (Tableau II.1) qui s'étalent sur treize ans (13 ans) de la période 2000-2013.

Tableau II.1 : Caractéristiques des stations climatiques dans la zone d'étude

Nom des stations	Code station.	X.	Y.	Z.
Ain –Assel	31601	1005.65	400.05	35.00
Cheffia	31501	977.15	381.30	170.00
Lac des oiseaux	31717	984.50	400.50	06.00
Bouteldja	31719	984.50	399.05	38.00

II.2. Facteurs climatiques

L'étude climatique nécessite l'identification de plusieurs facteurs parmi eux :

II.2.1. La Température (T(°C))

C'est un facteur qui cause un déficit d'écoulement annuel et saisonnier car il agit directement sur le phénomène d'évapotranspiration.

II.2.1.1. La Température moyenne mensuelle

Les températures moyennes mensuelles mesurées dans la station de Bouteldja sur une période de 13 ans (2000-2013) sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Températures moyennes mensuelles T (°C) de la station de Bouteldja (ANRH d'Alger).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juillet.	Août.
T (°C)	22.94	20.19	15.33	12.36	10.89	11.32	13.54	15.71	18.93	22.66	25.33	25.75

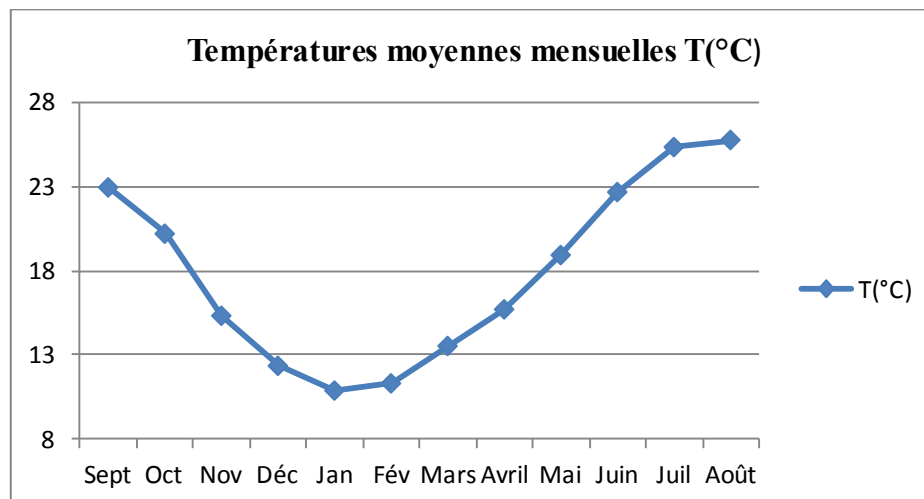


Figure II.1 : histogramme des Températures moyennes mensuelles T (°C) période (2000-2013).

L'histogramme des températures moyennes mensuelles montre que, les plus faibles valeurs sont mesurées aux mois de décembre, janvier, février et mars où on remarque que le mois le plus froid est le mois de janvier (avec une température de l'ordre de 10.89°C). Par contre, les plus fortes valeurs caractérisent maquent les mois de, juin, juillet et août où on remarque que le mois le plus chaud est le mois d'août (avec une température de l'ordre de 25.75°C).

II.2.2. Etude de la pluviométrie

C'est un facteur important dans l'étude climatique par ce qu'il donne un aperçu sur les variations mensuelles et pluriannuelles des précipitations.

Notre étude est basée sur les données pluviométriques de quatre stations pluviométriques (Ain-Assel, Cheffia, Lac des oiseaux, Bouteldja) durant la période de 13 ans (2000-2013) mentionnées dans le (Tableau II.2) précédent.

II.2.2.1 La pluviométrie moyenne mensuelle

La pluviométrie moyenne mensuelle mesurée dans la station de Bouteldja sur une période de 13 ans (2000-2013) est reportée dans le tableau suivant :

Tableau II.3 : La pluviométrie moyenne mensuelle (mm) des stations d'El-Taref pour la période (2000-2013).

Stations	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril	Mai.	Juin.	Juil.	Août.
Ain-Assel	61.65	91.66	125.95	145.14	129.66	120.98	89.14	75.46	35.84	13.33	2.26	8.81
Cheffia	49.45	68.88	95.38	131.86	122.86	100.59	87.86	78.22	46.93	14.64	2.43	16.66
Lac des oiseaux	53.48	72.54	98.61	117.89	97.52	81.84	76.92	69.69	33.55	13.46	3.01	11.57
Bouteldja	45.18	61.87	80.14	98.63	85.46	75.43	54.82	62.24	22.25	11.04	1.44	5.79

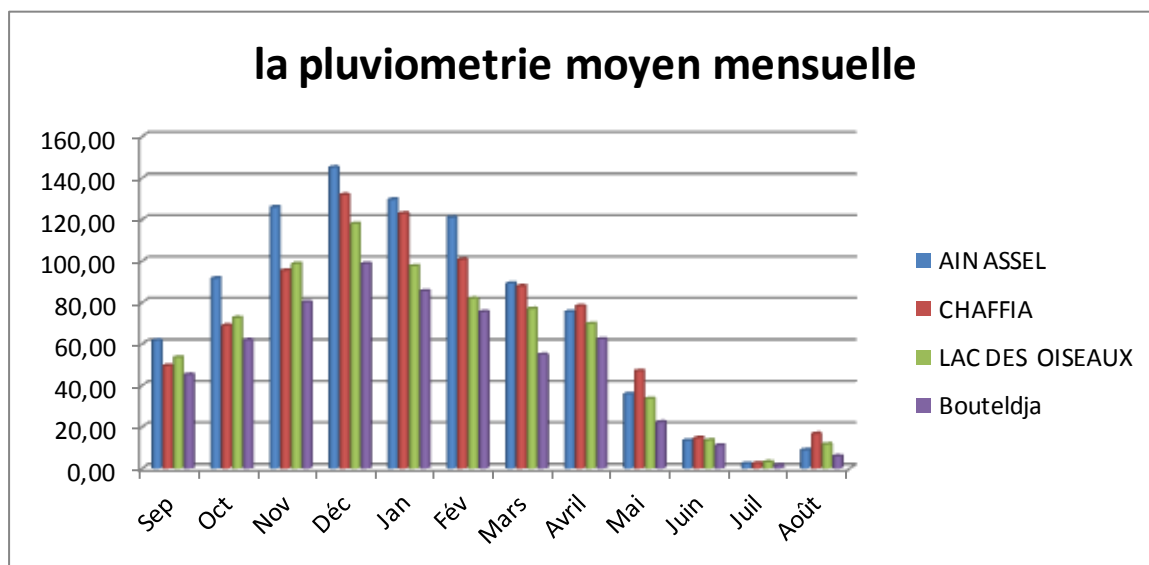


Figure II.2: La pluviométrie moyenne mensuelle (mm) des stations d'El-Taref pour la période (2000-2013).

Le mois de juillet représente le mois avec les plus faibles des pluies suivis du mois d'aout et du mois de juin, par contre le mois de décembre est le mois le plus pluvieux.

On remarque que la station de Ain-Assel est la station qui enregistre des pluies en grande intensité suivie successivement de la station de Cheffia, Lac des Oiseaux puis celle Bouteldja.

II.2.2.2 La pluviométrie moyenne annuelle :

La pluviométrie moyenne annuelle mesurée dans la station d'El-Taref sur une période de 13 ans (2000-2013) est reportée dans le (tableau II.4) suivant :

Tableau II.4 : La pluviométrie moyenne interannuelle des stations climatiques période (2000-2013) (ANRH Alger).

Années	Ain-Assel	Cheffia	Lac des oiseaux	Bouteldja
2000	71.71	58.11	61.13	57.45
2000/2001	40.82	41.88	39.73	31.05
2001/2002	102.08	94.93	86.68	88.18
2002/2003	79.28	80.01	73.64	62.53
2003/2004	96.55	93.65	70.23	77.48
2004/2005	51.14	53.60	50.96	39.40
2005/2006	71.31	64.68	66.08	33.60
2006/2007	58.91	45.73	47.26	28.57
2007/2008	78.58	84.09	83.01	61.04
2008/2009	74.23	62.41	63.93	41.72
2009/2010	80.23	70.59	65.84	53.73
2010/2011	99.29	78.44	62.67	55.18
2011/2012	69.64	65.38	52.92	43.78
2012/2013	76.09	58.23	27.69	31.29

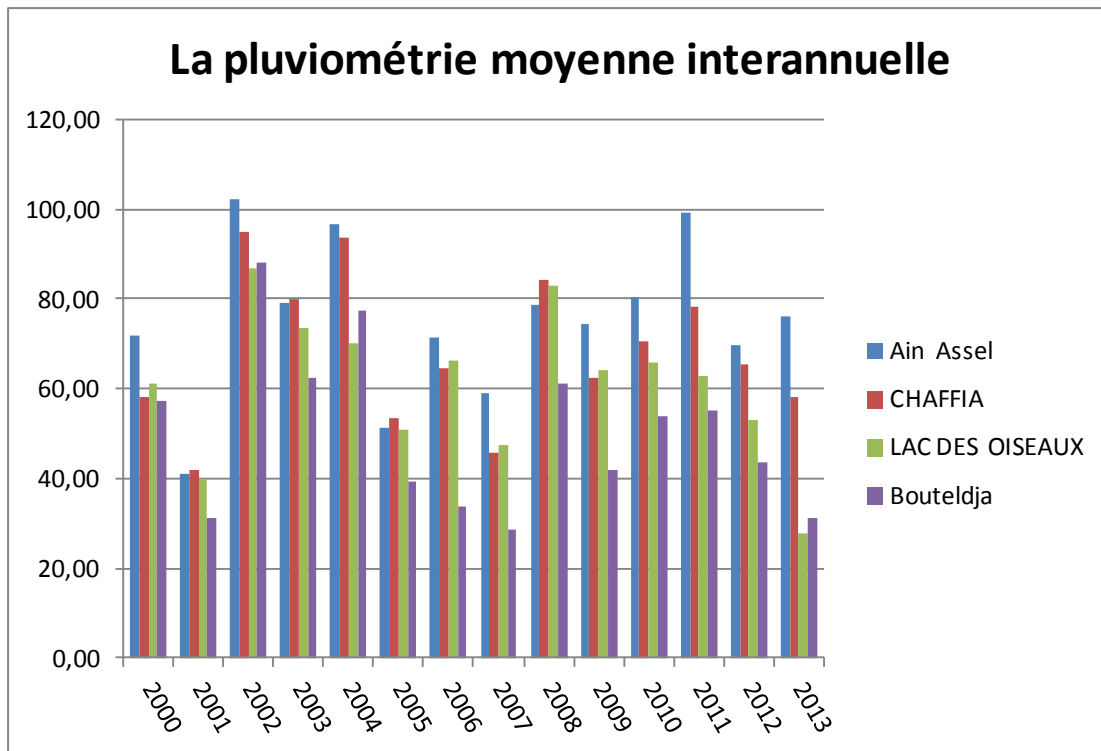


Figure II.3: Histogramme de la pluviométrie moyenne interannuelle des stations climatiques période (2000-2013).

Sur une période d'observation de 13 ans, les précipitations moyennes interannuelles dans les stations d'El-Taref sont représentées sur l'histogramme (**Figure II.3**) qui donne un aperçu sur les variations des précipitations interannuelles dans la région d'étude, montre que les pluies des stations évoluent de la même tendance pour la même année et elles présentent des variabilités d'année en année.

II.3. Diagramme Ombrothermique

Une courbe Ombrothermique est la combinaison entre les facteurs pluviométriques (P) et les facteurs thermiques (T). L'avantage de ces courbes nous permet de mettre en évidence les deux périodes sèche et humide.

Un mois sec est celui dont les précipitations totales exprimées en millimètres, sont égales ou inférieures au double de la température dont la règle est : $P < 2T$.

Tableau II.5: Les précipitations moyennes mensuelles à la station de Bouteldja
Période (2000-2013).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
P (mm)	85,46	75,43	54,82	62,24	22,25	11,04	1,44	5,79	45,18	61,87	80,14	98,63
T (°C)	10,89	11,32	13,54	15,71	18,93	22,66	25,33	25,75	22,94	20,19	15,33	12,36
2T (°C)	21,79	22,64	27,07	31,41	37,85	45,33	50,66	51,50	45,88	40,39	30,66	24,72

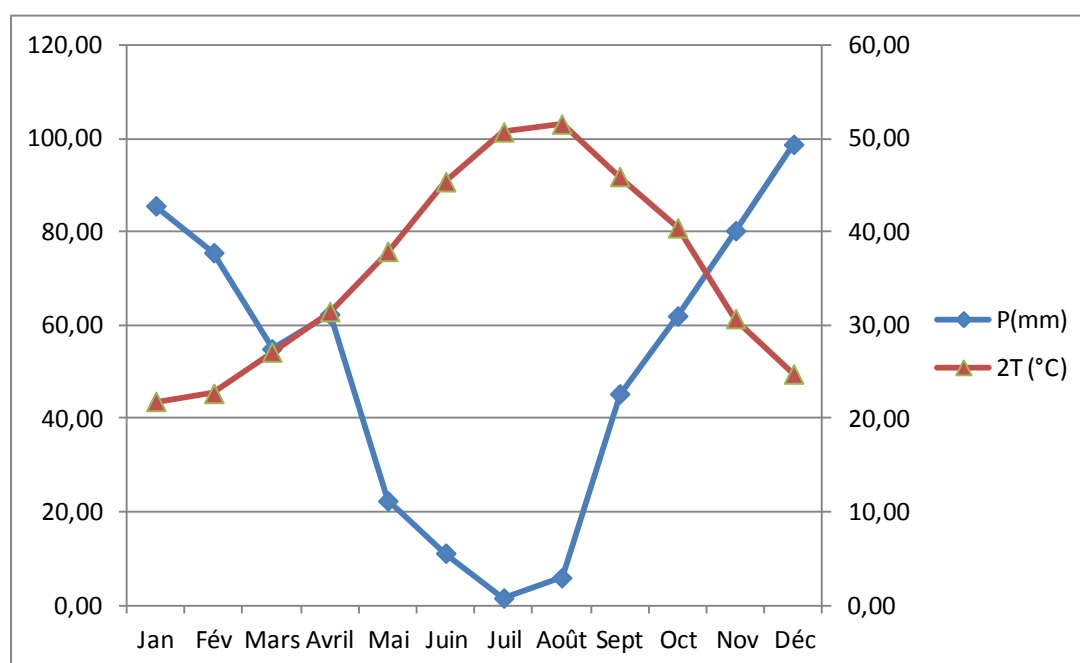


Figure II.4: Diagramme Ombrothermique de Gausse de la station de Bouteldja période (2000-2013).

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

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

II.3.1 Indice d'aridité 'A' de Martonne :

$$A = \frac{P}{(10 + T)}$$

Avec :

- A : indice d'aridité annuelle.
- P : précipitations moyennes annuelles en mm.
- T : températures moyennes annuelles en °C.

Le résultat du calcul sont résumé dans le (**Tableau II.6**) représentant l'Indice d'aridité de la station de Bouteldja avec les paramètres utilisés.

Tableau II.6: Le résultat du calcul de l'Indice d'aridité.

Station/paramètres	P (mm).	T (°C).	A (mm/°C).
Bouteldja	604.29	17.9126	21.649209

Et selon DE.MARTONNE

- Si $A < 5$: le climat est hyperaride.
- Si $5 < A < 10$: le climat est très sec.
- Si $10 < A < 20$: le climat est sec.
- Si $20 < A < 30$: le climat est tempéré, Subhumide.
- Si $A > 30$: le climat est humide (l'écoulement est abondant).

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

II.4. Estimation de l'Evapotranspiration

L'évapotranspiration est un phénomène important du cycle hydrologique, qui dépend du climat et de ses variations. Elle englobe l'ensemble des phénomènes d'évaporation directe par retour dans l'atmosphère, à partir des réservoirs de surface (lac, mer, etc...), souterrain (nappes, aquifères) et la transpiration des plantes.

On distingue deux types :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP).
- l'évapotranspiration réelle (ETR).

II.4.1. Estimation de l'Évapotranspiration Potentielle ETPc (mm)

II.4.1.1. Formule de Thornthwaite

La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon C.W Thornthwaite tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle.

Avec :

$$ETP = 16. \left(10 \frac{T}{I}\right)^a . K$$

- ETP : Évapotranspiration Potentielle mensuel corrigé en mm.
- T : *Température* moyenne mensuelle en °C.
- K : Coefficient d'ajustement mensuel.
- I : Indice thermique annuel : somme des indices mensuelles calculées à partir de températures moyennes mensuelles selon la formule :

$$I = \sum_1^{12} i$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

Tableau II.7 : Calcul de d'ETP par la méthode de Thornthwaite la période (2000-2013) station de Bouteldja.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.
P (mm)	45.18	61.87	80.14	98.63	85.46	75.43	54.82	62.24	22.25	11.04	1.44	5.79
T (°C)	22.94	20.19	15.33	12.36	10.89	11.32	13.54	15.71	18.93	22.66	25.33	25.75
i	10.04	8.28	5.45	3.94	3.25	3.45	4.52	5.66	7.5	9.86	11.67	11.96
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16
ETPc (mm)	104.11	77.25	40.92	26.73	21.86	22.95	38.84	54.78	85.38	120.5	150.85	145.5

II.4.1.2. Formule de Serra :

$$ETP = 16. \left(10 \frac{T}{I}\right)^a . K$$

Avec :

$$I = \sum_1^{12} i$$

$$i = 0.09T^{3/2}$$

$$a = \frac{1.6}{100}I + 0.5$$

Tableau II.8: Calcule d'ETP par la méthode de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.
P (mm)	45.18	61.87	80.14	98.63	85.46	75.43	54.82	62.24	22.25	11.04	1.44	5.79
T (°C)	22.94	20.19	15.33	12.36	10.89	11.32	13.54	15.71	18.93	22.66	25.33	25.75
i	9.89	8.17	5.4	3.91	3.24	3.43	4.48	5.6	7.41	9.71	11.47	11.76
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16
ETPc (mm)	104.8	77.93	41.48	27.2	22.29	23.38	39.45	55.5	86.22	121.36	151.6	146.19

II.4.2. Estimation de l'Evapotranspiration Réelle ETR (mm)

II.4.2.1. Formule de Truc

La formule de Turc consiste à évaluer directement l'évapotranspiration réelle, à partir de la hauteur moyenne de la pluie et de la température moyenne annuelle et qui s'écrit de la manière suivante :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

Avec :

- ETR : Evapotranspiration réelle en mm.
- P : Hauteur annuelle de la pluie (en mm).
- t : Température annuelle (°C).

Tableau II.9 : l'ETR par la formule de Truc période (2000-2013) station de Bouteldja.

Station	P (mm).	T (°C).	L.	L ² .	ETR (mm/an).
Bouteldja	604.29	17.9126	1035.188	1071614.1	542.5

II.4.2.2. Formule de Coutagne :

Avec l'application des formules suivantes

$$ETR = \bar{P} - \lambda T^2$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.1T}$$

$$\frac{1}{8\lambda} < \bar{P} < \frac{1}{2\lambda}$$

Avec :

- ETR : Evapotranspiration réelle en mm.
- T : température moyenne annuelle en °C.
- P : pluie moyenne annuelle en mm.

$1/8\lambda$	<p(mm)<	$1/2\lambda$
0.323	0.809	1.295

Tableau II.10: Calcule de l'ETR par la par formule de Coutagne période (2000-2013) station de Bouteldja.

station.	P (mm/an).	T (°C).	λ .	ETR (mm).
Bouteldja.	604.28571	17.9126	0.3859126	480.46131

II.4.2.3. Le calcule de l'ETR par méthode de Thornthwaite

Le calcul de l'ETR par Méthode de Thornthwaite se fait en considérant deux cas possibles :

Si $P > ETP$ donc $ETP = ETR$: dans ce cas on parle d'excédent de précipitations qui sera emmagasiné dans le sous-sol participant ainsi à l'augmentation des réserves en eau souterraines jusqu'à ce que ces dernières soient maximales, le surplus constitue l'excédent qui va être disponible pour l'alimentation de l'écoulement de surface et des nappes profondes.

Si $P < ETP$: dans ce cas l'ETR dépens de toutes les pluies mensuelles et le déficit et comblé par les réserves du sol (RFU) jusqu'à l'épuisement, ($ETR = P + RFU$).

Si la réserve facilement utilisable(RFU) contient l'eau nécessaire pour satisfaire le déficit, l'ETR est égale à l'ETP (1 "cas), dans le cas contraire la (RFU) est vide, l'ETR est liée aux précipitations mensuelle et le déficit constitue le déficit agricole (da) qui représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent de sécheresse.

II.4.2.3.1. Bilan hydrologique en fonction de l'ETP de Thornthwaite

Tableau II.11 : Bilan de Thornthwaite en fonction de l'ETP de Thornthwaite période (2000-2013) station de Bouteldja.

Mois	P (mm).	ETP (mm).	RFU (mm).	ETR (mm).	Da (mm).	Excédent (mm).
Sep.	45.18	104.11	0	45.18	58.93	0
Oct.	61.87	77.25	0	61.87	15.38	0
Nov.	80.14	40.92	39.22	40.92	0	0
Déc.	98.63	26.73	100	26.73	0	11.12
Jan.	85.46	21.86	100.	21.86	0	63.60
Fév.	75.43	22.95	100	22.95	0	52.48
Mars.	54.82	38.84	100	38.84	0	15.99
Avril.	62.24	54.76	100	54.78	0	7.46
Mai.	22.25	85.38	36.88	85.38	0.00	0
Juin.	11.04	120.54	0	47.92	109.50	0
Juil.	1.44	150.85	0	1.44	149.41	0
Août.	5.79	145.53	0	5.79	139.75	0
Annuel.	604.29	889.72	/	453.63	521.46	150.65

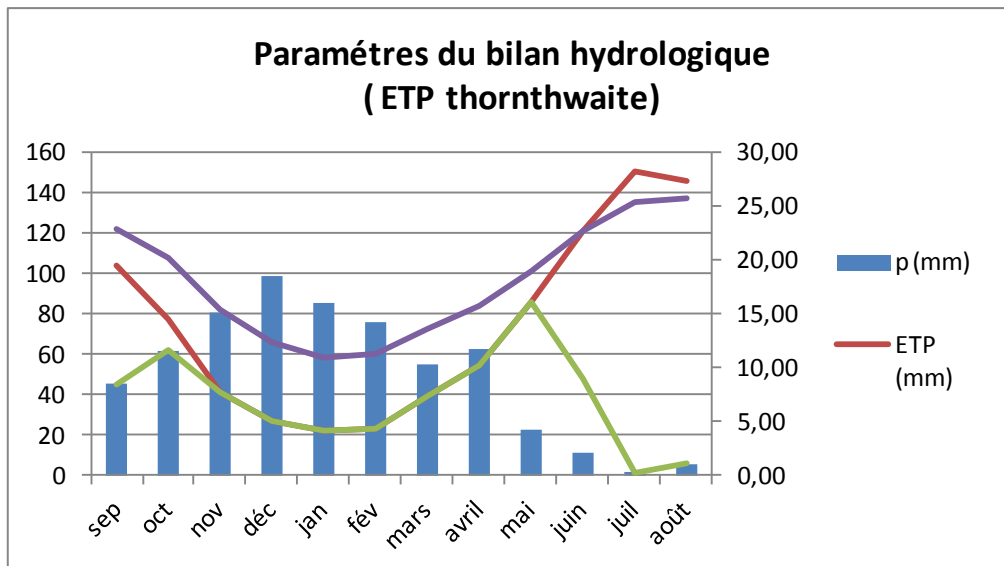


Figure II.5: Bilan hydrologique en fonction de l’ETP de Thornthwaite période (2000-2013) station de Bouteldja.

II.4.2.3.2. Bilan hydrologique en fonction de l’ETP de Serra

Tableau II.12: Bilan de Serra en fonction de l’ETP de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.

Mois	P (mm).	ETP (mm).	RFU (mm).	ETR (mm).	Da (mm).	Excédent (mm).
Sept	45.18	104.79	0.00	45.18	59.61	0.00
Oct.	61.87	77.93	0.00	61.87	16.05	0.00
Nov.	80.14	41.48	38.67	41.48	0.00	0.00
Déc.	98.63	27.2	100	27.20	0.00	10.10
Jan	85.46	22.29	100	22.29	0.00	63.17
Fév.	75.43	23.38	100	23.38	0.00	52.04
Mars	54.82	39.45	100	39.45	0.00	15.37
Avril	62.24	55.5	100	55.50	0.00	6.74
Mai	22.25	86.22	36.03	86.22	0.00	0.00
Juin	11.04	121.36	0.00	47.07	74.29	0.00
Juil.	1.44	151.57	0.00	1.44	150.14	0.00
Août	5.79	146.19	0.00	5.79	140.4	0.00
Annuel	604.29	897.36	/	456.86	440.49	147.43

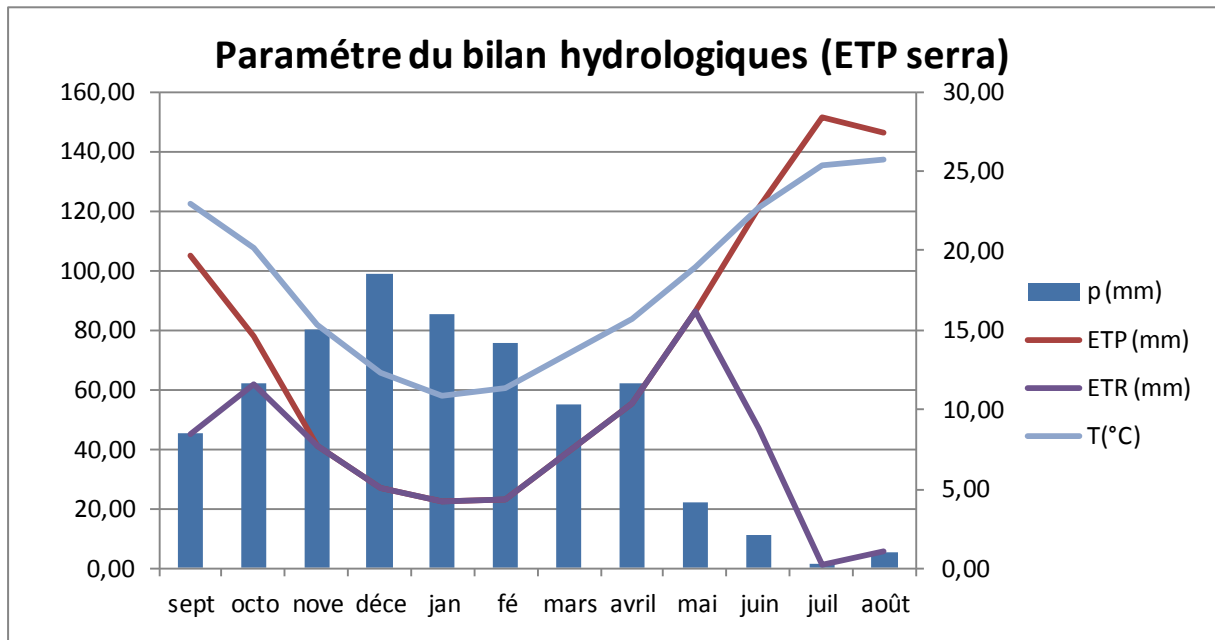


Figure II.6: Bilan de Serra en fonction de l'ETP de Serra période (2000-2013) station de Bouteldja.

Les deux méthodes de Serra et Thornthwaite, nous confirme que la période humide excédentaire de l'ordre de 147.43 mm, qui va du mois de Octobre à Avril et ainsi que la période sèche du mois de Mai à Septembre, qui est de l'ordre de 440.49 mm.

Le **Tableau II.13** suivant représente le récapitulatif des résultats des paramètres du bilan hydrologique.

Tableau II.13: récapitulatif des résultats des paramètres du bilan hydrologiques période (2000-2013) station de Bouteldja.

Paramètres	Méthodes	Résultats	Moyennes (mm)	
P (mm)	604.29		604.29	
ETP (mm)	Thornthwaite	889.72	893.54	
	Serra	897.36		
ETR (mm)	Thornthwaite	ETR	455.25	
		Thornthwaite		453.63
		ETR Serra		456.86
	Turc	542.5	542.5	
Coutagne	480.46	480.46		

II.5. Estimation de l'infiltration « I » avec l'équation du bilan hydrologique

L'infiltration est un paramètre très important dans le bilan hydrique, est définie comme étant le mouvement de l'eau dans un sol en passant par la surface, elle dépend de plusieurs facteurs, les plus importants sont :

- La nature du sol.
- La perméabilité et la porosité du terrain
- La couverture végétale.
- L'intensité de la pluie
- Topographie du terrain

Elle peut être calculée par la formule du bilan globale :

$$\boxed{P = ETR + I_e + R} \quad \Longrightarrow \quad \boxed{I_e = P - (ETR + R)}$$

Avec :

- **P** : Précipitation moyennes annuelles (mm).
- **ETR** : Evaporation Réelle (mm).
- **I_e** : la lame d'eau infiltrée (mm).
- **R** : la lame d'eau ruisselée.

II.6. Estimation du Ruissellement « R »:

Avec :

$$\boxed{R = \frac{P^3}{3ETP^2}}$$

- **R** : lame d'eau ruisselée annuelle en mm.
- **P** : précipitation moyenne annuelle en mm.
- **ETP** : Evapotranspiration annuelle en mm.

R= 92.13

II.7. Conclusion

Tableau II.14: récapitulatif des résultats du bilan hydrologiques période (2000-2013) station de Bouteldja.

Paramètres	P	ETR	R	Ie
Unité	(mm/an)	(mm/an)	(mm/an)	(mm/an)
Station de Bouteldja	604.29	483.36	92.13	28.8
		%	%	%
		79.80	15.24	4.76

La région d'étude, est soumise à un climat tempéré caractérisé par deux saisons, la première humide allant du mois d'octobre au mois de d'Avril et une seconde sèche allant de mois de Mai au mois de Septembre. Ce climat est influencé par une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 604.29 mm/an, avec une température moyenne annuelle de 17.9126°C.

L'estimation des moyennes des paramètres constituant le bilan hydrologique sur la période (2000-2013), a permis de faire ressortir les résultats suivants pour la station de Bouteldja :

1. Une évapotranspiration potentielle (ETP) de 893.54 mm/an.
2. Une évapotranspiration réelle (ETR) de 483.36 mm/an soit 79.80 %
3. Un ruissellement (R) de 92.13 mm/an soit 15.24 %.
4. Un taux d'infiltration (I) de 28.8 mm/an soit 4.76 %.

Chapitre III :
Géologie

Chapitre III : La Géologie de la région d'El-Taref

III.1. Introduction

La géologie de la région d'El Taref appartient au contexte géologique régional du Nord-Est algérien qui se résume en une chrono-stratigraphie révélant des terrains géologiques de deux types l'un sédimentaire et l'autre métamorphique (Joleaud.L,1936. Hilly.J,1963). Villa.J.M.1980. Lahondere.J.C.1987) d'âges différents.

III.2. L'échelle stratigraphique

L'échelle stratigraphique de ces terrains se répartit du Paléozoïque au Quaternaire :

Le socle du Primaire : affleure à l'Ouest dans le massif de Dj. Edough, Belelieta et Bouhamra, constitué par des roches cristallophylliennes (des micaschistes qui ceinturent des gneiss d'après Hilly, 1962 ; Caby, 1992 ; Ahmed-Said, 1993 (in Hani 2003) ces roches se superposent en trois séries :

1. Série inférieure forme le cœur de l'anticlinal du massif de l'Edough, représentée par des gneiss riches en biotite et sillimanite d'une épaisseur moyenne de 70 m.
2. Série intermédiaire : contient des marbres qui s'intercalent dans les formations des micaschistes sous forme de skarns, représentée par des schistes et des micaschistes riches en biotite, muscovite et du grenat et des feldspaths.
3. Série supérieure, constituée par un ensemble de gneiss ocellés, schistes satinés, micaschistes grenats et amphibolites. (Débièche, 2002).

III.3. La description lithologique

III.3.1.Le Mésozoïque

Affleure dans la partie sud, au niveau de la région de Guelma et Bouchegouf, il forme trois systèmes constitués de :

1. Trias formé par une association de dolomies, calcaires dolomitiques et de gypse.
2. Le Jurassique, représenté par des dolomies noires et des schistes calcaireux.
3. Le Crétacé comporte des calcaires dolomitiques riches en foraminifères et des débris de Rudistes (Débièche, 2002).

III.3.1.1 Crétacé supérieur

Sénonien est le seul étage représenté dans le Secondaire, il affleure à l'Est du bassin versant de Mafragh au niveau de Boussouagui en territoire Tunisien, occupe presque la totalité des monts de la Cheffia et Cap Rosa. Il est représenté par un faciès schisteux et légèrement argileux. Parfois il s'agit aussi de passage de calcaire avec alternance de marnes ou de microbrèches épais de 5 à 10 cm. Quelques forages de reconnaissances répartis dans la cuvette de la Cheffia et réalisés dans le cadre d'une étude géologique au droit de l'emplacement du barrage et de la galerie d'amenée ont recoupé ces faciès. (Hani, 2003)

III.3.2. Cénozoïque

III.3.2.1 Le Tertiaire

Il est représenté par des formations gréseux-argileuses du Numidien au niveau des montagnes allant d'Ain Berda à El-Kala, et par les séries suivantes :

III.3.2.1.1 Paléogène

Se distingue par l'achèvement total de l'étape géosynclinale du développement orogénique, se compose du :

1. Paléocène

Composé des assises de l'étage Danien et du Montien indifférenciées. Ces dépôts affleurent aux bassins des Oueds Bounamoussa, Kébir, Chaffia, Zitouna et Bougous qui sont influencés par le phénomène d'érosion dans l'allochtone numidien

2. Eocène

Présente des traits caractéristiques dans la structure et la composition lithologique, ces dépôts affleurent aux bassins d'oued Kébir, Seybouse et Bounamoussa. On distingue

- **Eocène inférieur** : Il affleure en une série transgressive de calcaire massif à faciès épineurien
- **Eocène supérieur** : Il est caractérisé par des formations argileuses du Numidien de couleur rouge ou grise. Parfois sur la base vert à brunâtre d'où le nom des flyschs type Numidien limitant les alluvions des oueds avec des intercalations des bancs gréseux.

3. Oligocène

Ce sont des formations d'argiles Numidiens de 30 m d'épaisseur de couleur verdâtre, brunâtre ou bleu sombre, comprend parfois des intercalations de lentilles gréseuses, rencontrées dans toute la partie sud de la région d'étude (monts de la Cheffia), au Sud-Est de Bouteldja et dans les djebels Koursi, Bourdim et Oum El-Agareb. Ces argiles, formant la base de la série numidienne, ont été datées de l'Oligocène moyen à supérieur (Lahondère, 1987). Au-dessus de ces formations argileuses viennent se superposer les grès numidiens en position allochtone d'âge aquitanien (Rouvier in Ramdani, 1996), à grains hétérométriques allant du grain grossier au grain fin. Ces grès, épais de près de 150m, sont bien représentés au sud de la région d'étude, à l'Est dans le djebel Bourdim et au Nord-Est dans le djebel Koursi. Ils ceinturent les formations alluvionnaires et surtout dunaires (Hani,2003).

III.3.2.1.2 Néogène

Ces dépôts font partie de la série post nappe composée de conglomérats et de sable de la série du Miocène et de l'étage du Pontien (Miocène terminal). Il affleure dans l'Oued Chaffia et au bord droit de la vallée de l'Oued Bougous.

III.3.3 Le Quaternaire

Les dépôts Quaternaires sont les formations dunaires et alluvionnaires, constituent la roche réservoir, ces dépôts formée essentiellement de limons, de sables et graviers sur les rives des oueds, on distingue :

III.3.3.1 Quaternaire ancien

Il caractérise la nappe superficielle dont le matériau est composé de sables, d'argiles, de graviers et de conglomérats de petite taille dominant cette formation (Khérici,1993 in Hani,2003).

III.3.3.2. Quaternaire moyen :

Il est défini par les matériaux alluvionnaires (limons, cailloux) représentée sur le long des versants des oueds, on distingue dedans :

a. Pléistocène ancien :

Il affleure dans les hautes terrasses et il se caractérise par des formations avec des cailloux roulés et des blocs de grés Numidiens enrobés ensemble dans une matrice argileuse.

b. Pléistocène moyen :

Il correspond aux moyennes terrasses qui traversent la région d'El Taref jusqu'à Ain Assel et parfois les rives de l'oued Kébir Est et qui sont constituées de cailloux roulés, de sables et de limons.

c. Pléistocène récent :

Il présente un granoclassement naturel aux versants des oueds défini par les galets à la base, surmontée par les graviers et on trouve à la surface les sables et les limons.

III.3.3.3. Quaternaire récent :

IL caractérise les lagunes marines dans la région d'El Kala (lac Tonga, Oubéira et Mellah) sous forme de dépôts alluvionnaires, sables, cailloux et limons fins avec dominance d'argiles parfois canalisant ainsi les lits des oueds. Il correspond à la basse et à la moyenne terrasse.

□ La moyenne terrasse est représentée par des terrasses alluvionnaires des oueds, correspond aussi à la terre cultivable (terre, argile, sable).

Basse terrasse est formée par des alluvions du niveau des eaux actuelles des oueds. Ces terrasses sont plus limoneuses que sableuses et sont parsemées de marécages.

III.3.3.4. Quaternaire actuel :

il est présenté par les alluvions des dépôts du lit actuel de l'Oued, généralement de matériaux variés, argiles, sables et des cailloux, résultant de l'érosion des formations traversées par l'Oued et cordon dunaire (les plages actuelles) représenté par un massif constitué essentiellement de sable d'origine marine. Il affleure largement entre le village de Chatt et la ville d'El-Kala. (Hani, 2003).

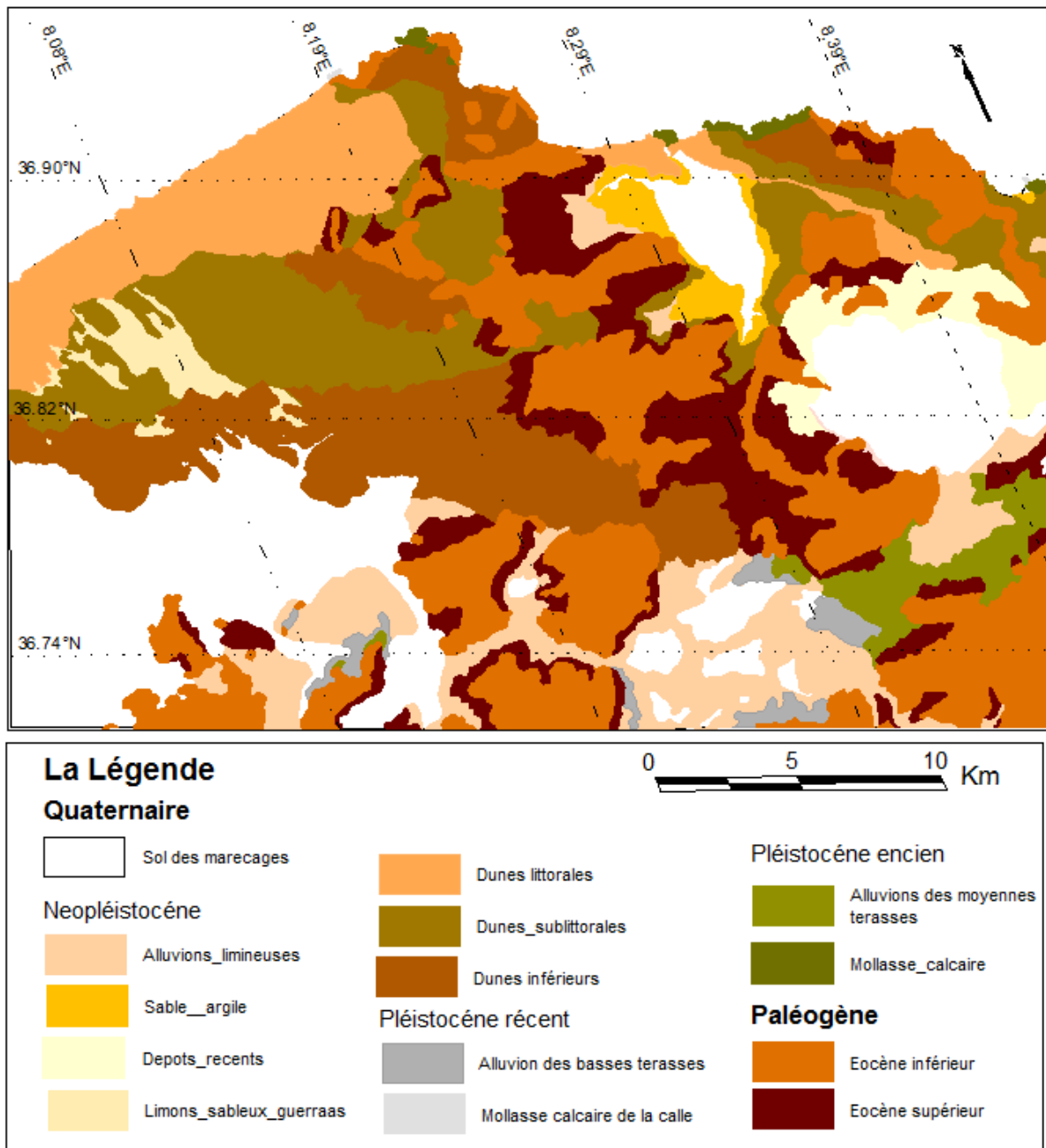


Figure II.1 : Carte géologiques représentant la nappe de Bouteldja digitalisée à partir de la carte 1/500 000 de la carte géologique BLANDAN

SYSTEME	SERIE	ETAGE	INDICE	COLONNE LITHOLOGIQUE	EPAISSEUR en m	description lithologique
TERTIAIRE	MEOGENE		m		> 10	Conglomérats gravelot-blocageux à ciment sablo-argileux
	PALEOGENE	OLIGOCENE	og _N		> 430	SERIE NUMIDIENNE Assise supérieure: grès quartzeux feldspathiques à intercalation des gravelites, des conglomérats des aleurolites et des argiles Assise inférieure: Argile gris foncée à intercalations de grès et des aleurolites
		E O C E N E	PRABONNIEN	e _N		
	LUTTIEN		e ₄		> 150	Marnes argileuses et calcaireuses d'une teinte foncée à rares intercalations de calcaires A la base de l'assise : horizon des calcaires
	YPRESIEN		e ₃		> 200	Argiles, marnes argileuses gris-foncée à intercalations des aleurolites et des silex. A la base horizon tufs et silex.
	PALEOGENE		e ₂		> 162	Argiles à intercalations d'aleurolites (5-10cm), de grès (15-20cm), calcaires (15-20cm) et des marnes (15-20cm)
	CRETACE SUPERIEUR			e ₆		> 200
			e _{5d}		80	Quatrième assise: marnes argileuses
			e _{5c}		360	Troisième assise: alternance répétée de couches de marnes, calcaires, grès, gravelites et aleurolites.
			e _{5b}		> 300	Deuxième assise: marnes gris verdâtres à des intercalations et des lentilles de calcaires sidéritisés.

Figure III.2 : La colonne stratigraphique de la région d'El- taraf (Tchoulanov 1980)

III.4. Aperçu structurale

La zone d'étude est caractérisée en premier lieu, par un enfoncement progressif des grès numidiens sous l'effet tectonique de la deuxième phase alpine durant le Miocène cette phase se caractérise par un remplissage en matériaux détritiques d'âge Plio-Quaternaire dans la plaine.

La continuité se fait par un processus d'effondrement qui donnent naissance à deux fosses celle de Ben Ahmed d'orientation Nord-Sud et celle de Ben M'hidi orienté Ouest-Est durant le Pliocène.

La région d'étude est affectée par un réseau de failles de direction Sud-Est, Nord-Ouest à la région d'El Kala et Cap Rosa.

On note l'affleurement diapérique du Trias à Djebel Bouhadjar; sans oublier les contacts anormaux, chevauchements et charriages et la deuxième phase alpine et à l'extension de la mise en place des nappes.

III.5. Conclusion

La région d'El-Taref est traversée par des terrains sédimentaires d'âges différents de mésozoïques jusqu'aux quaternaires. Le remplissage de sédiments quaternaire constitue le fond d'une dépression tectonique. Les apports de conglomérats, qui sont le plus souvent dus à l'érosion des roches mises en reliefs, viennent remplir cette dépression. Les alluvions récentes recouvrent ces formations argilo-limoneuses.

Chapitre IV :
Ressources en eau
souterraines

Chapitre IV: Ressources en eau souterraines de la région d'El-Taref

IV.1. Introduction

La description dans le chapitre précédent, des principales et des différentes formations géologiques qui traversent notre région d'études, qui servira de base dans la description, des différentes formations aquifères et d'appréhender les caractéristiques géométriques, hydrogéologiques et hydrodynamiques des principales nappes aquifères exploitées pour différentes utilisations.

Les formations du système aquifère sont constituées de sédiments Mio-pliocènes et quaternaires, où on distingue quatre aquifères importants : le massif dunaire de Bouteldja, la nappe des graviers, la nappe libre et la nappe du cordon dunaire, qui se situent toutes dans la grande plaine d'El-Taref et qui seront décrites dans ce chapitre. Et nous portant un intérêt particulier à la nappe du massif dunaire de Bouteldja qui fera l'objet d'étude approfondi dans les chapitres qui suivent.

IV.2. Description des principales ressources en eau souterraines

IV.2.1. La nappe des graviers

IV.2.1.1. Localisation

Connue sous le nom de la nappe profonde et c'est un aquifère captive (Khérici,1993).. Contenue dans des formations du plio-quaternaires, constituées par des graviers, des sables et galets avec des passées d'argile sableux. Elle se situe au dessous des aquifères superficiels de Cordon dunaire au Nord Est et du massif dunaire de Bouteldja au Nord –Est (**Figure IV.1**).

IV.2.1.2. Description hydrogéologiques

IV.2.1.2.1 Géométrie de l'aquifère

Dans la zone centrale, les épaisseurs de l'horizon aquifère varie WE et SN selon les zones. Elles sont de 2 à 13.2 m sous de la plaine d'El Taref de 10 à 120 m de la plaine de Bouteldja Sa profondeur est de 2 à 20 m dans la plaine d'El Taref et de 40 à 50 m de la plaine de Bouteldja. Son toit est une couche imperméable à semi-perméable, d'épaisseur 2 à 20 (m) sous la plaine d'El Taref et est de 40 m à 50 m (m) sous la plaine de Bouteldja.

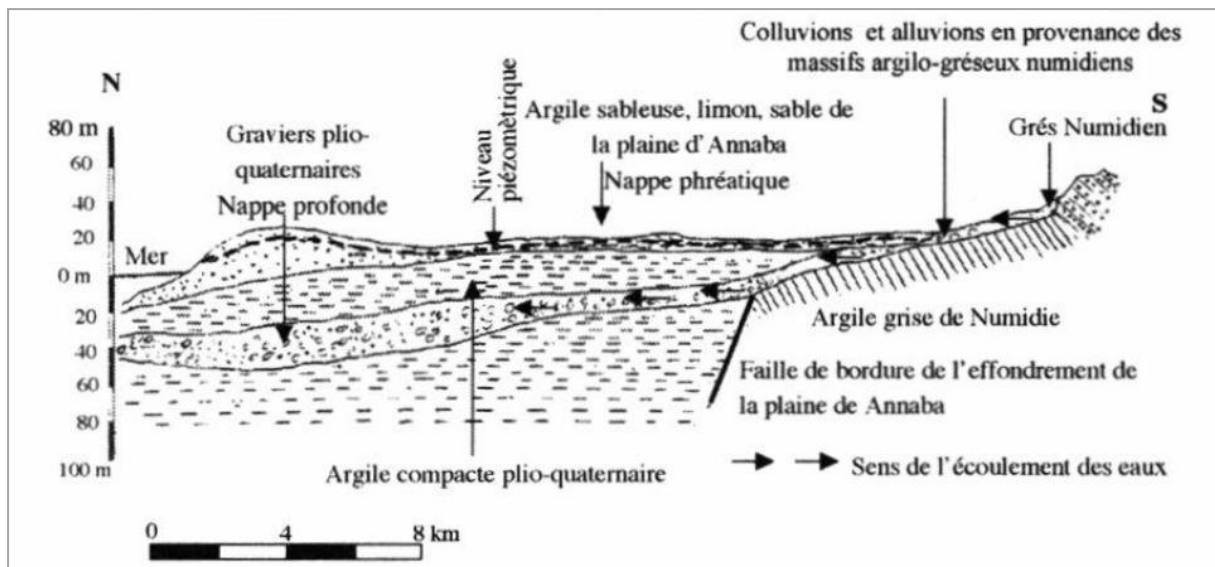


Figure IV.1 : Coupe schématique du système aquifère d'Annaba El-Taref (F. Derradji, N. Khirici, R. Caruba et M.Romeo 2010)

IV.2.1.3. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe :

Nous citons les paramètres hydrodynamiques suivants :

- **La perméabilité** : ce paramètre hydrodynamique important varie de 10^{-4} m/s à 10^{-5} m/s.
- **La Transmissivité** : elle varie entre $4 \cdot 10^{-2}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s au Nord de Ben M'Hidi et dans la région de la Mafragh et entre $1 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s (dans la région de Bouteldja)
- **Coefficient d'emmagasinement** : ce dernier varie entre 10^{-4} (les zones où la nappe est captive) et atteignent 10^{-2} dans les zones où elle est libre

IV.2.1.4. La zone d'alimentation de la nappe :

La nappe est alimentée des apports provenant des dunes et par drainance des écoulements de la nappe phréatique et celle du massif dunaire ainsi que les apports de l'oued El-Kebir.

Les travaux de (Khérici, 1993), expliquent qu'au Nord une limite à potentiel imposé par la mer, au Sud une limite d'alimentation par la nappe des terrasses et les grès numidiens, à l'Ouest une limite d'alimentation par les nappes secondaires des cipolins fissurés et des gneiss altérés des massifs de Bouhamra et Belieleta et à l'Est le manque de sondage au niveau des marécages de Mekhada, laisse des incertitudes, mais elle reste toujours supposée comme étanche.

IV.2.2. La nappe libre

IV.2.2.1 Quelques caractéristiques de la nappe libre (Figure IV.2)

La nappe libre appelée aussi nappe phréatique est séparée de la nappe captive par un horizon argileux qui constitue le toit de la nappe captive et le substratum de cette nappe. C'est une nappe superficielle, contenue dans des formations alluvionnaires et les argiles plus au moins sableuses. (Hani, 2003). Elle est caractérisée aussi par une transmissivité varie entre $1,5 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

L'alimentation de la nappe s'effectue principalement par l'infiltration des eaux de pluie. Et les conditions aux limites sont imposées ; au Nord au niveau des grès Numidiens par une limite perméable, au Nord-Est et au Sud-Ouest par deux limites perméables d'où une relation souterraine avec la nappe dunaire de Bouteldja et la nappe des grès altérés de Bougous respectivement et enfin au Sud-Est par une limite non perméable avec les formations d'argiles Numidiennes, Caractérisant surtout les terrasses Sud de la rive gauche d'oued El-Kébir-Est (grand Pourcentage d'alluvions argileux). (Hani, 2003).

La carte piézométrique (**Figure IV.2**) montre : Au centre par une fluctuation très importante avec une amplitude maximale de 4.5 m, cela est dû à l'exploitation par de nombreux puits. Cette fluctuation diminue en allant vers le Nord de la plaine; dû probablement au drainage des Oueds : El Kébir-Est et Messida par la nappe. Au Sud-Ouest de la plaine la fluctuation varie de 1.5 à 2.5 m, cela est dû à l'alimentation de la nappe par Oued Guergour.

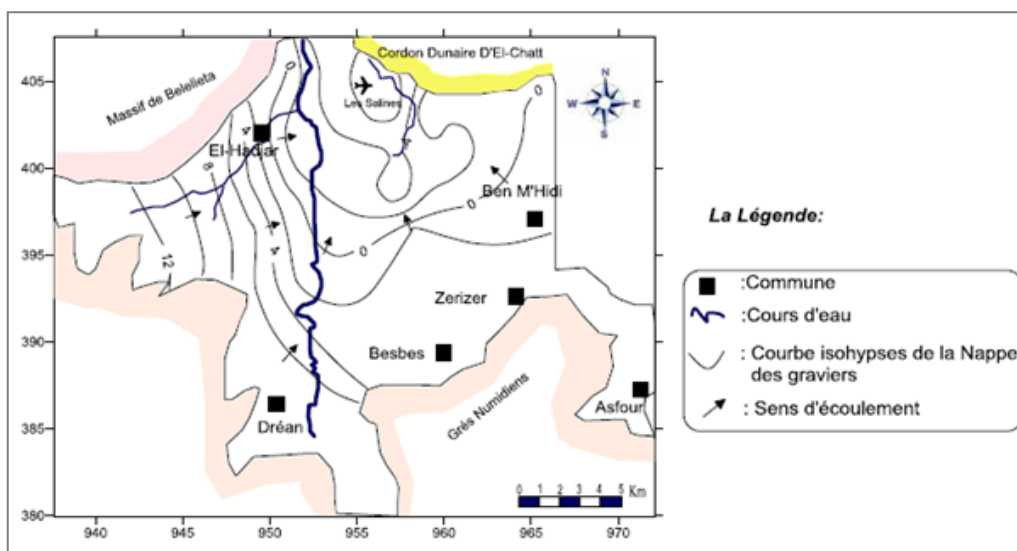


Figure IV. 2 : Carte des isohypses de l'aquifère de la nappe libre (octobre 1996, in Hani 2003).

IV.2.3. Le Cordon dunaire

IV.2.3.1. Localisation de l'aquifère (Figure IV.3).

La nappe du cordon dunaire est une nappe libre se localise entre Annaba et Oued Mafragh, la mer Méditerranée au Nord, la wilaya d'Annaba à l'Est, le massif dunaire de Bouteldja à l'Ouest et par les argiles sableuses de la nappe libre au Sud. Cette nappe a un intérêt d'isoler la nappe libre, des venues d'eau salée. (Khérici, 1993).

IV.2.3.2. Description hydrogéologiques

D'une largeur oscillant entre 0,5 à 2 km. Contenue dans des sables dunaires éoliens qui proviennent de la dégradation progressive des grès du numidien et reposant sur un substratum argileux. à l'état pur le sable siliceux renferme 80 à 90% de silice, il est blanc ou jaune clair, fin, meuble et homogène (80% des grains ont un diamètre de 0.3 à 0.5mm), souvent accompagné de différents minéraux (L'oxyde de calcium CaO, Oxyde de magnésium MgO, L'alumine Al₂O₃).

IV.2.3.3. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du Cordon dunaire

- **La porosité** : la nappe du Cordon dunaire est caractérisée par une bonne porosité efficace des sables de l'ordre de 10% (B.Gand 1976)
- **L'épaisseur mouillée** : la nappe est caractérisée une épaisseur mouillée moyenne oscille entre 5 et 18 m.
- **La Perméabilité** : La nappe de Cordon dunaire est caractérisée par une perméabilité qui varie entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s
- **La piézométrie** La Carte piézométrique de (Boumaiza.2003) obtenue (hautes eaux Avril 2003) différencie les zones suivantes :
 - La partie Nord-Est : les courbes isopiezés sont serrées indiquant un écoulement rapide avec un gradient hydraulique de l'ordre de 3.10^{-3} . Les lignes de courant sont orientées vers l'oued Mafragh où se dirige l'écoulement.
 - La zone Centrale : où on remarque des courbes concaves et espacées, indiquant une surexploitation et identifiant un écoulement faible avec un gradient hydraulique plus au moins fort.

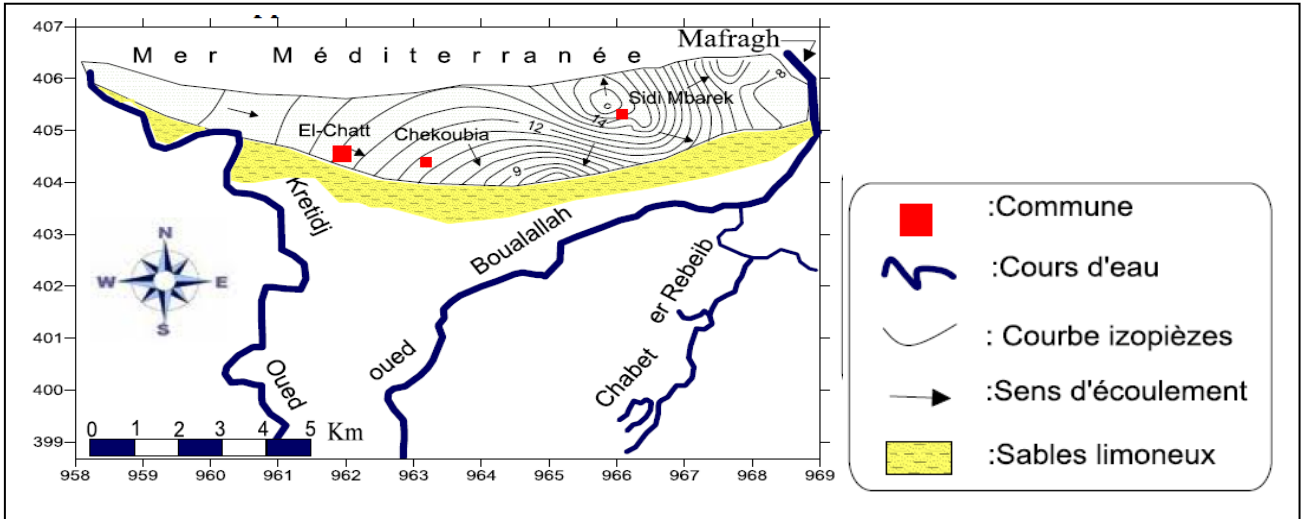


Figure IV.3: Carte piézométrique de la Nappe du Cordon Dunaire d'El-Chatt (**Boumaïza, avril 2003**).

IV.2.4. La nappe du massif dunaire de Bouteldja

IV.2.4.1. Localisation de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja (Figure IV.4)

Elle fait parti du sous bassin versant de Mafragh (0317) avec d'une superficie de 180 km² et une orientation NW- SE. Se localise entre, la mer méditerranée au Nord, la plaine de Bouteldja au Sud, le massif de Cap Rosa et Djebel Koursi à l'Est et l'oued de Mafragh à l'Ouest

IV.2.4.2. Description hydrogéologiques

Il forme une nappe libre reposant sur un substratum argilo-gréseux, imperméable à semi-perméable. C'est une nappe très vulnérable à l'intrusion marine par, sa situation au littorale et la présence des marécages salés à son pourtour (Derradji, F, 2004)

IV.2.4.2.1. Géométrie de l'aquifère (Figure IV.4)

Il est constitué de sables éoliens épais de 20 m (Est) à 120 m (Ouest) souvent à intercalations argileuses sous formes de lentilles (Khérici. N, 1985) ; (Ramdani. D, 1996). La profondeur des dunes varie de 2 à 8 m.

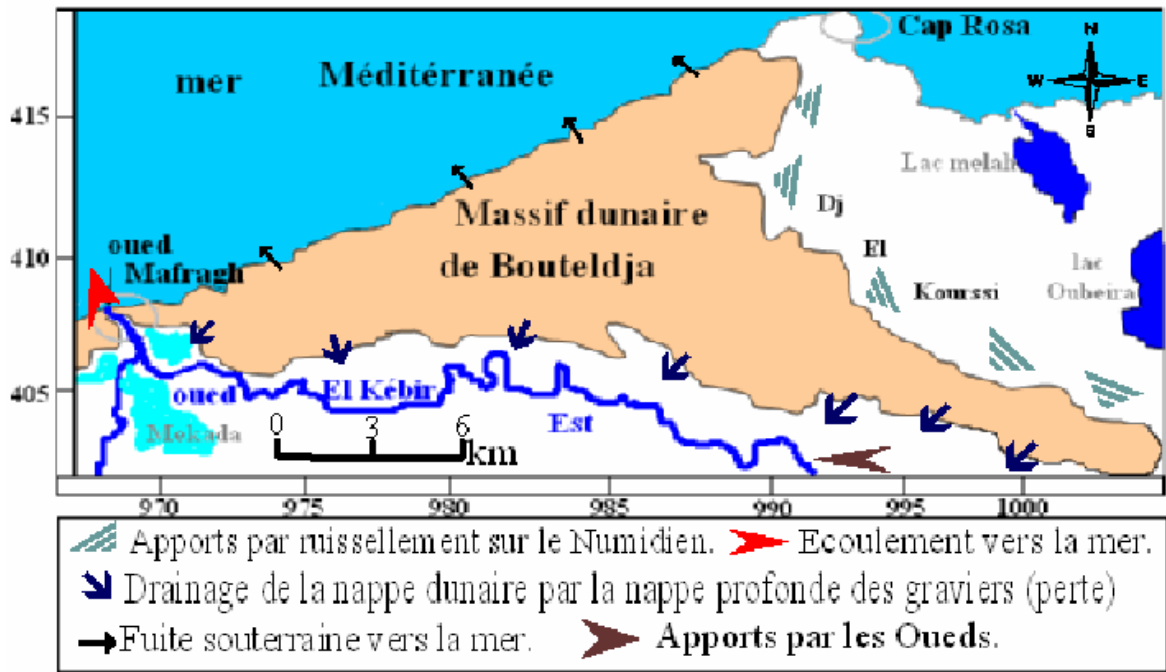


Figure IV.4 : Situation l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.(Saadali Badreddine 2007).

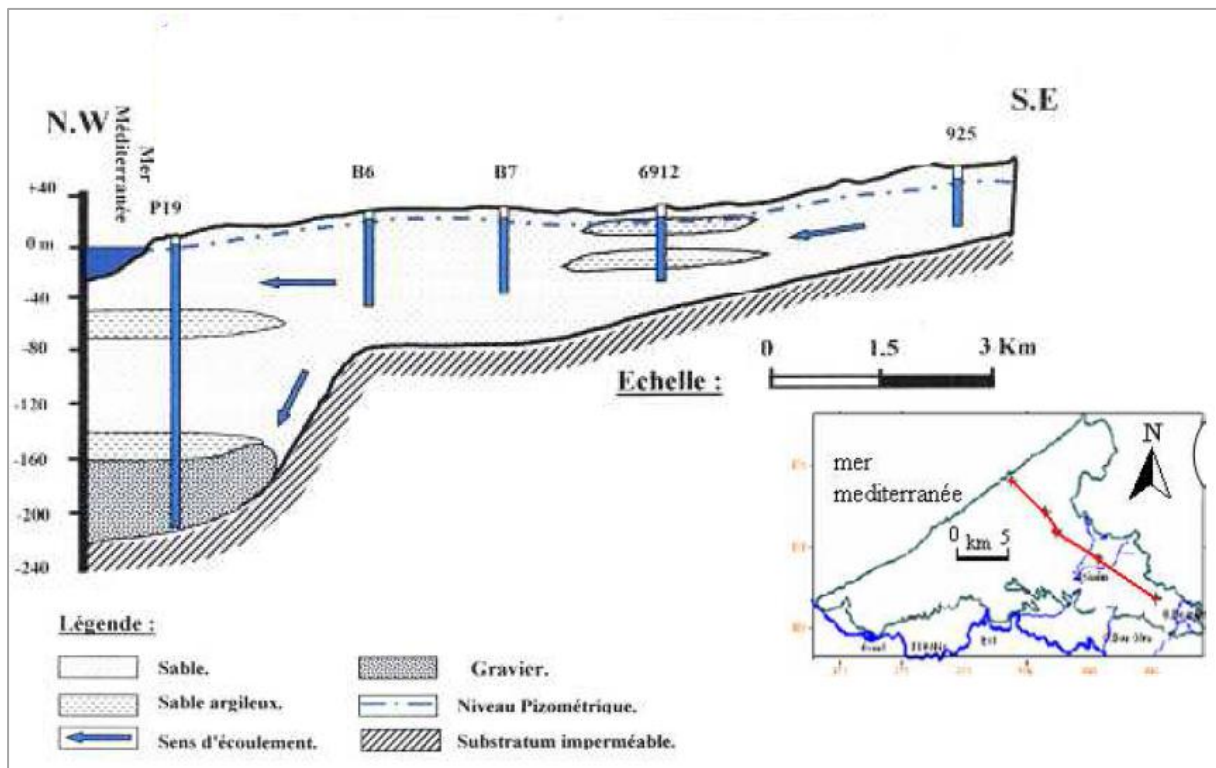


Figure IV.5 : Coupe hydrogéologique dans le massif dunaire de Bouteldja (Haied.N. 2008)

IV.2.4.3. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe

IV.2.4.3.1. La piézométrie (Figure IV. 6)

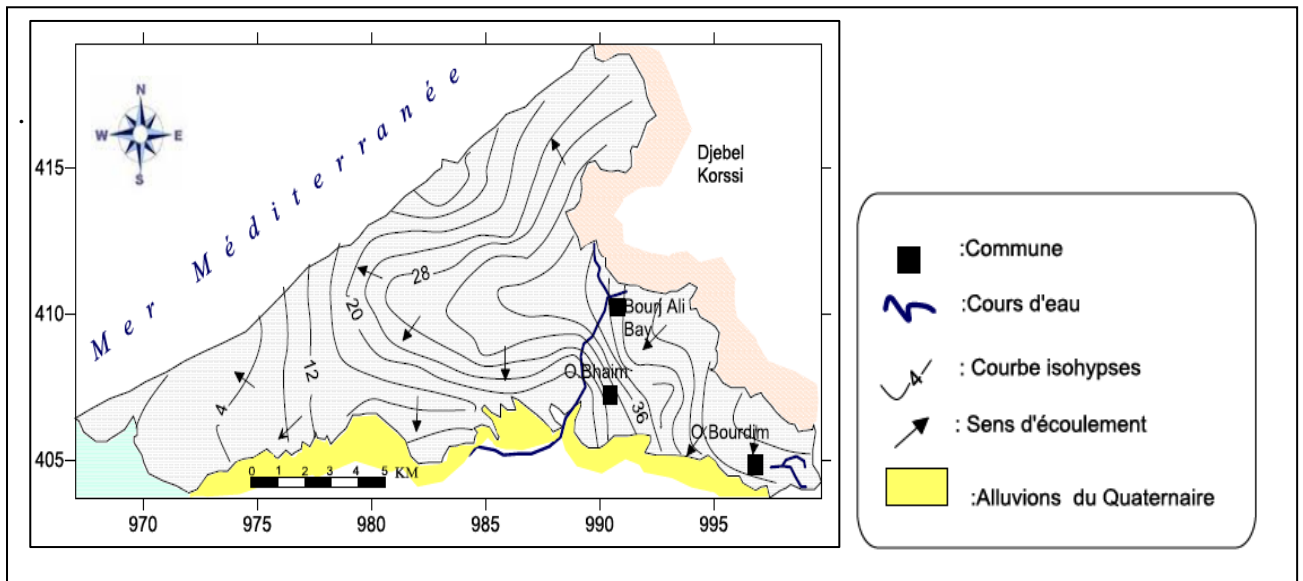


Figure IV. 6 : Carte piézométrique du massif dunaire de Bouteldja (Kherici, 1985).

La carte piézométrique (Figure IV. 6) réalisée par (Kherici, 1985) mis en évidence deux sens de l'écoulement souterrain, l'un se dirige au Nord vers la mer et forme son premier exutoire et l'autre se dirige au Sud vers la nappe captive des graviers et les marécages de Mekhada formant ainsi son deuxième exutoire.

IV.2.4.3.2. La Perméabilité

La perméabilité augmente d'Ouest en Est avec un maximum de $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s et un minimum de $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, se localise à l'Ouest jusqu'à la mer au Nord, avec une moyenne d'ordre de $4 \cdot 10^{-5}$ m/s. (Boularouk Wahiba 2011)

IV.2.4.3.3. La porosité efficace

La porosité efficace des sables du massif dunaire a été déterminée par, (ANRH 1994), sur le terrain par des essais de pompage dans les forages et au laboratoire par égouttage correspond à un taux d'environ 10 %.

IV.2.4.3.4. La Transmissivité (figure IV.7)

Les valeurs de la transmissivité données par (Haeid Nadjib, 2015) sont comprises entre :

- $1 \text{ et } 3 \cdot 10^{-3}$ m²/s dans la partie Nord Est de l'oued Kébir Est.
- $0,7 \cdot 10^{-2}$ m²/s de Sud au Sud Est.

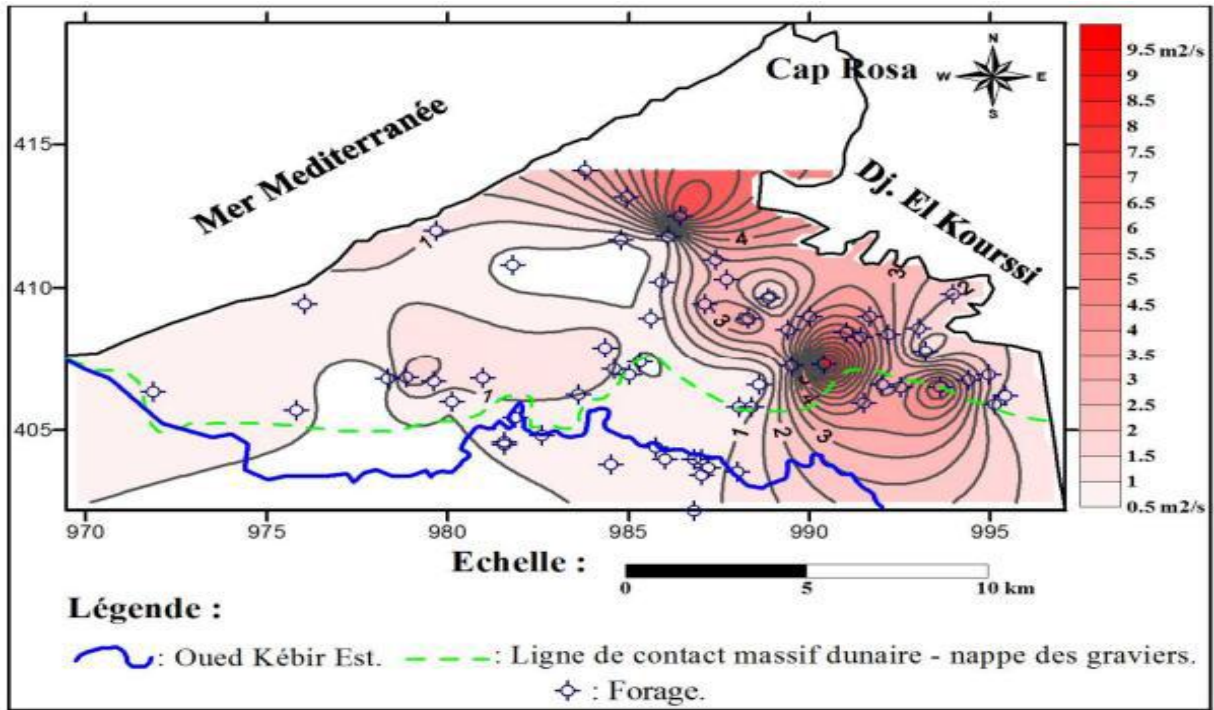


Figure IV.7: Carte de répartition des valeurs de la transmissivité de la nappe du massif dunaire de Bouteldja en $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Haeid Nadjib, 2015).

IV.2.4.3.5. Coefficient d’emménagement (figure IV.8) :

Les valeurs se situent entre 24 % au niveau du forage B10 et 1.4% au niveau forage B6. Localement, la nappe peut être sous pression sous les formations argileuses et les valeurs du coefficient d'emménagement pourraient être plus faibles (saadelli.B ,2007).

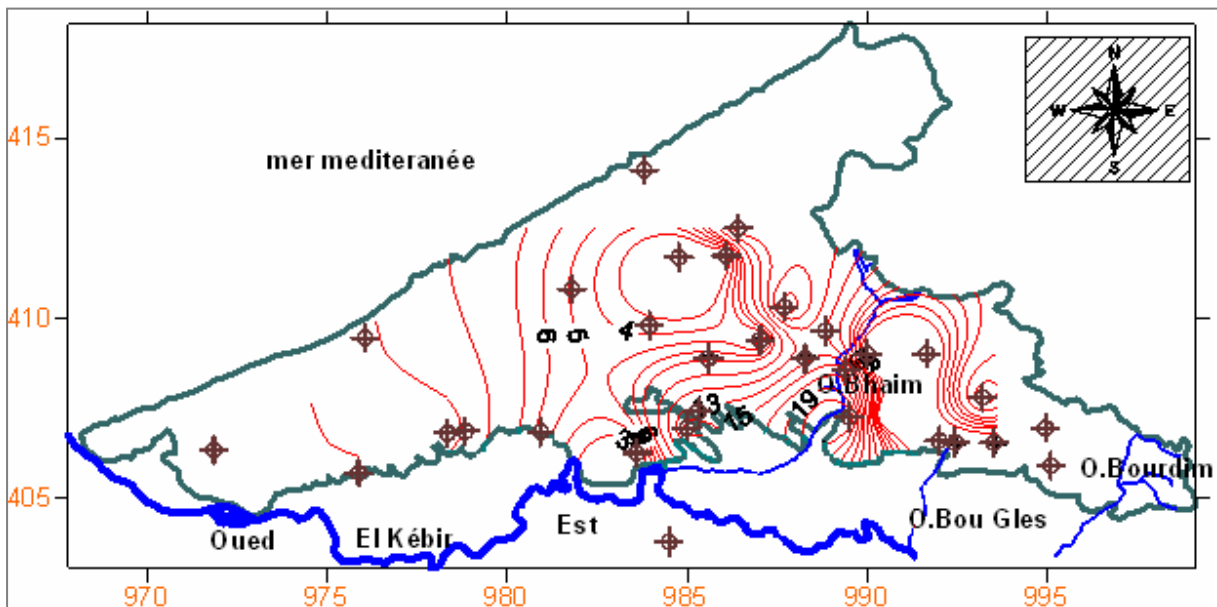


Figure IV.8 : La carte du coefficient d'emménagement de la nappe du massif dunaire de Bouteldja (saadelli.B ,2007).

IV.3.Conclusion

Les études réalisées dans la région d'étude (El-Taref), font ressortir l'existence d'un système aquifère formé par plusieurs réservoirs, ou on distingue quatre aquifères importants :

1. La nappe des graviés : la nappe profonde, elle est située en dessous de l'aquifère superficiel. Le réservoir de la nappe est constitué par des graviers, sables et galets Plio-quadernaire et encaissé dans un bassin d'effondrement.
2. La nappe libre : c'est une nappe superficielle alimentée principalement par l'infiltration des eaux de pluie, elle est contenue dans les formations alluvionnaires et les argiles plus au moins sableuses.
3. La nappe du cordon dunaire : s'étend entre Annaba et Oued Mafragh, elle a pour intérêt d'isoler la nappe phréatique de la plaine, des venues d'eau salée. Cette nappe est alimentée par l'infiltration des pluies.
4. Le massif dunaire de Bouteldja : il forme une nappe libre avec un substratum argilo-gréseux imperméable. Il est constitué de sables éoliens ; Cet aquifère est vulnérable du fait de la présence de la mer et des marécages salés à son pourtour.

Chapitre v :

Qualité des eaux de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja

Chapitre V : Qualité des eaux de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja

V.1.Introduction

La chimie des eaux souterraines dépend de la nature lithologique des couches traversées, des conditions hydrodynamiques et du temps de séjour des eaux dans l'aquifère. La relation entre l'eau et son milieu détermine pour l'essentiel l'acquisition de la minéralisation de l'eau. Les teneurs des éléments chimiques majeurs sont aussi influencées par d'autres facteurs tels que les échanges entre aquifères, les paramètres climatiques et très souvent, aussi, les activités anthropiques. Elle est définie par ses caractéristiques physiques, chimiques et selon son utilisation.

Notre étude hydrochimique est basée sur des résultats des analyses physico-chimiques de trois forages qui appartiennent au massif dunaire de Bouteldja fournies par l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) d'Alger pour les années de 2010,2011, 2012 et 2015.

V.2.Analyse des paramètres physico-chimique

V.2.1Analyses des paramètres physique

- **La température :**

La température est un paramètre physique clé, qui permet de déterminer les processus chimiques et biologiques des eaux et joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz, aussi dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH et de la conductivité, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels. (RODIER J, 1996).

La température des eaux du massif dunaire varie entre 17.5°C à 22.5°C avec une moyenne de près de 20°C (N. Haied, 2015).

- **Le potentiel Hydrogène pH**

Le pH (le potentiel d'hydrogène) c'est un paramètre physique qui détermine le caractère incrustant ou agressif d'une eau, il est lié à la nature des terrains traversés.

Il exprime la concentration en ion H⁺ d'une solution qui lui confère son caractère acide ou basique.

On remarque d'après les analyses d'ANRH que la moyenne des valeurs de pH des eaux de la nappe est comprise entre 6.8 et 7.7 c'est le caractère intermédiaire.

- **La conductivité**

Elle traduit globalement sa teneur en sels dissous et permet d'évaluer approximativement sa minéralisation globale et d'en suivre l'évolution.

D'après les analyses de 2010 jusqu'à 2015, la conductivité des eaux de la nappe est comprise entre 200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ donc c'est une minéralisation moyenne.

Ses variations sont inférieures à la norme algérienne, 2011 qui est de 2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

V.2.2. Analyses des paramètres chimiques

- **Alcalinité (Tableau V.1)**

L'alcalinité correspond à la capacité d'une eau à réagir avec les ions hydrogène (H^+) qui est due à la présence des ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-), carbonate (CO_3^{--}) et hydroxyde (OH^-). (RODIER 1996). Il existe deux types d'alcalinité qui se distinguent selon la borne de Ph :

- Titre alcalimétrique complet (TAC) ou alcalinité au point de virage du rouge de méthyle au pH 4.5 ce qui revient à déterminer les bicarbonates (HCO_3^-)
- le Titre alcalimétrique (TA) ou alcalinité au point de virage de la phénophtaléine qui sert à déterminer les carbonates (CO_3^{--}).

- **Dureté totale (TH) (Tableau V.1)**

La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH fait référence à la concentration en hydrogénocarbonates de magnésium et de calcium dissous dans l'eau ; totalité de tous les sels de calcium et de magnésium dissous dans l'eau. La dureté a un caractère naturel lié aux lessivages des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium. Les eaux provenant de terrains calcaires et surtout des terrains gypseux peuvent avoir des duretés très élevées. Par contre, les eaux en provenance des terrains cristallins, métamorphiques ou schisteux auront des duretés très faibles (RODIER 1996).

Il y a trois classes de dureté (in ARAB L) :

- Eau douce : 0 – 150 mg/l ;
- Eau moyenne douce: 150 – 300 mg/l
- Eau dure : > 300 mg/l

Le tableau V.1 montre les résultats des paramètres chimiques ; alcalinité et la dureté totale :

Le TA vari entre 1.2997 mg/l et 7.79781 mg/l, le TAC entre 2.3545 et 15.15 mg/l ; ces valeurs sont prises en compte dans un ensemble de paramètres (pH, TH, température, pluviométrie...). La dureté totale (TH) d'eau comprise entre 17 et 76mg/l. Les valeurs indiquent une eau douce.

Tableau V.1 : résultats des paramètres chimiques : Titre alcalimétrique complet (TAC), le Titre alcalimétrique (TA) et dureté totale (TH).

Points d'eau	Date prélèvement	TAC (mg/l)	TA (mg/l)	TH (mg/l)
Forage 1	2010	7.79781	10.08	50
	2011	6.848035	9.9122	49
	2012	4.73166667	10.3723333	51.67
	2015	5.7898508	10.142267	51.5
Forage 2	2010	1.59955	3.4	17
	2011	1.2997	2.3545	12.5
	2012	1.539	3.1735	10.67
	2015	1.99943	3.358	17
Forage 3	2010	5.79837	14.31	72
	2011	5.398	13.185	65.5
	2012	3.7998	14.58	73
	2015	6.2982	15.15	76

- Calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires et marneuses entrainant dans les eaux, divers sels de calcium essentiellement les carbonates et les sulfates.

On remarque que les valeurs de calcium comprises entre 43 mg/l et 229.3 mg/l ces variations sont dû principalement a la nature des terrains traversés. (RODIER)

- Magnésium

Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, c'est l'un des éléments les plus réponsus dans la nature (environ 2.1% de l'écorce terrestre).

Il est un constituant de nombreux minéraux et roches, en particulier la dolomie. La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau, son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large

utilisation industrielle font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes. (RODIER 1996).

D'après les analyses la valeur du magnésium est vari entre 7 mg/l et 110mg /l ces valeurs du restant nettement inférieures à la limite admissible selon les normes algériennes de 2011-2014, qui est de 150 mg/l.

- **Chlorure :**

- Les teneurs en chlorures des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés (roches évaporitiques). (RODIER 1996)

Les teneurs en chlorures pendant les périodes pluvieuses subissent une élévation qui peut être provoquée par un lessivage superficiel, et en profondeur peut être due aux incrustations.

Les taux de chlorures dans les eaux sont compris entre 10 et 620 mg/l en profondeur. Ceux-ci sont supérieurs aux normes algériennes 2011 : 600mg/l.

- **Sulfate :**

La concentration en ions sulfates dans les eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/l) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé. (RODIER 1996)

Les valeurs de sulfates varient entre 8mg/let 100mg/l en profondeur. Elles sont conformes à la norme algérienne 2011 qui est de 400 mg/l.

V.3.Le faciès chimique :

La description de la composition chimique des eaux souterraines est définie grâce à l'utilisation des faciès chimiques et la classification des eaux, nécessite l'utilisation des représentations graphiques parmi eux

- Le diagramme de Piper.
- Le diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkalof

V.3.1.Evolution annuelle des facies

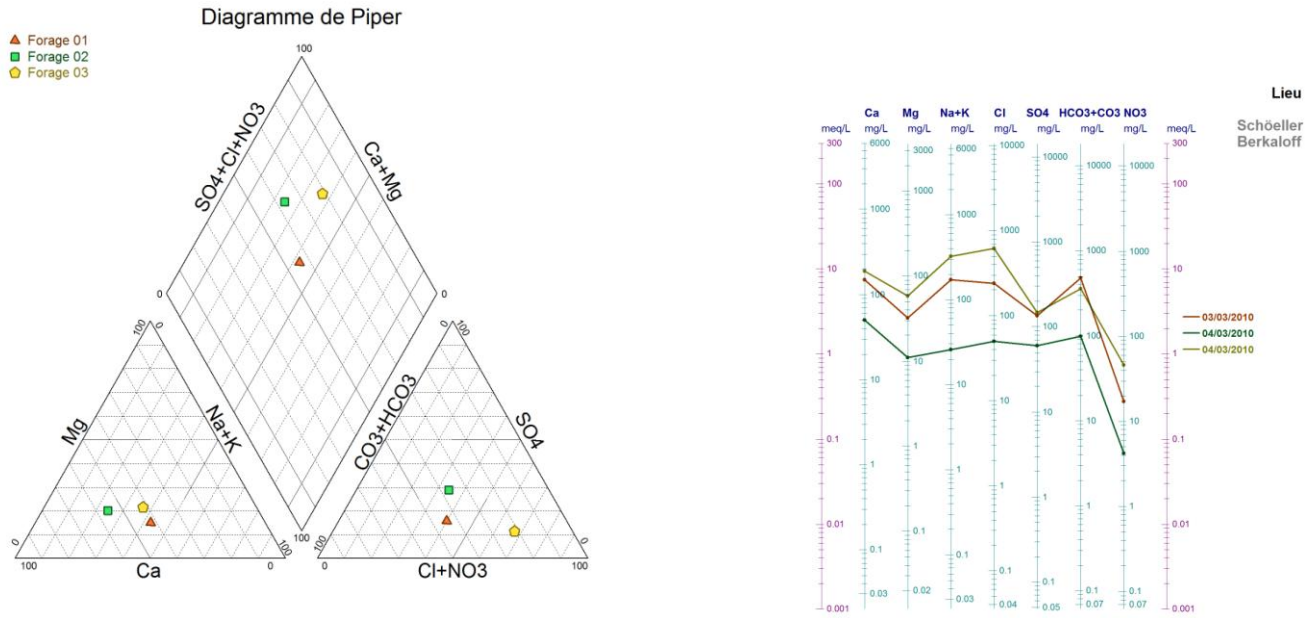


Figure V.1 : Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2010

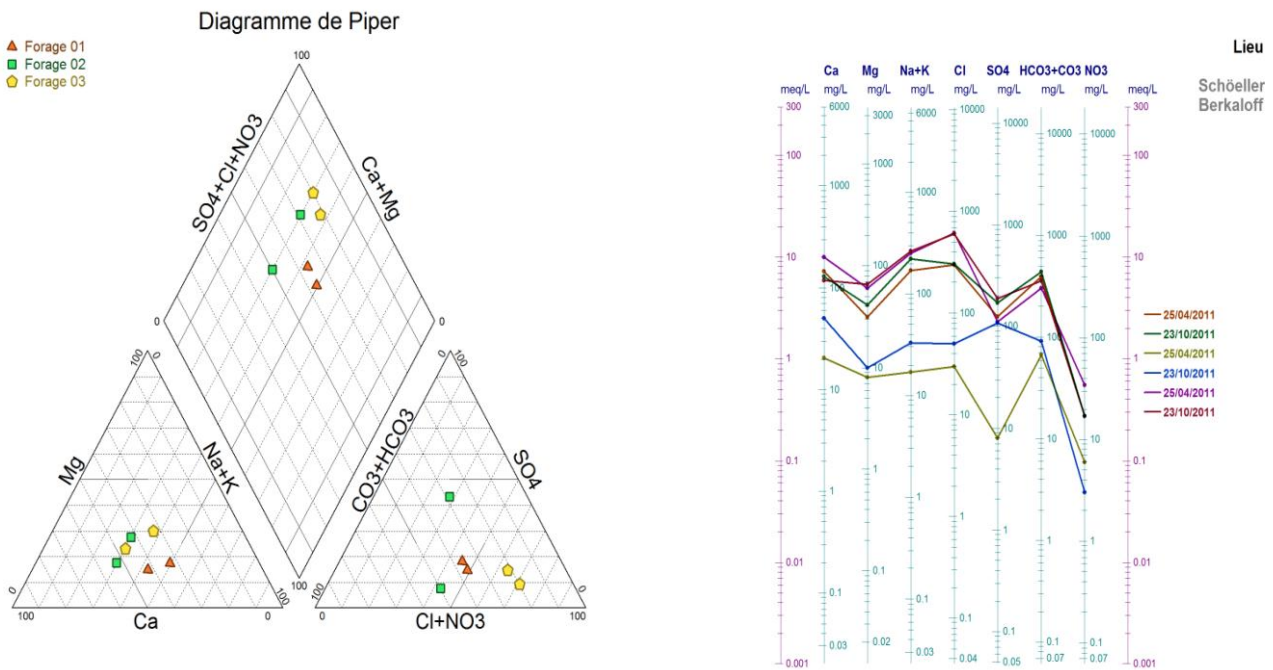


Figure V.2 : Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2011

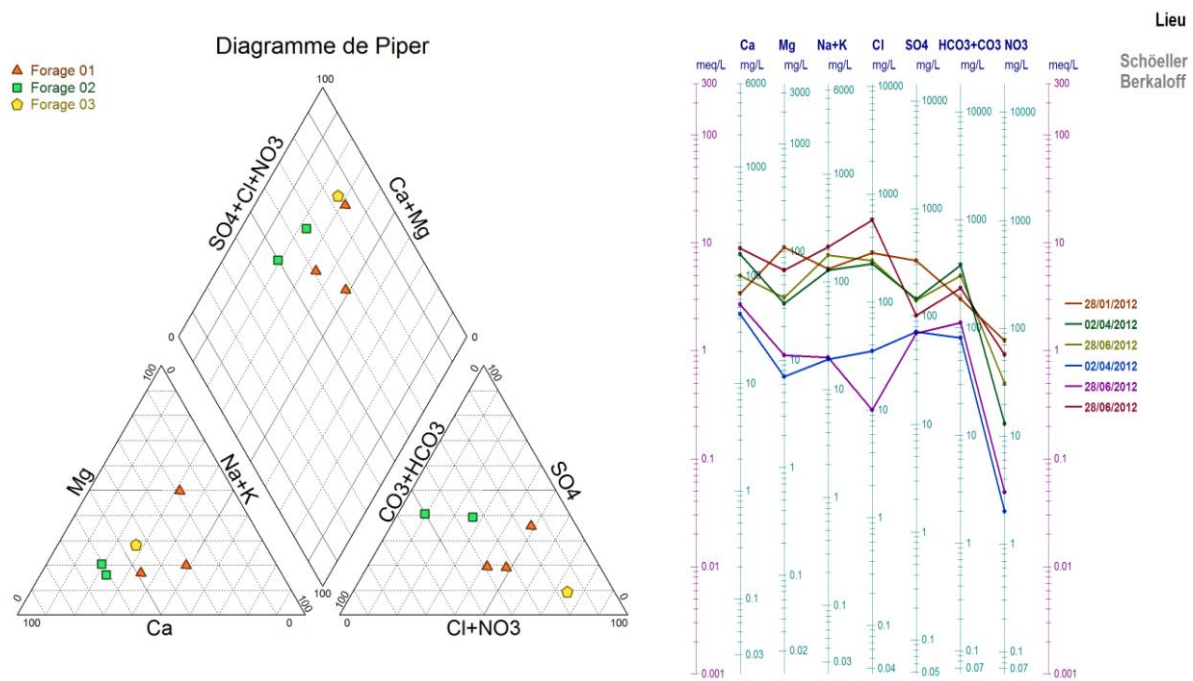


Figure V.3 : Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2012

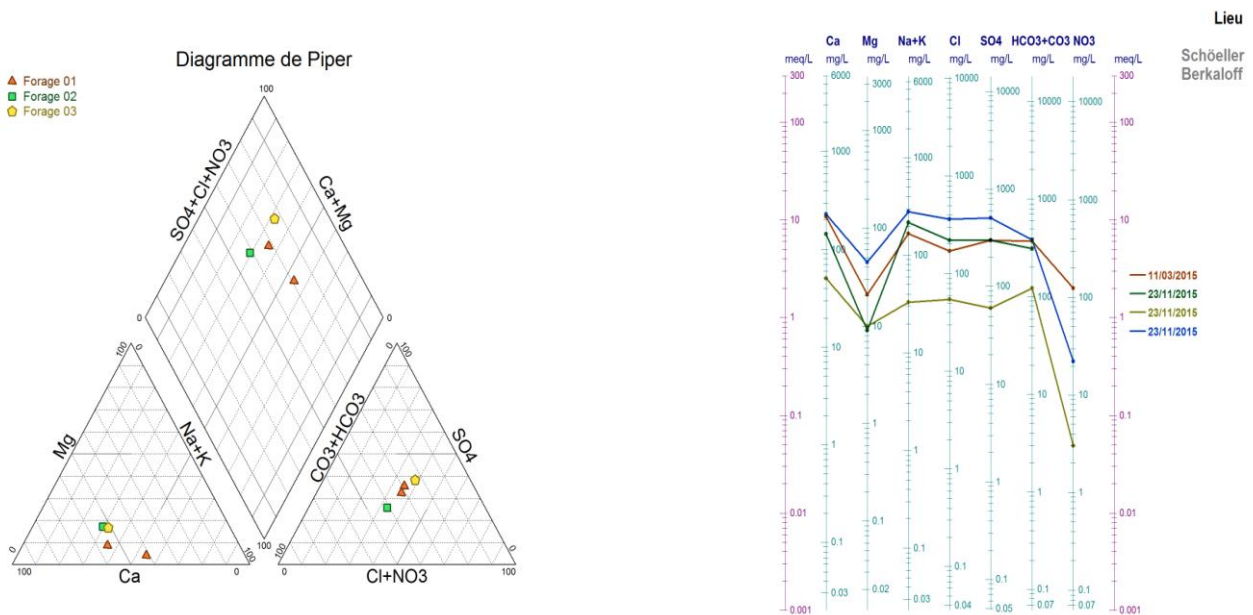


Figure V.4 : Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja en 2015

V.3.2 Evolution des facies entre hautes eaux et les basses eaux:

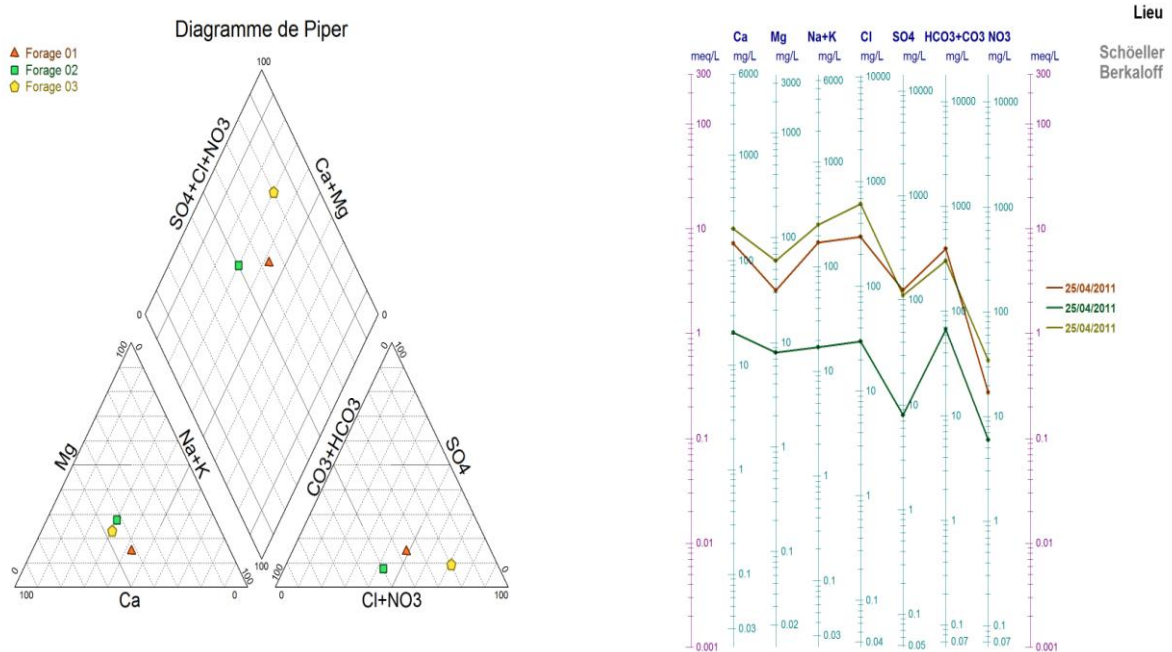


Figure V.5: Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja périodes des hautes eaux (Avril 2011)

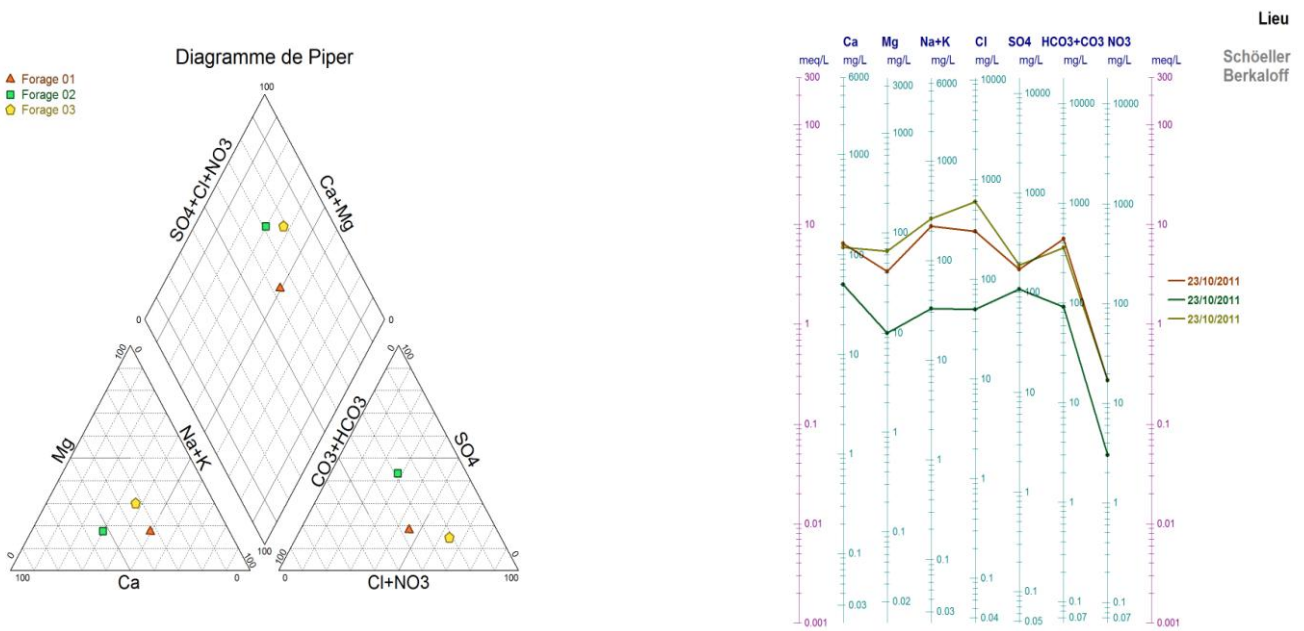


Figure V.6: Diagramme de Piper et de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe de Bouteldja Périodes des basses eaux (octobre 2011).

V.4. Interprétation des graphes :

Tableau V.2: Formules ioniques et faciès chimiques des eaux du massif dunaires.

Forage	Formule ionique	Période	Faciès chimiques
F01 (E01300867) F 02 (E01301152) F03 (E01301376)	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	2010	Un faciès chloruré sodique
	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	2011	un faciès chloruré sodique
	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	2012	Un faciès chloruré sodique
	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	2015	un faciès chloruré sodique
	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	Hautes eaux (25/04/2011)	un faciès chloruré sodique
	$r \% Cl^- > r \% HCO_3^- > r \% SO_4^{4-}$ $r \% (Na^+ + K^+) > r \% Ca^{2+} > r \% Mg^{2+}$	Basses eaux (23/10/2011)	un faciès chloruré sodique

La représentation des points d'eau des trois forages sur les deux diagrammes pour les prélèvements de l'année 2010, 2011, 2012 et 2015, montrent la tendance vers le pôle de calcium (Ca) dans le sous-triangle des cations, alors que les anions montrent une dominance bicarbonatée.

Le diagramme de Piper et de Schoeller Berkloff fait ressortir un faciès chloruré sodique durant la période des hautes eaux et des basses eaux (pour l'année de 2011) et pour toute la période de 2010 jusqu'à 2015

Le faciès chloruré sodique indique un écoulement souterrain des eaux salées par infiltration ou ruissèlement ou dessalement des minéraux à cause de plusieurs facteurs parmi eux la nature des formations géologiques de la aquifère sa perméabilité et sa saturation ou exploitation.

V.5.Origines de la minéralisation observée :

Ces écoulements causent le lessivage des formations lithologiques avec un apport en sulfates provenant principalement du gypse et de l'anhydrite spécialement dans les marais, avec l'influence des rejets eaux usées domestiques avec des apports en nitrates et les nitrites Sans oublier l'entrée de l'eau de mer vers la nappe.

Les trois forages appartiennent a une région caractérisée par une forte pluviométrie qui est le massif dunaire de Bouteldja, constitue de grés et de sables purement siliceux ayant permis un lessivage complet, avec un apport en sulfates provenant essentiellement du gypse et de l'anhydrite spécialement dans les marais, avec l'influence des rejets eaux usées domestiques avec des apports en nitrates et les nitrites Sans oublier l'entrée de l'eau de mer vers la nappe.

V.6. Conclusion :

L'étude hydrochimique des eaux souterraines du système aquifère du massif dunaire de Bouteldja a permis d'apprécier leur qualité chimique, qui constitue un point essentiel pour notre étude

Les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja présentent une température moyenne de près de 20° C, un pH de 6 à 7 qui reflètent le pH des eaux souterraines, caractérisée par une faible minéralisation.

Les eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja présentent un faciès chloruré sodique influencé par l'entrée de l'eau de la mer méditerranée, les eaux superficielles principalement les précipitations et le lessivage des formations lithologiques avec un apport en sulfates provenant principalement du gypse et de l'anhydrite spécialement dans les marais.

Chapitre VI :
Protection des eaux
souterraines et intrusion
marine

Chapitre VI : Protection des eaux souterraines et intrusion marine

V.1.Introduction

Les eaux souterraines représentent une « ressource cachée » dont la quantité est bien supérieure à celle des eaux de surface, grâce à la protection naturelle des couches du sol sous-jacentes et aux pouvoirs filtrant des terrains. Elles permettent des échanges physico-chimiques avec le milieu réservoir en provoquant un retard de la matière polluante par sa destruction ou par sa fixation (Bousnoubra, 2002), mais elle doit être évaluée aujourd'hui car on sait bien que les eaux souterraines sont vulnérables aux pollutions, qui se manifestent souvent après un temps d'accumulation (Jourda, 1991) pour lesquelles des mesures de prévention contre les pollutions, des programmes de surveillance et des actions de restauration sont nécessaires.

VI.2. La protection des eaux souterraines, Objectif :

Pour dire une ressource en eau souterraine menacée par un risque de pollution quelle que soit le type (agricole, intrusion marine ...), cela va dépendre principalement de

- son emplacement par rapport à la source d'eau
- la zone de captage et secondairement de la mobilité
- des contaminant (s) concerné (s).

Pour cela la protection des eaux souterraines doit être appliquée et elle est définie grâce aux deux paramétrés sont :

- les données hydrogéologiques
- le régime d'écoulement des eaux souterraines.

En cas d'épandage ou de déversement de contaminants, plusieurs cas peuvent se présenter :

1. 1er cas - Le déversement a lieu à l'extérieur de la zone d'alimentation du captage: donc il n'y a aucun risque de pollution de l'eau captée.

2. 2e cas - Le déversement a lieu dans la zone d'alimentation : la concentration pourra être, suivant la nature du polluant et la quantité déversée. Le problème posé est donc complexe et quels que soient les moyens mis en œuvre, aucun découpage de la zone d'alimentation d'un captage (périmètres de protection) ne permettra de garantir de façon parfaite la protection de celui-ci. Il est donc évident qu'on ne peut espérer une protection absolue des ouvrages de captage et que l'on doit donc viser la limitation des risques.

VI.3. Principales sources de pollution des eaux souterraines :

La pollution de la ressource en eau souterraine se caractérise par la présence des micro-organismes, des substances chimiques ou encore des déchets industriels. Cette pollution peut avoir des origines diverses et peuvent être liquide et solide nous citons quelques-unes :

- **La pollution industrielle** : concerne les rejets liquide et solide, de produits chimiques comme les hydrocarbures rejetés par les industries ainsi que toutes les eaux usées évacuées par les usines directement dans la nature sans aucun traitement préalable.
- **La pollution agricole** : concerne les déjections animales, mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais, utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.
- **La pollution domestique** : par l'infiltration des eaux usées domestiques provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures... soit rejetée dans la nature ou dans les effluents en contacte directe avec les eaux souterraines
- **La pollution accidentelle** : concerne le déversement accidentel de produits toxiques dans le milieu naturel et qui viennent perturber l'écosystème.
- **La pollution minérale** : l'échange physico-chimique des eaux avec le milieu réservoir ce qui provoque un changement dans la qualité de l'eau et ne répand pas aux normes.
- **Intrusion marine** : qui fait l'objet de notre étude, défini comme un phénomène qui influence sur les aquifères côtiers par l'entrée de l'eau de mer dans la nappe qui provoque une pollution saline.

VI.4. Les outils d'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines

Les risques de pollution des eaux souterraines sont évalués, en fonction de l'importance et de la sensibilité de la ressource en eau souterraine et plusieurs méthodes, de nos jours, sont mise en œuvre et nous citons les principales

VI.4.1. Les méthodes numériques :

Elles constituent des outils jugés pertinents, mais sont surtout préconisées en cas de masse importante de données. (Saidi, 2011) basée sur la modélisation hydrogéologique.

Ces méthodes sont basées sur des lois mathématiques et des principes analogiques simples ou complexes. Elles sont souvent développées pour l'estimation de la vulnérabilité à un polluant ou une source Exemples :

- **La méthode EVARISK** qui est un logiciel conçu en 1997 par l'INRS – Eau ; il est défini comme un outil d'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines par les sources diffuses à l'échelle régionale.
- **Les méthodes axées sur la caractérisation des rejets ponctuels** : Une méthodologie toute spéciale s'est élaborée au cours des dernières années aux Etats Unis. Il s'agit de la caractérisation des aquifères localisés sous des sites de rejets ponctuels. Ces méthodes présentent l'avantage favorisant l'évaluation et la comparaison de la vulnérabilité entre les régions. Parmi ces méthodes : RB associates (1982), Legrand (1983), Union Cabride (1982) BRGM (1990)

VI.4.2 Les méthodes cartographiques basées sur les SIG

La cartographie est un outil de compréhension qui permet de représenter rapidement des phénomènes ayant une structure spatiale. Et avec le système d'information géographique (SIG) permet le traitement de ces informations géographiques. Il existe plusieurs logiciels comme logiciels libres (AccuGlobe, Google Earth ...) et des logiciels propriétaires (ArcGis, Mapinfo, Surfer, Isatis...). Il comporte des fonctionnalités de gestion des données géographiques, d'analyses multicritères et de cartographie, simples et efficaces, permettant la visualisation et l'analyse des bases de données géographiques et les transformées en une information cartographique. Ces outils sont très utilisés en géologie et particulièrement en hydrogéologie pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines et parmi ces méthodes :

VI.4.2.1. La méthode Wipp (environnement Ontario) :

En 1982, le ministère de l'environnement de l'Ontario a publié une série de cartes de vulnérabilité de plusieurs aquifères à l'échelle de 1/5000. Pour cela il a utilisé une méthode qui tient compte des paramètres suivants :

- La perméabilité du sol de surface.
- Le mouvement de l'eau souterraine.
- La profondeur de la nappe.
- L'utilisation de l'eau.

Pour n'importe quelle région, trois types de vulnérabilité peuvent être existé (fort, moyen et faible) et à chacune de ces catégories correspond une teinte particulière.

VI.4.2.2. Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères

Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères (Point Count Systems Models, PCSM) sont les plus pertinentes vis à vis des réalités de terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Ce sont aussi les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle (Gogu et Dassargues 2000 ; Zaporozec et Vrba 1994).

Différentes méthodes développées et normalisées sont utilisées en fonction du type de milieu et du mode d'infiltration des polluants :

A. Cas d'un milieu discontinu (fracturé) on utilise les méthodes suivantes :

- ✓ **EPIK** : C'est la première méthode dédiée spécifiquement aux aquifères karstiques sensusstricto (Doerfliger, 1996 ; Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle est basée sur quatre critères) :
 - Epikarst (zone épikarstique rassemble l'eau d'infiltration dans un aquifère perché local et discontinu, drainé par le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente)
 - Protective Cover (couverture protectrice : sol)
 - Infiltration Conditions (conditions d'infiltration)
 - Karst network development (développement du réseau karstique)

- ✓ **RISKE** : Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK en raison de sa spécificité karstique, c'est un acronyme qui reprend les initiales des 5 critères pris en compte (Petelet-Giraud et al., 2000):
 - Roche aquifère
 - Infiltration
 - Sol
 - Karstification
 - Epikarst

- ✓ **DISCO** : La méthode "DISCO" (discontinuités - couverture protectrice) a pour but de définir les zones de protection en tenant compte de l'hétérogénéité du milieu, en se basant sur Trois paramètres:
 - le paramètre "discontinuités"
 - le paramètre "couverture protectrice"
 - le paramètre "ruissellement"

B. Cas d'un milieu continu : on utilise les méthodes suivantes :

B. 1. Méthode par infiltration verticale

- ✓ **GOD** : Ce système a été développé par Foster en 1987. Il présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas de la migration latérale des polluants dans la zone saturée. Cette méthode est basée sur de trois critères :
 - Type de nappe (Groundwater occurrence)
 - Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class)
 - Profondeur de la nappe (Depth to groundwater table).

- ✓ **DRASTIC** : La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, pour estimer la vulnérabilité verticale des eaux souterraines (Schnebelen et al., 2002), en se basant sur sept critères :
 - D : Depth to groundwater (distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)
 - R : Recharge (recharge)
 - A : Aquifer media (nature de la zone saturée)
 - S : Soil media (nature du sol)

- T : Topographie (topographie, pente en %)
 - I : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)
 - C : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).
- ✓ **SINTACS** : cette méthode est dérivée de la méthode DRASTIC, développée en Italie, en 1990, en basant sur les paramètres de caractérisation de la vulnérabilité :
- S : Soggiacenza (profondeur de la nappe)
 - I : Infiltrazione (infiltration)
 - N : Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée)
 - T : Tipologia della Copertura (sol)
 - A : Carratteri Idrogeologici dell' Acquifero (caractéristique hydrogéologiques de l'aquifère)
 - C : Conducibilita Idraulica (conductivité hydraulique)
 - S : Acclività della Superficie Topographica (pente moyenne de la surface topographique).

B. 2. Méthode par diffusion latérale

Concerne les méthodes dédiées à la vulnérabilité des aquifères côtiers et qui fait l'objectif de notre étude. Ce phénomène est très répondu est appelé intrusion marine et qui serait défini dans ce qui suit.

Notre étude est consacrée à l'étude de la pollution des nappes côtières par l'invasion des eaux marines qui s'accroît de plus en plus avec les changements climatiques et l'accroissement de la démographie et des besoins.

VI.5. L'intrusion marine dans les aquifères côtiers (Figure VI.1)

Les aquifères littoraux sont toujours en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre (1 kg/L) que l'eau salée (1,025 kg/L en moyenne) « flottant » sur l'eau salée.

L'intrusion d'eau salée prend la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément « biseau salé », et constitue un interface entre l'eau salée et l'eau douce et lorsqu'il pleut beaucoup (période des hautes eaux) l'interface eau douce-eau salée est repoussée vers la mer alors que cette interface se déplace vers le continent en période sèche (période des basses eaux). On comprend donc bien qu'elle se déplace au fil des saisons de quelques mètres.

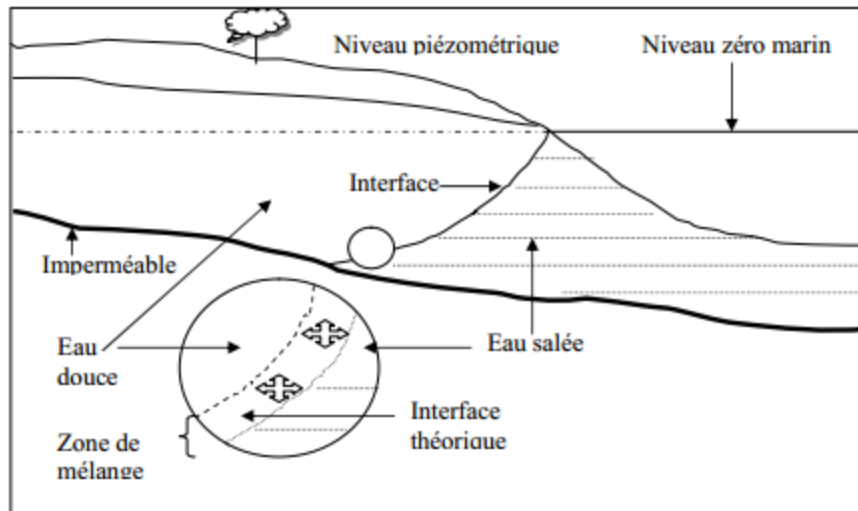


Figure VI.1 : la représentation schématique de l'interface de l'interface « eau douce – eau salée » (Haddani ,2010).

VI.5.1. Les principales causes de l'intrusion marines

Parmi les raisons qui peuvent expliquer ce phénomène on a :

VI.5.1.1. Changement climatique

L'augmentation des températures de l'air induit une évapotranspiration importante et que l'infiltration des précipitations, étant dépendante du type d'événement pluvieux (durée, intensité et fréquence), une réduction de la recharge des aquifères serait probable dans le contexte des changements climatiques.

Ou au contraire, apparition du phénomène d'augmentation globale du niveau moyen des océans de 0,18 à 0,59 m au cours du prochain siècle (IPCC, 2007) met encore plus en péril les aquifères côtiers et insulaires. L'élévation du niveau marin peut entraîner des inondations, de l'érosion des côtes qui mènent à une perte de territoire et donc à une diminution de la capacité de réserve des réservoirs souterrains et du volume d'eau douce disponible dans l'aquifère.

VI.5.1.2 Le facteur anthropique :

Le facteur anthropique correspond à la surexploitation d'un aquifère et de puits mal positionné.

A. Les Pompages excessifs

On parle de surexploitation lorsque les prélèvements d'eau excèdent la recharge et conduit à un abaissement du niveau piézométrique. Durant les 30 à 40 dernières années, le développement socio-économique et agricole des zones littorales a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau à cause de l'augmentation des populations sur le littoral principalement en période estivale, dans ce cas, on parle alors de phénomène qui s'agit d'une remontée de l'interface directement vers le puits de pompage engendrée par une baisse de la pression hydrostatique (rabattement). Cette remontée est accompagnée alors d'un avancement profond du biseau salé vers l'intérieur du continent. La zone de transition devient également plus importante, et peut par la suite s'aggraver et engendrer une pollution de l'aquifère. (BOUDERBALA .A, 2015).

B. Puits mal positionné

Si un ouvrage de captage est réalisé trop profond (la crépine est près de la zone de transition), donc l'eau pompée sera saumâtre et impropre à la consommation dès le début de son exploitation. Par ce que la crépine va se retrouver immédiatement dans la zone où l'eau est salée. De plus, pendant la saison sèche, puisque la nappe ne se recharge pas, on a alors une avancée de l'intrusion saline dans la nappe ce qui augmente le risque d'avoir un puits situé dans la zone de transition.

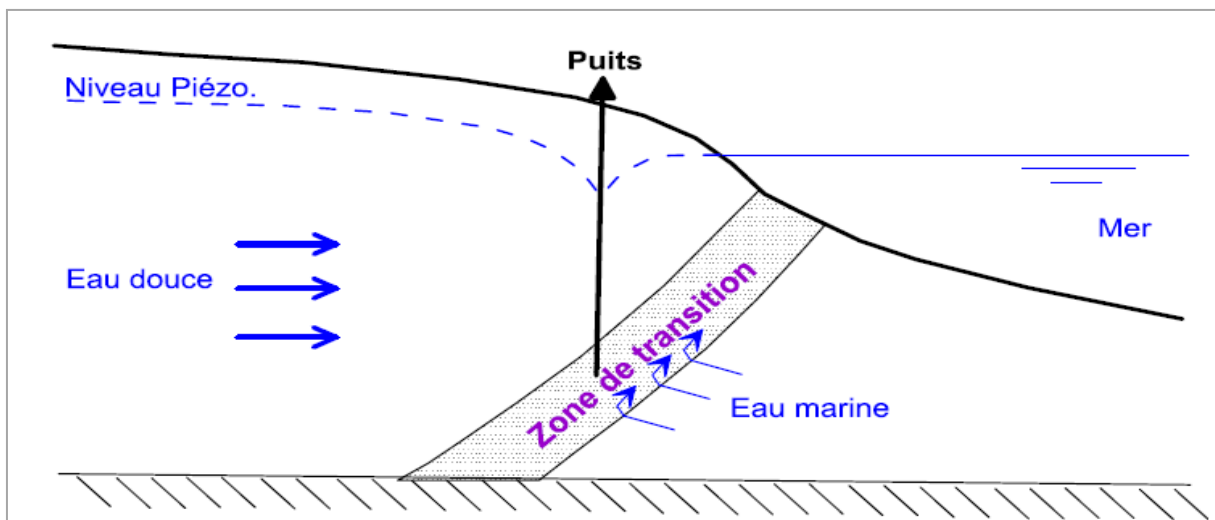


Figure VI.2 : Salinisation du puits par l'eau marine dans le cas d'un puits mal positionné
(Bouderbala. A, 2015).

VI.5.2. Impact de l'intrusion marine sur les eaux souterraines

Nous citons quelques impacts

VI.5.2.1. Impact sur l'économie

La mise en exploitation des nappes côtières nécessite une bonne gestion de la ressource en eau afin d'éviter tout type de pollution. Lorsqu'une pollution de l'eau douce par une eau salée par exemple a lieu, il est en général difficile d'en faire disparaître les conséquences (BRGM 1996; Kouzana et al. 2007 ; Djabri et al. 2011. Il est alors préférable d'essayer de prévoir les risques d'intrusion marine, ce qui nous place directement devant un double problème complexe, associant la notion de quantité à celle de qualité (Pulido-Bosch et al. 1991 ; Hsissou et al. 1997,

VI.5.2.2. Impact sur la santé des consommateurs

L'effet le plus visible d'une intrusion saline dans un aquifère côtier est l'établissement d'un gradient de salinité de la côte vers l'intérieur de l'aquifère. L'indice de la pénétration est la concentration en ions chlorure (Cl-) dans les eaux (la salinité). Le seuil de concentration ces derniers est fixé par l'Agence de Protection de l'Environnement est de 0,5 g/l pour que l'eau soit potable (la concentration de l'eau de mer est de 30 à 35 g/l). (Gwénaëlle.C et al, 2012)

VI.5.3. Les méthodes d'évaluation de l'intrusion marine

Parmi les méthodes d'évaluation de l'intrusion marines, les plus utilisées sont :

VI.5.3.1. Les Méthodes géophysiques :

Elle existe les méthodes de prospection électrique et les méthodes sismiques. A l'aide cette méthode, on peut facilement évaluer toutes formes de pollution comme la pollution saline grâce à l'interprétation des résultats de coupes électriques qui permettent de donner plusieurs des appréciation sur l'avancer du biseau salée, son emplacement et aussi les profondeurs et la nature des couches géologiques épaisseurs de la zone de transitions, la perméabilité et la recharge des aquifères.

VI.5.3.2. Les méthodes de vulnérabilité d'indexation et de pondération

Qui font partie des méthodes de pondération cartographique

A. La méthode GALDIT

Elle est une méthode dédiée à la vulnérabilité des aquifères côtiers, que nous avons choisi d'utiliser et qui va être développé dans le chapitre de l'application.

C'est est une méthode de cartographie qui nécessite peu de données et simple à l'utilisation. Elle a été développée pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN"

(Michaud et al. 2003in saidi 2011) et dont l'objectif était de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine (Chachadi et Labo-Ferreira, 2005in Saidi, 2011).

VI.5.4. Les préventions de l'intrusion marine

Les principales actions à mettre en œuvre pour lutter contre l'intrusion sont :

VI.5.4.1. Les périmètres de protection

Par l'établissement

- Des périmètres de protection quantitative
- Des périmètres de protection qualitative
 - Le périmètre de Protection immédiat
 - Le périmètre de protection rapproché
 - Le périmètre de protection éloigné

VI.5.4.2. La vérification des quantités de prélèvement

Ce point est très important pour la lutte contre la surexploitation des aquifères côtiers. Il est considéré comme une solution générée par la gouvernance publique des eaux souterraines par l'établissement d'une gestion par les quantités, à travers les quotas (limites sur les volumes de prélèvement) et les licences (autorisations de prélèvement), et/ou les outils économiques tels que des taxes permettant de limiter la consommation.

VI.5.4.3. La protection des littorales

« Le littoral est une entité géographique qui appelle une politique spécifique d'aménagement, de protection et de mise en valeur ». C'est une zone de contact entre la terre et la mer qui constitue aujourd'hui un espace de plus en plus sollicité, ce qui accentue sa fragilité (Becet, 2002). Pour que le littoral conserve sa productivité (la ressource eau) et ses fonctions naturelles, il faut donc améliorer la planification et la gestion de son développement. En effet, l'aménagement des zones littorales doit se fonder sur une base scientifique tenant compte de ses caractéristiques géomorphologiques et climatiques et conciliant les exigences des divers secteurs économiques dont la survie dépend de ces écosystèmes (Paskoff, 1993 ; Marcadon et al., 1999).

VI.6. Les outils Juridiques de la protection des eaux souterraines :

VI.6.1. Cadre législatif Européen :

La première vague de législation concernant l'eau a eu lieu de 1975 à 1980, ce qui a donné lieu à un certain nombre de directives et de décisions qui ont défini les objectifs de qualité de l'eau pour des types spécifiques d'eau, comme la directive sur l'abstraction de l'eau potable de 1975 ou les valeurs limites d'émission et pour des utilisations spécifiques de l'eau, comme la directive sur les substances dangereuses de 1976 et ses directives sur les diverses substances individuelles (1982 à 1986). Depuis lors, la question de savoir quelle approche était la plus appropriée a fait l'objet de longs débats scientifiques et politiques. Par la suite, une législation plus récente à la fois au niveau européen et des États membres a été basée sur une « approche combinée » où les valeurs limites et les objectifs de qualité ont été utilisés pour se renforcer mutuellement. Dans une situation particulière, l'approche plus rigoureuse est en application. (Philippe Quevauviller 2011).

La directive 76/464/CEE de 1976 relative à la pollution causée par certaines substances dangereuses rejetées dans le milieu aquatique de la Communauté, encore nommée « Directive sur les substances dangereuses », est à l'origine de la législation de l'UE sur les eaux souterraines. En effet, son article 4 fait explicitement référence à la rédaction d'une directive spécifique sur les eaux souterraines. Cette directive de 1976 en elle-même a été un élément important de la législation de l'UE en matière d'eau, car elle prévoyait un cadre pour une réglementation ultérieure pour contrôler l'élimination de substances dangereuses spécifiques, classées en deux listes en fonction du danger qu'ils présentent. (Philippe Quevauviller 2011)

La rédaction de la directive 80/68/CEE de 1980 sur les eaux souterraines, relative à la protection des eaux souterraines contre la pollution causée par certaines substances dangereuses, a débuté à la fin de 1976 et a nécessité trois ans de travail.

VI.6.1.1. Dispositions législatives et réglementaires pour la Sauvegardé des eaux souterraines : (Philippe Quevauviller 2011)

Les lois sur l'eau du 16 décembre 1964, du 3 janvier 1992 et la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, de nombreux textes ont défini les dispositions à prendre pour préserver la qualité des eaux souterraines. On ne peut en dresser ici une liste exhaustive, mais on peut rappeler, à titre d'exemples, qu'ils fixent notamment :

- les mesures nécessaires à la restauration et à la préservation de la qualité des eaux
- les conditions dans lesquelles peuvent être interdits ou réglementés :
 - les déversements, écoulements, jets, dépôts directs ou indirects d'eau ou de matières susceptibles d'altérer la qualité des eaux

- la mise en vente et la diffusion des produits ou dispositifs susceptibles de nuire à la qualité des eaux
- les forages, prises d'eau, travaux ou ouvrages de rejet
- les dispositions à respecter par les installations classées pour la protection de l'environnement
- les programmes d'action à mettre en œuvre dans les zones vulnérables en vue de la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole
- l'agrandissement ou la création de cimetières
- les stockages souterrains de gaz.

VI.6.1.2. Dispositions Législatives et réglementaires spécifiques à la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine : (Philippe Quevauviller 2011)

La réglementation générale relative à la sauvegarde de la qualité des eaux souterraines a été complétée par des textes spécifiques permettant de renforcer les mesures de protection autour des captages destinés à l'alimentation humaine. Ceux-ci n'ont pas pour objet de renforcer la protection de la nappe exploitée- ce qui est fait par la réglementation générale, mais a pour mission essentielle de sauvegarder la qualité de l'eau dans une zone rendue sensible par le prélèvement qui est opéré. L'article L.20 du Code de la santé publique et ses textes d'application ont institué trois périmètres de protection autour des points de prélèvement d'eau:

- un périmètre de protection immédiate englobant le ou les points de prélèvement,
- un périmètre de protection rapprochée qui doit protéger efficacement le captage vis-à-vis de la migration des substances polluantes,
- un périmètre de protection éloignée qui, si nécessaire, prolonge le précédent pour renforcer la protection contre les pollutions.

Il s'agit, en fait, « d'une protection complémentaire dont l'objectif est de préserver les points de prélèvement des risques de pollution provenant des activités exercées à proximité ».

VI.6.2. Cadre législatif Algérien

VI.6.2.1 Historique du droit de l'eau en Algérie. (J.O.R.A, 4 septembre 2005))

A. L'eau dans la Constitution

1963: ne prévoit pas de disposition explicite sur la propriété publique des ressources en eau.

1976 :- article 14 La propriété de l'Etat se définit comme propriété détenue collectivité nationale dont l'Etat est l'émanation. Elle est établie de manière irréversible sur les eaux.

-Article 151/25 Relèvent également de la loi et le régime général de l'eau.

1989 : - Article 17 La propriété publique est un bien de la collectivité nationale. Elle comprend les eaux.

-Article 115/25 Relèvent également de la loi le régime général de l'eau.

1996 : - Article 17 La propriété publique est un bien de la collectivité nationale. Elle comprend les eaux.

-Article 122/23 Le Parlement légifère dans les domaines suivants le régime général de l'eau ...

B. L'eau à travers la législation (J.O.R.A, 4 septembre 2005))

Loi n 62-157 n du 31-12-1962 tendant à la reconduction, jusqu'à 'à nouvel ordre, de la législation en vigueur au 31-12 12-1962.

Ordonnance n 71-73 du 8-11-71 portant révolution agraire art 81 Toutes les ressources en eau sont propriété de la collectivité nationale.

Ordonnance n75-58 du 26- 19975 portant code civil1975 civil

Art 692 : toutes les ressources en eau sont propriété de la collectivité nationale

Loi n 83-17 du 16-7-1983 portants code des eaux.

Ordonnance n 96-13 du 15-6-1996 modifiant et complétant la loi n° 83-17

Loi n° 05-12 du 4 aout 2005 relative a l'eau, modifiée et complétée

VL6.2.2.Dispositions législatives et réglementaires algérienne pour la protection des eaux souterraines (J.O.R.A, 4 septembre 2005))

D'après le titre III « de la protection et de la préservation des ressources en eau » de la Loi n° 05-12 du 4 aout 2005 relative a l'eau dans le journal officiel algérien

Art. 30. — La protection et la préservation des ressources en eau sont assurées par :

- des périmètres de protection quantitative.
- des plans de lutte contre l'érosion hydrique.
- des périmètres de protection qualitative.
- des mesures de prévention et de protection contre les pollutions.
- des mesures de prévention des risques d'inondations.

Le Chapitre 1 : Des périmètres de protection quantitative (art 31-art 33) :

Protection quantitative des ressources en eau des nappes surexploitérent ou menacées de l'être et l'interdiction de nouveaux forages ou de modification des installations augmentant les débits prélevés et limitation des débits ou mise hors service de points de prélèvement.

Le Chapitre 3 : Des périmètres de protection qualitative (art 38-art 42) :

Protection qualitative des ressources en eau est également assurée à travers des normes de rejets et des obligations de prétraitement des effluents. Il existe trois types de périmètres

- Le périmètre de Protection immédiat
- Le périmètre de protection rapproché
- Le périmètre de protection éloigné

Le Chapitre 4 : des mesures de prévention et de protection contre les pollutions (art 43-art 52)

Art. 46. Sont interdits :

- tout déversement ou rejet d'eaux usées de toute nature dans les puits, forages, galeries de captage, fontaines et abreuvoirs publics, oueds à sec et canaux.
- tout dépôt ou enfouissement de matières insalubres susceptibles de polluer les eaux souterraines par infiltration naturelle ou par recharge artificielle.
- l'introduction de toutes matières insalubres dans les ouvrages et installations hydrauliques destinés à l'alimentation en eau.
- le dépôt et/ou l'enfouissement de cadavres d'animaux dans les oueds, lacs, étangs et à proximité des puits, forages, galeries de captage, fontaines et abreuvoirs publics.

VI.5. L'évaluation des risques de pollution des eaux souterraine

L'évaluation des risques de pollution des eaux souterraines est réalisées grâce à la cartographie et l'analyse des composants nécessaires, ces derniers sont varient en fonction de l'importance et de la sensibilité de la ressource en eau souterraine. Les évaluations devraient inciter les autorités municipales ou les organismes de réglementation de l'environnement à prendre :

- les mesures préventives (pour éviter la pollution future)
- les mesures correctives (pour contrôler les menaces existantes).

Pour protéger les eaux souterraines contre l'intrusion marine et la surexploitation des nappes, il est essentiel d'évaluer la vulnérabilité et étude des Pompages de l'eau souterraine et taux de recharge.

VI.7. Conclusion

La protection de la ressource eaux et la prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'effort, par ce que les sources de pollutions (quelle que soit la nature) influencent sur la qualité des eaux et pour les estimer ils ont développés des outils d'évaluation des risques de pollution (DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK, GALDIT...etc).

Notamment en étudiant la salinisation des eaux sur la nappe du massif dunaire de Bouteldja qui représente une problématique importante en terme de dégradation des eaux souterraines par la méthode GALDIT.

Chapitre VII :
Application de la méthode
GALDIT

Chapitre VII : Application de la méthode GALDIT

VII.1. Introduction

La nappe du Massif dunaire de Bouteldja, qui a fait l'objet de cette application, est menacée par la surexploitation de ses eaux par pompages. Combinées à d'autres pratiques néfastes et en conséquence cela a favorisé l'avancée de la mer par ce que l'on appelle en hydrogéologie le phénomène d'intrusion marine qui mène à une salinisation de ces eaux.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la méthode GALDIT, afin de pouvoir évaluer ce phénomène dans le massif dunaire de Bouteldja.

Et pour cela, nous avons choisi d'utiliser le système d'information géographique « MapInfo 8.0 » combiné aux bases de données de chaque paramètre qui sont analysées et traitées pour une application plus fiable.

VII.2. Présentation de la méthode de GALDIT

La méthode GALDIT a été développée pour la première fois lors du projet "EU- India INCO-DEV COASTIN" (Michaud et al. 2003), c'est est une méthode de cartographie de six acronymes essentielle pour la détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport au biseau salée, dont le but de déterminer la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion marine

Cette méthode se base sur les caractéristiques hydrogéologiques, hydrodynamiques, morphologiques et hydrochimiques, pour cela elle utilise les six paramètres suivants :

- **[G]** Type d'aquifère (**G**roundwater occurrence).
- **[A]** La conductivité hydraulique de la couche aquifère (Perméabilité de la zone saturée) (**A**quifer hydraulic conductivity).
- **[L]** La Profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (Depth to ground water **L**evel above sea).
- **[D]** Distance du rivage (**D**istance from shore)
- **[I]** l'impact de l'intrusion d'eau de mer (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area).
- **[T]** L'épaisseur de la couche aquifère (**T**hickness of the aquifer).

VII.3. Description des paramètres de la GALDIT

VII.3.1. Type de l'aquifère (G)

Les eaux souterraines se trouvent dans des couches géologiques. Ces couches peuvent être confinées, non confinées, semi-confinées par une limite ou plusieurs limites, L'aquifère non confiné est plus vulnérable à cause de l'absence de toit imperméable comparé à l'aquifère confinée et semi-confinée mais avec la libération instantanée de l'eau dans les points d'eau lors du pompage peut engendrer un cône de dépression ce qui favorise une intrusion marine. Pour ces raisons, il faut étudier attentivement la disposition et le type d'aquifère dans la zone d'étude pour évaluer le risque de l'intrusion marine par l'un des paramètres de la méthode GALDIT qui s'appelle Groundwater occurrence « G » (Type de l'aquifère).

VII.3.2. La conductivité hydraulique de l'aquifère (A)

La conductivité hydraulique de l'aquifère (en m/j) représente le 2^{ème} paramètre de la méthode GALDIT. Par définition, elle est la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau, c'est le résultat des pores interconnectés (porosité effective) de l'aquifère. La conductivité entraîne également un cône de dépression plus large lors du pompage. Dans ce cas, l'utilisateur doit prendre en compte les barrières hydrauliques telles que les couches d'argile et les digues imperméables parallèles à la côte, qui peuvent agir comme un mur contre l'intrusion d'eau de mer vers la nappe.

VII.3.3. Profondeur du plan d'eau (Depth of groundwater Level above sea) L

C'est la hauteur du niveau des eaux souterraines par rapport au niveau de la mer. Le niveau des eaux souterraines par rapport à l'élévation moyenne de la mer C'est un facteur très important dans l'évaluation de l'intrusion d'eau de mer dans une zone puisqu'il détermine la pression hydraulique disponible pour repousser le front salé.

Il faut examiner la variation temporelle et à long terme des niveaux des eaux souterraines dans la région. Généralement, les valeurs relatives aux niveaux minimums des eaux souterraines au-dessus de la mer peuvent être prises en compte, car elles offrent le plus haut risque de vulnérabilité le plus élevé possible.

VII.3.4. Distance par rapport à la côte (Distance from the coastline) D

En général, l'impact de l'intrusion d'eau salée diminue avec la distance de la côte, elle est mesurée perpendiculairement par rapport à la côte pour des points d'eau situés au niveau d'une image géoréférencée. La baisse du niveau piézométrique dans un aquifère et le faible

débit des oueds en période d'étiage (novembre), permettent à l'eau de mer de pénétrer dans les estuaires des oueds et d'atteindre des régions du cours d'eau jusqu'à 2000 m (Boulabeiz 2006).

VII.3.5. Impact de d'état de l'intrusion marine existante (Impact of existing status of seawater intrusion) (I)

Lors de la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère à l'intrusion d'eau de mer, (Chachadi et Labo-Ferreira (2001) ont recommandé le rapport $Cl/ (HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$. Ils ont pris en considération que :

- le chlorure est dominant dans l'eau de mer et peu présent dans les eaux souterraines.
- le bicarbonate est peu présent dans l'eau de mer et dominant dans les eaux souterraines.

Ils ont conclu que :

- ✓ Si le coefficient est > 2 ppm (ou milléquivalent par million) l'intrusion est élevé.
- ✓ Si le coefficient < 1 ppm montre que l'intrusion marine est très faible.

VII.3.6. L'épaisseur de la nappe phréatique (T)

Pour le but de la détermination de l'abondance et variation de l'intrusion saline dans les régions côtières, on étudie ce paramètre important « T » (plus l'épaisseur de la nappe aquifère est grande, plus l'extension des apports de l'intrusion saline est importante et vice versa)

Selon (Bear et Verrujit ,1987 ;in Dorfliger N et al ,2011), les équations suivantes permettent de définir la longueur de l'extension d'un biseau salé pour un aquifère captif ou libre :

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

Avec :

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

2. Aquifère captif : $q = [KB^2 / 2L][(1 + \delta) / \delta^2] - WL / 2$ (2)

Si $w=0$ $q = [KB^2 / 2L][(1 + \delta) / \delta^2]$

$L = K B^2 / q^2 * 0.0257$.

Avec W : est la recharge naturelle de l'aquifère.

L'intrusion est prédominante au cours des périodes où la recharge est nulle.

Considérant des valeurs identiques de K et B dans les 2 équations, les longueurs calculées sont pratiquement identiques.

VII.4. Méthodologie d'application

Le principe d'attribution de la classe de vulnérabilité repose sur trois composantes

Pondération : un poids est attribué à chacun des six paramètres pris en considération, en fonction de son importance relative à l'intrusion marine. Ce dernier allant de « 1 » : une influence faible jusqu'à « 4 » : une grande influence

Notation (ou rang) : un rang est attribué pour tout le paramètre en fonction des attribuées de 1 à 10 (plus la valeur est importante plus la vulnérabilité est grande).

Classification : elle est déterminée par un indice GALDIT, il correspond à la somme mesurée et normée des notes de rang attribuées aux six paramètres selon la formule suivante (Dorfliger N et al ; 2011) :

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

Avec :

- P_i est le poids à accorder (1 à 4) à chaque paramètre i .
- R_i : est le rang ou la notation accordée à chaque paramètre (2.5 à 10)

Tableau VII.1 : synthèses des poids et rangs de la méthode de GALDIT (Chachadi, 2005 in Saliha Najib et al ,2012).

Paramètres	Poids	Rangs			
		Très faible 2.5	Faible 5	Moyen 7.5	Elevé 10
Type d'aquifère	1	contraint, barrière imperméable ou recharge // à la côte	Semi-captif	Libre	Captive
Conductivité hydraulique (m/j)	3	<5	5-10	10-40	>40
Profondeur de plan d'eau (m)	4	>2	1.5-2	1-1.5	<1
Distance par rapport à la cote (m)	4	>1000	750-1000	500-750	<1000
L'impacte de l'état de l'intrusion saline	1	<1	1-1.5	1.5-2	2-2.5
Epaisseur de la nappe	2	<5	5-7.5	7.5-10	>10

Permet de pour calculé l'indice de GALDIT (IG) par la somme de la multiplication des paramètres * le poids de chaque un on utilise cette expression

$$IG = (1 * G) + (3 * A) + (4 * L) + (4 * D) + (1 * I) + (2 * T)$$





Cette équation ainsi que les valeurs des différents paramètres pris en considération sont intégrés dans un SIG dans notre cas, on utilise le logiciel map info qui permis de spatialiser les différentes informations sous forme de couches (al Karkouri et al, 2014).

La superposition des couches sur "MapInfo" permet de produire une carte de la vulnérabilité à l'intrusion marine dans la nappe de Bouteldja.

VII.5. Echelle des risques

Une fois que l'indice GALDIT est obtenu; il est possible d'identifier les zones qui sont susceptibles d'être affectées par une intrusion marine potentielle, dans le but de la lisibilité et interprétation de la carte des résultats, Chachadi et al En 2005, proposent une classification selon la valeur d'Indice GALDIT sous forme 3 principales classes résumé dans le tableau suivant.

Tableau VII.2 : Classes de vulnérabilité GALDIT (Chachadi, 2005 in Saliha Najib et al ,2012).

Classe de vulnérabilité	Indice GALDIT	
Vulnérabilité forte	> 7.5	
Vulnérabilité moyenne	5-7.5	
Vulnérabilité faible	5-2.5	
Vulnérabilité très faible	< 2.5	

VII.6. Résultats d'application et d'interprétation

VII.6. 1. Carte d'indice "IG" Type d'aquifère (Figure VII.1) :

Les couches géologiques qui constitue un aquifère peuvent être confinées, non confinées, semi confinées, L'aquifère libre est plus vulnérable à cause de l'absence de toit imperméable

comparé à l'aquifère captif comme ce cas, le paramètre (G) de l'indice Galdit est estimé à 7.5 donc la nappe de massif dunaire est une nappe libre.

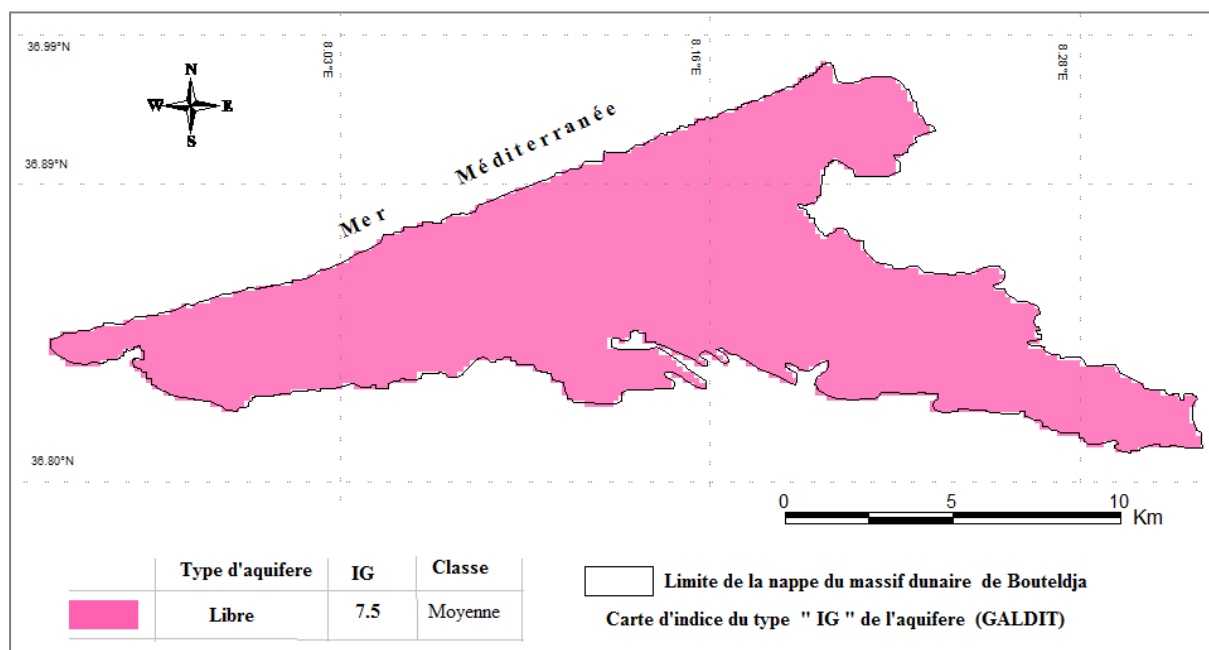


Figure VII.1: Type d'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.

VII.6. 2. Carte d'indice "IA" La conductivité hydraulique (Figure VII.2)

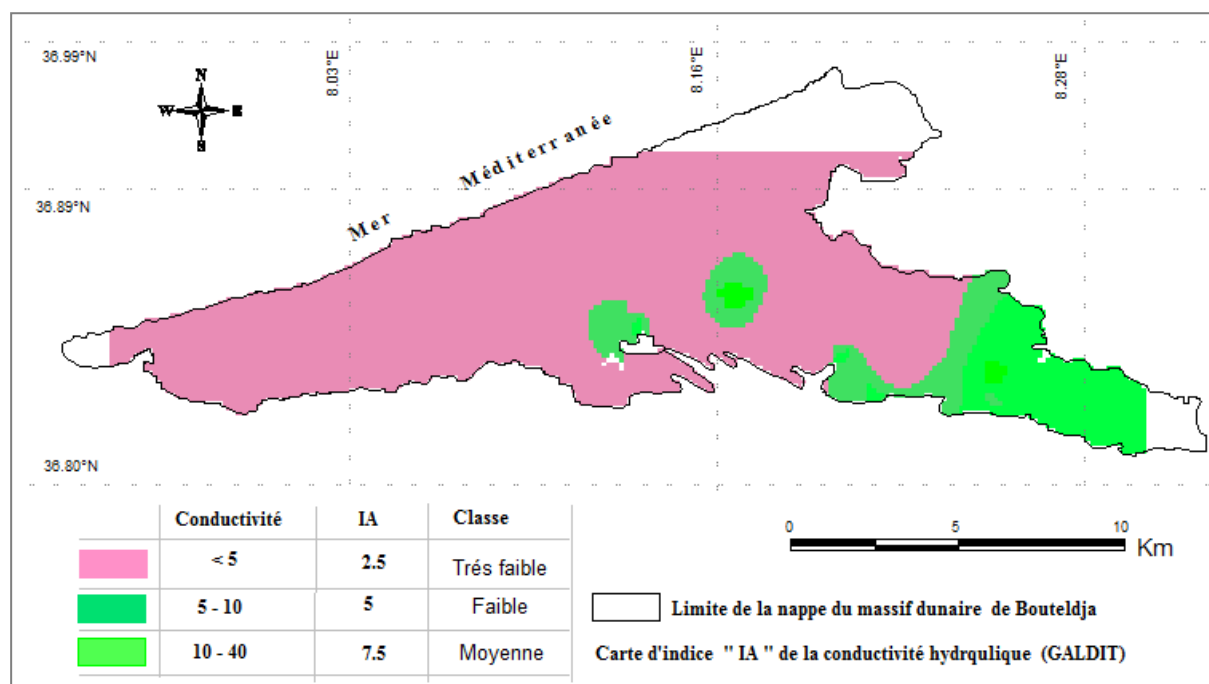


Figure VII.2 : Conductivité hydraulique de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.

La carte de conductivité hydraulique a été établie par interpolation des données de conductivité du massif dunaire de Bouteldja.

On a obtenu trois classes selon la classification GALDIT :

Classe 01 : La conductivité hydraulique de l'aquifère inférieur a 5 m/j avec un rang égal à 2.5 dans la majeure partie de l'aquifère surtout la partie Nord ce qui correspond à la classe très faible

Classe 02 : La conductivité hydraulique de l'aquifère varie entre (5-10 m/j) avec un rang égal à 5 occupe une petite surface au centre de l'aquifère et une partie à Est de la nappe située entre les 2 classes de conductivité ce qui correspond à la classe faible

Classe 03 : La conductivité hydraulique de l'aquifère varie entre (10-40 m/j) avec un rang égal à 7.5 occupe la partie Sud Est de la nappe ce qui correspond à la classe moyenne.

VII.6.3. Carte d'indice "IL" La Profondeur de la nappe (Figure VII.3)

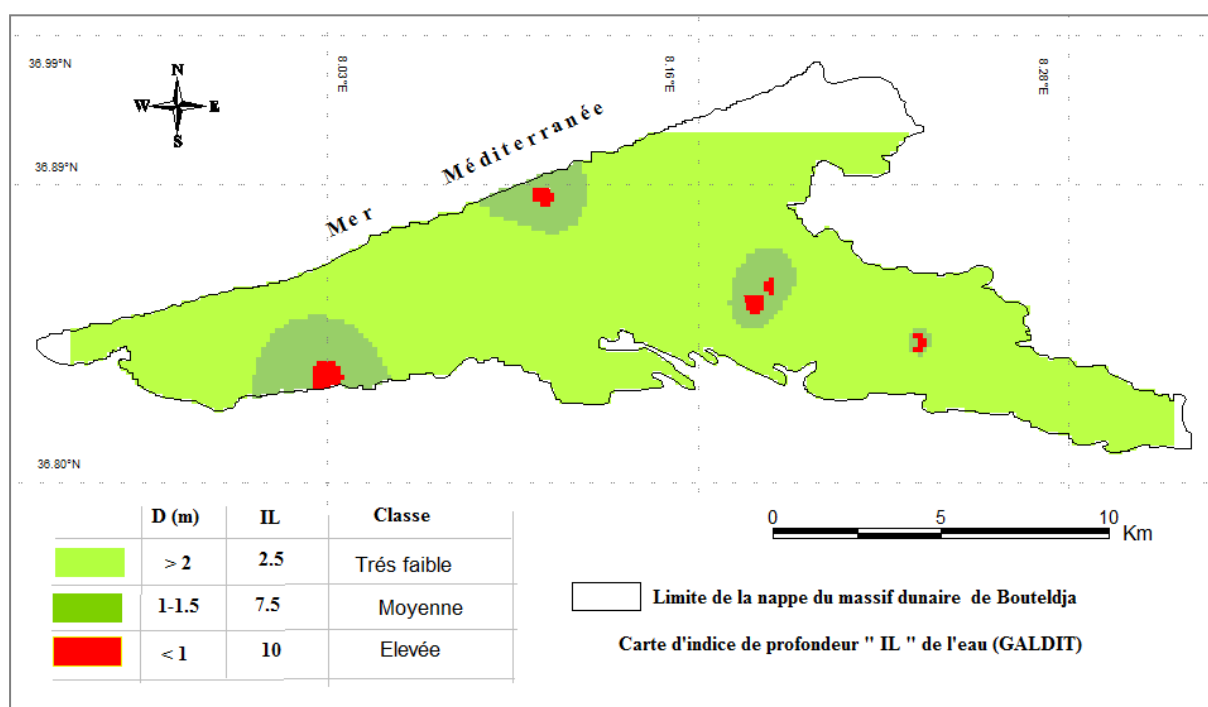


Figure VII.3 : Carte des profondeurs du plan d'eau du massif dunaire de Bouteldja.

On a obtenu les classes suivantes :

La profondeur du plan d'eau (L) est un paramètre qui détermine la pression hydraulique capable de pousser le front salé.

On a obtenu trois classes selon la classification GALDIT :

Classe 01 : La profondeur du plan d'eau est supérieur à 2 m avec un rang égal à 2.5 dans la majeure partie de l'aquifère ce qui correspond à la classe de vulnérabilité très faible

Classe 02 : La profondeur du plan d'eau est varié entre 1 à 1.5 m avec un rang égal à 7.5. Elle occupe une faible superficie au Nord et au Sud-Est aussi une autre zone a Ouest de l'aquifère ce qui correspond à la classe de vulnérabilité moyenne.

Classe 03: La profondeur du plan d'eau est supérieure à 1 m avec un rang égal à 10. Elle est incrustée dans la plage précédente (la 2^{ème} classe) ce qui correspond à la classe de vulnérabilité forte.

VII.6. 4. Carte d'indice "ID" Distance du rivage (Figure VII.4)

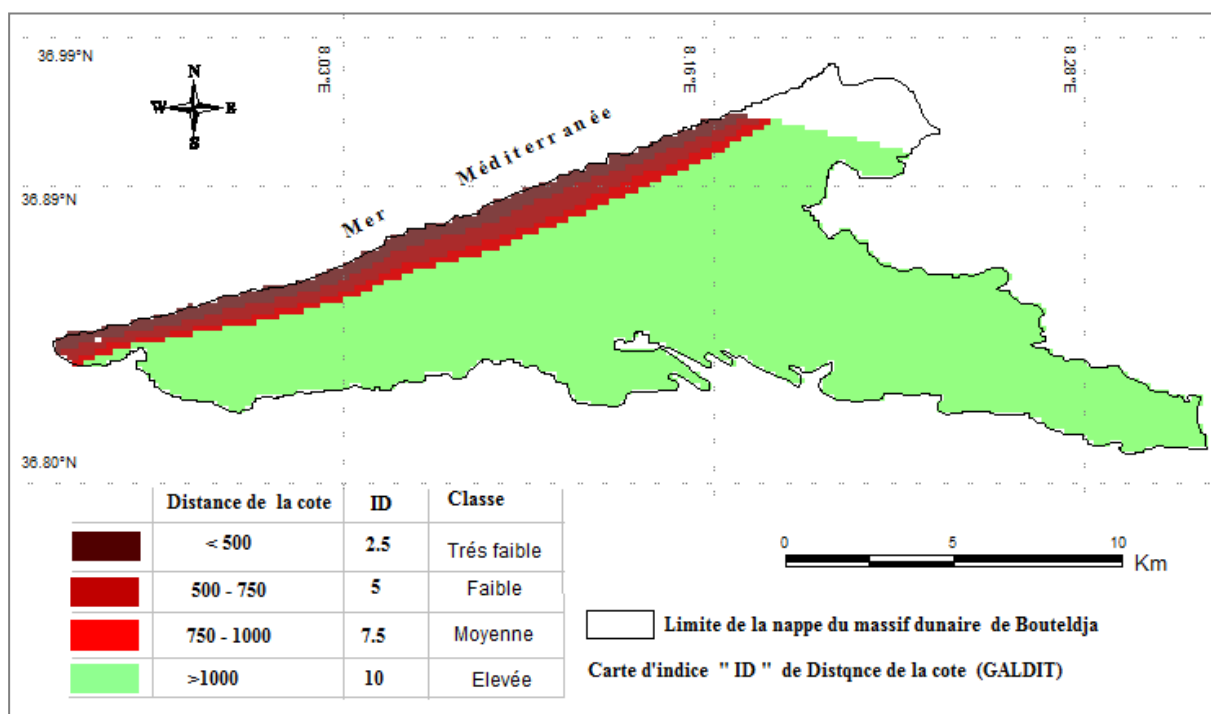


Figure VII.4 : Carte de la distance du point d'eau de la nappe du massif dunaire de Bouteldja à la côte.

On a obtenu quatre classes selon la classification GALDIT :

Classe 01: La distance du point d'eau de la nappe est inférieure à 500 m avec un rang égal à 2.5. Elle occupe une bande littorale s'étendant dans une direction WSW-ENE, ce qui correspond à la classe de vulnérabilité très faible.

Classe 02: La distance du point d'eau de la nappe varie entre 500 et 750 m avec un rang égal à 5. Elle correspond à la classe de vulnérabilité faible.

Classe 03: La distance du point d'eau de la nappe varie entre 750 et 1000 m avec un rang égal à 7.5. Elle correspond à la classe de vulnérabilité moyenne.

Classe 04: La distance du point d'eau de la nappe est supérieure à 1000 m avec un rang égal à 10. Elle la majeure partie de l'aquifère surtout la partie sud ce qui correspond à la classe de vulnérabilité Elevée.

VII.6. 5. Carte d'indice "II" l'impact de l'intrusion d'eau de mer (Figure VII.5)

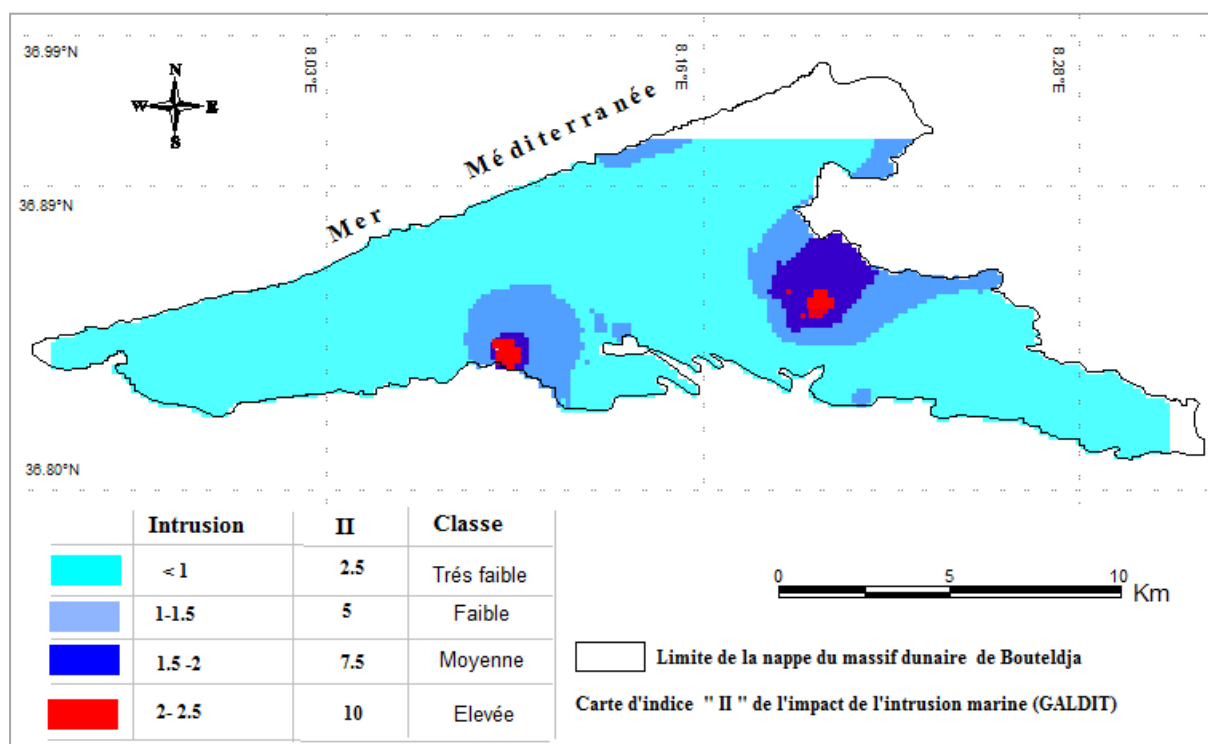


Figure VII.5: Carte montrant l'impact des intrusions marines existantes sur la qualité des eaux de la nappe du massif dunaire de Bouteldja par le rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$

On a obtenu les classes suivantes :

Classe 01: Les valeurs du rapport $Cl^- / (HCO_3^- + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont inférieures à 1 avec un rang égal à 2.5. Elle occupe la majeure partie de l'aquifère ce qui correspond à la classe de vulnérabilité très faible.

Classe 02: Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont variées entre 1 et 1.5 avec un rang égal à 5. Elle occupe la partie Est et Sud-Ouest de l'aquifère ce qui correspond à la classe de vulnérabilité faible.

Classe 03: Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont variées entre 1.5 et 2 avec un rang égal à 7.5. Elle est incluse dans la plage précédente (la 2^{ème} classe) ce qui correspond à la classe de vulnérabilité moyenne.

Classe 04: Les valeurs du rapport $Cl/(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ de l'aquifère sont variées entre 2 et 2.5 avec un rang égal à 10. Elle est incluse dans la plage précédente (la 3^{ème} classe) ce qui correspond à la classe de vulnérabilité forte.

VII.6. 6. Carte d'indice "IT" L'épaisseur de la couche aquifère (Figure VII.6)

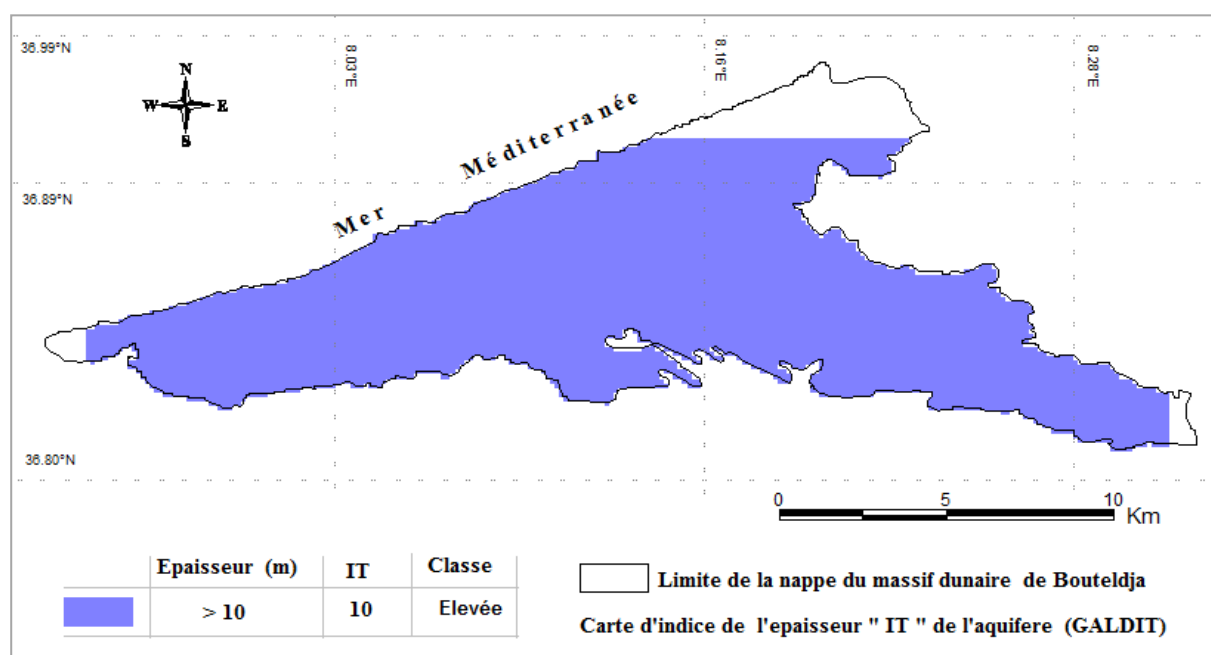


Figure VII.6 : Représentation du paramètre (T) l'épaisseur de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.

Les valeurs de l'épaisseur saturée de l'aquifère sont toutes supérieures à 10 m avec un rang égal à 10 pour la totalité de l'aquifère du massif dunaire de Bouteldja.

VII.6.7. Carte finale d'indice "Indice GALDIT" de vulnérabilité à la pollution (Figure VII.7)

La carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif par la méthode GALDIT est présentée dans la Figure VII.7. Elle montre trois classes de vulnérabilités

Classe 01: Une vulnérabilité moyenne (valeurs de l'indice 7.5 à 5) occupe une bande littorale

s'étendant dans une direction WSW-ENE, et une superficie importante à l'Est aussi une petite zone à l'Ouest de l'aquifère

Classe 02: Une vulnérabilité faible (valeurs de l'indice 5 à 2.5) occupe une petite zone localisée au centre de la nappe et des superficies incrustée entre les deux classes de vulnérabilités.

Classe 03: Une vulnérabilité très faible (valeurs de l'indice inférieurs à 2) occupe de superficies importantes localisées au centre de la nappe.

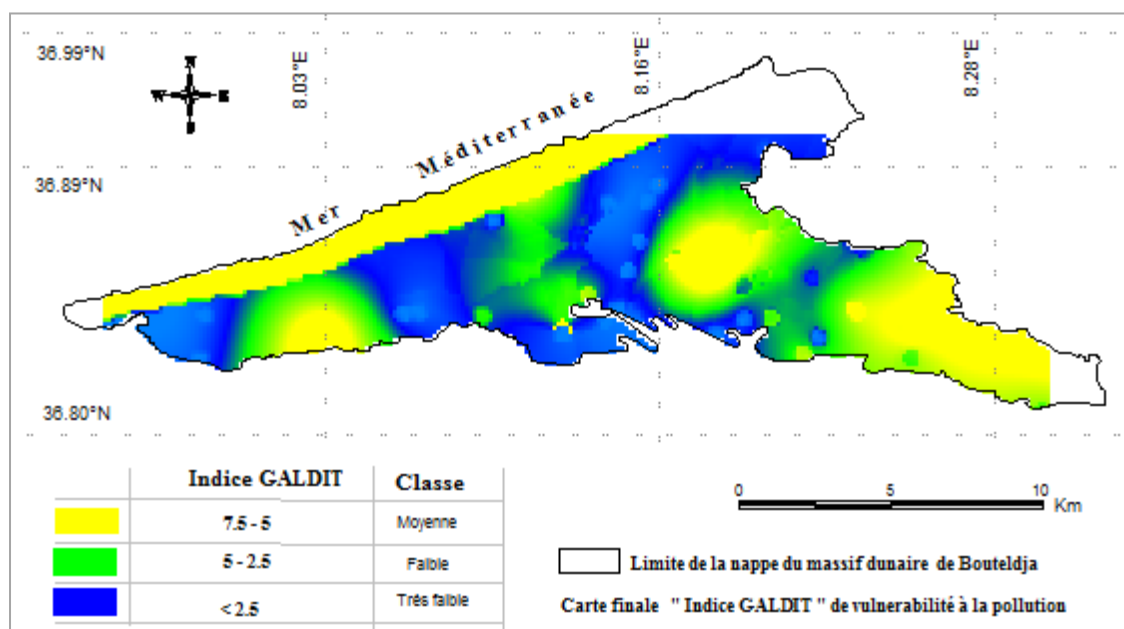


Figure VII.7 : Carte de vulnérabilité à l'intrusion marine de la nappe libre du massif dunaire de par la méthode GALDIT.

VII.7. Conclusion :

Pour produire la carte de vulnérabilité de l'indice global GALDIT de la nappe du massif dunaire de Bouteldja basée sur les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques du système aquifère, on a procédé à l'estimation individuelle de chacune des variables (G, A, L, D, I et T) pour l'ensemble de la zone. En superposant les différentes couches des paramètres définis pour l'aquifère avec le logiciel Mapinfo 8.0 et en calculant l'indice de vulnérabilité GALDIT, on a identifié trois classes de vulnérabilités (moyenne, faible et très faible) grâce à la valeur de IG représente les zones qui sont susceptibles d'être affectées par une intrusion marine.

Conclusion générale

La wilaya d'El-Taref est située à l'extrême Nord-Est algérien à la frontière Algéro-Tunisienne. Elle appartient à la grande zone hydrographique constantinoise codifiée par l'ANRH-Alger '03'. Le bassin versant d'El-Taref est constitué de quatre (04) sous-bassins versants qui sont El-Kebir-Est, la Calle, Bounamoussa et celui de Mafragh (0317) qui fait l'objet de cette étude.

Du point de vue climatique, la zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen tempéré, caractérisé par deux saisons distinctes, l'une pluvieuse et humide allant de mois d'octobre jusqu'au mois de Avril et l'autre sèche, allant du mois Mai au mois de septembre. Par le suivi des pluviométries enregistrées à la station de Bouteldja, cette zone reçoit une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 604.29 sous une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.91°C. Le Bilan hydrique de la zone d'étude montre une évapotranspiration réelle représentant 79.80 % des précipitations, une quantité de ruissellement estimé de 15.24% et environ 4.76 % des pluies contribuent à la réalimentation des nappes

Le fondement géologique de la région caractérisé par des terrains sédimentaires d'âges différents de mésozoïques jusqu'aux quaternaires. L'étude stratigraphique des principaux affleurements rencontrés montre des affleurements du crétacé (représenté par un faciès schisteux et légèrement argileux) des affleurements tertiaires (les formations argilo-gréseux du numidien) et des formations quaternaires (dunes, sables, alluvions)

El Taref englobe quatre principales nappes sont : La nappe des graviers c'est la nappe profonde, elle est constituée par des graviers, sables et galets Plio-quaternaire. La nappe libre qui est une nappe superficielle, elle est contenue dans les formations alluvionnaires et les argiles plus au moins sableuses. La nappe du cordon dunaire s'étend entre Annaba et Oued Mafragh, elle a pour intérêt d'isoler la nappe phréatique de la plaine, des venues d'eau salée. Cette nappe est alimentée par l'infiltration des pluies. Enfin la nappe du massif dunaire de Bouteldja, qui fait l'objet de cette étude. Elle forme une nappe libre avec un substratum argilo-gréseux imperméable. Il est constitué de sables éoliens. Cet aquifère est vulnérable du fait de la présence de la mer et des marécages salés à son pourtour.

L'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux du massif dunaire de Bouteldja montre un faciès chloruré sodique, influencé par l'avancée de mer, le lessivage des formations géologiques des marais et la surexploitation pour répondre aux besoins en eau de la région.

L'application de la méthode GALDIT sur la nappe du massif dunaire de Bouteldja est dans le but mettre en évidence sa vulnérabilité à l'intrusion marine, combinée aux outils du système d'information géographique 'SIG' et les méthodes géostatistiques. Elle a identifié trois classes de vulnérabilités grâce à la valeur de l'indice GALDIT 'IG, affectant les zones qui sont susceptibles à l'intrusion marine et elles sont : une classe de vulnérabilités moyenne ($IG=7.5-5$) occupe une bande littorale s'étendant dans une direction WSW-ENE, et une superficie importante à l'Est aussi une petite zone à l'Ouest de l'aquifère, une classe de vulnérabilités faible ($IG=5-2.5$) et une classe de vulnérabilités très faible ($IG=< 2.5$). Les classes occupent généralement et particulièrement pour la classe moyenne, les zones côtières, les champs de captage et aussi les zones des marécages salés.

Recommandations :

La meilleure prévention des nappes côtières qui présentent un risque d'intrusion marine c'est

- L'adoption d'un système d'exploitation adéquat :
 - Le volume annuel prélevé de la nappe doit être inférieur à la recharge totale. Les dépressions des niveaux piézométriques peuvent entraîner un avancement du biseau salé.
 - Etant donnée les conditions climatiques et les exploitations intensives, la mise en place d'un réseau de surveillance du niveau de la nappe et de la salinité est nécessaire.
- La réalisation des périmètres de protection pour les points surexploités.
- Le rétablissement des systèmes d'opérations pour les eaux usées.

Dans le cas où problème de l'intrusion est avéré, il faut :

- Réduire les débits de pompage d'eau souterraine dans les zones sensibles à la pénétration du biseau d'eau salée.
- Arrêter le fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée.
- La réalimentation artificielle de la nappe dans. Cette méthode est parfois coûteuse et demande des connaissances précises sur les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques.
- La mise en place des barrières hydrauliques (la recharge de la nappe avec de l'eau douce le long de la côte sur les zones proches de la mer, soit par pompage des eaux salées de l'aquifère, soit en combinaison les deux méthodes).

Références Bibliographiques

- Débièche, 2002 :** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien.
- Hani 2003 :** Analyse méthodologique de la structure des processus anthropiques. Application aux ressources en eaux d'un bassin côtier méditerranéen. Thèse de Doctorat d'Etat, univ d'Annaba, pp 123-125.
- Ahmed-Said, 1993 :** The petrology, geochemistry and petrogenesis of the Edough igneous rocks, Annaba, NE Algeria.
- Aller et Al, 1997 :** Une étude de la méthode DRASTIC en mettant l'accent sur les conditions suédoises (Grounds water) "278p-285p.
- Arab L, Oudafal N** Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux brutes et traitées du barrage de Taksebt (Ingénieur d'Etat UMMTO)
- Attoui Badra 2014 :** Etude de vulnérabilité à la pollution des eaux des grands réservoirs d'eaux souterraines de la région de annaba-ElTaref et l'identification des sites d'enfouissement de déchet. THESE
- B.Gaud 1976 :** Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja. Système de reconnaissance et recherche des conditions de modération, rapport d'étude INRH d'Annaba.
- B.R.G.M, 1985 :** Etude par modèle mathématique de la nappe d'Annaba-Bouteldja, 78p.
- Bear et Verruït ,1987 :** Modeling groundwater flow and pollution.
- Becet, 2002 :** Jean-Marie Becet, « Le droit de l'urbanisme littoral », 2002
- BOUDERBALA .A, 2015 :** Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviales de l'Oued Nador-Tipaza (Algérie).Thèse de Doctorat. Université Hassiba Benbouali de Chlef .212p.
- Boulabeiz 2006 :** Evolution des éléments chimiques et évaluation de risque des eaux souterraines à la pollution; Nord-Est algérien.
- Boularouk Wahiba 2011 :** Etude comparative des deux systèmes aquifères en zone humide et en zone hyper aride : cas du massif dunaire de Bouteldja et de la vallée de l'Oued souf.
- Bousnoubra, 2002 :** Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El-Tarf, Guelma, Souk Ahras, évaluation, gestion et perspective vulnérabilité et protection. Doctorat. Université d'Annaba.

- Caby, 1992 :** Le massif cristallin de l'Edough (Algérie): un métamorphique Core Complexe d'âge miocène dans les Maghrébines.
- Chachadi, 2005 :** Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model: A case study in Goa
- Derradji, F, 2004 :** Identification quantitative et qualitative des ressources en eau dans la région d'Annaba – El Tarf (Nord-Est de l'Algérie) . Thèse de doctorat d'état. Université de Annaba.
- Djabri et al. 2011 :** Évaluation de la vulnérabilité d'une nappe en milieu semi-aride et comparaison des méthodes appliquées: cas de la nappe de Meskiana (Est algérien)
- Djouadar ,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 Alger, 2014 .178p.
- Doerfliger, 1996 :** Traçage des eaux à l'aide de bactériophages.
- Dorfliger N et al ,2011 :** Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain).
- Dorfliger N et al ; 2011 :** Une méthode d'estimation de la vulnérabilité des ressources et des sources karstiques - application au système karstique d'Ouyse (sud-ouest de la France).
- F. Derradji et al. 2010 :** Evaluation de la pollution chimique par le zinc et le fer de la nappe profonde des graviers d'Annaba (Nord-Est d'Algérie)
- Gogu et Dassargues 2000 :** Tendances actuelles et défis futurs dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'aide de méthodes de superposition et d'indice.
- Gwénaëlle.C et al, 2012 :** Sécurité du patient: un enjeu majeur-expérience d'un centre hospitalier général
- Haddani ,2010 :** Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia (Maroc).Mémoire de fin d'étude Université CADI AYYAD Faculté des Sciences et Techniques Marrakech (Maroc).43p.
- Haddouche, 2011 :** Etude comparative sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères dans un milieu contrastés : Mitidja Est et Oued Miya .Mémoire de Magister .USTHB Alger.136p.
- Haid Nadjib, 2015 :** Evaluation quantitative d'une réalimentation de la nappe libre du massif dunaire de Bouteldja dans la région de Bordj Ali Bey et son impact sur la qualité des eaux souterraines.
- Hilly .J, 1963:** Etude géologique du Massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est

- Constantinois). Thèse, Fac. Sciences Nancy 1957, n° 125, 408 p.
- Hilly, 1962:** Etude géologique du massif de l'Edough et du cap de fer (et constantinois). Bull n°19carte géologiques Algérie, Alger 33
- Hsissou et al. 1997 :** Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques
- IPCC, 2007 :** Le changement climatique, la base des sciences physiques
- Joleaud.L,1936 :** Etude géologique de la région de Bône-la Calle, B.S.G.A (2), n°12, 199 p.
- JORA 4 septembre 2005** JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 60 publié le 4 septembre 2005 correspondant au 30 Rajab 1426. La Loi n° 05-12 du 28 Jomada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau.
- Jourda. J.P, 1991 :** Pollution des eaux souterraines en France. Bilan des connaissances. Impacts et moyens de prévention, manuels et méthode, n°22.3.éd, par BRGM 262 P.
- Karkouri et al, 2014 :** Cartographie de la vulnérabilité à l'intrusion marine de l'aquifère Côtier de Mnasra (littoral du Gharb, Maroc–Nord-Occidental)
- Khérici, 1993 :** Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole Annaba –la Mafragh Nord –Est Algérienne. Doctorat d'Etat, université d'Annaba
- Khérici. N, 1985 :** Aquifères sableux de bord de mer, hydrodynamiques exemple de la nappe de Bouteldja (Nord-Est Algérien) «thèse de doctorat 3eme cycle USTL, Montpellier
- Kouzana et al. 2007 :** Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie)
- Lahondere J.C. 1987 :** La série ultra tellienne d'Algérie Nord Orientale et les formations environnantes dans leur cadre structurale. Thèses de doctorat d'Etat.
- Marcadon et al, 1999 :** Les ports de commerce, l'environnement et la gestion intégrée du littoral (Ports of trade, the environment and integrated management of the coast)
- Michaud et al. 2003 :** Vulnérabilité: introduction et méthodologie. Rapport technique du Centre Géoscientifique de Quebec.
- Paskoff, 1993 :** Deux atlas des espaces littoraux en France: Atlas des espaces naturels du littoral et Le littoral éléments de diagnostic
- Petelet-Giraud et al ; 2000 :** Méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Application aux systèmes des Fontanilles et Cent-Fonts (Hérault, Sud de la France)

- Philippe Quevauviller 2011 :** Journal officiel des Communautés européennes, Circulaire du 24 juillet 1990 - J.O. du 13 septembre
- Pulido-Bosch et al. 1991 :** Intrusion d'eau salée dans un petit aquifère côtier (Rio Verde, Almuñecar, sud de l'Espagne)
- Ramdani A 1996 :** Etude hydrogéologique et simulation par modèle mathématique de la nappe dunaire de la région de Bouteldja ; thèse de magistère, IST, Université d'Annaba. 139p
- Roche M. 1963 :** Hydrologie de surface Gauthier Villars, Paris, 430p.
- RODIER J, 1996 :** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e édition Dunod, Paris, France.
- Saadali .B, 2007 :** Etude de la qualité des eaux des sources issues du massif dunaire de Bouteldja (Algérie extrême Nord orientale .Mémoire de Magister. Université d'Annaba.84p.
- 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. Faculté des sciences de Sfax, département des sciences de la terre (Tunisie). 255p
- Saliha Najib et al ,2012 :** Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia coast (Morocco).
- Schnebelen et al, 2002 :** Gestion des eaux souterraines en aquitaine Année 5
- Villa .J.M. 1980 :** La chaîne alpine d'Algérie Orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse doctorat .Sciences, Pierre et Marie Curie, Paris VI, 450 p.
- Zaporozec et Vrba 1994 :** Guide sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines
- Zwahlen, 1997 :** Méthodes de mesure des NOE intermoléculaires par spectroscopie RMN multinucléaire : application à un complexe ARN bactériophage

Chapitre II : Hydroclimatologie

Moyennes de la pluviométrie en mm de la station de Bouteldja après comblement de lacune
(source : ANRH d'Alger 2020)

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
2000	12.70	56.50	14.60	48.50	34.60	24.70	21.10	15.00	16.00	0.00	0.00	0.00
2001	22.00	3.20	27.50	19.20	11.00	19.30	14.80	13.00	4.70	0.00	1.60	15.50
2002	38.00	32.10	64.10	59.50	52.50	40.00	16.10	52.10	24.80	0.00	0.00	0.00
2003	20.80	18.70	13.00	35.90	53.20	6.60	19.00	38.40	12.50	36.00	0.00	0.00
2004	27.50	16.00	52.00	29.50	24.70	20.70	20.20	51.20	5.40	24.00	0.00	3.00
2005	5.80	2.60	13.30	48.80	48.30	24.00	8.20	13.00	11.80	0.00	0.00	0.00
2006	14.00	2.40	15.50	59.50	14.10	17.40	7.20	26.00	6.60	13.10	0.00	0.00
2007	13.50	15.50	45.20	31.00	5.00	3.20	22.00	14.20	9.10	2.60	0.00	0.00
2008	26.50	37.50	5.60	12.30	75.30	23.00	14.90	62.40	43.50	0.00	0.00	3.50
2009	39.00	32.00	16.00	16.20	13.20	11.50	12.80	14.60	11.00	24.00	0.00	4.50
2010	26.80	56.00	27.20	28.70	13.00	24.00	30.00	8.40	12.00	0.90	13.00	0.00
2011	14.00	20.40	10.80	20.80	18.10	45.00	14.00	45.80	0.00	0.00	0.00	16.00
2012	24.00	24.00	26.20	15.80	15.30	22.30	26.70	12.60	12.50	0.00	0.00	3.00
2013	17.50	2.20	16.00	0.80	16.00	3.50	31.00	4.80	1.30	2.70	2.00	0.00