

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI
FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DOMAINE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'univers

Filière : Géologie Appliquée

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

**Fluctuation du niveau piézométrique du système
aquifère de la plaine de l'Oued Nador (Tipaza)
dans un contexte de changement climatique**

Présenté par : M. BOUCHALA Juba

Soutenu publiquement le : 19 janvier 2020

Devant le jury composé de :

M. Makhlouf A.	M. C. B.	Président
M. Drouiche A.	M. A. C. A.	Promoteur
M ^{lle} Yahiaoui S.	M. A. C. A.	Examinatrice
M. Kardache R.	M. C. A.	Examineur
M. Belaidi M.	Chef de service (ANRH)	invité

Année universitaire : 2018-2019

Dédicaces

Je dédie ce travail :

Avant tout, à mes chers parents, pour leur soutien immense qu'ils n'ont cessé de m'apporter ainsi que les conseils qu'ils m'ont prodigué sans lesquels j'avoue je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.

À Mon promoteur Monsieur DROUICHE Abdelmadjid

À mes Sœurs : Lila et Dihia

À mes oncles et mes tantes.

À toute ma famille sans exception.

À toutes les meilleures personnes qui m'aiment et qui m'aident dans ma vie, sans oublier leurs familles.

À tous mes amis et toute ma famille de département des sciences géologiques.

À toutes et à tous, je dédie ce travail

Remerciements

Tous d'abord et avant tout, Je remercie « Dieu » qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage et de volonté et la santé pour réaliser ce travail de recherche.

*Au terme de cette étude qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude
Envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide.*

J'exprime ma reconnaissance à mon promoteur

Monsieur ABDELMADJID DROUICHE

qui a proposé et accepté de diriger ce travail.

Je le remercie très chaleureusement pour sa confiance, sa disponibilité, ses connaissances scientifiques et la qualité de son encadrement. Je lui garde tout mon respect.

Je remercie Monsieur MAKHLOUF Ali pour avoir accepté la présidence du jury, j'adresse également mes remerciements à Mademoiselle YAHIAOUI Salima et Monsieur KARDACHE Ramdane d'avoir accepté d'être membres en tant que examinateurs.

Je tiens à exprimer ici mes plus vifs remerciements à Monsieur BELAIDI, chef de service à l'ANRH de Blida et Monsieur BELKACEMI chef de service au niveau de l'ANRH d'Alger pour toute leur aide et leur précieuse contribution en mettant à ma disposition toutes les informations nécessaires pour la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie très chaleureusement aussi mes deux sources de lumière, ma mère et mon père, qui continuent à m'éclairer mon chemin.

*Je tiens à les remercier profondément pour leur amour et leurs sacrifices,
que le Tout Puissant me les garde autant que possible.*

Je ne peux conclure ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants du département des sciences géologiques, qui sont à l'origine de ma formation durant le cycle de mes études.

Enfin, je tiens à saluer toute personne qui, de près ou de loin, a généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

Merci

Résumé

La présente étude est consacrée à la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe de l'Oued Nador dans un contexte du changement climatique. La zone d'étude est une plaine qui fait partie d'un grand ensemble littoral appelé Sahel d'Alger. Elle est située à 75 km à l'Ouest d'Alger. Cette plaine renferme un aquifère composé à sa base par une nappe de grès astien et une nappe alluvionnaire quaternaire sus-jacente recouverte par des marnes par endroits.

L'étude piézométrique a révélé une baisse du niveau d'eau dans le système aquifère entre les années 1980 et le début des années 2000. Le niveau piézométrique a marqué une tendance positive durant la décennie 2000. Une approche statistique basée sur les tests de Pettitt et de Buishand ainsi que des indices pluviométriques a permis de déterminer, d'une part, une période déficitaire qui coïncide avec la période de la baisse du plan d'eau de la nappe, et d'autre part, une tendance à la hausse des précipitations dans la zone d'étude dont les années humides ont contribué à la recharge de la nappe de l'Oued Nador.

Mots clés : Eaux souterraines, Oued Nador, changement climatique, pluviométrie, tests statistiques.

Abstract

This study is devoted to the fluctuation of the piezometric level of the Oued Nador aquifer in the context of climate change. The study area is a plain that is part of a large coastal complex called the Sahel of Algiers. It is located 75 km west of Algiers. This plain contains an aquifer composed at its base by a layer of Astian sandstone and an overlying quaternary alluvial layer covered by marls in places.

The piezometric study revealed a drop in the water level in the aquifer system between the 1980s and the early 2000s. The piezometric level marked a positive trend during the 2000s. A statistical approach based on Pettitt test and Buishand test as well as rainfall indices made it possible to determine, on the one hand, a deficit period which coincides with the period of the decline of the aquifer, and on the other hand, an upward trend in precipitation in the study area, the wet years of which have contributed to the recharge of the Oued Nador aquifer.

Key words : Underground waters, Oued Nador, climate change, rainfall, statistical tests.

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	3
2. CADRE GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION.....	4
2.1. Le relief	4
2.2. Les unités Géomorphologiques de la zone d'études	5
3. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	6
4. LES RESSOURCES EN EAUX DISPONIBLES A L'ECHELLE DE LA WILAYA DE TIPAZA	7
4.1. Les ressources conventionnelles	7
4.1.1. Les eaux de surfaces	7
4.1.2. Les eaux souterraines	8
4.2. Les ressources en eau non conventionnelles	8
4.2.1. Les eaux des stations d'épuration (STEP)	8
4.2.2. Les eaux de dessalement SDEM (Station de Dessalement d'Eau de Mer).....	8
5. ASPECT SOCIO-ECONOMIQUE DE LA ZONE D'ETUDE	9
5.1. Le potentiel humain.....	9
5.2. Le potentiel industriel	9
5.3. Le potentiel agricole.....	9
5.4. Le développement forestier	10
5.5. Le développement touristique	10
6. CONCLUSION.....	10

CHAPITRE 2 : CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. INTRODUCTION.....	11
2. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL	11
3. CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL	12

3.1. Les terrains éruptifs.....	13
3.2. Les terrains primaires.....	13
3.3. Les terrains secondaires	13
3.3.1. Le Trias.....	13
3.3.2. Le Jurassique.....	13
3.3.3. Le Crétacé.....	13
3.4. Les terrains Tertiaires.....	14
3.4.1. L'Eocène.....	14
3.4.2. Le Miocène	14
3.4.3. Le Pliocène.....	14
3.5. Les terrains quaternaires	15
4. CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA PLAINE DE L'OUED NADOR.....	16
4.1. Description lithostratigraphique de la zone d'étude.....	16
4.1.1. Le Pliocène :	16
4.1.2. Le Plaisancien :	16
4.1.3. La série quaternaire (Calabrien-Villafranchien) :	17
4.1.4 Roches éruptives.....	17
4.2. Coupes des ensembles lithologiques.....	17
5. CONCLUSION.....	19

CHAPITRE 3 : ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. INTRODUCTION.....	21
2. APERÇU SUR LE CLIMAT A L'ECHELLE REGIONALE ET LOCALE	21
3. PRECIPITATIONS	22
3.1. Collecte des données	22
3.2. Comblement des lacunes.....	23
3.3. Pluviométrie mensuelle	24
3.4. La Pluviométrie annuelle	26
4. TEMPERATURES	27
4.1. Evolution de la température sur la période 1987-2015	27
4.2. Diagramme Ombrothermique	28
5. HUMIDITE RELATIVE	30
6. VITESSE DU VENT	30
7. LE BILAN HYDROLOGIQUE.....	31
7.1. Evapotranspiration	32

7.1.1. Evapotranspiration potentielle	32
7.1.2. Evapotranspiration réelle	33
7.1.3. Bilan de Thornthwaite.....	34
7.2. Lamé d'eau ruisselée.....	36
7.3. Lamé d'eau infiltrée	37
7.4. Estimation du bilan hydrologique	37
8. CONCLUSION.....	38

CHAPITRE 4 : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. INTRODUCTION.....	39
2. DESCRIPTION DES FORMATIONS AQUIFERES	39
2.1. L'aquifère de la Mitidja	39
2.2. Les aquifères des vallées des cours d'eau actuels	41
2.3. L'aquifère du cordon dunaire.....	41
2.4. La formation de l'Astien du Sahel d'Alger.....	42
2.5. Les Formations des reliefs carbonatés (Zeccar, Chenoua).....	42
2.5.1. Djebel Boumaad.....	42
2.5.2. Autres formations calcaires.....	42
3. LES ENSEMBLES AQUIFERES DE LA ZONE D'ETUDE	43
3.1. La nappe de l'oued Nador	43
3.2. L'Aquifère de l'Astien	44
4. ETUDE PIEZOMETRIQUE.....	45
4.1. Réseau piézométrique de la zone d'étude	45
4.2. Cartes piézométriques	46
4.2.1. Période des hautes eaux	47
4.2.2. Période des basses eaux	49
5. CONCLUSION.....	51

CHAPITRE 5 : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

1. INTRODUCTION.....	52
2. DEFINITION DES CONCEPTS	52
3. LES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A ECHELLE GLOBALE	54
3.1. L'augmentation de la température de surface sur la terre	54
3.2. La température des océans	54
3.3. La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques.....	54

3.4. Le recul des glaciers continentaux	54
3.5. Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland	54
3.6. Le niveau moyen des océans.....	55
4. LES CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL	56
4.1. Les causes naturelles	56
4.1.1. L'effet de serre.....	56
4.1.2. L'activité solaire	56
4.1.3. Les activités volcanique	56
4.2. Les causes anthropiques.....	57
5. SCENARIOS POSSIBLES DE L'EVOLUTION DU CLIMAT	57
5.1. Température	58
5.2. Cycle de l'eau.....	59
5.3. Qualité de l'air.....	59
5.4. L'océan.....	60
5.5. La cryosphère	60
5.6. Le niveau des mers.....	60
6. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ALGERIE	61
7. L'EAU ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUES	64
7.1. Impact du changement climatique sur le cycle hydrologique	64
7.2. Impact du changement climatique sur les eaux de surface	65
7.3. Impact du changement climatique sur les eaux souterraines	65
8. CONCLUSION.....	66

CHAPITRE 6 : L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FLUCTUATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE LA PLAINE DE L'OUED NADOR

1. INTRODUCTION.....	67
2. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE.....	67
2.1. Détection des ruptures : tests statistiques.....	67
2.1.1. Test de Pettitt	68
2.1.2. Statistique <i>U</i> de Buishand	68
2.2. Evolution des indices climatiques	68
2.2.1. L'indice de pluviosité (<i>Ip</i>).....	69
2.2.2. L'indice de précipitations standardisé (SPI)	69

2.2.3. L'indice de déficit pluviométrique (IDP).....	70
2.2.4. L'indice de sécheresse (IS)	71
3. APPLICATION	71
3.1. Détection de ruptures dans les séries pluviométrique annuelles	71
3.2. Détection de ruptures dans la série de température annuelle	74
3.3. Evolution des indices climatiques	75
3.3.1. L'indice de précipitation standardisé (SPI).....	75
3.3.2. L'indice de déficit pluviométrique (IDP).....	77
3.3.3. Indice de pluviosité (IP).....	78
3.3.4. Indice de sècheresse (IS).....	78
4. RELATION ENTRE L'EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE D'ETUDE	79
5. CONCLUSION.....	80
CONCLUSION GENERALE.....	81

Références Bibliographiques

Annexes

Liste des tableaux

Tableau 1. Les bassins versants de la Wilaya de Tipaza.	6
Tableau 2. Les caractéristiques des différents barrages de la Wilaya de Tipaza.....	7
Tableau 3. Capacité des retenues collinaires. (Ammari, 2012)	8
Tableau 4. Stations de traitement des eaux usées. (Benmeddah, 2018)	8
Tableau 5. Stations de dessalement d'eau de mer de la Wilaya de Tipaza. (Djeddis, 2018)	9
Tableau 6. Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. (ANRH)	22
Tableau 7. Températures minimales, moyennes et extrêmes enregistrées dans la station de Boukourdane (1987-2015).	27
Tableau 8. Moyenne mensuelle des températures et précipitations enregistrées à la station de Boukourdane (1987-2015).	29
Tableau 9. Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative au niveau de la station de Boukourdane (1987-2015).	30
Tableau 10. Valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent dans la station de Boukourdane (1987-2015).	31
Tableau 11. Valeurs de l'ETP estimées par la formule Thornthwaite.....	33
Tableau 12. Bilan hydrologique moyen obtenu par la méthode de Thornthwaite.....	35
Tableau 13. Valeurs de l'ETR obtenus par les trois formules.....	36
Tableau 14. Tableau récapitulatif des différents termes du bilan hydrologique.....	37
Tableau 15. Caractéristique des projections climatiques sur l'Algérie aux horizons 2020 et 2050 (MATE, 2010).....	64
Tableau 16. Classes de sévérité des sécheresses selon les valeurs du SPI	70
Tableau 17. Resultats des tests de Pettitt et de Buishand sur les séries pluviométriques.	71
Tableau 18. Résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqué sur la série de Boukourdane (1987-2017).....	74
Tableau 19. Fréquences des années pluviométriques en fonction de l'Indice de Précipitations Standardisé (SPI).	76

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude. Source : Carte hydrogéologique de la région d'Alger.	3
Figure 2. Les limites administratives de la Wilaya de Tipaza.	4
Figure 3. Carte géomorphologique de la Wilaya de Tipaza.	5
Figure 4. Carte des bassins versants de la Wilaya de Tipaza. Source : Carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux.	7
Figure 5. Carte du Nord de l'Algérie dans le cadre géodynamique de la Méditerranée occidentale. (Bouillin, 1986).....	12
Figure 6. Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifiée d'après Durand-Delga, 1969, les Bibans et les Babors qui étaient considérés comme étant de l'Autochtone font également partie des nappes telliennes).	12
Figure 7. Carte de localisation des coupes des ensembles lithologiques.	17
Figure 8. Coupes montrant les ensembles lithologiques. (Hachemi, 2016).....	18
Figure 9. Extrait digitalisé de la carte géologique de Tipaza 1/50 000.	20
Figure 10. Carte de situation des stations pluviométriques.	22
Figure 11. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au niveau des stations d'Attatba Cave et Ain Tagourait (1982-2015).	25
Figure 12. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au niveau des stations de Hadjout, station de Djebabra (1982-2015) et Boukourdane (1987-2015).	25
Figure 13. variations de la températures mensuelle de la station de Boukourdane (1987-2015).	28
Figure 14. Diagramme Ombrothermique établi pour la plaine de l'Oued Nador (1987-2015).	29
Figure 15. Variation de l'humidité relative mensuelle de la station de Boukourdane (1987-2015).	30
Figure 16. Variation de la vitesse du vent mensuelle de la station de Boukourdane (1987-2015).	31

Figure 17. Bilan hydrologique selon la méthode de Thorrrthwaite pour la période 1982-2015.	35
Figure 18. Aperçu géologique du bassin de la Mitidja (Bennie and Partners, 1983)	40
Figure 19. Extrait de la carte géologique de la région de Tipaza au 1/50000 montrant l'extension des affleurements de l'aquifère du cordon dunaire et des sables et grès de l'Astien sur les collines du Sahel en bordure nord de la plaine de la Mitidja	41
Figure 20. Extrait de la carte Hydrogéologique de la région d'Alger au 1/200 000	42
Figure 21. Coupe géophysique dans la vallée de l'Oued Nador (C.G.G. 1967).	44
Figure 22. Carte de localisation de la coupe géophysique dans la vallée de l'Oued Nador (C.G.G. 1967)	44
Figure 23. Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de l'Oued Nador.	46
Figure 24. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des hautes eaux 2003	47
Figure 25. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des hautes eaux 2016	48
Figure 26. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des basses eaux 2003	49
Figure 27. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des basses eaux 2016	50
Figure 28. Les composantes du système climatique.	53
Figure 29. Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord, (GIEC, 2007).	55
Figure 30. Projections relatives au réchauffement à la surface du globe, selon plusieurs scénarios climatiques (GIEC, 2007)	58
Figure 31. Séries chronologiques simulées à partir de plusieurs modèles CMIP5 de 1950 à 2100 pour l'évolution de la température annuelle moyenne du globe en surface par rapport à la période 1986-2005 (GIEC, 2013)	59
Figure 32. Projections de l'élévation du niveau des mers au cours du 21 ^{ème} siècle par rapport à la période 1986-2005 (GIEC, 2013).	61

Figure 33. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000) (Abderrahmani, 2014).....	62
Figure 34. Evolution des totaux annuels de précipitations en Algérie (1901-2000) (Abderrahmani, 2014).....	62
Figure 35. Evolution de l'isoline 200mm en Algérie (Dakiche, 2011).	63
Figure 36. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Djebabra.	73
Figure 37. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Hadjout.....	73
Figure 38. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série d'Attatba Cave.	73
Figure 39. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série d'Ain Tagourait.	73
Figure 40. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Boukourdane.	73
Figure 41. Indice de Déficit Pluviométrique (IDP %) des stations d'Attatba Cave, Hadjout, Ain Tagourait et Djebabra (1982-2015).	77

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément vital pour la subsistance de tout être vivant et aussi un facteur prépondérant et important pour de nombreuses activités humaines, 70 % de la surface de la terre est occupée par l'eau avec seulement 2,2 % de qualité douce, dont 22 % proviennent des eaux souterraines (BENMEDDAH, 2018). Ces dernières représentent une excellente source d'approvisionnement en eau potable. Leurs exploitations présentent des avantages économiques appréciables du fait qu'elles ne nécessitent que peu de traitement et parfois même aucun. Le maintien de cet avantage relatif requiert cependant que les mesures soient prises pour préserver de façon durable la qualité de cette importante ressource.

Les plaines côtières, sièges des principaux aquifères alluvionnaires, sont dues principalement, à des subsidences remplies d'importants dépôts alluviaux, alimentées, à la fois par les précipitations et par les rivières qui les traversent. Ces aquifères côtiers constituent des ressources en eaux importantes dans les zones littorales, où l'on observe de fortes densités démographiques et une intense activité agricole et industrielle ce qui mène à les solliciter fortement par des usages concurrentiels (population, agriculture, industrie et tourisme) en plus des changements climatiques qui font sentir de manière sensible durant les dernières décennies du 20^{ème} siècle où le déficit pluviométrique est évalué à près de 30 %. (BELKACEMI, 2012)

Dans la zone d'étude comme dans toutes les régions côtières du pays, la plupart des besoins en eau sont assurés par l'exploitation des eaux souterraines, par des forages, puits et captages des sources.

Actuellement, l'enjeu hydraulique est de comment faire pour bien répondre aux besoins des utilisateurs (AEP, agricole et industrie) avec des ressources en eau relativement limitées. A long terme, face à l'augmentation de la demande, les volumes d'eaux mobilisables risquent de ne pas être parfaitement garantis compte tenu des changements climatiques et de la dégradation de la quantité et la qualité de ces eaux souterraines.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce modeste travail. Ce dernier est basé sur une étude du système aquifère de la plaine de l'Oued Nador dans le but d'évaluer la fluctuation de son niveau piézométrique dans un contexte de changement climatique que la région subit ces dernières décennies.

Pour plus de clarté dans la présentation ce mémoire, nous l'avons structuré selon la structure suivante :

Dans le **premier chapitre** nous allons donner un aperçu géographique et nous décrirons les moyens socio-économiques de la région ainsi que le potentiel hydriques et le réseau hydrographique.

Le **deuxième chapitre** est réservé à une étude géologique pour bien connaître les différentes formations géologiques susceptibles de former des aquifères.

Le **troisième chapitre** est consacré à une étude climatologique dans le but de quantifier les paramètres climatiques qui permet d'évaluer les éléments essentiels de la recharge de système aquifère étudié.

Dans le **quatrième chapitre**, nous allons faire une étude hydrogéologique afin d'identifier les ensembles aquifères de la wilaya et de synthétiser leurs propriétés hydrogéologiques et ensuite faire une étude piézométrique dans le but d'évaluer l'évolution du niveau de la nappe.

Le **cinquième chapitre** fera l'objet d'une recherche sommaire sur le changement climatique à l'échelle mondiale et aussi à l'échelle de la région de Tipaza, car ce changement climatique est là, et restera une menace pour longtemps et il aura des répercussions sur quasiment tous les domaines de la société (santé, économie, industrie... etc.)

Dans le **sixième chapitre**, nous allons essayer de faire un lien entre le changement climatique et le niveau piézométrique de la nappe de l'Oued Nador à travers des tests statistiques dans le but de détecter des ruptures au sein des séries pluviométriques et de températures.

En fin, ce travail sera achevé par une conclusion générale où nous récapitulerons les principaux résultats obtenus avec une série de recommandations proposées à la lumière de l'étude réalisé

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Cadre géographique de la zone d'étude

La basse vallée de l'oued Nador est située à 75 km à l'Ouest de la Wilaya d'Alger, c'est une plaine alluviale qui fait partie d'un grand ensemble appelé Sahel algérois. Elle est limitée à l'Ouest par le massif de Chenoua, au Sud et à l'Est par les contreforts du Sahel et au Nord par la mer méditerranéenne (figure 1).

Cette vallée emprunte un sillon synclinal d'orientation NNE-SSO dont l'axe principal est occupé par l'Oued Nador qui a donné son nom à cette plaine alluviale. (Mesbah, 1981)

Du point de vue cartographique, notre zone d'étude est limitée par les coordonnées suivantes :

$$X_{\min} = 471\,600 \text{ m}$$

$$X_{\max} = 477\,800 \text{ m}$$

$$Y_{\min} = 367\,200 \text{ m}$$

$$Y_{\max} = 366\,100 \text{ m}$$

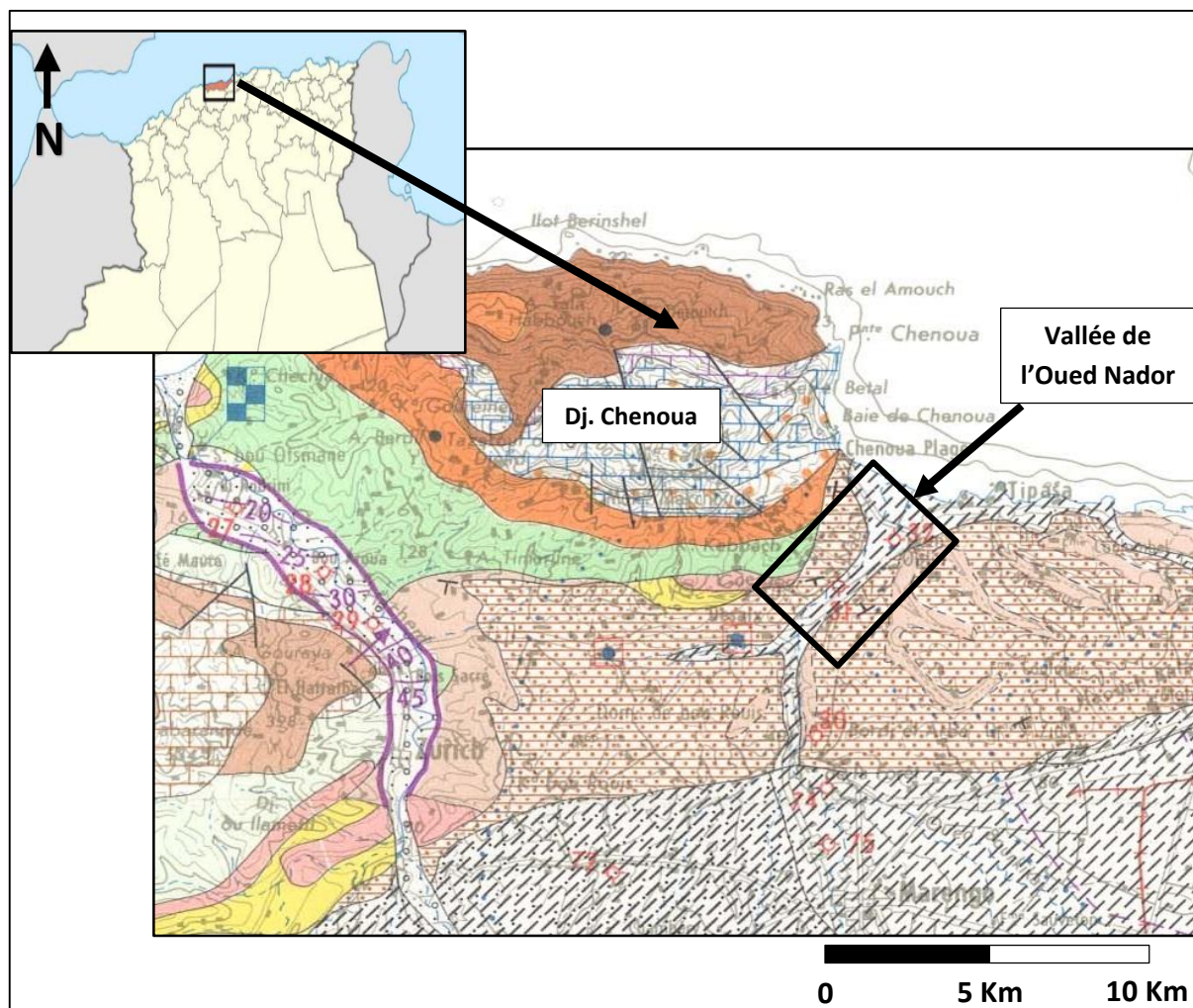


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude. Source : Carte hydrogéologique de la région d'Alger.

Sur le plan administratif, la zone d'étude est circonscrite dans la wilaya de Tipaza. Cette dernière est limitée, selon la figure ci-après, par :

- La mer méditerranée au Nord.
- La wilaya d'Alger au Nord-est.
- La wilaya de Blida à l'Est et Sud.
- La wilaya d'Aïn-Defla au Sud et Sud-ouest.
- La wilaya de Chlef à l'Ouest.

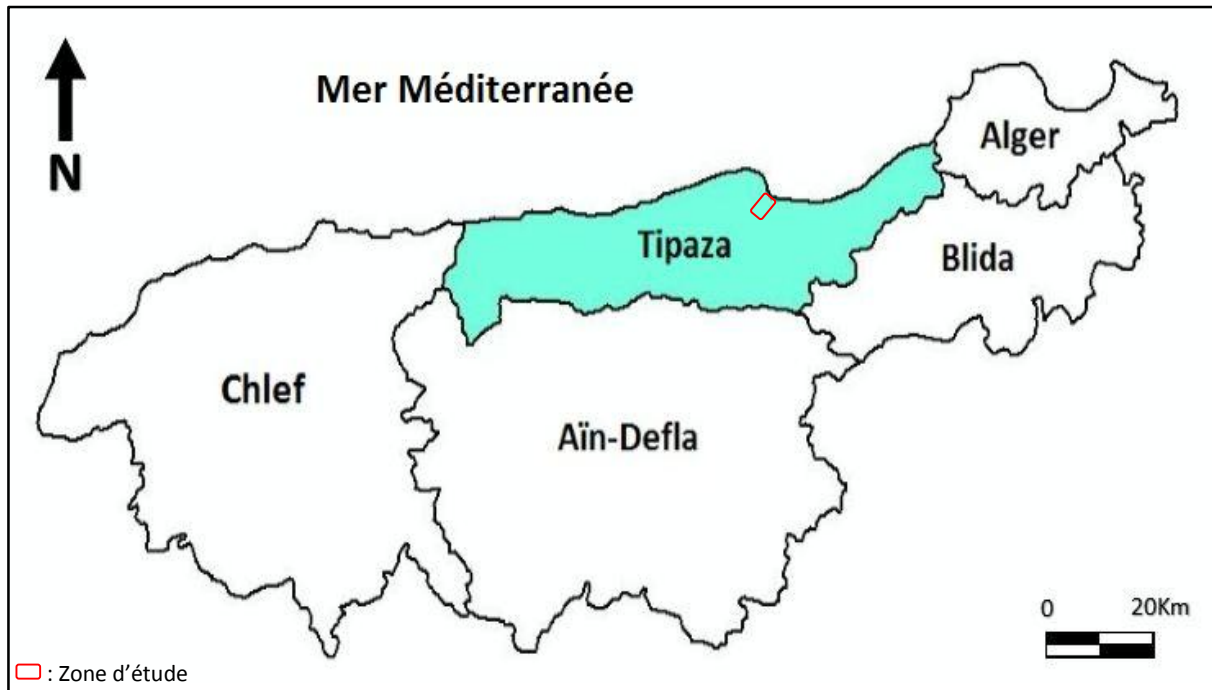


Figure 2. Les limites administratives de la Wilaya de Tipaza.

2. Cadre géomorphologique de la région

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est essentiellement lié à ses paramètres et caractéristiques géographiques, morphologiques et orographiques qui déterminent les différents paramètres d'un bilan hydrologique (ruissèlement, infiltration, précipitations et évapotranspirations).

2.1. Le relief

Le relief est un élément de base pour l'étude et la description des principaux ensembles topographiques dans une région, leur agencement et leur disposition. De plus, il conduit à reconnaître les formes élémentaires qui se combinent à leur tour pour former des ensembles plus au moins complexes.

Le territoire de la wilaya de Tipaza couvre une superficie de 1 707 Km² qui se répartit en montagnes, collines, piémonts et plaines. (Figure 3)

- Au Nord-ouest de notre région d'étude, apparait la chaîne de montagne de Chenoua.
- Au Nord-est, la Mitidja s'étend essentiellement sur la Wilaya de Blida et se trouve limitée au niveau de la wilaya de Tipaza par le bourrelet constitué par le Sahel.
- Au Nord du Sahel un cordon littoral présente un rétrécissement et une élévation graduelle d'Est en Ouest jusqu'à disparition par endroits à Tipaza et dans les daïra de Cherrhell et Sidi Amar où le relief très accidenté autour du mont du Chenoua présente des escarpements importants en bordures de la mer.

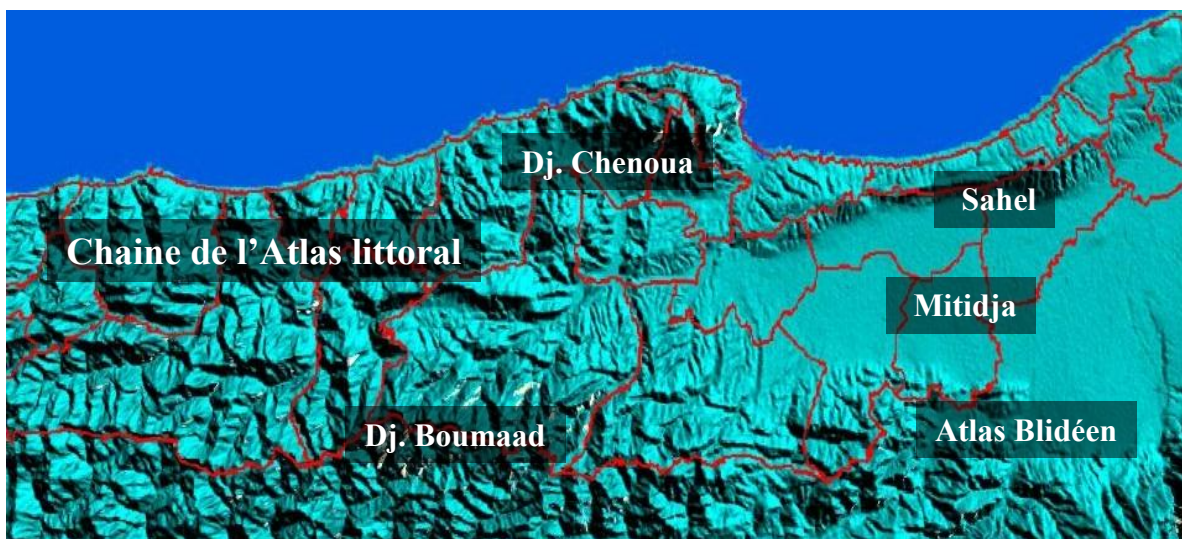


Figure 3. Carte géomorphologique de la Wilaya de Tipaza.

2.2. Les unités Géomorphologiques de la zone d'études

La plaine alluviale de l'Oued Nador offre sur le plan géomorphologique une assez grande homogénéité. Ce phénomène est lié à la nature subsidence de cette unité. Le paysage apparait ainsi sous différents aspects. Du Nord au Sud, on peut définir les unités morphologiques suivantes :

- **Le Sahel** : C'est une bande accidentée de quelques kilomètres de largeurs. Elle borde la mer méditerranéenne, représentée par un bombement anticlinal à faible pente et sépare la plaine de la mer. Son altitude varie entre 200 et 250 m. (Figure 3)
- **Le massif de Chenoua** : le Chenoua correspond à un dôme formant un promontoire nettement individualisé, dont les pentes sont très accentuées et le contact avec la mer est brutal où les côtes sont rocheuses et très disséquées par l'érosion marine. Ce massif est séparé des collines du Sahel à l'Est par l'Oued Nador et des premiers monts de Cherrhell par l'Oued El Hachem.

- **La plaine** : C'est une zone de subsidence (une dépression représentée par un affaissement d'axe ENE-OSO) dont l'altitude varie entre 4 à 50 m d'Est en Ouest et le remplissage est d'âge mio-plio-quaternaire caractérisée par une faible pente. Cette plaine est bordée par (02) deux zones surélevées (le Sahel et l'Atlas Blidéen du côté est et par le massif de Chenoua du côté ouest). (Glangeaud, 1932)
- **Piémonts et collines** : elles correspondent à une zone de déjection à écoulement profond, résultat de l'érosion dynamique du massif ancien. Son altitude moyenne varie de 80 à 120 m, avec un rôle de couverture qui cache le contact structural séparant la plaine de l'atlas. (Glangeaud, 1932)

3. Le réseau hydrographique

Compte tenu de sa position géographique le bassin versant de l'Oued Nador dispose d'un réseau hydrographique relativement important et particulièrement dense à l'amont. (Figure 4)

L'Oued Nador qui a une longueur de 8,5 km s'écoule entre le massif du Chenoua au NNO et les formations astiennes des contreforts sahéliens au SSE.

Les affluents de l'Oued Nador (principaux et secondaires), sont :

Oued Hamamra, oued Damous, oued El Hachem, oued Djer, oued Barrich, oued Roumroum, oued Boukelal, oued Guergour, oued Ozakou, oued Bou Chenoun, oued Bou Kisnadene, oued Arar, oued Melah, oued Merad, oued Bourkika, oued Bou Ardoun, oued Atallah, oued Hamou,, oued Bou Djabroun, oued Fodda, oued Bou Yerseme. (BELKACEMI, 2012)

Pendant l'écoulement, Ces cours d'eau drainent quatre (04) sous bassins versants appartenant au grand bassin appelé côtier algérois selon le répertoire de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques). Le tableau ci-après, présente ces bassins et leurs codes respectifs :

Tableau 1. Les bassins versants de la Wilaya de Tipaza.

Code	Bassin Versant
02-12	Oued Mazafran
02-10	Oued Djer-Bouroumi
02-04	Sahel
02-03	Oued El Hachem et Oued Nador

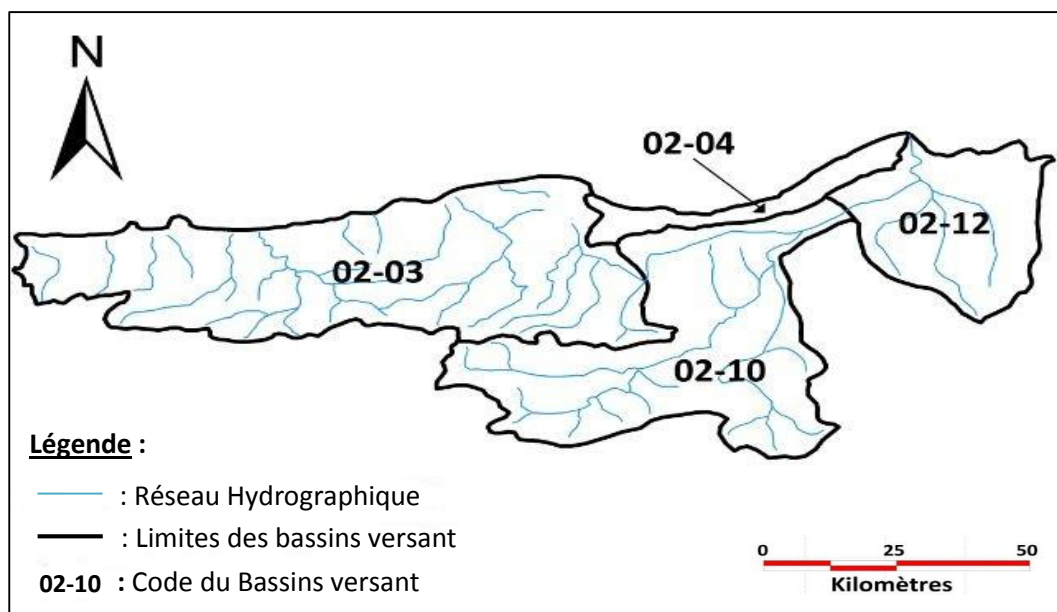


Figure 4. Carte des bassins versants de la Wilaya de Tipaza. Source : Carte du réseau hydroclimatologique et de la surveillance de la qualité des eaux.

4. Les ressources en eaux disponibles à l'échelle de la Wilaya de Tipaza

4.1. Les ressources conventionnelles

Cette ressource se subdivise en eaux de surfaces et eaux souterraines :

4.1.1. Les eaux de surfaces

Cette ressource est exploitée à partir des barrages et des retenues d'eaux collinaires. On compte, en effet, trois (03) Barrages (Barrage de Boukerdane, Barrage de Boudjebroune, Barrage de Keff Eddir) et deux (02) retenues d'eaux collinaires.

Les caractéristiques de ces Barrages sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Les caractéristiques des différents barrages de la Wilaya de Tipaza (Ammari, 2012)

Nom de Barrage	Boudjebroune	Boukourdane	Keff Eddir
Localisation	Merad	Sidi Amar	Damous
Oued	Sidi Bouyahia	El Hachem	Damous
Capacité initiale	1 Hm ³	97 Hm ³	125 Hm ³
Apport moyen annuel	1,5 Hm ³ /an	21,10 Hm ³ /an	-
Volume régularisé	75%	49 Hm ³ /an	60 Hm ³
Année de mise en service	1862	1996	En cours de remplissage

Le tableau 3, suivant récapitule les caractéristiques des retenues d'eaux collinaires recensées dans la Wilaya de Tipaza.

Tableau 3. Capacité des retenues collinaires. (Ammari, 2012)

Retenues d'eaux collinaires	Capacité Total
Hadjret Ennous	0,160 Hm ³
Attatba	0,120 Hm ³

4.1.2. Les eaux souterraines

La zone d'étude possède des nappes alluviales des Oueds et des plaines, ces dernières constituent les principales nappes aquifères de la Wilaya de Tipaza, ainsi l'Astien qui constitue un réservoir très important des eaux souterraines, auxquelles s'ajoutent aussi les formations géologiques perméables telles que les calcaires de Chenoua.

4.2. Les ressources en eau non conventionnelles

Les ressources en eau non conventionnelles sont constituées par :

- Les eaux de mer dessalées et les eaux saumâtres déminéralisées dans un but d'utilité publique.
- Les eaux usées épurées et utilisées dans un but d'utilité publique.
- Les eaux de toutes origines injectées dans les systèmes aquifères par la technique de la recharge artificielle. (Journal officiel de la république algérienne n° 60, 4 septembre 2005, page : 4).

4.2.1. Les eaux des stations d'épuration (STEP)

La Wilaya de Tipaza dispose de trois (03) stations d'épurations des eaux usées qui sont : les stations d'épuration de Hadjout, de Chenoua et de Koléa (tableau 4).

Tableau 4. Stations de traitement des eaux usées. (BENMEDDAH, 2018)

Station d'épuration	Capacité (équivalent habitant)	Débit
Koléa	75 000	11 000 m ³ /jour
Chenoua	70 000	11 200 m ³ /jour
Hadjout	70 000	11 200 m ³ /jour

4.2.2. Les eaux de dessalement SDEM (Station de Dessalement d'Eau de Mer)

La Wilaya de Tipaza comprend quatre (04) stations de dessalement d'eau de mer ce sont la station de Douaouda (actuellement fonctionnelle), la station de l'Oued Sebt, la station de Fouka (mise en service en juillet 2011, actuellement fonctionnelle) et la station de Bousmail (actuellement en panne).

Tableau 5. Stations de dessalement d'eau de mer de la Wilaya de Tipaza. (Djeddis, 2018)

Nom de la station	Débit d'eau potable
Douaouda	5 000 m ³ /jour
Fouka	70 000 m ³ /jour
Oued Sebt	100 000 m ³ /jour
Bousmail	3000 m ³ /jour

5. Aspect socio-économique de la zone d'étude

La région d'étude possède plusieurs potentialités socio-économiques, surtout en matière d'industrie et agriculture, mais aussi humaines et touristique.

5.1. Le potentiel humain

La population totale de la Wilaya de Tipaza est estimée à 591 010 habitants soit d'une densité de 346,22 habitants au kilomètre carré (Km²) calculé selon le taux d'accroissement annuelle moyen de la période 1998-2008. (BENMEDDAH, 2018)

5.2. Le potentiel industriel

Le palier industriel de la Wilaya de Tipaza est composé essentiellement de petites et moyennes entreprises (PME).

Le type d'activités le plus répandu et le plus abondant est celui lié à la production de matériaux de construction ensuite suivi de l'activité agroalimentaire.

5.3. Le potentiel agricole

La Wilaya de Tipaza est caractérisée par un potentiel en sol cultivable destiné à l'activité agriculture d'environ de 72 929 ha, dont 64 772 ha de surface agricole utile (SAU). (ANDI, 2015)

La superficie irriguée est estimée à 12 215 ha, soit un taux d'irrigation de 18,6 % de la surface agricole utile). (ANDI, 2015)

Les terres dans cette région sont cultivées par plusieurs cultures ; dont, l'arboriculture fruitières, les agrumes, culture maraichère, les fourrages et les céréales.

5.4. Le développement forestier

La Wilaya de Tipaza possède un riche potentiel forestier avec une superficie d'environ de 40 375 ha. On note que les forêts et les maquis occupent environ 23,61 % du territoire de la Wilaya (soit 170 700 ha).

Les forêts sont réparties d'une façon inégale à travers la Wilaya, les statistiques relèvent environ 27 415 ha, soit 60 % du total qui sont concentrés dans la région Ouest (Damous, Cherchell, Gouraya et Sidi Amar).

L'occupation du sol par essence donne une répartition où le pin d'Alep est le plus répandu (55,69 %) suivi de chêne-vert (17,01 %). Quant au chêne liège dont l'aire se situe beaucoup plus du côté ouest de la Wilaya, il occupe 6,98 % de la superficie forestière totale.

5.5. Le développement touristique

La Wilaya de Tipaza dispose d'un potentiel touristique et d'un patrimoine historique importants sur une longueur d'une côte qui s'étend sur 123 km, avec l'existence de 51 plages dont 39 sont ouvertes à baignade en plus de nombreuses criques, baies, et autres falaises offrant d'indéniables possibilités touristiques.

Ce secteur permet à la Wilaya de Tipaza d'enregistrer chaque année une influence considérable qui dépasse les trois (03) millions de visiteurs et touristes durant la saison estivale. Ce qui rend ce secteur comme un atout appréciable pour le développement socio-économique de la Wilaya de Tipaza.

Quant à l'artisanat, la valeur de ses produits sont de renommée nationale et internationale : Tapis, broderie d'art, poterie, broderie typique de la région, dentelle, vannerie et sculpture sur bois.

6. Conclusion

La plaine de l'Oued Nador est située à 75 km à l'Ouest d'Alger. Cette plaine emprunte un sillon synclinal d'orientation NNE-SSO dont l'axe principale est occupé par l'Oued Nador qui a donné son nom à cette plaine. Sur le plan hydrologique, la plaine fait partie du sous bassin versant 02-04 et parcourue par l'Oued principal Oued Nador et ses affluents.

La wilaya de Tipaza est riche en ressources en eaux. Les eaux superficielles sont exploitées à travers trois barrages de capacité totale égale à 123 Hm³ et de deux retenues collinaires (0,120 Hm³). Quant aux eaux souterraines, les nappes des oueds et les plaines constituent les aquifères très intéressants. De plus, les eaux non-conventionnelles renforcent les potentialités hydriques de Tipaza à travers plusieurs stations de traitement d'eau de mer.

CHAPITRE 2 : CADRE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction

La géologie est un moyen d'investigation très utile dans une étude hydrogéologique, car elle permet le repérage des formations susceptibles d'être aquifères, de suivre leurs évolutions dans l'espace et dans le temps et sert aussi à identifier les formations lithostratigraphique par les caractéristiques des matériaux et la structure du sous-sol susceptible de conduire et d'emmagasiner l'eau des précipitations en profondeur, tout en permettant la détermination du type d'aquifère.

D'un point de vue géologique, l'Algérie est située dans la partie Nord du craton africain et peut être subdivisée en deux (02) domaines qui s'opposent par leurs histoires et leurs structures géologiques :

- **L'Algérie du Nord ou le domaine septentrional**, qui fait partie de la chaîne alpine, édifié au cours du Tertiaire et qui demeure encore instable aujourd'hui.
- **L'Algérie Saharienne**, domaine relativement stable depuis la fin du Précambrien, constitué d'un socle déformé par les orogénèses éburnéennes et panafricaines, d'une couverture paléozoïque généralement tabulaire affectée localement de plis hercyniens et d'une couverture méso-cénozoïque tabulaire.

La frontière entre ces deux (02) domaines est représentée par **l'accident sud-Atlasique** qui suit le revers sud de l'Atlas saharien.

La région étudiée, plaine de l'Oued Nador (Wilaya de Tipaza), appartient au premier domaine et fait partie de **la chaîne Maghrébides** que nous exposerons brièvement.

2. Contexte géologique régional

La chaîne alpine de l'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides fait partie de l'orogénèse alpine périméditerranéenne (Durand-Delga, 1969) d'âge tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 Km depuis l'Espagne du Sud, à l'arc calabro-sicilien (Figure 5).

Dans ce domaine en forme d'anneau très aplati, on distingue classiquement les zones internes, située à l'intérieure de l'anneau et représentées aujourd'hui par différents massifs, dispersées le long de la côte méditerranéenne et les zones externes situées à la périphérie.

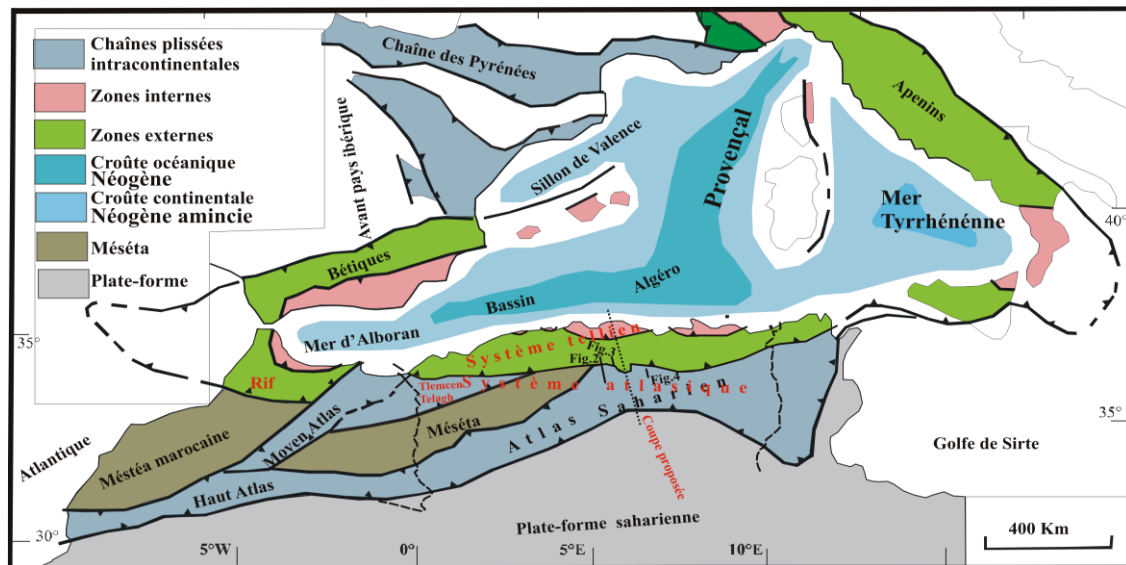


Figure 5. Carte du Nord de l'Algérie dans le cadre géodynamique de la Méditerranée occidentale. (Bouillin, 1986)

Le domaine de la Chaîne des Maghrébides a connu des phases de déformation méso-cénozoïque aboutissant à la mise en place de nappes de charriages. C'est le domaine de nappes ou domaine allochtone.

En Algérie, la Chaîne des Maghrébides montre du Nord au Sud les domaines suivants :
Le domaine interne, le domaine des flyschs et le domaine Externe (Figure 6).

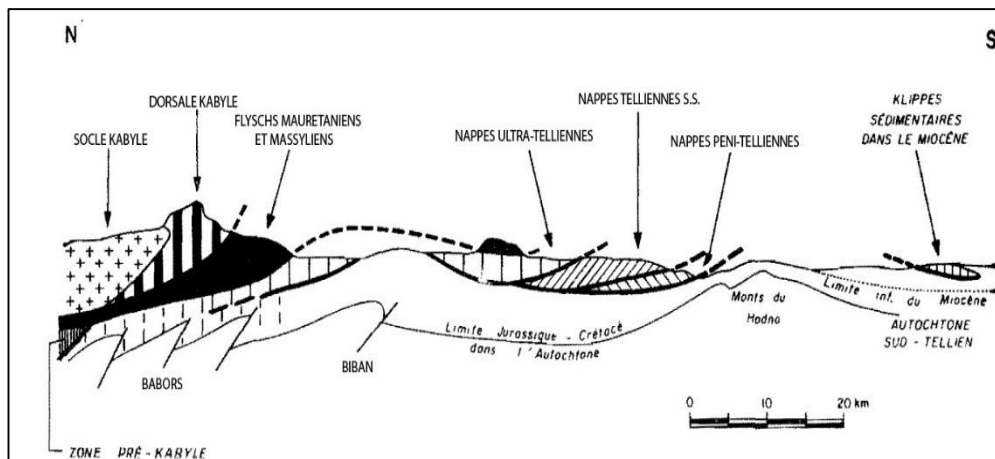


Figure 6. Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (modifiée d'après Durand-Delga, 1969, les Bibans et les Babors qui étaient considérés comme étant de l'Autochtone font également partie des nappes telliennes).

3. Contexte géologique local

Affectée par les mouvements orogéniques alpins et hercyniens, l'Algérie du Nord présente une importante complexité géologique, cependant elle a été l'objet de plusieurs études géologiques. (Figure 9)

3.1. Les terrains éruptifs

Ils n'apparaissent qu'en pointements de faible superficie en bordure du littoral. Ils sont représentés par des Granites, Granodiorites au Sud de Hadjret Ennous et des Syénites près de Cherchell, des liparites quartzifères et feldspathiques et dacites sur le flanc sud du Chenoua.

Les affleurements sont plus importants sur la bordure du bassin synclinal miocène de Menacer où la roche est surtout constituée d'angitendésites, où prospère la forêt de chêne-liège. Toutes ces roches éruptives fournissent des sols non calcaires, siliceux très caillouteux et superficiels à vocation strictement forestière. (Figure 9)

3.2. Les terrains primaires

Ils ne sont présents que sur la moitié du Nord du Mont du Chenoua. Le Dévonien y est représenté par une série de schistes noirs, micro brèches et grès et le Permien par des conglomérats à éléments siliceux, grès variés et argiles rouges. (Figure 9)

3.3. Les terrains secondaires

Ils sont représentés par :

3.3.1. Le Trias

Il forme des pointements isolés assez nombreux dans la partie est du Zaccar et dans le mont de Chenoua. Il est formé de calcaires jaunâtres, d'argiles rouges ou bariolées et de dolomie.

3.3.2. Le Jurassique

Il est formé de calcaire dur comportant quelque fois silex et constitue les lignes de crêtes, les pics et les falaises abrupts. On rencontre cette formation sur le versant est du Chenoua dépourvu de sols et de couverture végétale. (Figure 9)

3.3.3. Le Crétacé

Très largement dominant dans le périmètre d'étude, il se décompose en trois étages distincts :

- **Le Crétacé inférieur** : il constitue les massifs centraux et les lignes de crêtes du Zaccar (Dj. Boumaad). Il est composé de schistes, de grès, de quartzites et de calcaires.

L'Albien, formé d'argiles brunes gréseuses et de grès quartziteux, se rencontre surtout dans la forêt de Tizi Franco et de Bou Harb.

Cette formation apparaît également au Sud de Menacer où le chêne-liège prolifère sur des grès.

- **Le Crétacé moyen** : Il est représenté par le Cénomaniens et le Turonien observé dans le versant nord et sur de Djebel Nador. Le Cénomaniens dominant est caractérisé par une

alternance de marne argileuses ou de marno-calcaires tendres et roches calcaires dures. L'érosion a créé un relief accusé par enlèvement des marnes qui forment les bas-fonds et les vallées. Les calcaires durs forment les crêtes rocheuses. Ces formations donnent rarement naissance à des sols cultivables. C'est un substrat géologique à vocation essentiellement forestière.

- **Le Crétacé supérieur** : il est représenté par le Sénonien et le Danien. Il est formé par des marnes schisteuses présentant des lentilles de calcaires. Les marnes Cénomaniennes donnent naissance à des sols agricoles du moins dans les zones à topographie favorable ; sur les fortes pentes, elles sont couvertes de forêts de pins.

Ces formations géologiques sont à vocation agricole lorsque la topographie et l'épaisseur du sol sont favorables et à vocation forestière sur les hauts piémonts.

3.4. Les terrains Tertiaires

3.4.1. L'Eocène

Il apparaît sous forme de petits affleurements très dispersés au Sud-est du massif du Chenoua. Il est formé de marnes, de grès, de calcaires et de calcaire gréseux de l'Eocène inférieur.

3.4.2. Le Miocène

On le retrouve principalement dans la plaine de l'oued Messelmoune et de Sidi Ghiles. Il est représenté par plusieurs assises à la base des grès grossiers. Lorsqu'elle affleure, cette assise donne des pentes rocheuses souvent ravinées.

Au-dessus, viennent s'étagier des couches argilo-gréseuses, puis des marnes parfois gréseuses du Burdigalien. Seules les argiles rouges donnent des terres agricoles. Les grès et poudingues sont recouverts par des broussailles.

3.4.3. Le Pliocène

Il occupe essentiellement la plaine de la Mitidja ouest où il affleure largement. Il forme un affleurement de couches gréseuses jaune qui se plongent par des sables à l'Ouest. Par ailleurs, les couches pliocènes sont constituées par les molasses astiennes du Sahel à l'Est de Sidi Amar.

Le Pliocène affleure aussi au Sud de Cherchell sous forme de mollasse très grossière.

A l'Est du bassin de Menacer, les éventails des cônes de déjection d'âge Pliocène supérieur, sont découpés par des petites vallées. (Figure 9)

A. Le Plaisancien : il est composé principalement d'une série épaisse et uniforme de marnes grises et blanches qui présentent localement des bancs gréseux faiblement glauconieux à la base, avec des intercalations de lentilles gréseuses vers le sommet. (Figure 9)

B. L'Astien : il est bien développé sur les bordures de la plaine et est limité à sa base par un niveau à glauconie souvent fossilifère et surmonté d'une molasse astienne. Le niveau à glauconie, presque toujours présent dans le Sahel d'Alger, a une épaisseur qui varie de 10 cm à 10 m.

Au-dessus du niveau à glauconie, on rencontre à la base de l'Astien les marnes gréseuses fossilifères d'une quinzaine de mètres d'épaisseurs, ensuite des bancs gréseux où apparaissent des lits de conglomérats à petits galets provenant de l'Atlas, Ces bancs sont accompagnés d'intercalations de grès coquillers à ciment calcaire. Vers le haut de la série, on trouve des grès sableux et calcaires coquillers d'une quarantaine de mètres d'épaisseurs.

3.5. Les terrains quaternaires

Les formations Quaternaires, généralement meubles, donnent des sols alluviaux profonds à vocation agricole par excellence, elles couvrent les plaines littorales, et les terrasses alluviales des principaux oueds (Nador, Mazafran, El Hachem, Messelmoune et Damous).

Les plaines littorales sont formées par les alluvions actuelles des plages, les dunes actuelles et anciennes (dunes consolidées), des alluvions anciennes ou récentes donnant généralement des sols sableux convenant parfaitement aux cultures maraichères.

Les terres des terrasses alluviales des oueds sont de texture variable selon les endroits, selon leur âge et selon leurs positions géomorphologiques. Ces terrasses sont le plus souvent formées d'excellentes terres agricoles localement noyées dans des cônes de déjection et des dépôts torrentiels.

Ces formations sont visibles au Nord et au Centre de la plaine pourraient se placer soit à la fin du cycle pliocène (Astien supérieur), soit dans le Quaternaire ancien (Calabrien). Ces dépôts marins d'une trentaine de mètres d'épaisseurs reposent en discordance sur l'Astien grésocalcaire et sont formés de sable mêlé de galets, de conglomérats et de microconglomérats à ciment calcaire. Ils sont parfois surmontés par des dépôts alluvionnaires d'âge probablement villafranchien. Ce dernier est connu sous le nom de formations de marnes d'El-Harrach. C'est une séquence relativement uniforme d'argiles jaunâtres ou grise par endroits avec quelques cailloutis et lentilles de graviers. Son épaisseur varie entre 2 et 6 mètres.

4. Contexte géologique de la plaine de l'Oued Nador

La zone d'étude fait partie du domaine tellien constituant la ride du Sahel. Elle est formée de sédiments plio-quaternaires. La Mitidja forme une dépression synclinale, riche en formations récentes à remplissage néogène et remblaiement quaternaire, d'orientation OSO-ENE. Cette zone sépare deux reliefs (figure 9).

- Au Nord, l'anticlinal du Sahel d'une altitude moyenne de 267 m, isole la plaine de la Mitidja de la mer méditerranée.
- Au Sud, le massif à schistosité de Blida- Mouzaïa qui tranche brusquement la plaine, Il est caractérisé par d'épaisses séries méso-cénozoïques.

Localement, la plaine de l'Oued Nador est un synclinal orienté globalement NNE-SSO à remplissage plio-quaternaire, délimité à l'Ouest par des terrains d'âge miocène (faciès argileux, roches éruptives), à l'Est et au Sud par des affleurements calcaro-gréseux astiens.

4.1. Description lithostratigraphique de la zone d'étude

4.1.1. Le Pliocène : Les formations du Pliocène apparaissent essentiellement dans la partie sud et est de la plaine. Elles présentent des affleurements sous forme de dépôt sédimentaires de nature marneuse et molassique.

4.1.2. Le Plaisancien : Selon Glangeaud (1952), le Plaisancien apparaît comme une série uniforme de marnes bleues, légèrement gréseuse à la base et avec des intercalations de lentilles gréseuses vers le sommet. L'épaisseur de cette formation augmente du Nord vers le Sud. Au-dessous, se trouve le conglomérat du Mazafran qui marquerait la limite entre le Miocène et le Pliocène. Il est caractérisé par un niveau à glauconie à la base surmonté d'une molasse appelée molasse astienne.

- Le niveau à glauconie : Il marque la limite entre le Plaisancien et l'Astien. Il affleure souvent dans le Sahel à une épaisseur de 10 cm à 10 m.

Ce niveau à glauconie est très fossilifère. Il permet de séparer les marnes bleues, contenant quelques bancs de grés à leur sommet, des marnes gréseuses et des grés calcaires de la molasse astienne. Ce niveau n'apparaît pas systématiquement sur la plupart des coupes et logs des forages et piézomètres réalisés au niveau de la plaine de l'Oued Nador.

- Molasse astienne : Elle se trouve au-dessus du niveau à glauconie. Du bas vers le haut, nous trouvons les formations suivantes :
 - Les marnes gréseuses fossilifères.

- Des bancs gréseux contenant des lits de conglomérats à petits galets provenant de l'Atlas et qui sont accompagnés d'intercalations de grès coquillières à ciment calcaire.
- Les grès sableux et calcaires coquilliers d'une épaisseur de 40 m.

4.1.3. La série quaternaire (Calabrien-Villafranchien) : Selon (Ayme A. et al., 1954), les formations visibles au Nord de la plaine pourraient se placer soit à la fin du cycle pliocène (Astien supérieur), soit dans le Quaternaire ancien (Calabrien). Ces dépôts marins d'une trentaine de mètres d'épaisseur reposent en discordance sur l'Astien grésocalcaire et sont formés de sables mêlés de galets, de conglomérats et de microconglomérats à ciment calcaire. Ils sont parfois surmontés de dépôts alluvionnaires dits de Maison carrée d'âge villafranchien.

4.1.4 Roches éruptives : Les roches éruptives d'âge vindobonien, semblable à celles des environs d'Alger et de Hadjout, affleurent sur le flanc sud et nord du massif du Chenoua. Ces roches sont en contact avec la série du miocène inférieur (Burdigalien) et des alluvions récentes. Selon Glangeaud, 1952, Il s'agit d'une bande de roches rhyolitiques (Andésites, liparites) probablement d'âge burdigalien.

4.2. Coupes des ensembles lithologiques

Les trois coupes lithologiques, réalisées au niveau de la basse vallée de l'Oued Nador, permettent de distinguer trois grands ensembles (Figure 7) :

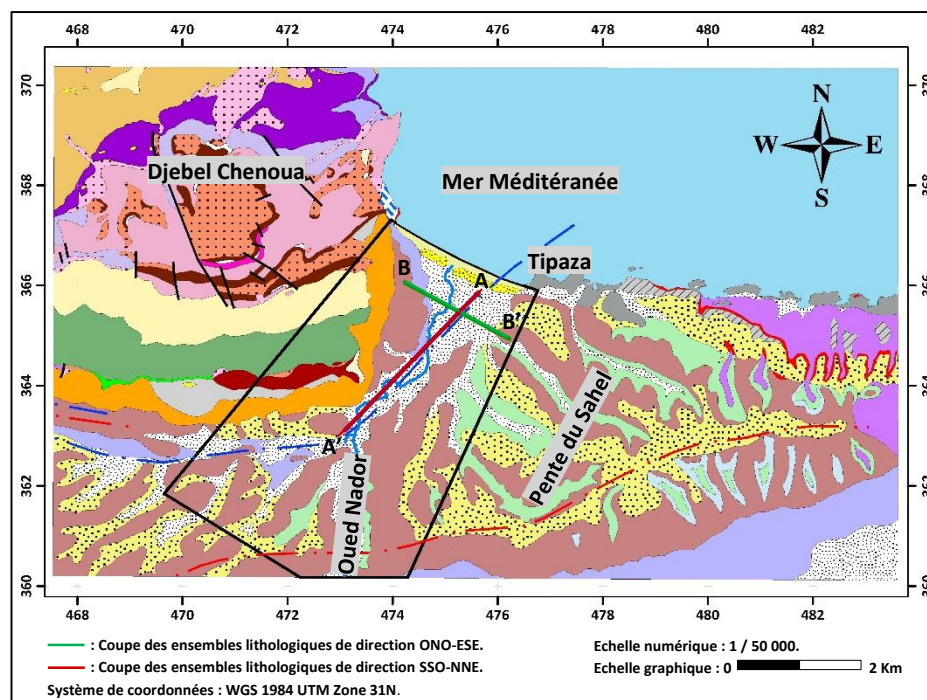


Figure 7. Carte de localisation des coupes des ensembles lithologiques.

- Un recouvrement d'une quarantaine de mètres d'épaisseur, à dominance argileuse, avec quelques intercalations de galets, de graviers et de sables dont l'épaisseur n'excède pas cinq mètres (5m).
- La molasse astienne sous-jacente d'une épaisseur de quarante mètres (40m), présente des grandes variations de faciès depuis une molasse argileuse jusqu'à une molasse compacte fissurée.
- Le substratum imperméable constitué par les marnes du Plaisancien. La transition entre la molasse astienne et les marnes du Plaisancien se fait progressivement par l'intermédiaire d'un niveau marno-sableux épais d'une vingtaine de mètres (20 m). (Figure 8)

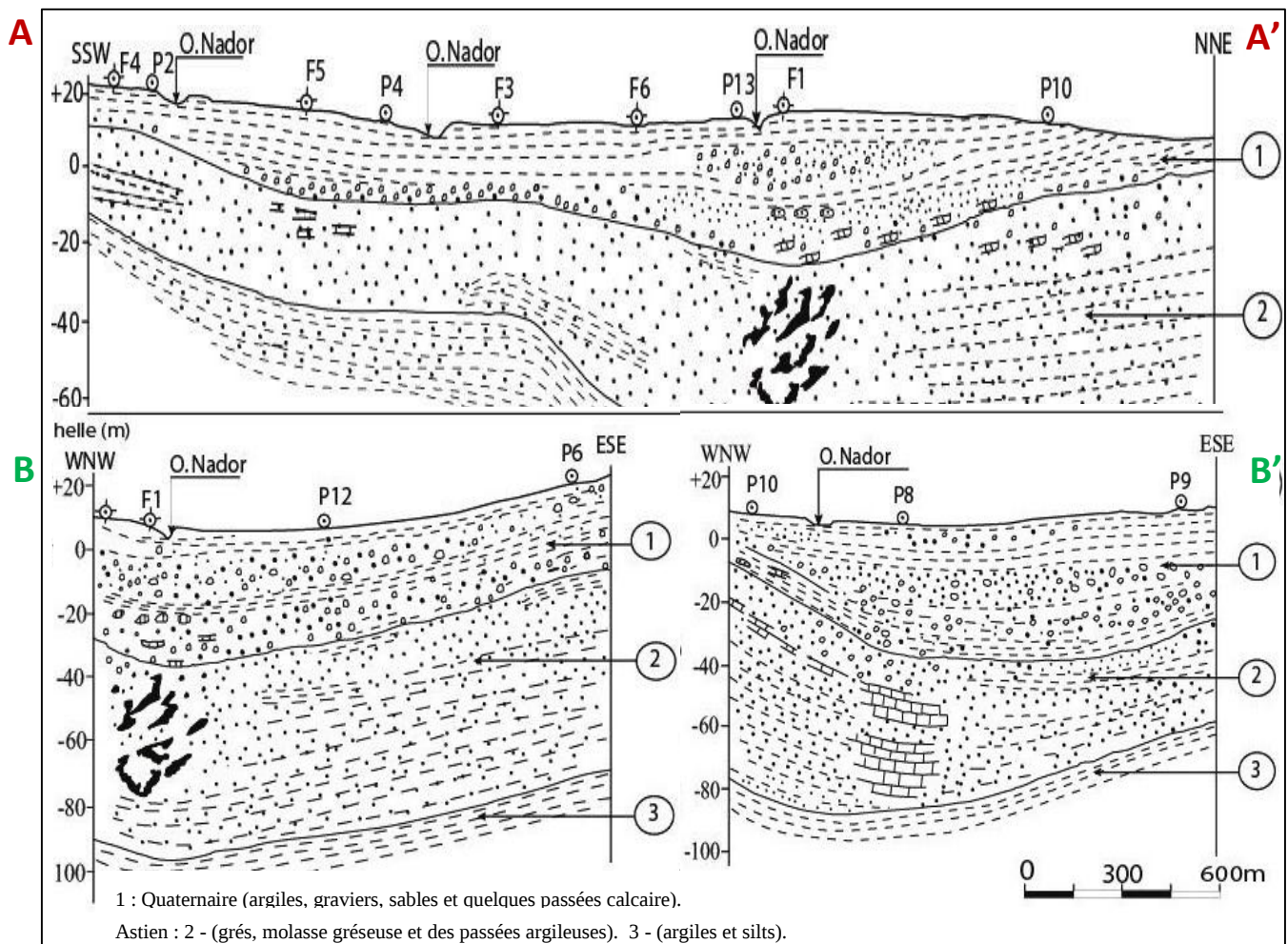


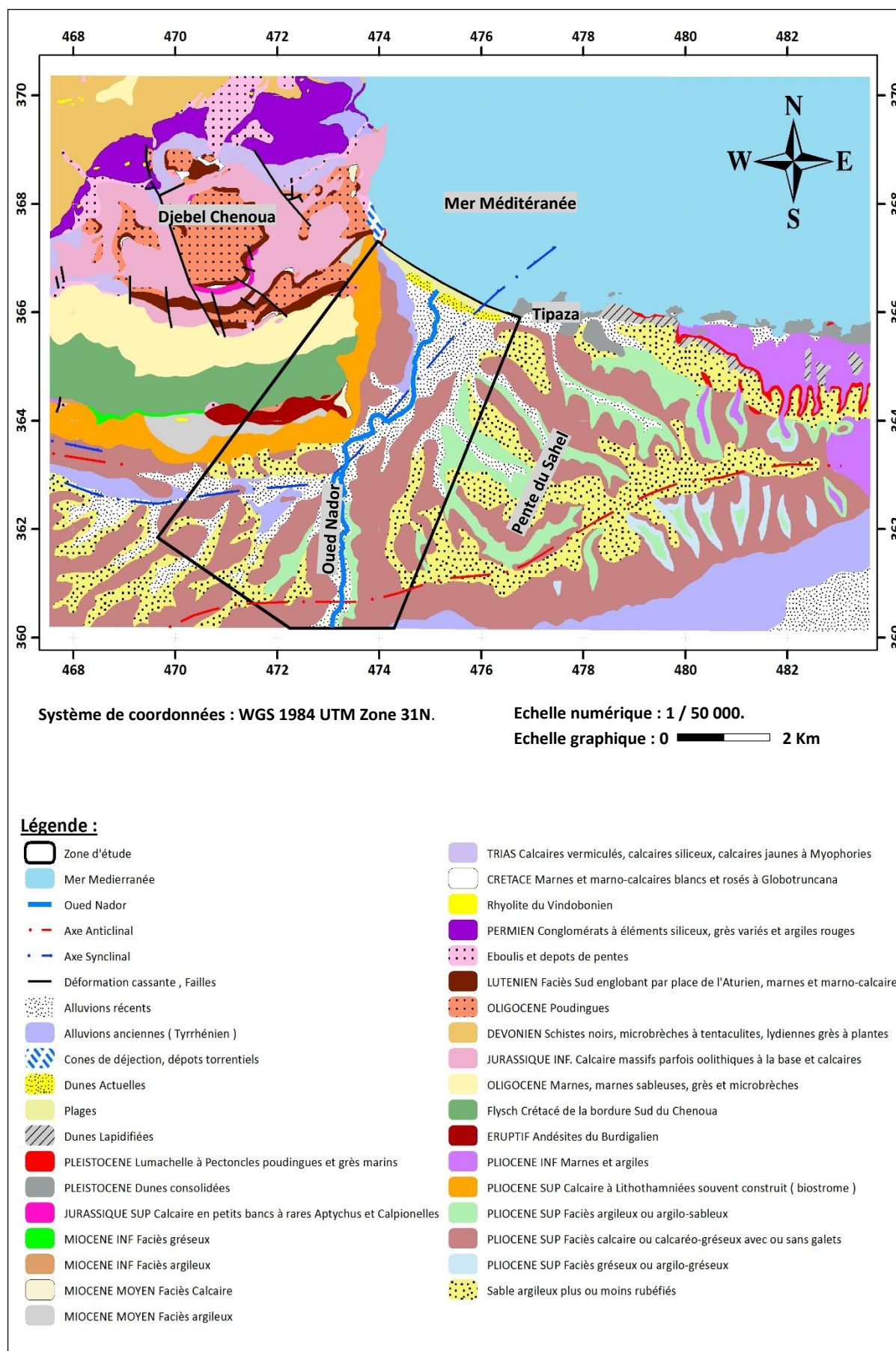
Figure 8. Coupes montrant les ensembles lithologiques. (Hachemi, 2016).

5. Conclusion

La région de Tipaza est située dans le domaine alpin caractérisé par une géologie complexe avec affleurement des massifs anciens formés de schistes noirs, micro brèches, grès, conglomérats à éléments siliceux, massif secondaire est représenté par calcaires jaunâtres, argile rouge et dolomie, massif tertiaires qui est formé de marnes, grès, calcaires et les terrains quaternaires, en générale, meuble qui donnent des alluvions, sols sableux. On rencontre aussi la chaîne calcaire ou dorsale kabyle, l'Oligocène kabyle et les flyschs (Crétacé à Miocène).

Dans la plaine de l'Oued Nador, on rencontre le Pliocène, le Plaisancien (marnes bleues), le quaternaire (microconglomérats à ciment calcaire)

Au sein de cette structure très accidentée des plaines de l'Oued Nador s'est formée par subsidence et remplie des matériaux détritiques plio-quaternaire.

Figure 9. Extrait **digitalisé** de la carte géologique de Tipaza 1/50 000.

CHAPITRE 3 : ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction

Dans toute étude des ressources hydriques ou des potentialités en eau d'une région donnée, il est primordial de démontrer le rôle que jouent les facteurs climatiques sur la variabilité des écoulements en surface et l'infiltration vers le sous-sol. Ceci souligne donc l'impact des deux (02) facteurs climatiques principaux, à savoir la température et le rôle qu'elle joue dans le phénomène d'évaporation, et les précipitations en tant qu'élément d'écoulement de surface et recharges des réserves souterraines.

L'étude des caractéristiques climatiques permet de quantifier les paramètres tel que la lame d'eau écoulée, l'infiltration et l'évapotranspiration, on se basant sur les précipitations et la température.

Dans ce chapitre, nous tenterons, à partir des données disponibles, de faire ressortir les caractéristiques générales du climat dans notre zone d'étude, ses variations spatiales et aussi ses irrégularités temporelles. Cinq stations pluviométriques (Attatba Cave, Hadjout, Ain Tagourait, Djebabra et Boukourdane) sont retenues dans notre étude, avec une période d'observation allant de 1982 à 2015.

2. Aperçu sur le climat à l'échelle régionale et locale

Du point de vue climatique, l'Algérie est subdivisée du Nord au Sud, selon (Cote, 1998 *in* Djenba, 2015) en cinq zones bioclimatiques en relation avec le relief et les précipitations :

Le domaine humide : n'est limité pratiquement qu'à la côte surtout à l'Est algérien.

Le domaine subhumide : qui remonte parfois jusqu'à la côte à l'exception du centre.

Le semi-aride : remonte dans les bassins intérieurs du Tell (Mila, Guelma) et il est particulièrement développé dans les Hautes Plaines qui le prolongent plus loin vers le Sud.

Le domaine subaride : qui se limite au flanc Sud de l'Atlas saharien.

Le domaine aride : qui occupe pratiquement tout le Sahara.

Cette zonation est régie principalement par le degré d'influence des courants froids issus du front polaire, qui s'atténuent en allant vers le Sud. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. Le climat de l'Atlas tellien présente tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagnes pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques.

De par sa position méditerranéenne, la Wilaya de Tipaza situé au Nord de l'Algérie est soumise à un climat tempéré humide, avec un hiver pluvieux et doux et un été chaud et sec.

3. Précipitations

3.1. Collecte des données

Pour mieux caractériser le régime climatique au sein de notre région, un réseau de surveillance a été mis en service. Ce dernier est disposé de quatre stations pluviométriques et une station climatique réparties d'une façon plus ou moins homogène sur l'ensemble du bassin versants, couvrant le territoire de la wilaya sur une période de 34 ans (1982-2015).

Les différentes caractéristiques, relatives à ces stations présentées dans la figure 10 sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 6. Caractéristiques des stations pluviométriques utilisées. (ANRH)

Stations	Code ANRH	Coordonnées Lambert		Z (m)	Période d'observation
		X (m)	Y (m)		
Djebabra	20307	476 250	343 900	440	1982-2015
Pont CW7 Hadjout	20325	475 850	358 850	59	1982-2015
Ain Tagourait	20403	492 050	366 850	60	1982-2015
Attatba Cave	21022	495 450	363 150	60	1982-2015
Boukourdane	20329	464 300	359 900	110	1982-2015

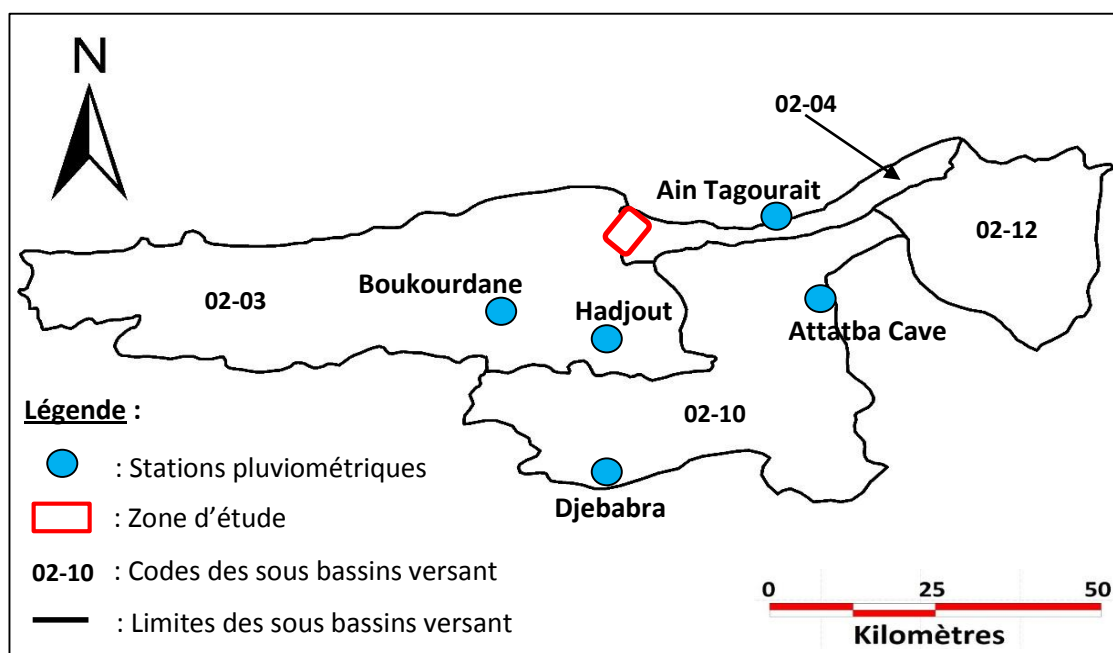


Figure 10. Carte de situation des stations pluviométriques.

3.2. Comblement des lacunes

Bien que le nombre et la répartition de ces stations paraissent à première vue satisfaisant pour mener cette étude, la réalité est toute autre car les informations que fournissent ces stations sont incomplètes pour ce qui concerne la pluviométrie, à l'exception des paramètres climatiques.

Les lacunes observées sur les séries de données ont été comblées en utilisant la commande « Bouche trou » du logiciel Hydrolab développé par J.P. Laborde et N. Mouhous en 1998.

Cette méthode intervient suite à la difficulté de combler les lacunes d'un grand nombre de stations sur la même période d'observation (de préférence trentenaire) par les méthodes régressives habituellement utilisées, elle a l'avantage de combler rapidement et simplement les lacunes avec la partie la plus fiable du tableau de données originales.

Cette méthode repose sur le principe de l'analyse en composantes principales (ACP), sachant qu'il n'est pas possible de faire une ACP sur un tableau incomplet, un premier comblement sera fait et sera amélioré par la suite.

Initialement, seront calculés les moyennes et les écarts-types expérimentaux $Mx_0(j)$ et $\sigma x_0(j)$ des précipitations pour chaque station j et sur les seules années réellement observées :

$$[Mx_0] = [\sigma x_0] = \begin{vmatrix} Mx_0(1) & Mx_0(2) & \dots & Mx_0(j) \\ \sigma x_0(1) & \sigma x_0(2) & \dots & \sigma x_0(j) \end{vmatrix}$$

Ce qui permet d'évaluer la matrice des valeurs centrées réduites : $u(i,j) = \frac{x(i,j) - Mx_0(j)}{\sigma x_0(j)}$ et de calculer pour chaque observation la moyenne des valeurs centrées réduites disponibles : $\bar{u}(i)$

$$[u] = \begin{vmatrix} u(1,1) & \text{inconnu} & u(1,3) & \dots & u(1,j) \\ u(2,1) & u(2,2) & u(2,3) & \dots & u(2,j) \\ u(i,1) & u(i,2) & u(i,3) & \dots & u(i,j) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{u}(1) \\ \bar{u}(2) \\ \bar{u}(j) \end{vmatrix}$$

Il sera possible, par la suite, de remplacer chaque valeur inconnue $x(i,j)$ par une valeur correspondant à la variable réduite moyenne pour cette observation. $xe_0(i,j) = \frac{\bar{u}(i) - Mx(j)}{\sigma x_0(j)}$

On obtient alors une première matrice complète. Une A.C.P. est alors effectuée sur cette matrice $[x_0]$ et nous obtenons les projections des variables $[a_1]$ et des observations $[c_1]$.

La difficulté réside dans le choix du nombre de composantes principales à utiliser dans les reconstitutions et seules seront retenues les k premières composantes ainsi que les matrices des moyennes et écarts-types.

Il est alors possible de reconstituer chaque observation manquante $x(i,j)$ par une nouvelle valeur estimée $xe1(i,j)$:

$$xe1(i,j) = Mx1(j) + \sigma x1(j) * \{a1(1,j)c1(i,1) + a1(2,j)c1(i,2) + \dots + a1(k,j)c1(i,k)\}$$

Cette estimation n'est pas très correcte puisque l'A.C.P a été effectuée sur une matrice "complétée" à partir de moyennes mensuelles, cependant $xe1(i,j)$ est une meilleure estimation que $xe0(i,j)$ puisqu'elle tient compte des observations faites aux autres stations pour cette année j.

On peut donc réitérer le processus en remplaçant dans la matrice $[xo]$ chaque $xe0(i,j)$ par les $xe1(i,j)$ adaptés. On obtient ainsi une nouvelle matrice $[x1]$, on recommence alors une A.C.P. sur la matrice $[x1]$ permettant d'obtenir de nouvelles matrices $[c2]$, $[a2]$, $[Mx2]$ et $[\sigma x1]$ d'où on tirera de nouvelles estimations $xe2(i,j)$.

L'automatisation de ces démarches est très simple. Elle peut très facilement être réalisée avec l'application appelée HYDROLAB.

Cette macro complémentaire d'Excel, HYDROLAB, a été utilisée pour compléter les lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle.

Pour nos données, un comblement des lacunes au niveau des séries pluviométriques à échelle mensuelle a été effectué, en premier lieu, pour les quatre (04) stations ayant une longue période d'observation, à savoir : Station d'Attatba Cave, Station de Hadjout, station de Djebabra et la station d'Ain Tagourait, par contre la station de Boukourdane a été écartée en raison de l'étendue courte des données de cette série (l'observation commence en 1987), mais elle sera comblée ultérieurement.

3.3. Pluviométrie mensuelle

Pour évaluer la variation des précipitations moyennes mensuelles, nous avons établi les histogrammes relatifs à chaque station, en rassemblant la station d'Attatba Cave et la station d'Ain Tagourait pour la région Est et la station de Djebabra, la station de Hadjout et la station de Boukourdane pour la région Ouest. Les données utilisées sont dans l'annexe 1

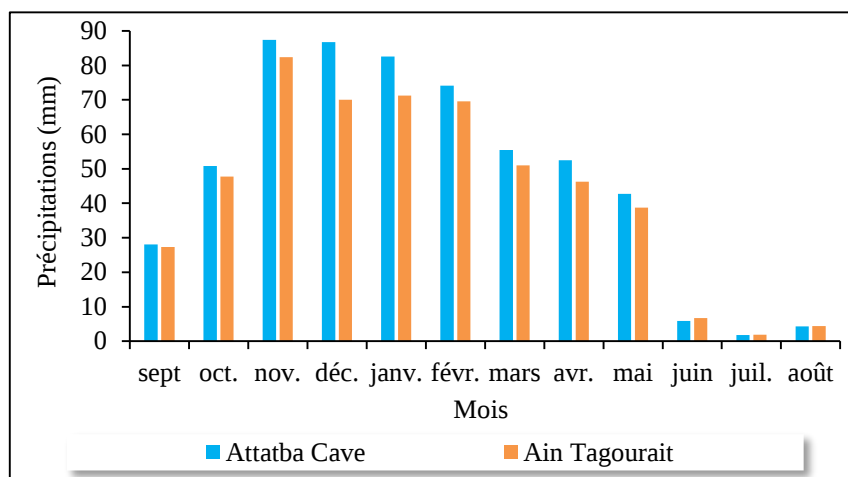


Figure 11. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au niveau des stations d'Attatba Cave et Ain Tagourait (1982-2015).

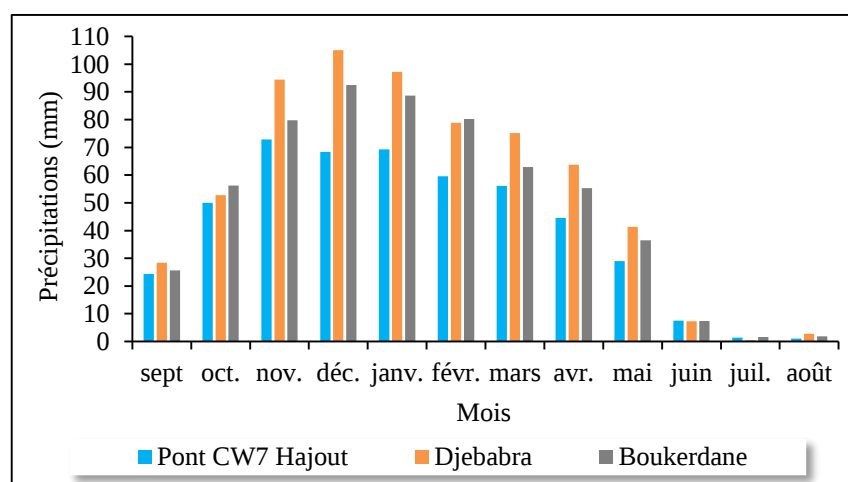


Figure 12. Histogramme des précipitations moyennes mensuelles au niveau des stations de Hadjout, station de Djebabra (1982-2015) et Boukourdane (1987-2015).

• Interprétation des histogrammes :

D'après les histogrammes (Figure 11 et 12), la variation des précipitations mensuelles sur le plan temporel est caractérisée par le même comportement dans toutes les stations de notre zone d'étude. La répartition des précipitations mensuelles est irrégulière d'un mois à l'autre dans l'ensemble des stations.

A l'échelle mensuelle, on remarque que dans la plupart des stations dans notre zone d'étude, le mois le plus pluvieux est le mois de décembre avec un maximum de 105,04 mm enregistré à la station de Djebabra et de 92,44 mm mesurée à la station de Boukourdane, cependant, à Attatba Cave, le maximum de pluies est enregistré en mois de novembre (87,39) mm. Par ailleurs, dans la majorité des stations, le mois de plus sec est celui de juillet, avec une valeur minimale de 0,51 mm (station de Djebabra).

3.4. La Pluviométrie annuelle

Les diagrammes montrés dans les figures qui suivent illustrent la distribution des précipitations annuelles aux différentes stations dans la région de Tipaza sur la période 1982-2015. Annexe 2

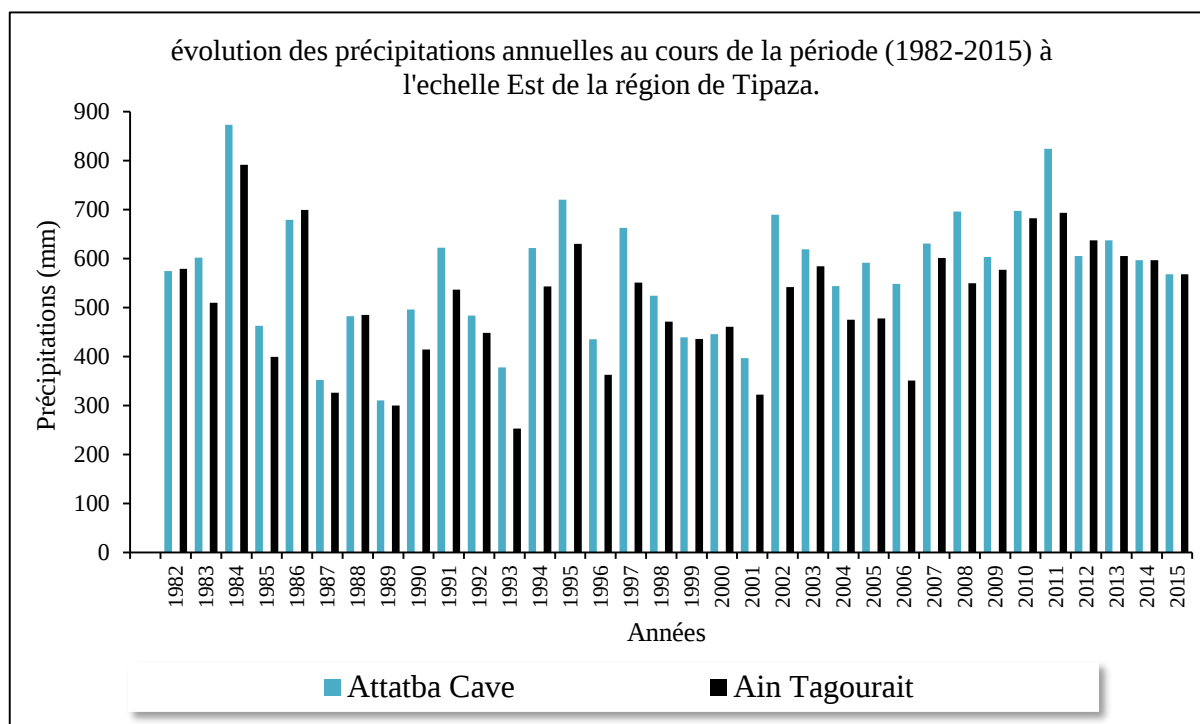


Figure 13. Variation des précipitations annuelles au niveau des stations d'Attatba Cave et Ain Tagourait 1982-2015.

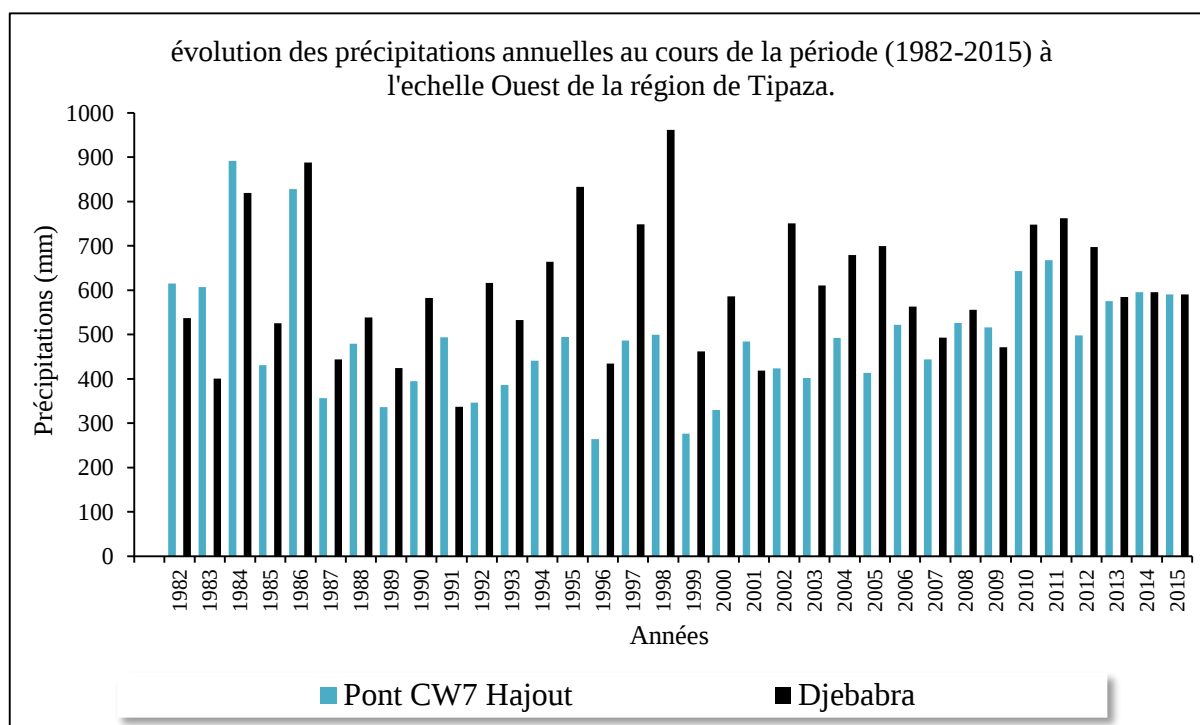


Figure 14. Variation des précipitations annuelles au niveau des stations de Hadjout et Djebabra 1982-2015.

Les stations de Ain Tagourait et Attatba Cave qui caractérisent la région orientale de la wilaya de Tipaza (figure 13) révèlent deux (02) périodes pluvieuses, dont la première est enregistrée entre 1982 et 1989 avec un maximum de 873.8 mm dans la station de Attatba Cave enregistré en 1984 et la deuxième période s'étale de 2007 à 2014 avec un maximum de 824.7 mm enregistré en 2011 au niveau de la station de Attatba cave.

Les stations de Djebabra et de Hadjout, qui se localisent dans la région occidentale de la wilaya de Tipaza (figure 14), montrent une période pluvieuse qui s'étale de 1991 à 1998 avec un maximum de 961,6 mm enregistré dans la station de Djebabra en 1998, autre période pluvieuse entre 2006 et 2012 avec une pluviométrie maximale de 762,4 mm dans la station de Djebabra en 2011.

4. Températures

La température est un facteur très important qui régit les paramètres climatiques. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des données de la station hydrométrique de Boukourdane la plus proche de la zone d'étude.

4.1. Evolution de la température sur la période 1987-2015

A défaut de série de température mesurée dans la zone d'étude, nous avons adopté, dans la présente étude, les données de la station de Boukourdane qui se situe dans la périphérie de la plaine de l'Oued Nador.

La base de données mise à notre disposition par les services de l'ANRH, est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 7. Températures minimales, moyennes et extrêmes enregistrées dans la station de Boukourdane (1987-2015).

	Sep.	oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
T.MOY min (C°)	16,39	12,33	9,38	7,26	5,62	5,87	7,95	9,66	12,84	17,5	19,84	19,63
T.MOY moy (C°)	23,1	19,82	15,71	12,62	11,12	11,78	13,64	15,46	18,8	22,32	26,26	26,49
T.MOY max (C°)	30,94	28,63	22,47	18,37	17,96	18,33	20,61	22,41	26,3	29,66	33,45	33,42

T.MOY min (C°) : Température Moyenne minimale.

T.MOY moy (C°) : Moyenne de la Température Moyenne.

T.MOY max (C°) : Température Moyenne maximale.

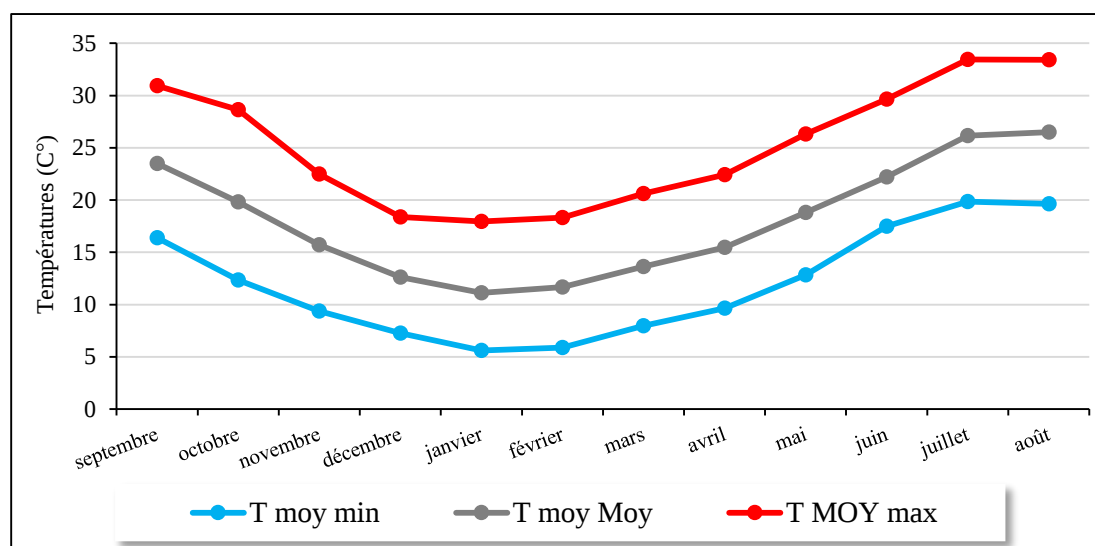


Figure 13. variations de la températures mensuelle de la station de Boukerdane (1987-2015).

La température moyenne annuelle pour la période 1987 - 2015 est de 18,4 °C. L'année hydrologique est subdivisée en deux périodes :

- Une période froide (saison humide) s'étale du mois de novembre jusqu'au mois mai avec une température moyenne la plus basse enregistrée au mois janvier (11,1 °C).
- Une période chaude (saison sèche) débute au mois juin et de termine au mois d'octobre. La température moyenne la plus élevée de 26,4 °C est observée au mois d'août.

L'amplitude thermique (l'écart entre la température minimale et maximale en un même lieu pendant une durée de temps déterminée) varie avec les mois et les saisons, mais cet écart reste toujours peu important, il en est de même pour l'amplitude thermique annuelle car la différence entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud ne dépasse pas les 15° C.

4.2. Diagramme Ombrothermique

On l'appelle aussi la courbe pluviométrique. Elle est représentée graphiquement par la combinaison de deux facteurs, la température (C°) et la précipitation (mm) ; Les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations selon la définition de GAUSSEN 1958.

Notons qu'une saison humide débute au mois d'octobre et se termine au mois de mai durant laquelle le total pluviométrique est égal ou supérieur au double de la température ($P = 2T^\circ$) et une saison sèche qui s'étale du mois de juin jusqu'au mois de septembre pendant laquelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température ($P \leq 2T$).

Dans le cas de la plaine de l'Oued Nador, on s'est appuyé sur les observations effectuées à la station de Boukourdane entre 1987 et 2015. Les valeurs de la température moyenne mensuelle et des précipitations sont données dans le tableau suivant.

Tableau 8. Moyenne mensuelle des températures et précipitations enregistrées à la station de Boukourdane (1987-2015).

	Sep.	oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.
Précipitation (mm)	25,66	56,21	79,82	92,44	88,7	80,21	62,89	55,33	36,47	7,44	1,64	1,84
Températures (C°)	23,1	19,82	15,71	12,62	11,12	11,78	13,64	15,46	18,8	22,32	26,26	26,49

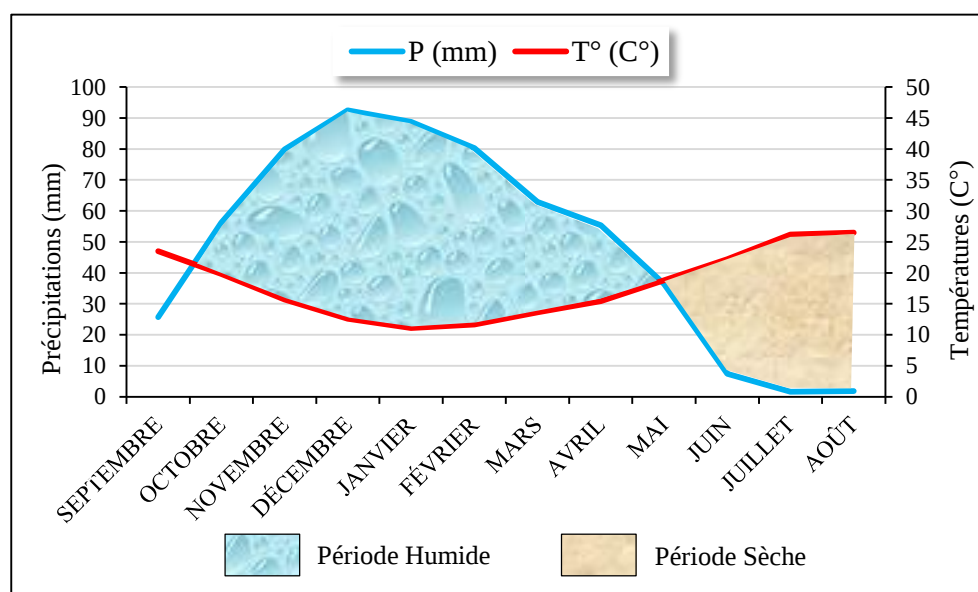


Figure 14. Diagramme Ombrothermique établi pour la plaine de l'Oued Nador (1987-2015).

Le diagramme pluviométrique (figure 16), montre deux saisons bien distinctes :

- Une saison sèche et chaude qui s'étale du mois de mi-mai jusqu'à la fin du mois de septembre, marquée par une forte évaporation provoquée par des températures élevées.
- Une saison humide plus longue, qui s'étend du début du mois d'octobre jusqu'à mi-mai, caractérisée par une précipitation importante qui atteint un maximum au mois de décembre avec 92,44 mm.

La détermination de ces périodes est d'une grande importance pour l'hydrologie par rapport à l'estimation des besoins en eau.

5. Humidité relative

L'humidité relative de l'air ou l'état hygrométrique montre l'état de l'atmosphère en expliquant s'il est plus ou moins proche de la condensation. Elle correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température. Elle est exprimée en %.

Les mesures de l'humidité relative enregistrées dans la zone d'étude portent sur la période 1987-2015 et sont récapitulées dans le tableau ci-après.

Tableau 9. Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative au niveau de la station de Boukourdane (1987-2015).

Mois	Sep.	oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.
Humidité (%)	77	75	73	74	75	72	74	73	74	75	78	80

La figure 17 montre que la valeur de l'humidité relative la plus élevée est enregistrée au mois d'aout (79 %) et la valeur minimale est observée en hiver, au mois de février (72 %). Il est à signaler aussi que l'humidité relative dans cette région augmente le matin et le soir de la journée par rapport à midi du jour.

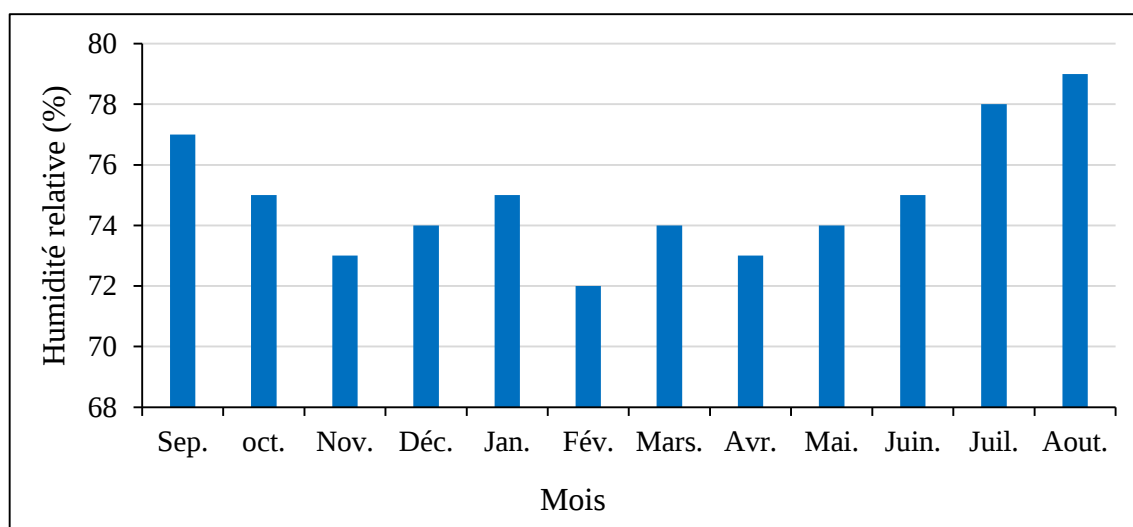


Figure 15. Variation de l'humidité relative mensuelle de la station de Boukourdane (1987-2015).

6. Vitesse du vent

Elle représente l'un des facteurs les plus déterminants du régime pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat. Donc, il convient de connaître la répartition mensuelle de la vitesse des vents, leur direction et leur fréquence. Le tableau suivant donne la vitesse du vent mesurée à la station de Boukourdane dans la période de 1987 à 2015.

Tableau 10. Valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent dans la station de Boukourdane (1987-2015).

Mois	Sep.	oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout
Vent moy (Km/h)	4,25	4,31	4,41	4,31	4,80	6,71	4,59	4,35	4,38	4,67	5,39	4,38

Dans notre région d'étude les vents dominants sont ceux qui soufflent du Nord-est et de l'Ouest avec des vitesses moyennes mensuelles variant entre 4,25 Km/h au mois de septembre à une vitesse moyenne maximale de 6,71 Km/h au mois de février. Par ailleurs, les vitesses moyennes sont, généralement, les mêmes pour toute l'année à l'exception du mois de février (figure 18).

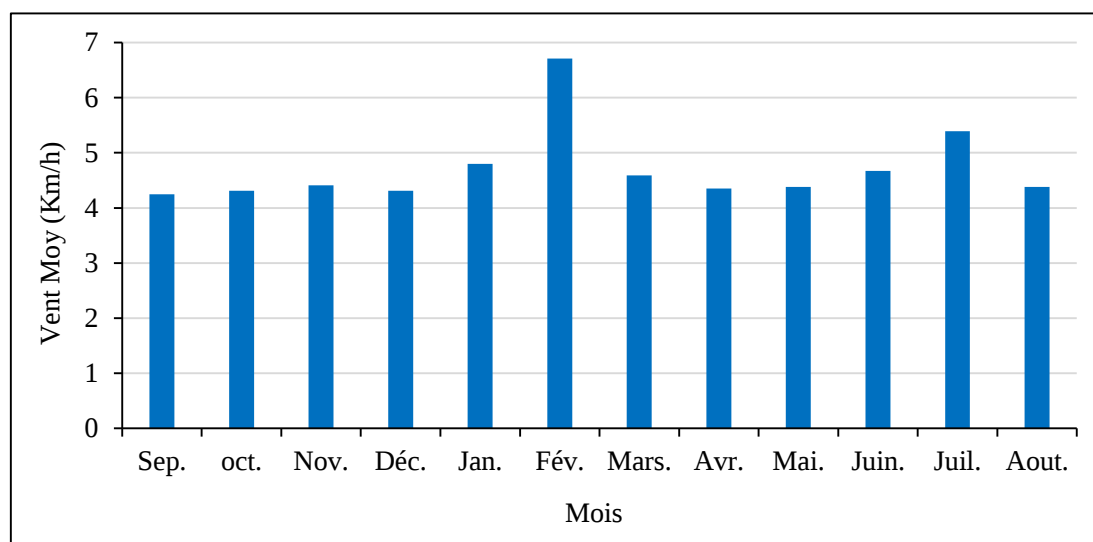


Figure 16. Variation de la vitesse du vent mensuelle de la station de Boukourdane (1987-2015).

7. Le bilan hydrologique

L'étude du bilan hydrologique permet d'évaluer la répartition des volumes d'eau reçus par un bassin versant entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation). Sur une période d'observation, suffisamment longue. La formule classique du bilan hydrologique s'écrit comme suit :

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

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

R : Ruissellement moyen annuel en (mm).

I : Infiltration moyenne annuelle en (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm).

ΔS : Variation de la réserve.

7.1. Evapotranspiration

C'est un paramètre important pour le calcul du bilan hydrologique. Cependant, il reste difficile à évaluer car il englobe divers phénomènes tels que l'évaporation directs (par retour dans l'atmosphère à partir des réservoirs de surface et des réservoirs souterrains) et la transpiration des plantes.

Les facteurs déterminant l'évapotranspiration sont essentiellement : la température, l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, le vent et la pression atmosphérique.

Ce terme du bilan hydrologique englobe deux notions : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

7.1.1. Evapotranspiration potentielle

C'est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant.

La détermination de l'ETP se fait en utilisant une méthode simple, qui ne fait intervenir que la température. C'est la formule de Thornthwaite qui s'exprime par l'expression suivante

$$ETP_c = 1,6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a K$$

Où :

ETP_c = Evapotranspiration potentielle corrigée en (mm).

T = Température moyenne du mois en ($^{\circ}C$).

$$a = 1,6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0,5$$

I = indice thermique annuel : $I = \sum_i^{12} i$

i = indice thermique mensuel : $i = (T/5)^{1,514}$

K = Coefficient de correction dépendant de la latitude de la station hydroclimatique.

Les valeurs obtenues par l'application de cette formule sont mentionnées dans le tableau suivant.

Tableau 11. Valeurs de l'ETP estimées par la formule Thornthwaite.

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Année
T(C°)	23,1	19,82	15,71	12,62	11,12	11,78	13,64	15,46	18,82	22,32	26,26	26,49	18,09
ETP (mm)	104,80	77,86	51,12	33,93	28,98	32,03	41,05	51,28	72,66	97,80	130,80	133,75	855,57
i	4,29	7,86	5,49	3,86	3,39	3,70	4,56	5,51	7,42	9,56	12,24	12,48	80,36
K	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,80	-
ETP_c (mm)	91,17	66,01	52,50	36,76	35,03	39,13	50,87	59,47	74,80	94,86	112,47	113,67	826,74

ETP = évapotranspiration potentielle obtenues par la formule de Thornthwaite.

ETP_c = évapotranspiration potentielle corrigée.

L'application de la formule de Thornthwaite a permis d'estimer l'ETP annuelle à 826,74 mm.

7.1.2. Evapotranspiration réelle

Ce terme correspond au volume des eaux effectivement évaporée à partir des surfaces d'eau libre et des eaux souterraines et transpirée par les plantes pour une surface donnée et une période définie. Son estimation est donnée également par l'utilisation de formules empiriques, telle que : la formule de Turc, la formule de Coutagne ou celle de Wundt ou encore par la méthode du bilan de Thornthwaite.

7.1.2.1. Formule de Turc

L'ETR peut être calculé par la formule de Turc qui s'exprime comme suit :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

L : Pouvoir évaporant. C'est une limite vers laquelle tend l'ETR lorsque P devient grand.

$$L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

t : température moyenne annuelle en (C°).

En prenant la température moyenne annuelle enregistrée à la station de Boukourdane, T = 17,075 °C et P = 588,65 mm, l'application numérique donne :

$$L = 975,79$$

$$ETR = 465,73 \text{ mm.}$$

7.1.2.2. Formule de Coutagne

Cette formule qui s'exprime par $ETR = P - \lambda P^2$, exige une condition pour qu'elle soit applicable de la forme suivante :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \quad ; \quad \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,145t}$$

t : La température moyenne annuelle exprimée en °C.

L'application de ces expressions par la prise de la précipitation moyenne (588.65 mm) et la température (18,09 °C) mesuré à la station de Boukourdane a abouti aux résultats suivants :

$$0,416 < 0,557 < 1,66$$

On constate que la condition de l'application de la méthode de Coutagne est vérifiée.

On a : $ETR = P - \lambda P^2$ d'où $ETR = 464,28$ mm.

7.1.3. Bilan de Thornthwaite

Cette méthode consiste à calculer tout d'abord pour chaque mois une ETP que l'on peut assimiler au pouvoir évaporant de l'atmosphère sur le bassin considéré. On estime que le sol est saturé, lorsque sa réserve facilement utilisable (RFU) atteint une valeur de 100 mm (il est souvent pris entre 50 mm et 200 mm). Le mois de Septembre a été pris comme référence de départ, il correspond à la période où la réserve en eau du sol est épuisée. On distingue trois cas.

- 1er cas : Si $P \geq ETP$; on pose l' $ETR = ETP$ et l'excédent des précipitations sur l' ETR est emmagasiné dans l'humidité du sol et donc il augmente les réserves jusqu'à ce que ce dernier soit saturé et le reste s'infiltre.

- 2ème cas : Si $P < ETP$; l' ETR mobilise alors l'ensemble des réserves du sol jusqu'à ce qu'elle devienne égale à l' ETP .

- Si $P + RFU \leq ETP$, $ETR = P + RFU$.

- Si $P + RFU > ETP$, $ETR = ETP$.

- 3ème cas : Si $P = ETR$, une fois la réserve d'humidité du sol épuisée, l' ETR devient égale aux précipitations, on obtient alors un déficit du bilan (Thornthwaite 1948).

L'estimation des réserves utiles est basée sur la structure du terrain et le couvert végétal.

Le bilan hydrologique est effectué par rapport au sol, des apports d'eau (pluie, remontées capillaires à partir de la nappe...), et des pertes d'eau (évapotranspiration, ruissellement, infiltration...). Il exprime la différence entre les apports et les pertes d'eau dans le sol qui est égale à la variation de la réserve d'eau.

Le tableau suivant présente le bilan hydrologique moyen établi par la méthode de Thornthwaite, au niveau de la station de Barrage Boukourdane (1982-2015).

Tableau 12. Bilan hydrologique moyen obtenu par la méthode de Thornthwaite.

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
P (mm)	25.66	56.21	79.82	92.44	88.7	80.21	62.89	55.33	36.47	7.44	1.64	1.84	588.65
ETP_C (mm)	91,17	66,01	52,50	36,76	35,03	39,13	50,87	59,47	74,80	94,86	112,47	113,67	826,74
P-ETP_C	-65,51	-9,8	27,32	55,68	53,67	41,08	12,02	-4,14	-38,33	-87,42	-110,83	-111,8	
RFU	0	0	27,32	83	100	100	100	95,86	57,53	0	0	0	
ETR (mm)	25,66	56,21	52,50	36,76	35,03	39,13	50,57	59,47	74,80	64,97	1.64	1.84	498,58
D.A (mm)	65,51	9,8	0	0	0	0	0	0	36,19	29,89	110,83	111,83	364,05
E.S	0	0	0	0	36,67	41,08	12,02	0	0	0	0	0	89,77

L'analyse du tableau du bilan hydrologique nous permet de constater que l'ETP est élevée au mois de mai jusqu'au mois de septembre, avec une valeur maximale de 113,67 mm au mois d'août, rendant l'irrigation nécessaire. À partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU. Cette dernière, atteint son maximum entre les mois de janvier à avril. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock.

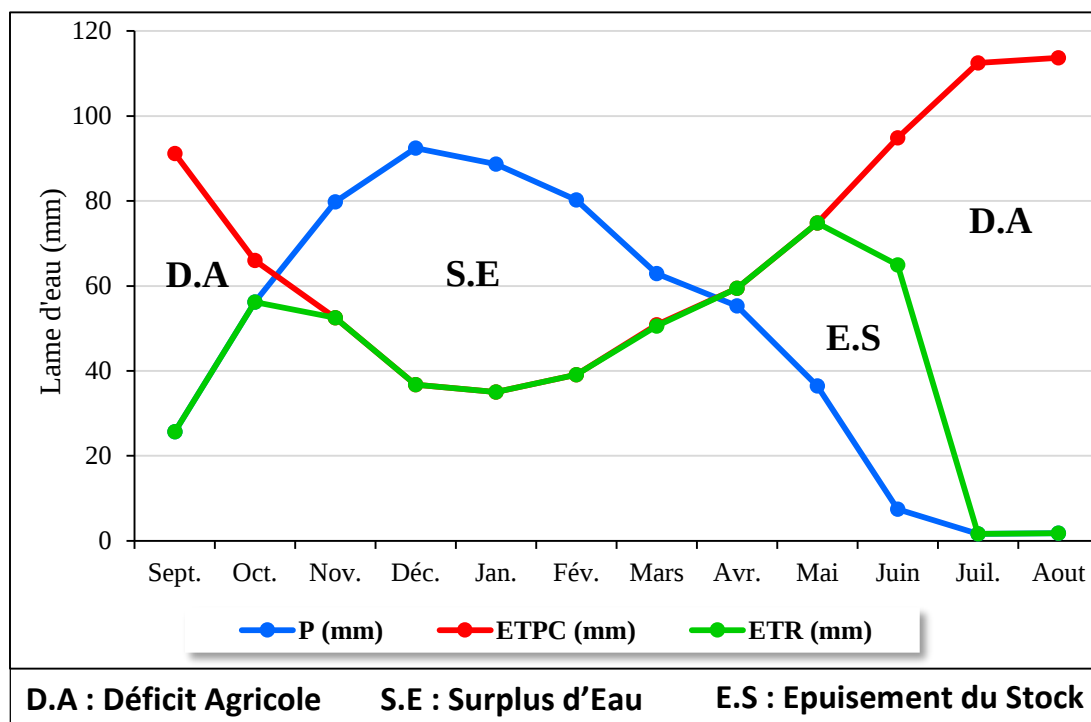


Figure 17. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite pour la période 1982-2015.

Le graphique du bilan hydrologique (méthode de Thornthwaite) qui illustre les résultats du tableau 12 pour la station de Boukourdane permet de souligner les observations suivantes :

- On remarque que si la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y aura un surplus d'eau donnant naissance à un ruissellement. Quand la RFU commence à diminuer, il y a un épuisement du stock au point où la RFU = 0. Il y aura alors un déficit agricole au début du mois de juin jusqu'à la fin du mois d'octobre.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la région d'étude atteint son maximum au mois d'août avec 133,75 mm et avec un minimum de 28.98 mm au mois de janvier.
- Dans la station de Boukourdane l'écoulement commence dans le mois de janvier jusqu'au mois d'avril, avec un maximum au mois de janvier avec un excédent de 48,18 mm.

Tableau 13. Valeurs de l'ETR obtenus par les trois formules

formule	Thornthwaite	Turc	Coutagne	Moyenne
ETR (mm)	498,58	465,73	464,28	476,19

Nous constatons d'après le tableau ci-dessus que les valeurs de l'ETR obtenues par les méthodes de Thornthwaite, Turc et Coutagne sont assez proches. Cependant, la méthode de Coutagne présente la valeur la plus proche de la moyenne des trois stations pour toute la région. La valeur de l'ETR retenue pour l'établissement du bilan hydrologique est 476,19 mm.

7.2. Lamé d'eau ruisselée

Le ruissellement de surface est le volume d'eau, qui au cours d'une période de précipitation échappe à l'infiltration et l'évapotranspiration.

Cette lame d'eau ruisselée sera calculée par la formule de Tixeront – Berkaloff qui s'écrit comme suit :

$$R = P^3 / 3(ETP_c^2) \quad , \quad \text{si : } P < 600 \text{ mm} \dots\dots (1)$$

Avec : R : Ruissellement annuel en (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle en (mm).

La formule de Tixeront – Berkaloff modifiée par Romantchook :

$$R = P^3 / 3 \quad , \quad \text{si : } P > 600 \text{ mm} \dots\dots (2)$$

Avec : R : Ruissellement annuel en (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm).

Comme on a dans la station de Boukourdane (588,65 mm) $P < 600$ mm, on applique la première formule, qui donne un ruissellement d'ordre de : 99,47 mm.

7.3. Lame d'eau infiltrée

De la même manière que le ruissellement, nous avons essayé d'estimer l'infiltration en sachant que ce paramètre est très difficile à déterminer quand on ne dispose pas de mesures directes (lysimètres par exemple).

L'infiltration a été déterminée en tirant sa valeur de l'équation du bilan hydrologique :

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

Pour une période d'observation assez longue, la variation de la réserve est négligeable, l'équation du bilan hydrologique s'écrit, couramment, comme suit :

$$P = ETR + R + I \quad \text{d'où,} \quad I = P - (ETR + R)$$

Où :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm ; $P = 588,65$ mm.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm ; $ETR = 476,19$ mm.

R : Lame d'eau ruisselle en mm ; $R = 99,47$ mm.

I : Lame d'eau infiltrée en mm.

$$I = 588,65 - (476,19 + 99,47) = 12,99 \text{ mm.}$$

7.4. Estimation du bilan hydrologique

Le calcul du bilan hydrologique basé sur la série des données de la station de Boukourdane, qui nous a permis de tirer des informations sur les composantes de ce bilan (précipitations, infiltration, évapotranspiration réelle et le ruissellement).

Les valeurs obtenues sont données dans le tableau suivant :

Tableau 14. Tableau récapitulatif des différents termes du bilan hydrologique.

Termes du bilan	Précipitations		ETR		Ruissellement		Infiltration	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Valeurs	588,65	100	476,19	80,9	99,47	16,9	12,99	2,2

Il est à noter que ces valeurs ne présentent pas réellement l'infiltration dans toute la zone d'étude, car on n'a pas tenu compte des infiltrations par excès d'irrigation et aussi la possibilité d'alimentation de la nappe par l'Oued (relation Oued-Nappe).

8. Conclusion

La zone d'étude est caractérisée par un climat tempéré humide, avec un hiver pluvieux et doux et un été chaud et sec. La moyenne interannuelle des précipitations tombées est de l'ordre de 571,18 mm à la station Attatba Cave et 492,77 mm à la station de Hadjout, 513,80 mm à la station d'Ain Tagourait, 604,63 mm à la station de Djebabra, enfin dans la station de Boukourdane 588,65 mm.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 18.10 °C avec un maximum au mois d'aout égal à 26.49 °C et un minimum au mois de janvier égal à 11.12 °C.

Le cycle pluviométrique le plus arrosé correspond aux années 1997-1999 avec un apport de 961,6 mm pour la station de Djebabra (côté ouest de la Wilaya de Tipaza) et à l'année 1983-1984 avec un apport de 873,8 mm pour la station d'Attatba Cave (côte est de la wilaya de Tipaza).

Au niveau du côté occidentale de la wilaya de Tipaza (station de Hadjout et de Djebabra) le cycle le plus sec correspond à l'année 2001/2002 avec un apport de 411 mm pour la station de Hadjout et 419 mm à la station de Djebabra.

Les mois les plus arrosés sont les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février, mars, avril, avec une valeur moyenne mensuelle maximale égale à 105.04 mm observée à la station de Djebabra. Le mois le plus sec est celui de juillet avec une valeur minimale moyenne mensuelle égale à 0,51 mm mesuré à la station de Djebabra.

L'humidité relative moyenne annuelle est égale à 75 % avec des moyennes mensuelles variant entre 78 % en été au mois de juillet et 72 % en hiver au mois de février.

Le suivi de la variation du vent à la station de Boukourdane a montré que la direction préférentielle du vent est Nord-est et Ouest. Ce vent favorise la pluviosité de la région.

Le bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite, permet l'estimation de l'ETR qui montre qu'une grande partie des précipitations est reprise par l'évapotranspiration réelle (ETR) (442,28 mm).

CHAPITRE 4 : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

1. Introduction

L'étude hydrogéologique permet d'arriver à une bonne connaissance et une meilleure compréhension des structures géologiques du sol et du sous-sol et aussi des horizons aquifères, ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques, afin d'assurer la surveillance et le suivi de l'évolution des ressources souterraines en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

Dans ce chapitre, les informations nécessaires à cette étude hydrogéologique correspondent aux données géologiques et géophysique effectuée par L.GLANGEAUD 1932, A.AYMIE (1956) et C.G.G (1967), afin de donner un aperçu sur l'hydrogéologie de notre zone d'étude.

2. Description des formations aquifères

Au niveau de la wilaya de Tipaza, après la consultation et la synthèse des données disponibles sur la géologie et de l'hydrogéologie de la région, nous distinguons 5 types d'aquifères qui sont les suivantes :

- ❖ L'aquifère de la Mitidja
- ❖ L'aquifère des vallées des cours d'eau actuels
- ❖ L'aquifère du cordon dunaire
- ❖ L'aquifère de l'Astien du Sahel d'Alger.
- ❖ L'aquifère karstique des reliefs carbonatés (Zeccar, Chenoua).

2.1. L'aquifère de la Mitidja

La plaine de la Mitidja s'étend sur une superficie de 1300 à 1450 Km², (100 km de longueur et 8 à 18 km de largeur), selon un axe orienté OSO-ENE.

Elle est limitée au Nord par le bombement du Sahel, de 260 m d'altitude, prolongé à l'Est par le massif cristallin de Bouzaréah (407 m) ; à l'Ouest par le massif de Chenoua (905 m). Vers le Sud, la plaine est brusquement interrompue par l'Atlas Blidéen. Cet aquifère s'étend sur le territoire de la wilaya de Tipaza, notamment dans sa partie sud-est, où on retrouve les communes de Hameur El Ain, de Bourkika, de Hadjout, Attatba et Sidi Rached.

Représentée par sa partie ouest, qui se situe entre l'Atlas au Sud et le Sahel algérois au Nord, cette formation présente des passages latéraux de faciès (figure 20).

Le cadre géologique local est caractérisé par la série lithostratigraphique représentée dans la figure ci-après (Figure 20). Au sein de la séquence sédimentaire de la Mitidja, on peut distinguer les aquifères de la formation de l'Astien et ceux de la formation de la Mitidja (Soltanien- Tensiftien) qui reposent sur les marnes du Plaisancien formant la limite inférieure imperméable de presque tout le bassin.

Ces deux aquifères sont séparés par la formation semi-perméable des argiles jaunes d'El Harrach.

Toutefois, vu son importance et le coût réduit des opérations de sa mise en exploitation, l'aquifère des alluvions quaternaires est le plus exploité.

Les sédiments clastiques de la formation de la Mitidja et les sédiments fluviaux récents constituent l'aquifère le plus important de la plaine de la Mitidja. Cet aquifère, composé de graviers et de galets alternant avec des limons et argiles, occupe toute l'étendue de la plaine. Sa limite inférieure est constituée par les marnes de la formation d'El Harrach et sa limite supérieure est libre sauf dans la zone du Mazafran où la nappe est captive sous les limons du Rharbien (figure 20).

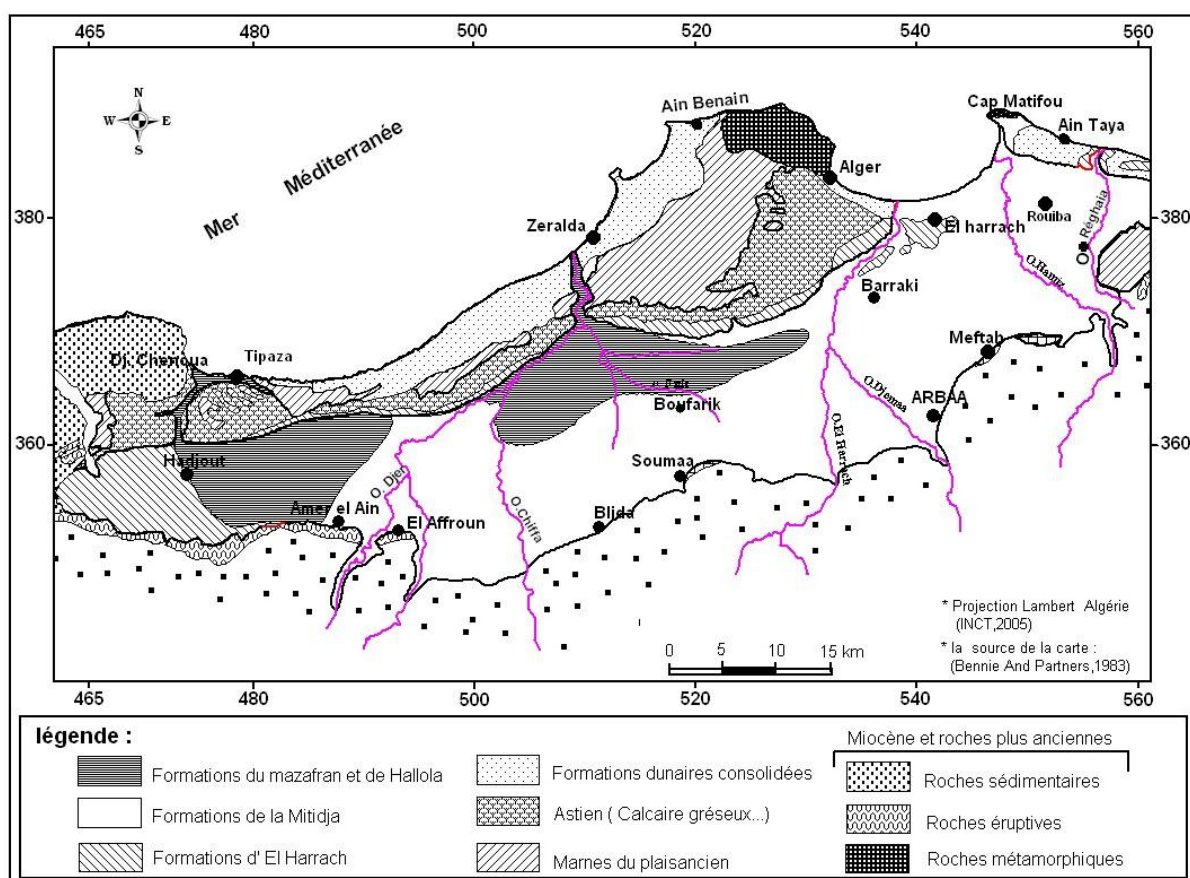


Figure 18. Aperçu géologique du bassin de la Mitidja (Bennie and Partners, 1983)

2.2. Les aquifères des vallées des cours d'eau actuels

Ils sont constitués par les alluvions actuelles déposées par l'écoulement des oueds de la chaîne littoral vers la mer. On distingue :

- La nappe de l'oued Nador.
- La nappe de l'oued el Hachem.
- La nappe de l'oued Messelmoun.
- La nappe de l'oued Sebt.
- La nappe de l'oued Damous.
- La nappe de l'oued Harbil.
- La nappe d'Ikilen.

2.3. L'aquifère du cordon dunaire

Les formations dunaires forment la bordure nord du Sahel algérois allant de Bérard à Douaouda (Côtiers ouest) (figure 21). Les formations dunaires sont des dépôts récents d'âge quaternaire. Ces dépôts dunaires se composent de sables meubles éoliens à grains fins à moyen, argileux par endroits, souvent cimentés à la base en un grès calcaire constituant de petites corniches. Le substratum est constitué par les marnes du Plaisancien. Ces formations forment une nappe libre, s'écoulant vers la mer, alimentée exclusivement par des précipitations. L'épaisseur moyenne de ces formations est de 30 m fournissant un débit (0,5 à 1,5 l/s).

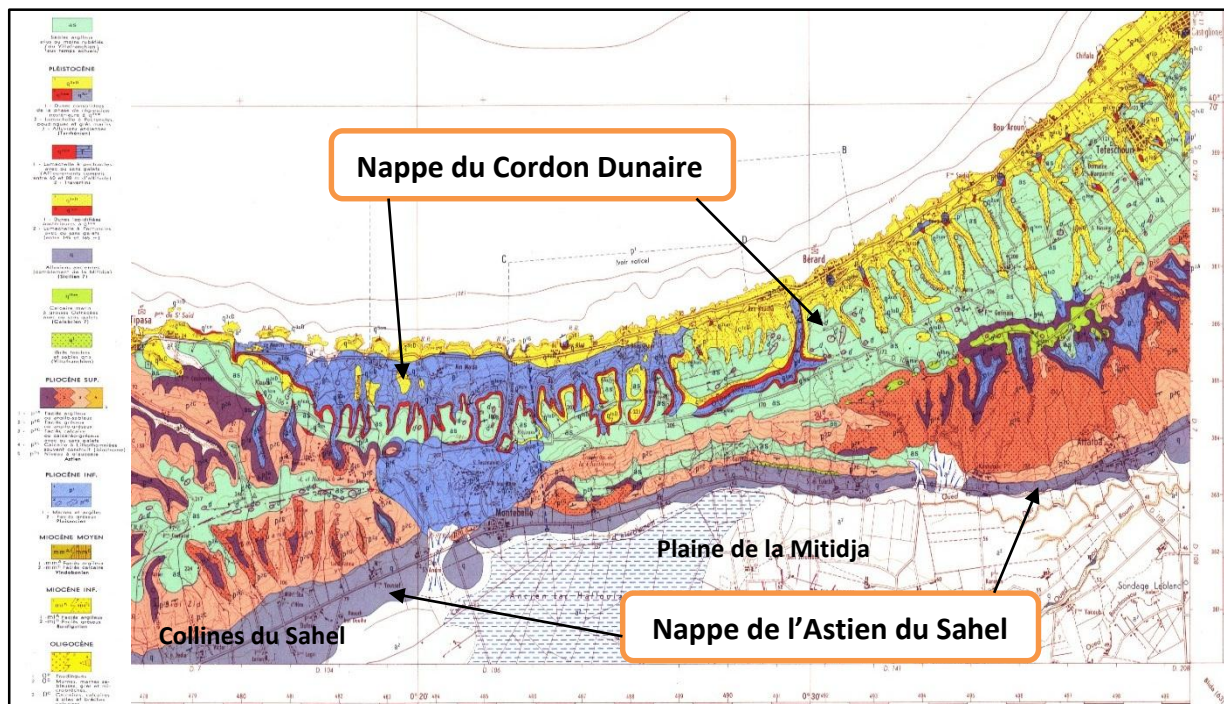


Figure 19. Extrait de la carte géologique de la région de Tipaza au 1/50000 montrant l'extension des affleurements de l'aquifère du cordon dunaire et des sables et grès de l'Astien sur les collines du Sahel en bordure nord de la plaine de la Mitidja

2.4. La formation de l'Astien du Sahel d'Alger

L'Astien affleure sur le bourrelet du sahel à partir de la cluse du Mazafran jusqu'au massif du Chenoua. Il est constitué principalement de grès, calcaire gréseux et de marne jaune.

L'épaisseur de cette formation varie de 100 à 150 m sous la Mitidja, cependant, sous l'effet de l'érosion, elle est entre 20 et 80 m sous la nappe alluvial de l'oued Nador. Cette nappe est exploitée par des forages à des fins agricoles et d'alimentation en eau potable.

2.5. Les Formations des reliefs carbonatés (Zeccar, Chenoua)

2.5.1. Djebel Boumaad

Djebel Boumaad est situé au Nord de l'oued Hachem et de l'oued Messelmoun, et au Sud du Djebel Zaccar Rherbi.

Il est constitué par des calcaires jurassiques, perméables, avec de nombreuses failles et déplacements verticaux rendent la porosité et la perméabilité plus importantes, ce qui donne naissance à plusieurs sources. L'aquifère formé au niveau des calcaires fissurés est d'âge jurassique-malm (figure 22).

2.5.2. Autres formations calcaires

En plus de Djebel Boumaad, il y a d'autres formations à caractère karstiques relativement moins importantes, qui sont les suivantes :

- **Le Massif calcaire de Gouraya** : ces formations sont d'âge éocène, dont la nature est calcaire à marno-calcaire. Il contribue à l'alimentation de la nappe de l'oued El Hachem du côté SO.
- **Le Massif de Chenoua** : C'est une formation d'âge jurassique constituée principalement de calcaires massifs. Il peut présenter des porosités de fissure de type karstique (figure 22).

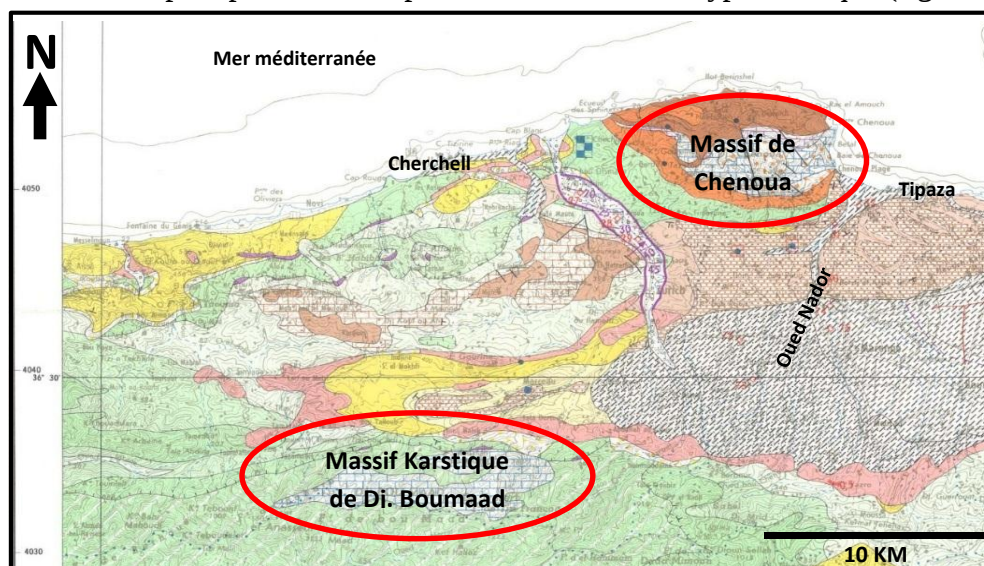


Figure 20. Extrait de la carte Hydrogéologique de la région d'Alger au 1/200 000

3. Les ensembles aquifères de la zone d'étude

Les formations aquifères de la basse vallée de l'oued Nador sont constituées de dépôts d'âge plio-quaternaire. La nappe qui a, dans son ensemble, un caractère captif sous un recouvrement argileux ou marneux, est constituée, de haut en bas, par :

- Une partie de la base du Quaternaire, généralement, formée de graviers et de Galets.
- Une série calcaro-gréseuse formant la mollasse astienne.

Ces deux formations sont en contact et en continuité hydraulique formant ainsi le réservoir utile de la nappe (Mesbah, 1981)

L'épaisseur de la nappe est variable. Elle est plus épaisse à l'aval que dans la partie amont où son épaisseur est inférieure à 15 m.

3.1. La nappe de l'oued Nador

Elle se situe dans la zone comprise entre la mer méditerranéenne au Nord, le bourrelet du Sahel au Sud et à l'Est et le massif de Chenoua à l'Ouest.

La nappe de l'oued Nador est superposée à l'axe synclinal des formations du Pliocène. Sur le plan lithologique, elle est limitée :

- Au Nord par une molasse calcaire-gréseuse de 20° de pendage vers l'Est et Sud-est.
- Au Sud par une molasse gréseuse à ciment marneux passant à des sables et argile plus ou moins rubéfiées.
- Les marnes bleues du Plaisancien sont visibles à l'Est de la zone d'étude.

La lithologie du recouvrement alluvionnaire est à prédominance argileuse, avec des bancs grossiers de 4 à 5 m d'épaisseur, dont l'épaisseur globale ne dépasse pas une quarantaine de mètres. La molasse de l'Astien sous-jacente présente une variation de faciès. Elle est plus grossière et aquifère vers le côté de Chenoua et plus marneuse vers le Sahel. La transition de la molasse vers les marnes du Plaisancien, se fait progressivement sur un horizon marno-sableux d'une vingtaine de mètre.

L'étude géophysique réalisée dans la plaine de l'Oued Nador en 1967 par C.G.G (Centre de Géologie et Géophysique) met en évidence l'existence des terrains suivants (figure 23) :

- ❖ Alluvions de 3 à 10 ohm.m
- ❖ Alluvion de 15 à 20 Ohm.m
- ❖ Molasse gréseuse d'Astien et horizon marno sableux de base de 50 Ohm.m
- ❖ Substratum marneux de 5 à 10 Ohm.m.

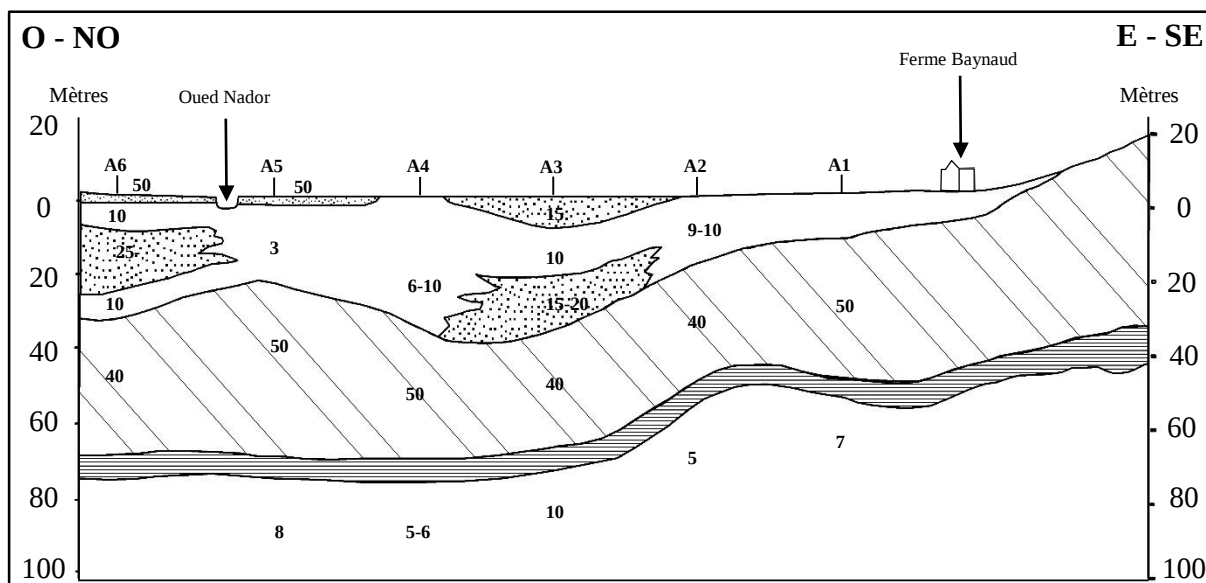


Figure 21. Coupe géophysique dans la vallée de l'Oued Nador (C.G.G. 1967).

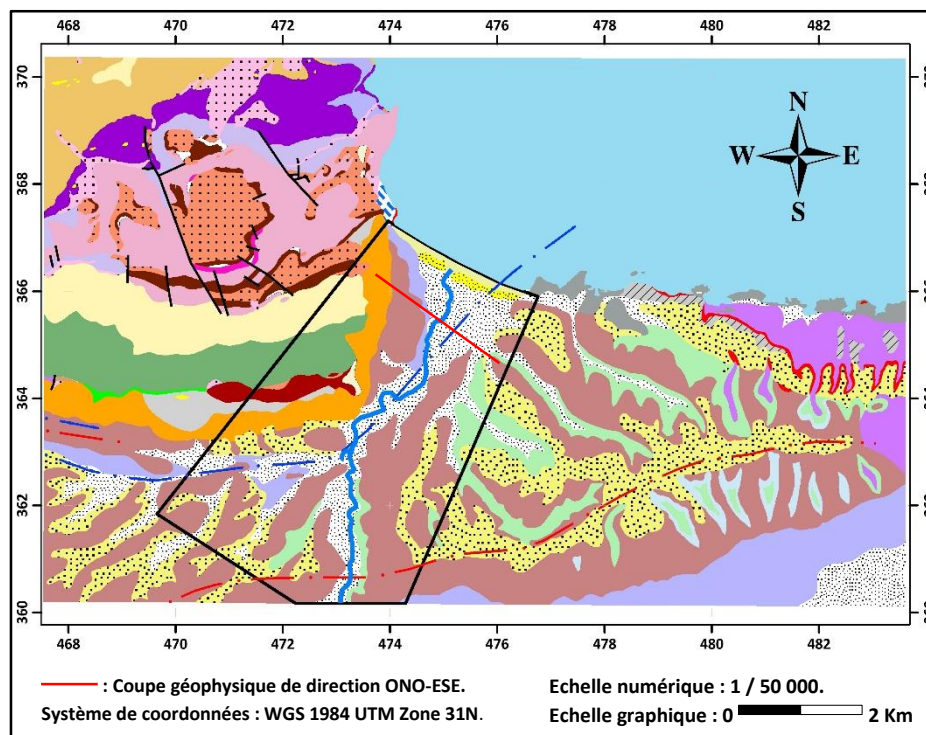


Figure 22. Carte de localisation de la coupe géophysique dans la vallée de l'Oued Nador (C.G.G. 1967)

3.2. L'Aquifère de l'Astien

Le réservoir astien est généralement constitué par un faciès de grès fins consolidés. Il est en générale captif au centre de la plaine avec des niveaux piézométriques au-dessus du toit de l'aquifère. Par ailleurs, il est libre dans les zones d'affleurement de l'Astien, dans le Sahel. Les écoulements souterrains se font depuis les bordures vers le centre de la plaine. Les coupes géo-

électriques réalisées au niveau de la zone d'étude montrent que le toit de cet aquifère se trouve à environs 400 m de profondeur à Oued El Alleug et à 200 m dans le Mazafran. Son épaisseur moyenne est de 100 m à 150 m dont le toit se situe généralement entre 250 et 300 m. (Bafdil et Mokdad, 2016)

L'alimentation de cet aquifère se fait essentiellement par les infiltrations des eaux de pluie sur le Sahel où il affleure. Il est également alimenté par la nappe alluviale sus-jacente par drainance à travers les marnes jaunes peu épaisses et dont la perméabilité varie de 10^{-7} à 10^{-8} m/s (Binnie et Partners, 1972).

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues. Les estimations de la perméabilité donnent des valeurs qui varient dans de larges fourchettes avec une moyenne de l'ordre de 4,3 m/j et le coefficient d'emmagasinement est compris entre 5.10^{-6} et 5.10^{-3} .

4. Etude piézométrique

La détermination de l'évolution des fluctuations de la surface piézométrique de la nappe de l'Oued Nador est basée sur les mesures relevées par les services de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Dans ce but, un réseau de surveillance, composé de piézomètres, forage et puits a été déployé sur toute la plaine.

4.1. Réseau piézométrique de la zone d'étude

Le réseau de surveillance mis par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH), afin d'assurer le suivi quantitatif et qualitatif dans le but de mieux caractériser le comportement de la nappe d'eau souterraine au sein de notre zone d'étude.

Ce réseau a fait l'objet, uniquement de deux (02) campagnes de mesures de niveau statique et de prélèvements d'échantillons durant la période 1993 à 1994. Depuis, le suivi de cette nappe a été interrompu pour des raisons sécuritaires afin d'être repris en 2003.

Ce réseau est composé de plusieurs points de mesures. On compte, en effet, 38 puits, 06 forages, 04 sources et 02 piézomètres.

Ce réseau de surveillance est caractérisé par :

- Une bonne répartition spatiale des points de mesures sur toute l'étendue de la plaine.

Lors de la campagne du mois de juillet 1994, les mesures du niveau statique et les prélèvements ont été effectués dans 21 points d'eaux de mesures. Au cours de la campagne de mesure de juillet 2003, plusieurs points d'eau étaient secs, fermés ou remblayés. Ainsi, les mesures ont été réalisées sur les 18 points d'eaux opérationnels.

La figure 25 présente les points d'eau existant actuellement au niveau de notre zone d'étude et leur code selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH).

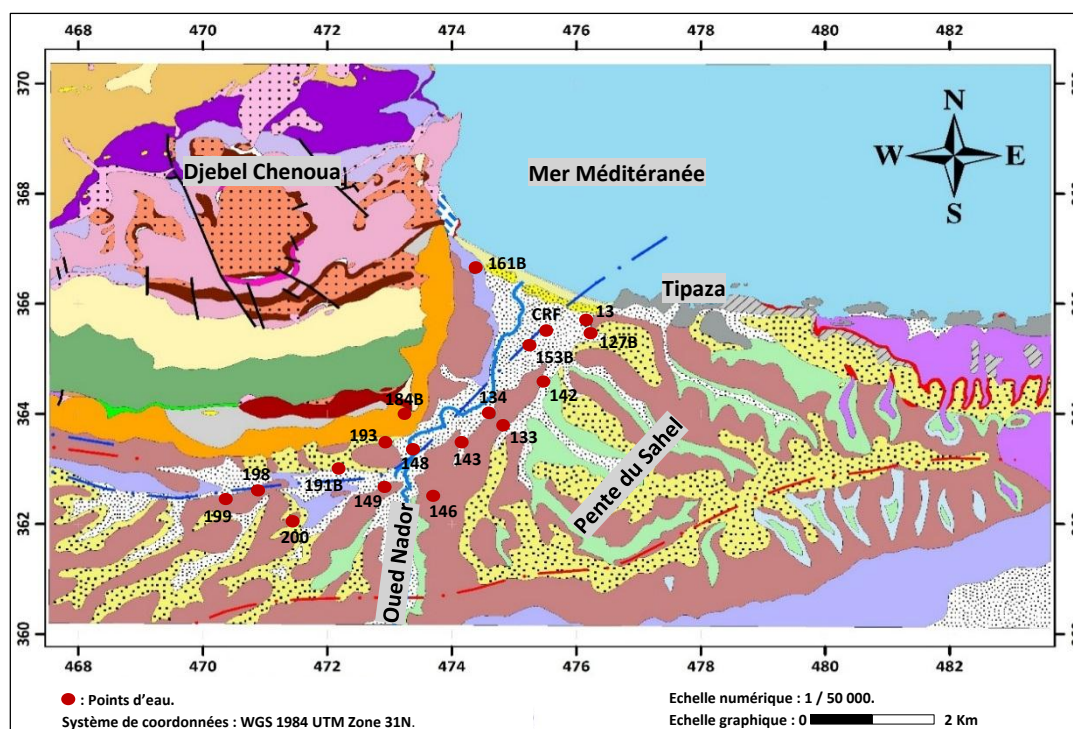


Figure 23. Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de l'Oued Nador.

4.2. Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont les documents de base de l'analyse et de la schématisation des fonctions captatives et conductrices du réservoir et du comportement hydrodynamique de l'aquifère.

C'est la synthèse la plus importante d'une étude hydrogéologique. Aussi la carte piézométrique a pour but de connaître l'extension de l'aquifère, la direction de l'écoulement des eaux souterraines et le gradient hydraulique, ainsi que la zone d'accumulation.

Pour illustrer l'évolution dans l'espace et dans le temps du niveau piézométrique au cours de ces dernières années nous avons élaboré des cartes piézométriques qui ont été réalisées pendant différents horizons (périodes des basses et hautes eaux).

4.2.1. Période des hautes eaux

• Hautes eaux 2003 :

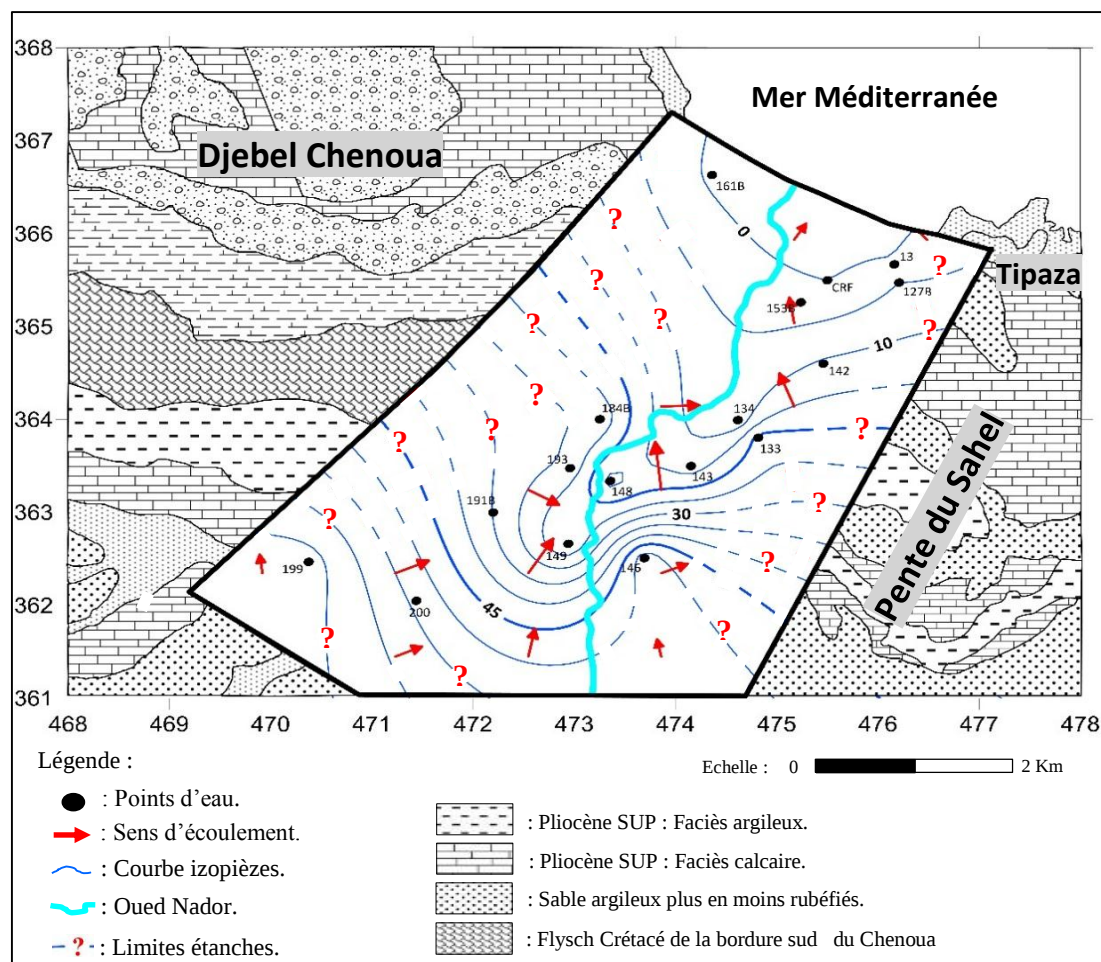


Figure 24. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des hautes eaux 2003.

• Interprétation :

L'allure générale des courbes isopièzes montre que la nappe suit le modèle topographique (figure 26). L'espacement des courbes augmente en allant du sud de la nappe vers le Nord, ce qui indique un écoulement rapide au Sud et devient plus lent au Nord.

On remarque que l'écoulement se fait généralement suivant une direction Sud-ouest vers le Nord-est dans la partie est de la carte et une direction Sud-est vers le Nord-ouest dans la partie ouest de la nappe, cela est dû à l'influence de la pente du Sahel, les flèches montrant le sens d'écoulement sont orientées vers le cours d'eau, cela indique que l'oued draine la nappe (la nappe alimente l'oued) durant cette période des hautes eaux.

• Hautes eaux 2016 :

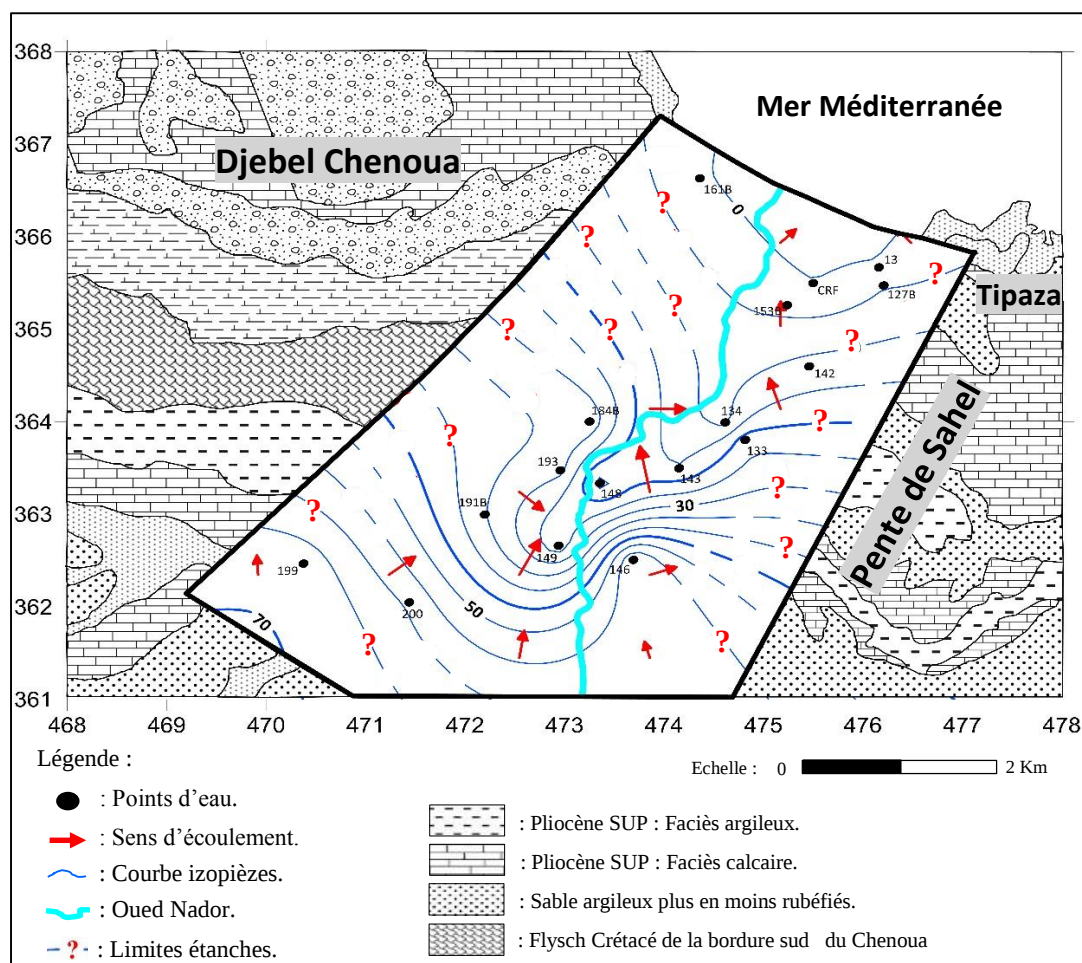


Figure 25. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des hautes eaux 2016.

• Interprétation :

On remarque dans cette carte de la campagne réalisée en Avril 2016 (figure 27) que le niveau piézométrique dans certains forages a augmentée d'une façon significative. Cela s'explique par l'augmentation de la pluviométrie enregistrée dans la région, ce qui indique que la recharge de cette nappe de l'Oued Nador se fait à partir des eaux de pluie sur les frontières est et ouest. La zone Est est plus rechargée que la zone ouest du fait que le niveau piézométrique dans la première zone est plus élevé que celui de la deuxième zone.

4.2.2. Période des basses eaux

• Basses eaux 2003 :

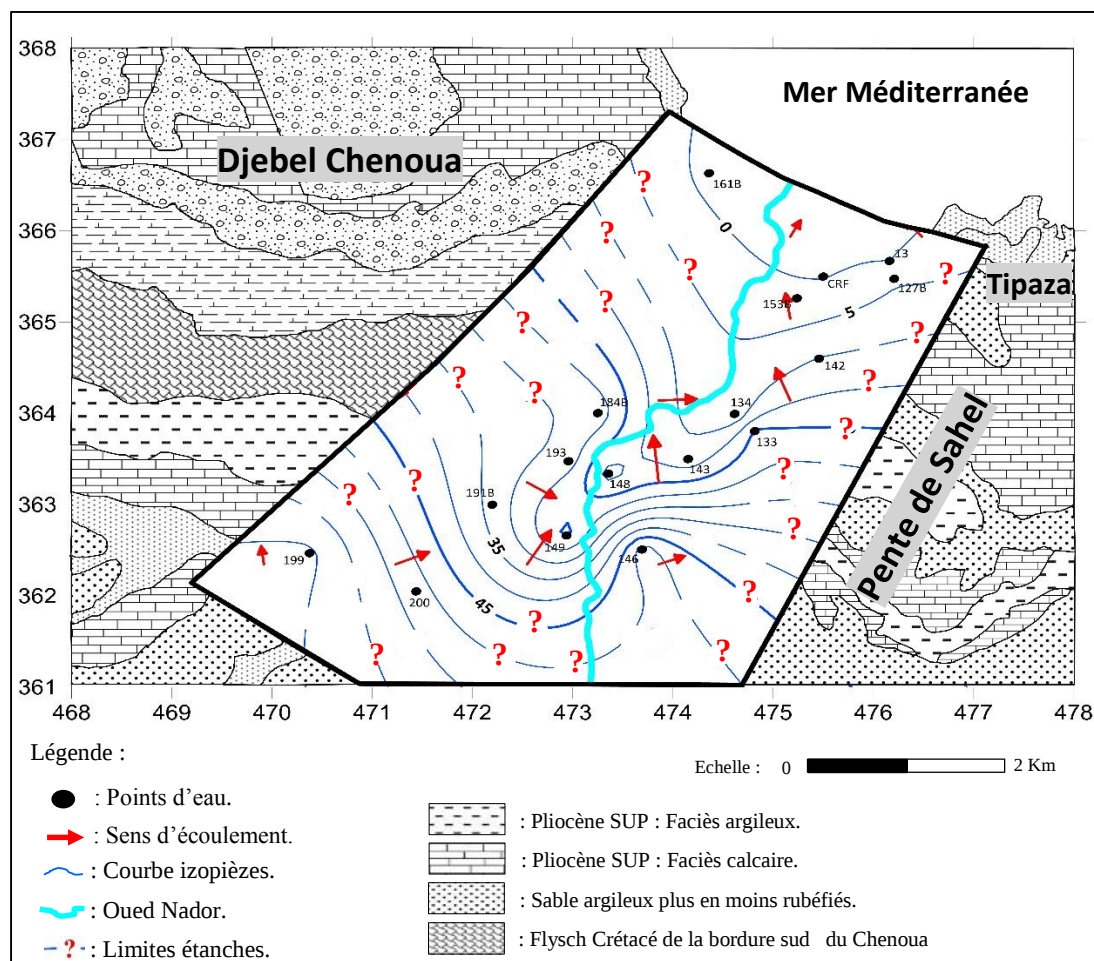


Figure 26. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des basses eaux 2003.

• Interprétation :

Cette carte piézométrique de la campagne réalisée au mois de septembre 2003 (figure 28) montre que le sens d'écoulement est toujours vers la mer. On remarque aussi que cette carte est presque similaire à celle de la campagne des hautes eaux avec une petite variation de la surface piézométrique

• Basses eaux 2016 :

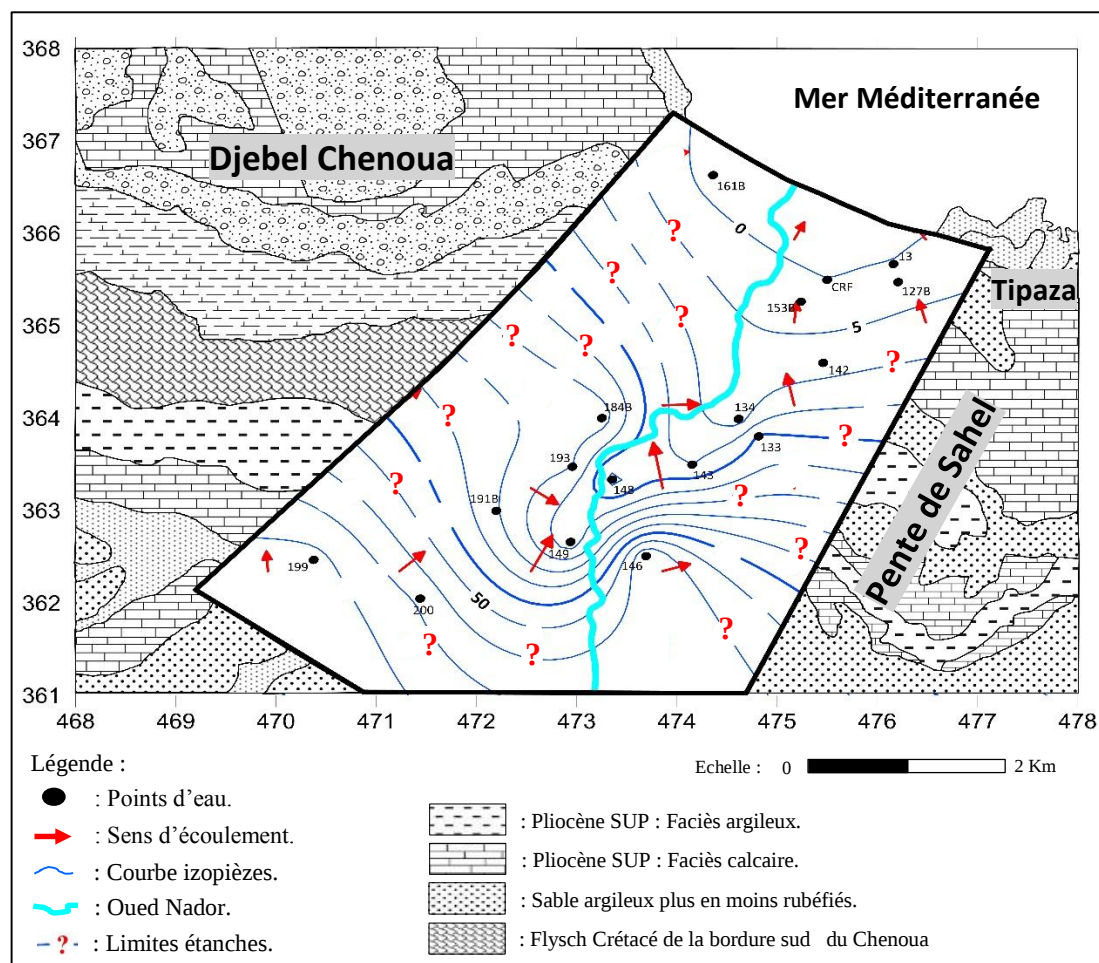


Figure 27. Carte piézométrique de la nappe de l'Oued Nador pour la période des basses eaux 2016.

• Interprétation :

L'allure générale dans la carte piézométrique de la campagne réalisée au mois de septembre 2016 (figure 29), indique la même évolution que la précédente avec une légère augmentation de la surface piézométrique (de l'ordre de 5 m ; au niveau du forage 193 la cote piézométrique était de 25 m en 2003 et de 30 m en 2016).

L'espacement des courbes indique une perméabilité constante sauf au centre où les courbes se resserrent à cause de la circulation souterraine rapide et à la concentration des points d'eau dans cet endroit.

5. Conclusion

Dans l'étude hydrogéologique établie, on a utilisés des données géologiques et des résultats de la reconnaissance géophysique (logs géo-électriques) pour reconnaître les formations de notre aquifère qui est de plio-quadernaire. Cette nappe est dans l'ensemble captive à l'exception des zones affleurements qui y donnent l'aspect d'un aquifère libre.

En bordure du littoral affleurent les formations quadernaires du cordon dunaire. Sur le versant sud du Sahel s'étendent les grès et sables de l'Astien avec une épaisseur variable (une dizaine de mètre en moyenne). Par ailleurs, les calcaires liasiques et jurassiques, qui affleurent sur Djebel Zeccar et Chenoua, forment des aquifères aux potentialités peu connues.

Afin de bien illustrer l'état de la nappe de l'Oued Nador, nous avons représenté les résultats des campagnes piézométriques pour l'année 2003 et 2016 (période hautes eaux et basses eaux), sous forme de cartes piézométriques.

L'examen des cartes piézométriques réalisées permet de relever un sens d'écoulement du Sud-ouest vers le Nord-est dans la partie est de la zone d'étude et une direction Sud-est vers le Nord-ouest dans la partie ouest de la nappe. Les courbes isopièzes convergent vers l'Oued et indiquent l'alimentation de ce dernier par la nappe, essentiellement dans sa partie aval.

Ainsi, ces cartes piézométriques nous ont renseignés sur la recharge naturelle de la nappe de l'Oued Nador. Elle se fait principalement par l'Est (pente du Sahel). Dans les périodes des basses eaux, on a remarqué une légère baisse du niveau de la nappe, ce qui indique que les eaux souterraines sont considérées comme une ressource importante de la Wilaya de Tipaza. Cette ressource est fortement sollicitée pour l'alimentation en eaux potable (AEP) et aussi dans l'irrigation. Par contre, dans les périodes des hautes eaux, on a remarqué une légère remontée du niveau de la nappe, due à la recharge par les précipitations.

CHAPITRE 5 : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

1. Introduction

Le réchauffement climatique n'a depuis longtemps pas cessé d'être une curiosité scientifique. Il constitue la question environnementale majeure qui domine notre vie. Aujourd'hui, rares sont les scientifiques qui doutent encore du changement climatique.

La plupart supposent que le processus du réchauffement de l'atmosphère s'accélère et que ses conséquences sont inquiétantes : l'eau des océans se réchauffe, les glaciers fondent, le niveau des mers s'élève et les zones littorales habitées pourraient être inondées. Les régions agricoles vont se déplacer, les fluctuations du climat vont s'amplifier, avec, pour conséquence, des tempêtes plus violentes. (Epstein, 2000 ; *in* Lespinas, 2008)

Ce changement climatique concerne des transformations générales du climat, y compris la température, les précipitations, les vents et d'autres facteurs ; ils peuvent varier d'une région à une autre. Il est établi par la science que ces changements sont la conséquence du renforcement du phénomène de l'effet de serre du fait du rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre par certaines activités humaines.

Du point de vue de l'abondante littérature en lien avec les changements climatiques, nous avons jugé que c'est nécessaire de définir certains concepts clés en relation avec le changement climatique.

2. Définition des concepts

Climat : Le mot climat apparaît en français au XII^e siècle, dérivant du latin *cliamtis*. Pourtant son origine est grecque : le *klimat* est l'inclinaison d'un point de la Terre par rapport au soleil. Cette notion de « *klimat* » y est très éloignée du concept moderne de climat. (Tabeaud, Martine., 2008).

En 1910, Hann a défini le climat comme étant « l'ensemble des éléments météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère au-dessus d'un lieu » (Helga-Jane Scarwell, 2010). Ainsi au cours du 19⁸⁷ Gibbs a proposé une définition plus dynamique « la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée. » (Christian, Godin., 2002).

Autrement dit, le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période donnée. Il est effectué à l'aide de valeurs moyennes établies à partir de mesures statistiques, mensuelles et annuelles, ainsi que sur la base des données atmosphériques locales : température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent.

Les régions continentales du globe connaissent un climat qui dépend de leur latitude et de la distance qui les sépare des principaux plans d'eau de la Terre. (BAGHDADLI, 2014)

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est défini comme « la synthèse des conditions météorologiques dans une région donnée, caractérisée par des statistiques à long terme (valeurs moyennes, variances, probabilités de valeurs extrêmes, etc.) des éléments météorologiques (températures, précipitations, vents) dans cette région ».

L'OMM recommande une période minimale de 30 ans pour calculer ces statistiques, définissant ainsi ce que l'on appelle communément les « normales climatologiques » qui servent de référence aux bulletins météorologiques.

Système climatique : C'est un système complexe dont le soleil est l'élément moteur. Les principales composantes sont l'atmosphère, la lithosphère (surface terrestre), l'hydrosphère (lacs, mers, océans et autres plans d'eau), la cryosphère (les glaces, manteau neigeux) et la biosphère (l'ensemble des êtres vivants, en particulier la végétation, ainsi que la matière organique des sols).

Ces 5 composantes (figure 30) sont en interaction permanente par l'intermédiaire de phénomènes physiques, chimiques et biologiques tels que le rayonnement, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le transfert de chaleur, de mouvement, etc. Le climat en tant que tel ne constitue donc que la résultante aux échelles locales/régionales de ces processus, ce qui explique la complexité et la diversité des climats existants sur Terre. (KHALDI, 2005)

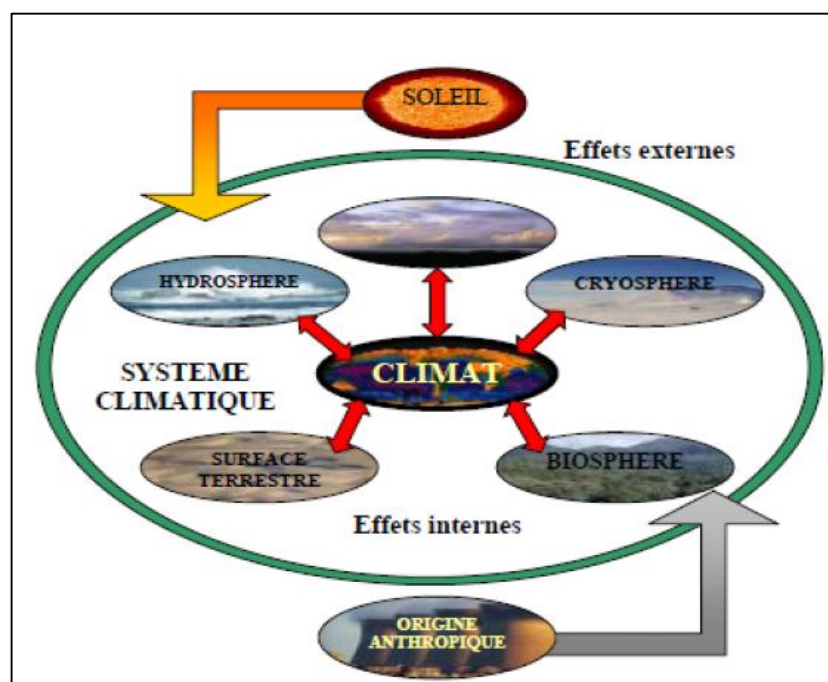


Figure 28. Les composantes du système climatique.

Le comportement de l'ensemble du système climatologique est influencé ou contraint par l'évolution de certains paramètres extérieurs que l'on appelle forçage extérieure. (MAZAR, 2014)

3. Les indicateurs du changement climatique à échelle globale

Selon le 4ème rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) publié en 2007, les changements climatiques observés à l'échelle globale peuvent être résumé en :

3.1. L'augmentation de la température de surface sur la terre

L'augmentation de la température de surface sur la terre est de $0,8 \pm 0,2$ °C depuis 1870. Elle reste notablement différente pour les deux hémisphères : plus forte au Nord et plus forte aux hautes latitudes. Une variabilité entre continents est également observée. Une forte modulation sur des périodes annuelles et multi décennales est également constatée, avec deux périodes de plus forte augmentation (approximativement de 1910 à 1940 et de (1975 à 2000) encadrées par des périodes de stagnation ou de décroissance.

3.2. La température des océans

Mesurée depuis les années 1950 par les bateaux de commerce ou les navires océanographiques (jusqu'à vers 700 m de profondeur) et plus récemment par le système de bouées profitantes montre une augmentation moyenne globale depuis quelques décennies. (MAZAR, 2014)

3.3. La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques

La banquise, dont la fonte ne contribue pas à l'élévation du niveau des océans, est un autre indicateur fort de l'accélération de l'évolution du climat : de 8,5 millions de km² stable dans la période 1950-1975, la surface des glaces de mer a connu une décroissance très rapide jusqu'à 5,5 millions de km² en 2010. (MAZAR, 2014)

3.4. Le recul des glaciers continentaux

Le recul des glaciers continentaux est observé de façon quasi généralisée depuis 3 à 4 décennies, avec une nette augmentation au cours des 20 dernières années. (MAZAR, 2014)

3.5. Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland

Les calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland ont un bilan total de masse négatif depuis une dizaine d'années. Si quelques régions élevées de l'intérieur des calottes, en

particulier Antarctique, s'épaississent un peu par suite de précipitations neigeuses accrues, la perte de masse domine.

Celle-ci s'effectue dans les zones côtières du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest par écoulement très rapide de certains glaciers vers l'océan et décharge d'icebergs. On pense que le réchauffement des eaux océaniques dans ces régions est la cause majeure des instabilités dynamiques observées. (MAZAR, 2014)

3.6. Le niveau moyen des océans

Le niveau moyen des océans est un autre indicateur qui intègre les effets de plusieurs composantes du système climatique (océan, glaces continentales, eaux continentales). Avant 1992, le niveau de la mer était mesuré par des marégraphes le long des côtes continentales et de quelques îles : le niveau des océans, en moyenne annuelle sur toute la planète, s'est élevé à un rythme de 0,7 mm/an entre 1870 et 1930 et d'environ 1,7 mm/an après 1930. Depuis 1992, les mesures sont effectuées par satellites : la hausse du niveau moyen global de la mer est de l'ordre de 3,4 mm/an. Les contributions climatiques à cette élévation sont approximativement dues, pour un tiers à la dilatation de l'océan consécutive au réchauffement et, pour les deux autres tiers, aux glaces continentales à parts quasi égales, fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique d'une part, et fonte des glaciers continentaux d'autre part. (FARAH, ABDELHAFID. K, 2014) (figure 31).

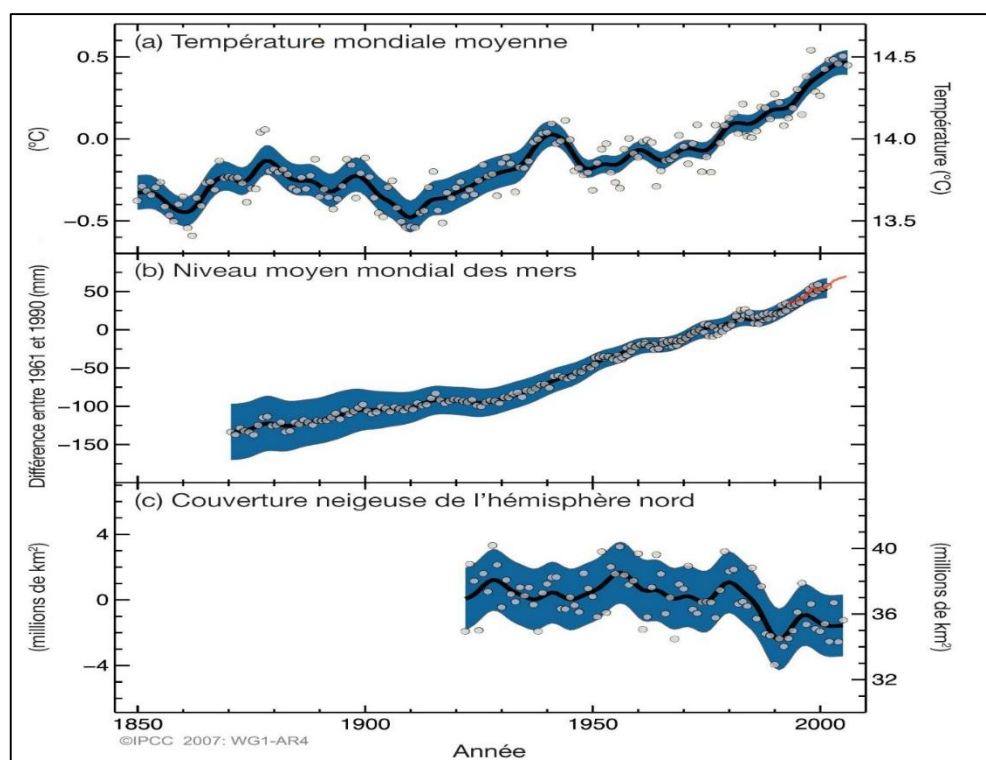


Figure 29. Variations de la température et du niveau de la mer à l'échelle du globe et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord, (GIEC, 2007).

4. Les causes du changement climatique global

Les causes du changement climatique sont multiples. Certaines sont naturelles comme le phénomène d'effet de serre, la variation des paramètres anthropique et l'activité volcanique. D'autres sont liés à l'activité humaine qui se traduit par le rejet des gaz à effet de serre (GES). (Jacques, Dermagne et al., 2006)

4.1. Les causes naturelles

4.1.1. L'effet de serre

C'est un phénomène naturel résultant de la réémission, sous forme d'un rayonnement thermique infrarouge, d'une partie du rayonnement solaire incident, par la surface terrestre. L'autre partie est absorbée par l'atmosphère ou par la surface de la Terre et donc transformée en chaleur.

Les gaz à effet de serre, qui sont, essentiellement, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitrique, piègent ce rayonnement thermique dans l'atmosphère terrestre et augmentent ainsi la température au sol.

Si l'un des éléments régissant le système climatique subit des modifications considérables, l'équilibre peut être rompu, ce qui entraînerait un changement climatique planétaire qu'il soit temporaire ou permanent. (SAIDA, NIAZI., 2007)

4.1.2. L'activité solaire

Le soleil traverse des périodes de grande activité, qui se traduisent par une augmentation du nombre de taches solaires, ainsi que par un accroissement du rayonnement, de l'activité magnétique et des flux de particules de haute énergie. Ces fluctuations de l'activité solaire s'effectuent à des échelles de temps qui peuvent varier de plusieurs millions d'années à quelques minutes. (TABET, 2008)

Lorsque le nombre de taches solaires est important, le soleil émet plus d'énergie (la terre en reçoit plus), par conséquent un changement de température et du climat aura lieu. (Lean, 1995 ; Hyot, 1998 ; Fröhlich ; 2000 ; in Baghdadli 2014)

4.1.3. Les activités volcaniques

Plusieurs études ont montré que l'activité volcanique est un autre moteur de la variabilité climatique (Budyko, 1984 ; Touchard, 2022 ; Baroni, 2006). Les grandes quantités de particules et de gaz émis dans l'atmosphère suite aux éruptions empêchent le rayonnement solaire de passer. Toute fluctuation de ce rayonnement a une incidence sur le climat, en particulier sur la température. (www.coalition-eau.org, 2014)

Le volcanisme implique une chute des températures à court terme, mais s'avère être un puissant facteur de réchauffement à long terme. Les éruptions volcaniques sont parfois si violentes que de grandes quantités de poussière et de gaz sont projetées à haute altitude dans l'atmosphère. Les particules qui atteignent la stratosphère peuvent rester plusieurs années. Elles provoquent une baisse des températures en réfléchissant le rayonnement solaire. (Jacques, Dermagne et al., 2006)

4.2. Les causes anthropiques

Le changement climatique d'origine anthropique est principalement dû à la production et au rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère résultant de l'activité humaine. Cette augmentation des gaz à effet de serre (GES) est directement liée à la croissance industrielle et aux modes de production et de consommation qui y sont associés. (www.coalition-eau.org, 2014)

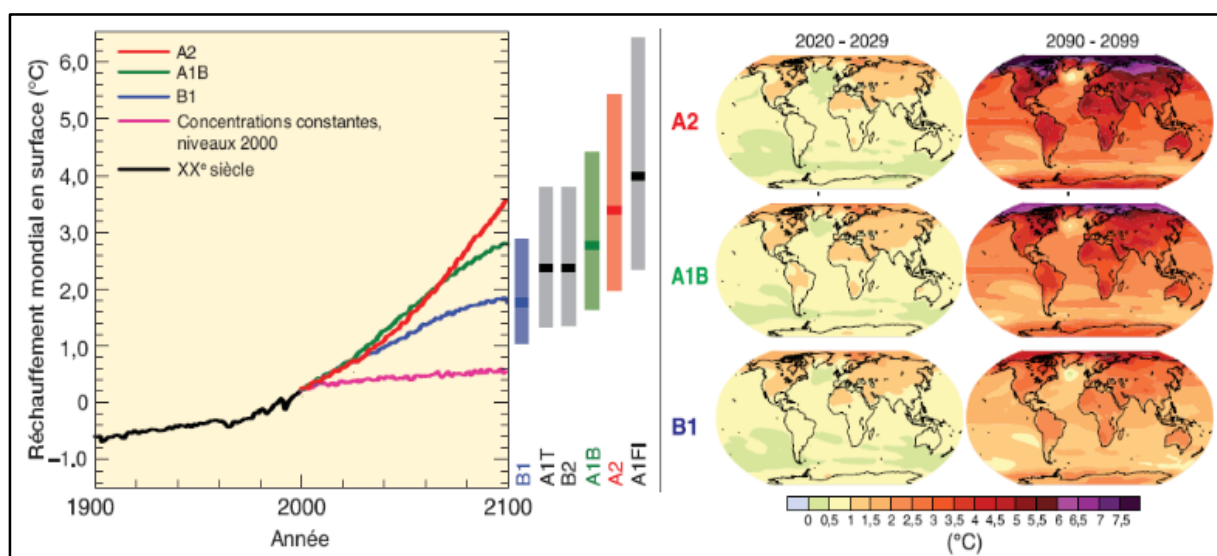
En effet, depuis le début de l'ère industrielle, les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols perturbent significativement le bilan radiatif de l'atmosphère. On observe un accroissement sensible des concentrations atmosphériques en gaz carbonique, en méthane et en oxyde nitreux ; le taux de CO₂ est passé de 280 ppm en 2005 à près de 400 ppm en 2013. Ces variations dépassent largement celles observées au cours des 400 000 dernières années, lorsque les cycles biogéochimiques ne subissaient que des variations naturelles. (Jacques, Dermagne et al., 2006)

Selon le dernier rapport du GIEC (2015), « Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols. L'océan a absorbé 30% des émissions anthropiques de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux ». (www.coalition-eau.org, 2014)

5. Scénarios possibles de l'évolution du climat

Afin d'anticiper et de préparer l'avenir, le GIEC (2007a) a élaboré plusieurs scénarios d'évolution des tendances climatiques pour le 21^{ème} siècle : A1, A2, B1, B2 et le scénario médian A1B. Les scénarios proposés sont composés de tendances climatiques couplées avec des composantes socio-économiques. Les scénarios A2, B1 et A1B correspondent aux scénarios les plus couramment employés (figure 32). A gauche, les courbes en trait plein correspondent

aux moyennes mondiales du réchauffement en surface (par rapport à la période 1980-1999). La courbe rose correspond au cas où les concentrations se maintiendraient aux niveaux de 2000 (aucune augmentation de GES). Les barres au milieu de la figure indiquent les valeurs les plus probables (zone foncée) et les fourchettes probables d'augmentation de la température à la surface du globe selon les scénarios SRES (Special Report on Emission Scenarios en français ; Le Rapport spécial sur les scénarios d'émissions) de référence pour la période 2090 par rapport à 1980-1999. A droite, l'évolution projetée de la température en surface pour le début et la fin du 21^{ème} siècle par rapport à la période 1980-1999 selon les projections moyennes obtenues à l'aide de plusieurs modèles pour les scénarios A2, A1B et B1 pour les décennies 2020-2029 et 2090-2099.



5.1. Température

Le changement de la température moyenne à la surface du globe pour la période 2016–2035 relativement à 1986–2005 sera probablement compris entre 0,3 °C et 0,7 °C. Ce changement pour la période 2081-2100, relativement à 1986–2005, sera probablement dans les plages allant de 0,3 °C à 4,8 °C selon les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway). L'Arctique se réchauffera plus rapidement que l'ensemble du globe et le réchauffement moyen sera plus important à la surface des continents qu'à la surface des océans. Un réchauffement au-delà de 2 °C est probable pour les scénarios RCP6,0 et RCP8,5. Mais, il est improbable que le réchauffement dépasse 4 °C (figure 33).

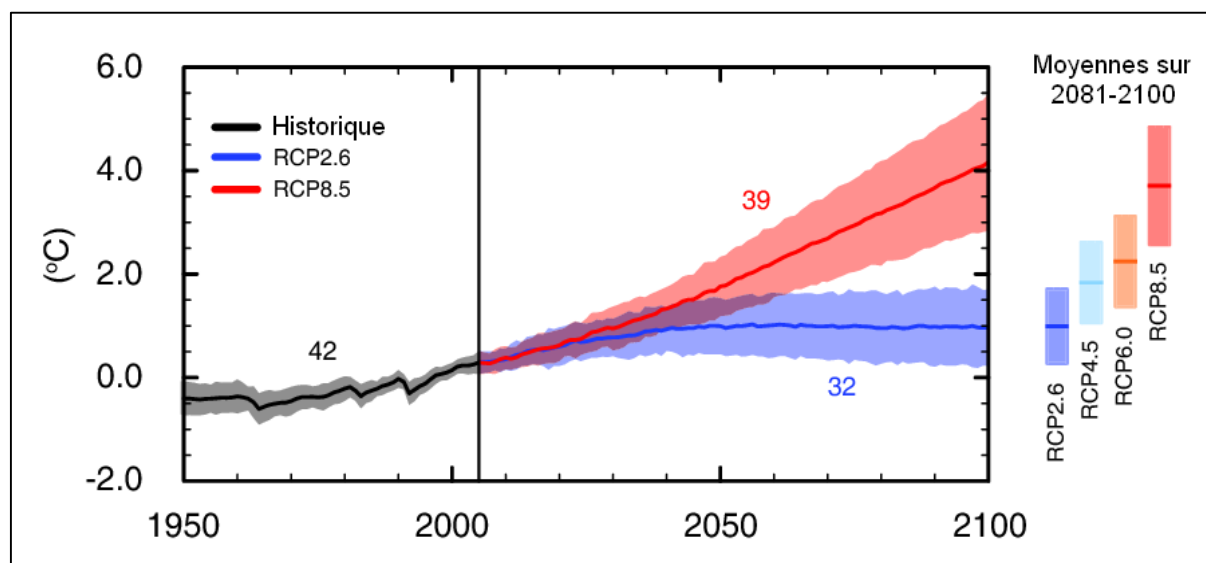


Figure 31. Séries chronologiques simulées à partir de plusieurs modèles CMIP5 de 1950 à 2100 pour l'évolution de la température annuelle moyenne du globe en surface par rapport à la période 1986-2005 (GIEC, 2013)

5.2. Cycle de l'eau

Plusieurs auteurs (GIEC, 2007b ; IFPRI, 2009 ; Chapron *et al.* 2010 ; GIEC, 2013) affirment que les changements concernant le cycle mondial de l'eau en réponse au réchauffement au cours du 21^{ème} siècle ne seront pas uniformes. Le contraste des précipitations entre régions humides et régions sèches ainsi qu'entre saisons humides et saisons sèches augmentera, bien qu'il puisse exister des exceptions régionales. La moyenne annuelle des précipitations augmentera probablement dans les hautes latitudes et l'océan Pacifique équatorial d'ici la fin de ce siècle dans le cas du RCP 8,5. Dans de nombreuses régions de moyennes latitudes et dans les régions subtropicales arides, les précipitations diminueront probablement, tandis que dans de nombreuses régions humides de moyennes latitudes, les précipitations moyennes augmenteront probablement d'ici la fin de ce siècle dans le cas du RCP 8,5 (GIEC, 2013).

5.3. Qualité de l'air

La gamme des projections de qualité de l'air (ozone et PM 2,5¹⁷ dans les basses couches atmosphériques) est essentiellement déterminée par les émissions (dont le CH₄), plutôt que par le changement climatique physique. Le GIEC (2013) affirme qu'en moyenne globale, le réchauffement diminue la concentration de fond de l'ozone en surface. Des concentrations élevées en CH₄ peuvent retarder cette diminution, ce qui augmente la concentration de fond de l'ozone d'environ 25 % des niveaux actuels en moyenne vers l'année 2100.

5.4. L'océan

Selon le GIEC (2013), l'océan continuera à se réchauffer au cours du 21^{ème} siècle à l'échelle mondiale. De la chaleur sera absorbée à la surface et pénétrera jusqu'à l'océan profond, perturbant la circulation océanique. Les estimations les plus probables sur les cent premiers mètres sont d'environ 0,6 °C à 2,0 °C et d'environ 0,3 °C à 0,6 °C à une profondeur d'environ 1 000 m vers la fin du 21^{ème} siècle. Selon les scénarios pris en compte, il est *très improbable* que la circulation méridienne océanique de retournement de l'Arctique (AMOC) subisse une transition brutale ou s'effondre au cours du 21^{ème} siècle. Cependant, un effondrement après le 21^{ème} siècle suite à un réchauffement important et prolongé ne peut être exclu.

5.5. La cryosphère

Selon le GIEC (2013), il est très probable qu'au cours du 21^{ème} siècle, l'étendue et l'épaisseur de la banquise arctique continueront à diminuer. Vers la fin du 21^{ème} siècle, cette diminution est comprise pour septembre, entre 43 et 94 % et pour février, entre 8 et 34 %. De même, l'étendue du manteau neigeux de l'hémisphère nord diminuera au printemps, au fur et à mesure de l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe. À l'échelle mondiale, les glaciers continueront de perdre de leur volume.

5.6. Le niveau des mers

Le niveau moyen mondial des mers continuera à s'élever au cours du 21^{ème} siècle (figure 34). L'élévation moyenne du niveau des mers pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005 sera probablement comprise entre 0,26 et 0,82 m (degré de confiance moyen). Pour 2100, l'élévation du niveau des mers est comprise entre 0,52 et 0,98 m, avec un rythme moyen de 8 à 15 mm. an⁻¹. Cette élévation ne sera pas uniforme. Il est très probable que le niveau des mers augmentera sur plus de 95 % environ de la surface des océans. Selon les projections, environ 70 % des littoraux du monde vont connaître un changement du niveau des mers proche de l'élévation moyenne (GIEC, 2013).

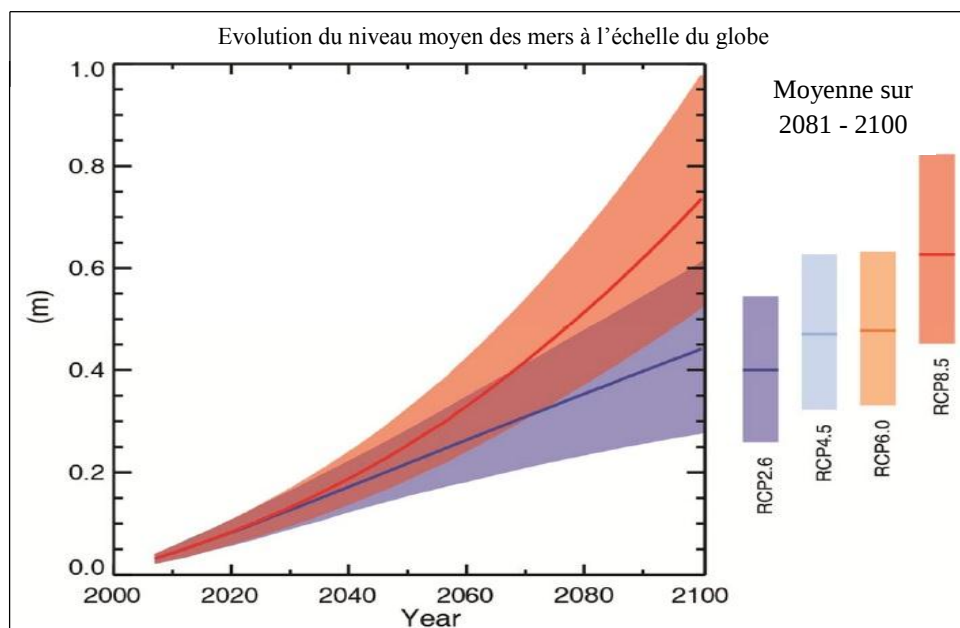


Figure 32. Projections de l'élévation du niveau des mers au cours du 21^{ème} siècle par rapport à la période 1986-2005 (GIEC, 2013).

6. Le changement climatique en Algérie

De nombreuses études réalisées sur le changement climatique en Algérie (MATE, 2001 ; Djellouli, 2007 ; Tabet-Aoul, 2008 ; Nedjraoui et al. 2009 ; Dakiche, 2011 ; Chabane, 2012 ; Belala et Hirche, 2013 ; Nichane et Khelil, 2014 ; *in* Baghdadli 2014) confirment que le pays a subi un réchauffement climatique accompagné d'une baisse sensible des précipitations.

La hausse des températures au 20^{ème} siècle s'est située entre 1,5 et 2 °C en Algérie, soit plus du double de la hausse moyenne planétaire qui est de 0,74°C (Tabet-Aoul, 2008 ; Chabane, 2012). Les températures annuelles oscillent entre 21,5°C (1916) et 23,5°C (1985). Les années les plus froides sont respectivement 1917, 1925, 1974 et 1976, et les années les plus chaudes sont 1945, 1954, 1985, 1988 et 1997 (figure 35).

L'évolution récente du climat montre une augmentation des températures moyennes annuelles estimée entre 0,5°C (Boucherf, 2007 ; Saci, 2007 ; *in* Baghdadli 2014) et 1,6 °C (Matari et al. 2007 ; *in* Baghdadli 2014). L'examen de l'évolution des températures a mis en évidence une hausse de température moyenne sur l'ensemble du pays au cours des saisons d'hiver et d'automne, mais aussi, une hausse nette des températures minimales et maximales sur l'ensemble du Nord du pays. (Tabet-Aoul, 2008 ; *in* Baghdadli 2014)

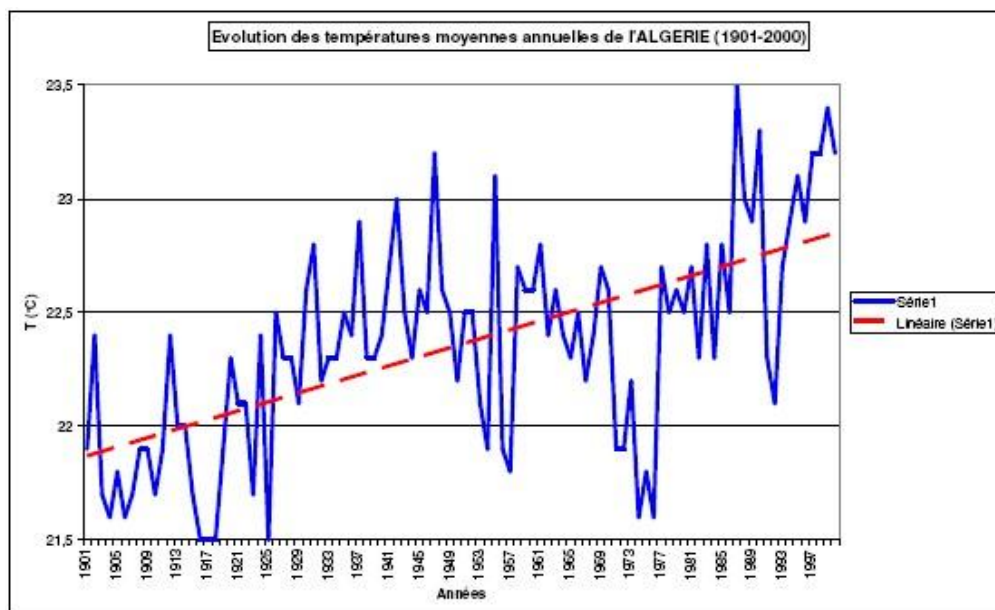


Figure 33. Evolution des températures moyennes annuelles de l'Algérie (1901-2000) (Abderrahmani, 2014).

Quant à la baisse de la pluviométrie au 20^{ème} siècle, elle varie entre 10 % et 20 % (Boucherf, 2007 ; Tabet-Aoul, 2008 ; Chabane, 2012). Ce déficit est beaucoup plus prononcé pour la région ouest (20%) que pour la région centre (13 %) et la région Est du pays (12 %).

Pour certaines stations, la réduction des précipitations peut s'échelonner entre 20 et 40 % (Djellouli, 2007). Les précipitations annuelles oscillent entre 128 mm (1901) et 59 mm (1984) (Abderrahmani, 2014) avec des années pluvieuses (1901, 1957 et 1976) et des années plus sèches (1914, 1926, 1938, 1984 et 1999-2000) (figure 36).

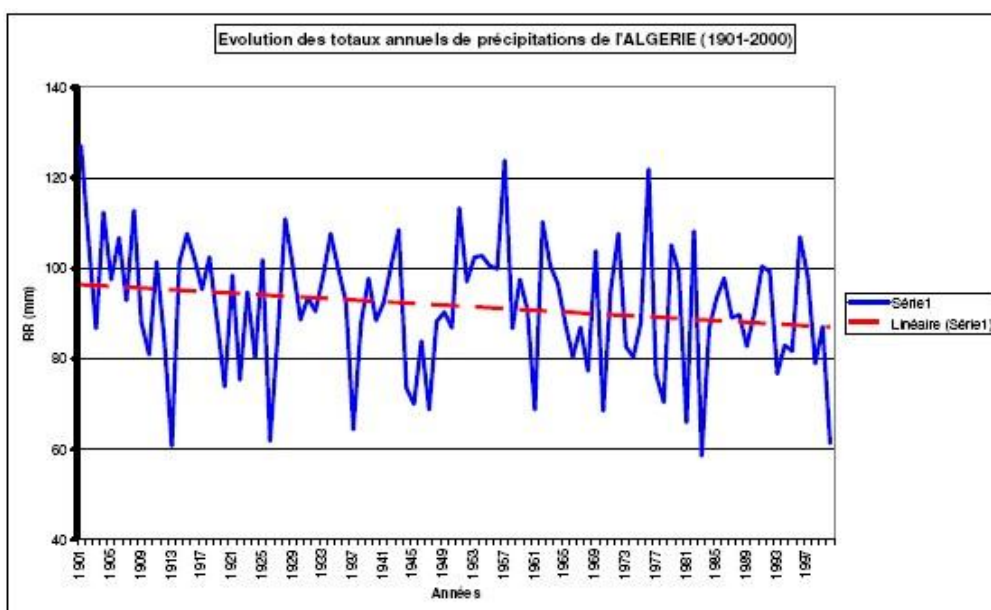


Figure 34. Evolution des totaux annuels de précipitations en Algérie (1901-2000) (Abderrahmani, 2014).

Nedjraoui et al. (2009) et Dakiche (2011 ; *in* Baghdadli 2014) confirment la tendance à l'aridité des zones semi-arides et des zones steppiques (figure 37). Le déficit pluviométrique est compris entre 17 et 27% ; la variation interannuelle des précipitations est importante et la sécheresse est plus prononcée notamment au niveau des steppes occidentales avec l'augmentation des saisons sèches de 2 mois. Le risque de la désertification étant trop élevé.

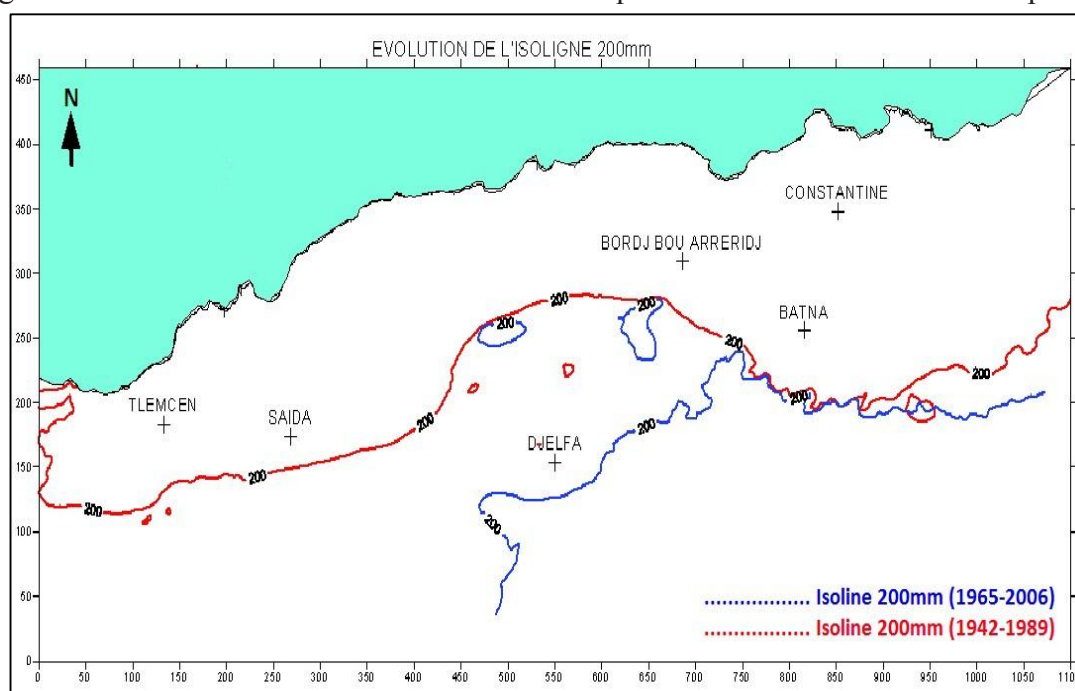


Figure 35. Evolution de l'isoline 200mm en Algérie (Dakiche, 2011).

Les projections futures du climat en Algérie, élaborées par les modèles de circulation générale (MCG), révèlent en moyenne une augmentation de température de 1°C et une diminution des précipitations de l'ordre de 10 % à l'horizon 2020 (Tabet-Aoul, 2008) et plus que le double de ces valeurs à l'horizon 2050, soit une augmentation des températures de 2° à 3 °C et une chute des précipitations de 10 à 30 % (Chabane, 2012 ; *in* Baghdadli 2014).

Les données de projections climatiques saisonnières sur l'Algérie à l'horizon 2020 et 2050 obtenues par le modèle UKHI (United Kingdom Meteorological Office High Resolution) en utilisant le scénario « IS92A », montrent la même tendance avec des étés et des automnes plus chauds et des hivers moins pluvieux (MATE, 2010 ; *in* Baghdadli 2014). Le printemps sera une saison moins clémente (tableau 15).

Tableau 15. Caractéristique des projections climatiques sur l'Algérie aux horizons 2020 et 2050 (MATE, 2010).

Saison	Paramètres climatique	2020		2050	
		Bas	Haut	Bas	Haut
Automne	T °C	0,8	1,1	1,2	2,2
	P %	6	8	10	15
Hiver	T °C	0,65	0,8	0,95	1,6
	P %	10	10	16	16
Printemps	T °C	0,85	0,95	1,25	1,9
	P %	5	9	10	20
Eté	T °C	0,85	1,05	1,25	2,1
	P %	8	13	15	22

7. L'eau et le changement climatiques

Le constat dressé par la division Eau de l'ONU (Organisation des Nations Unis) (UN-Water 2010) est clair : « L'eau est le premier intermédiaire par lequel le changement climatique impacte les écosystèmes terrestres, ainsi que le mode de vie et le bien-être de nos sociétés ». Ces impacts peuvent jouer à la fois sur le cycle annuel de l'eau et sur les extrêmes comme les risques d'inondation et de sécheresse, et ainsi affecter durablement l'hydro-système. (Florence, HABETS et al., 2011) ; *in* Baghdadli 2014)

7.1. Impact du changement climatique sur le cycle hydrologique

Selon les travaux du GIEC et des autres études (Houghton et al, 2001), la température de l'air et des océans est le premier paramètre qui, soumis à l'impact du changement climatique, va influencer sur le cycle de l'eau en modifiant les conditions d'alimentation du réservoir atmosphérique (taux d'évaporation, degré d'humidité de l'air). Ces modifications vont, dans un second temps, impacter la pluviométrie, avec, pour conséquence, des modifications spatiales et temporelles des régimes de précipitations qui caractérisent aujourd'hui notre territoire. Une fois précipitée sur le sol, l'eau est soumise au phénomène d'évapotranspiration, qui, lui-aussi, sera impacté par les modifications climatiques prévisibles (notamment la température de l'air). Cela va engendrer une modification sur la pluie efficace, la quantité de ruissèlement et la quantité d'eau infiltré. (WATELET, 2010)

7.2. Impact du changement climatique sur les eaux de surface

Plusieurs études indiquent que l'écoulement de surface a augmenté à l'échelle globale au cours du 20^{ème} siècle (Labat et al. 2004 ; Milly et al, 2005 ; *in* Baghdadli 2014). Cette évolution masque toutefois des tendances régionales opposées : les débits des fleuves ont augmenté de manière importante en Europe du Nord et au nord-ouest de l'Amérique du Nord tandis qu'ils ont eu tendance à diminuer en Europe du Sud et en Afrique sub-saharienne. (Lespinas, 2008)

La sécheresse intense et persistante, observée en Algérie durant les 30 dernières années du 20^{ème} siècle et caractérisée par un déficit pluviométrique évalué à 30 % (50 % durant l'année 2001- 2002), a eu un impact négatif sur les régimes d'écoulement des cours d'eau. Par conséquence la contribution du ruissellement aux eaux de surface a, systématiquement, diminué avec les pluies diluviennes et les glissements de terrain qui favorise l'envasement et la réduction de la capacité des réservoirs d'eau, par conséquence, les flux trop faibles ne permettent pas de remplir suffisamment les barrages existants. (Kadi, 1997)

7.3. Impact du changement climatique sur les eaux souterraines

Le rapport du GIEC (2008) sur le changement climatique et l'eau aborde sommairement le cas des eaux souterraines. Il constate ainsi que le niveau de nombreux aquifères dans le monde tend à diminuer ces dernières années mais que cela est souvent lié à leur surexploitation ainsi qu'aux prélèvements dans les cours d'eau qui leur sont associés. Le rapport du GIEC mentionne également que, du fait du manque de données et de la forte inertie des aquifères, aucune modification sensible de la recharge des nappes liée au climat n'a encore été observée. Cependant, le GIEC insiste sur le fait que très peu de recherches ont été menées sur l'incidence du changement climatique sur les eaux souterraines. (Bates,B et al., 2008)

En Algérie, la diminution des pluies due aux sécheresses qui sévissent depuis le début des années 70 a entraîné une baisse constante des réserves d'eau souterraine des principales nappes aquifères du nord du pays. Dans beaucoup de plaines du pays, le niveau des nappes phréatiques a déjà chuté dans des proportions alarmantes (> 20 m.).

L'aggravation des sécheresses conjuguée à la surexploitation des nappes phréatiques a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides comme le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. Le taux moyen d'utilisation des nappes phréatiques est de 79% dans la région Nord, il peut parfois atteindre et dépasser les 90% dans certaines zones. (Bates,B et al., 2008)

Dans les régions côtières, la baisse des niveaux de pression hydrostatique a déjà entraînée la pénétration d'eau de mer dans les réserves d'eau douce des nappes aquifères côtières des régions de la Mitidja, d'Oran, de Terga et d'Annaba.

8. Conclusion

Le climat a changé ; il évolue et continuera à changer d'avantage. Cela constitue une préoccupation majeure pour le monde entier du fait des risques et des incertitudes liés à ce phénomène. Tous les pays doivent non seulement mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales mais aussi coopérer efficacement à l'échelle internationale pour pouvoir atténuer les impacts de ce changement climatique. Certes, les pays développés sont beaucoup plus impliqués dans cette situation et doivent assurer un appui technique et financier aux pays du Sud qui, pour la plupart, souffrent des conditions climatiques difficiles et des retards socio-économiques.

Selon le GIEC qui est la principale source d'information scientifique de la qualité sur le réchauffement climatique, il existe plusieurs indicateurs du changement climatique à l'échelle globale, nous citons à titre d'exemple : l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre, l'augmentation du niveau de la mer à environ 17 cm au cours du dernier siècle, une diminution dans la masse des calottes de glace et modification de fréquence des événements extrêmes.

Les indicateurs du changement climatique en Algérie peuvent être résumés en l'augmentation de la température moyenne de 0,5 °C pendant les 40 dernières années et un déficit pluviométrique dans la même période estimé de 10 % de la moyenne. Donc nous pouvons dire que les changements climatiques en Algérie se présentent sous forme d'une sécheresse.

Les causes du changement climatiques à l'échelle globale sont multiples, Certain sont naturelle comme le phénomène d'effet de serre. D'autres sont liés à l'activité humaine, en particulier, le rejet des gaz à effet de serres.

CHAPITRE 6 : L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FLUCTUATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE LA PLAINE DE L'OUED NADOR

1. Introduction

Dans le but de montrer l'existence du changement climatique au niveau de la région de Tipaza et précisément dans la plaine de l'Oued Nador et de déterminer ces impacts sur l'évolution du niveau piézométrique de la nappe, on a adopté une approche appuyée sur plusieurs outils. En premier lieu, on va utiliser les méthodes statistiques pour la détection de la rupture au sein des séries pluviométriques. Ce sont des tests statistiques permettant de déceler un éventuel changement brutal et naturel dans la moyenne des mesures pluviométriques et de température qui touche la zone d'étude.

Ensuite, on calcule des indices climatiques appropriés qui permettent de mettre en évidence les périodes excédentaires et les périodes déficitaires en s'appuyant sur les précipitations annuelles observées dans la plaine de l'Oued Nador, ces indices sont utilisés, en effet, pour suivre l'évolution du climat.

En fin, on tentera de déterminer le lien des résultats obtenus à partir des tests statistiques appliqués et des indices calculés pour les séries pluviométriques observées dans les stations (d'Ain Tagourait, de Djebabra, d'Attatba Cave, de Hadjout et de Boukourdane), avec l'évolution de niveau piézométrique de la nappe de l'Oued Nador.

2. Présentation de la méthodologie

L'approche adoptée pour atteindre l'objectif souligné dans le présent chapitre se résume dans les étapes suivantes :

1. La détection des ruptures au sein des séries pluviométriques et de température annuelles.
2. Mise en évidence du changement climatique par les calculs des indices appropriés.
3. comparer les résultats obtenus avec l'évolution du niveau piézométrique de la nappe de l'Oued Nador.

2.1. Détection des ruptures : tests statistiques

Selon Lubès et al. (1994) ; *in* Baghdadli 2014), une rupture peut être définie de façon générale comme étant un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique. (ACHITE, Mohammed *et al*, 2014)

La stationnarité ou non stationnarité des séries pluviométriques intéresse beaucoup les utilisateurs de ces dernières dans les différentes applications (hydrologie, agronomie, gestion des ressources hydriques, etc.). La détection d'une ou plusieurs ruptures renseigne sur l'évolution pluviométrique d'une région donnée. (KHALDI, 2005)

En vue de détecter d'éventuelle rupture dans les séries pluviométriques de la zone d'étude, on a adopté une approche statistique basée sur le test de Pettitt (Pettitt, 1979) et la statistique U de Buishand (Buishand, 1984)

2.1.1. Test de Pettitt

Le test de Pettitt est un test non paramétrique. Il dérive du test de Man-Wihtney, il a été décrit par plusieurs auteurs (Pettitt, 1979 ; Lubes et al. 1994 ; Lubes-Niels et al. 1998). Il permet de vérifier la stationnarité de la série pluviométrique. Il se propose de tester l'hypothèse H_0 « Absence de rupture dans la série (X_i) de taille N » face à l'hypothèse alternative H_a « Présence d'une rupture dans la séquence ». (El Ibrahimi, 2015)

2.1.2. Statistique U de Buishand

Le test est de nature Bayésienne, en supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture t , la statique U de Buishand est définie par :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k^*}{D_x} \right)^2}{N(N+1)}$$

D'où : $S_k = \sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})$ pour k variant de 1 à N , et D_x désignée l'écart type de la série. (Omar, Chadid, 2003)

En cas de rejet de l'hypothèse nulle « H_0 », aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série (X_i). La variable Sk , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $[k(N-k)\sigma^2]/N$, k variant de 0 à N sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série X_i . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des Sk . (Omar, Chadid, 2003)

2.2. Evolution des indices climatiques

Afin de suivre l'évolution des précipitations annuelles et expliquer au mieux ses changements et ses impacts sur l'évolution du niveau de la nappe souterraine de la plaine de l'Oued Nador, nous proposons de suivre l'évolution de quelques indices climatiques.

Un indice climatique est une combinaison d'au moins deux variables décrivant l'état de l'atmosphère pour caractériser le climat d'un lieu (Beltrando, 1995). Les variables les plus utilisées sont les précipitations, la température, la pression atmosphérique et l'évapotranspiration. Progressivement, les indices ont incorporé des informations de plus en plus nombreuses et complexes, résultant de traitements antérieurs et provenant même parfois de disciplines connexes. Aujourd'hui, les indices climatiques sont utilisés dans de multiples domaines. (Tommy, Klein, 2009)

Vu à la complexité du climat, il est difficile de faire une analyse de tous ces composantes. Certains auteurs se sont penchés sur la possibilité de mettre en évidence l'évolution et les fluctuations temporelles des précipitations, on peut citer entre autres :

2.2.1. L'indice de pluviosité (I_p)

C'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle à la hauteur moyenne annuelle de précipitation.

$$I_p = P_i / P_m$$

D'où : $\left\{ \begin{array}{l} P_i: \text{la pluie annuelle de l'année } i \text{ (mm).} \\ P_m: \text{la pluie moyenne annuelle de la série (mm).} \end{array} \right.$

L'intérêt de cette méthode est d'identifier les séquences sèches et leurs caractérisations. Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1. Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne (I_{pm}) qui diffère de l'indice de pluviosité en soustrayant 1 de cet indice.

$$I_{pm} = I_p - 1$$

Le cumul des indices d'années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année à l'autre. Quand la somme des indices croît, il s'agit d'une tendance humide. La tendance est de type « sèche », dans le cas contraire. Lorsque la hauteur moyenne annuelle présentée est calculée sur une période assez longue, et que la distribution n'est très loin de la loi normale on peut utiliser le rapport à la normale au lieu de la moyenne. (KHALDI, 2005)

2.2.2. L'indice de précipitations standardisé (SPI)

L'indice de précipitations standardisé ou SPI (Standardized precipitation index en anglais), est un indice statistique de type probabiliste. Il a été mis au point par l'université de Colorado au début des années 90 (McKee, 1993). Il était développé dans le but d'identifier et gérer les

sécheresses locales. Il permet aussi de vérifier bien les périodes/cycles humides que les périodes/cycles sec. (Tommy, Klein, 2009)

L'Organisation météorologique mondiale a adopté le SPI en 2009 comme instrument mondial pour mesurer les sécheresses météorologiques, aux termes de la « Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse ».

Pour calculer le SPI, il faut au moins des relevés pluviométriques mensuels étalés sur 20 à 30 ans (Guttman, 1999). Très souvent, la standardisation consiste à soustraire la moyenne aux données et à diviser le résultat par l'écart-type de la série. Il est exprimé de l'expression mathématique suivante :

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma}$$

$$D'où : \begin{cases} P_i : \text{Précipitation de l'année } i \text{ (mm)} \\ P_m : \text{Précipitation moyenne de la série (mm)} \\ \sigma : \text{l'écart type} \end{cases}$$

En plus d'être un indice de sécheresse, ce dernier peut également nous renseigner sur la sévérité de celle-ci. Une échelle de sévérité a été donnée par Mackee et *al.* (1993). Elle est présentée dans le tableau ci-après.

Tableau 16. Classes de sévérité des sécheresses selon les valeurs du SPI (Mackee et al 1993).

Valeurs du SPI	Classes
Plus de 2.0	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Sévèrement humide
1 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à 0.99	Proche de la normale
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
Moins de -2.0	Extrêmement sèche

2.2.3. L'indice de déficit pluviométrique (IDP)

L'indice de déficit pluviométrique (IDP) permet de montrer et de calculer le nombre des années déficitaires et leur succession. Une année est qualifiée d'humide si cet indice est positif, de sèche lorsqu'il est négatif. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IDP (\%) = ((P_i - P_m)/P_m) \times 100$$

Où :

IDP : Indice de déficit pluviométrique (en pourcentage).

P_i : précipitation annuelle (en mm).

P_m : précipitation moyenne (en mm).

2.2.4. L'indice de sécheresse (IS)

Il permet d'estimer le déficit pluviométrique annuel. Cet écart à la moyenne est la différence entre la hauteur des précipitations d'une année P_i et la hauteur moyenne annuelle de précipitations P de la série. Il s'exprime par la formule suivante :

$$IS = P_i - P$$

L'indice est positif pour les années humides et négatives pour les années sèches.

3. Application

Dans ce qui suit, nous allons montrer les résultats obtenus en utilisant ces méthodes et outils et interpréter ces résultats.

3.1. Détection de ruptures dans les séries pluviométrique annuelles

Pour rechercher les ruptures de stationnarités des enseignements pluviométriques. On a procédé à l'application de la statistique U de Buishand et le test de Pettitt.

Cette procédure a été menée sous xlstat sur les cinq (05) séries pluviométriques (Attatba Cave, Hadjout, Ain tagourait, Djebabra et Boukourdane) adoptes précédemment dans la présente étude. Le tableau 17 montre les résultats obtenus.

Tableau 17. Resultats des tests de Pettitt et de Buishand sur les séries pluviométriques.

Tests statistiques	Observations	Attatba cave	Hadjout	Ain Tagourait	Djebabra	Boukourdane
Pettitt	Année de rupture	2001	2005	2006	1991	1986
	P-VALUE	13,2 %	6,6 %	32,5 %	76,7 %	61,3 %
	mu. Avant	571,17	501,59	502,03	598,74	588,65
	mu. Après					
Buishand	Année de rupture	2001	1986	2006	1993	2003
	P-VALUE	7,6 %	6,5 %	33,1 %	72 %	28,4 %
	mu. Avant	571,17	501,59	502,03	598,74	588,65
	mu. Après					

mu : la moyenne de la série pluviométrique de 1982 à 2015.

Dans l'application des tests statistiques (Pettitt et Buishand), on a choisi un intervalle de confiance de 5 %.

L'application du test de Pettitt a révélé une rupture naturelle des précipitations au niveau de la série de Hadjout en 2005 sans changement de la moyenne (figure 39). Cette rupture est acceptée avec un intervalle de confiance de 10 %. Selon le même test, les autres séries ne présentent pas de rupture du régime pluviométrique car la p-value est supérieure à 10 % (figure 38, 40, 41 et 42).

Le test de Buishand a permis de détecter une rupture sans changement de la moyenne dans les séries d'Attatba Cave (figure 38) et Hadjout (figure 39) en 2001 et 1986 respectivement. La p-value calculée pour les stations d'Ain Tagourait, Djebabra et Boukourdane indique que ces stations sont homogènes (p-value supérieure à 10 %).

Par ailleurs, on peut constater que la série de Hadjout présente deux ruptures différentes (1986 et 2001). Ces deux ruptures peuvent déterminer une période qui pourrait être caractérisée par une sécheresse ou une pluviométrie excédentaire.

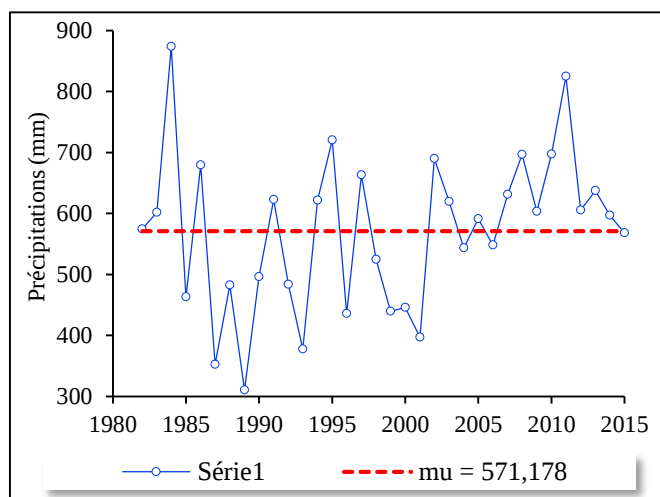


Figure 38. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série d'Attatba Cave.

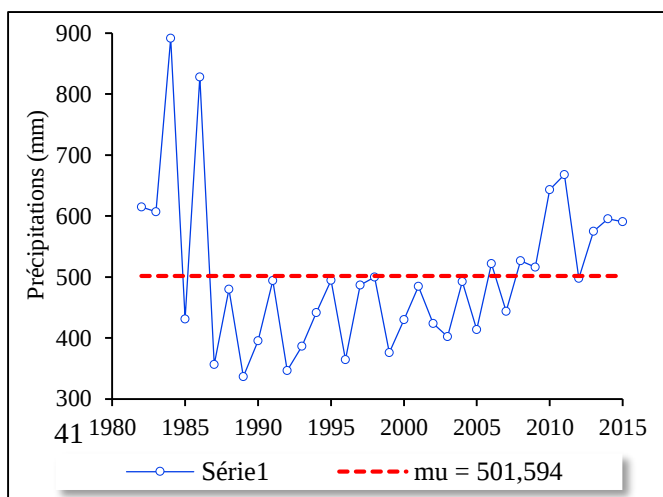


Figure 37. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Hadjout.

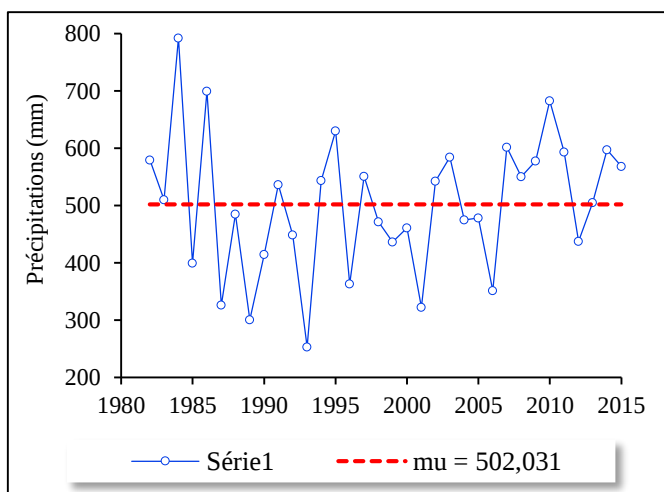


Figure 39. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série d'Ain Tagourait.

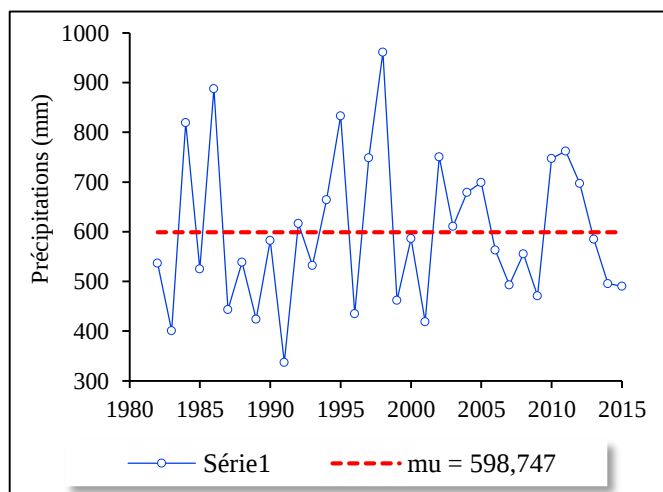


Figure 36. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Djebabra.

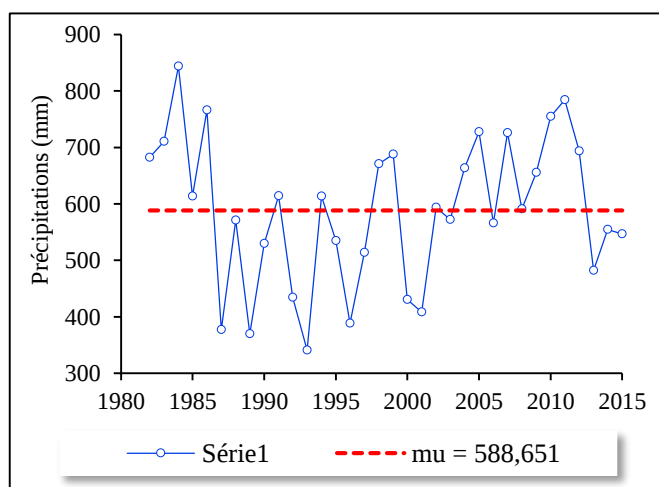


Figure 40. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et de Buishand appliqués sur la série de Boukourdane.

3.2. Détection de ruptures dans la série de température annuelle

En vue de déceler la rupture dans les enregistrements de la température, on a appliqué les tests statistiques adoptés sur la série de la station de Boukourdane qui présente des observations sur la période allant de 1987 à 2017.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-après.

Tableau 18. Résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqué sur la série de Boukourdane (1987-2017).

Station	Valeur de μ	Année de rupture	P-VALUE	
			Test de Pettitt	Test U de Buishand
Boukourdane	18,037	2003	61,4 %	56 %

μ : la moyenne de la série de température annuelle de station de Boukourdane 1987 à 2017.

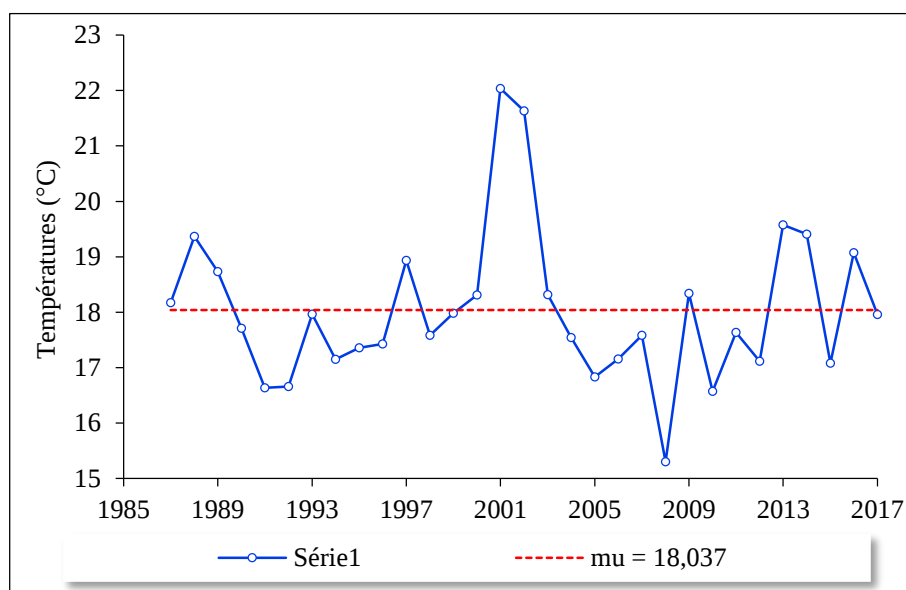


Figure 43. Graphe obtenu par les tests de Pettitt et Buishand appliqués sur la série de Boukourdane (1987-2017).

La série de température annuelle (figure 43) observée à la station de Boukourdane (1987-2017) est homogène selon les résultats des tests statistiques appliqués. La p-value de loin le seuil de confiance de 10 %. On constate une absence de rupture dans cette station.

3.3. Evolution des indices climatiques

L'étude de l'évolution des indices climatiques nous a permis de déterminer les périodes sèches et humides ainsi que la variabilité spatiale des précipitations au niveau de la plaine.

3.3.1. L'indice de précipitation standardisé (SPI)

L'évolution de l'indice de précipitation standardisé (SPI), indique une variabilité temporelle des précipitations. Cette variabilité est caractérisée par une alternance des phases humides, proche de la normal et sèches pour les différentes stations.

L'illustration graphique de l'indice de précipitations standardisé, 1982-2015, a permis de mettre en évidence deux périodes bien distinctes ; la première étant sèche de 1987 à 2006 pour les deux (02) stations de la région ouest, (figure 44), (Attatba Cave et Ain Tagourait) tandis que la seconde s'étale de 1987 à 2009 pour les stations pluviométriques dans la région est de la zone d'étude (Station de Hadjout, station de Djebabra).(figure 45)

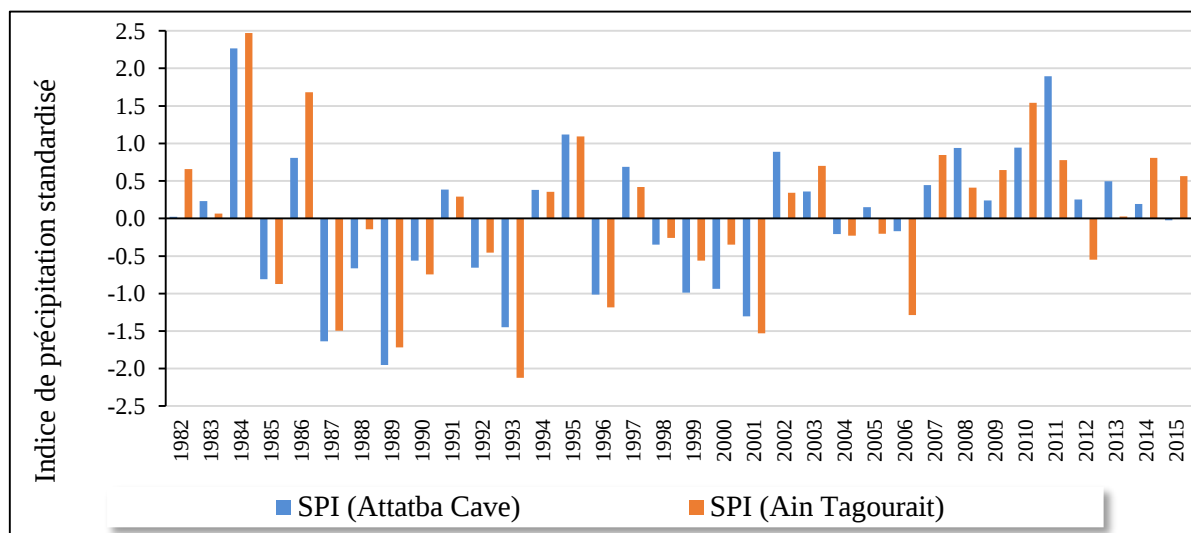


Figure 44. Indice de précipitation standardisé des stations d'Attatba Cave et Ain Tagourait (1982-2015).

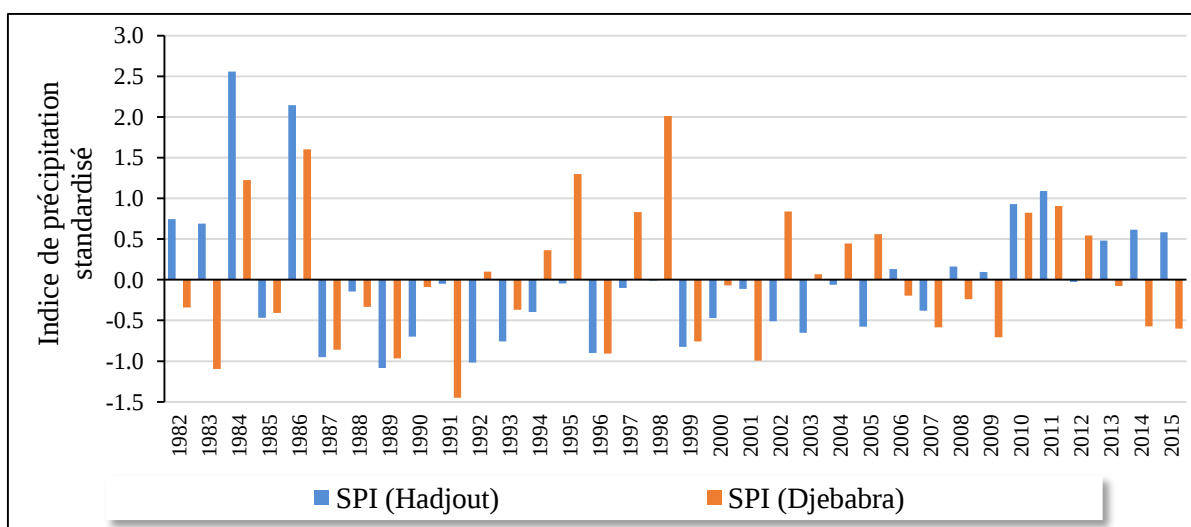


Figure 45. Indice de précipitation standardisé des stations de Hadjout et de Djebabra (1982-2015).

Les trente-quatre années d'observation des séries pluviométriques de la période 1982-2015, sont réparties en années sèches et années humides en tenant compte des valeurs de l'indice de précipitations standardisé (tableau 19).

Tableau 19. Fréquences des années pluviométriques en fonction de l'Indice de Précipitations Standardisé (SPI).

Echelle SPI	Observation	Station d'Attatba Cave	Station de Hadjout	Station Ain Tagourait	Station de Djebabra
$2 < \text{SPI}$	Humidité extrême	01	02	01	01
$1.5 < \text{SPI} < 1.99$	Humidité sévère	02	00	02	01
$1 < \text{SPI} < 1.49$	Humidité modéré	01	01	01	02
$0 < \text{SPI} < 0.99$	Humidité légère	17	11	14	10
$0 < \text{SPI} < -0.99$	Sécheresse légère	08	17	10	16
$-1 < \text{SPI} < -1.49$	sécheresse modéré	03	03	02	04
$-1.5 < \text{SPI} < -1.99$	Sécheresse sévère	01	00	03	00
$\text{SPI} < -2$	Sécheresse extrême	01	00	01	00

La période d'observation 1982-2015 est caractérisée par huit années de sécheresse légère pour la station d'Attatba Cave, de 17 années pour la station de Hadjout, 10 années pour la station d'Ain Tagourait et 16 années pour la station de Djebabra. Pour le nombre d'années d'humidité légère, on a enregistré 17 années pour la station d'Attatba Cave, 11 années pour la station de Hadjout, 14 pour la station d'Ain Tagourait et 10 pour la station de Djebabra.

L'année 1989 a connu une sécheresse sévère ($P = 300,40$ mm) enregistrée au niveau de la station d'Attatba Cave et les années 1984 et 1998 se sont manifestées par une humidité extrême avec une pluviométrie de 891,3 mm (station de Hadjout) et 961,6 mm (Djebabra). Il est à noter que la période 1982-2015 a connu une sécheresse extrême avec une pluviométrie de 252,9 mm durant l'année 1993 enregistrée au niveau de la station d'Ain Tagourait.

3.3.2. L'indice de déficit pluviométrique (IDP)

L'indice de déficit pluviométrique a permis d'estimer la variation ponctuelle des précipitations par rapport à la normale. Le déficit le plus important enregistré durant toute la période d'observation est de - 50 % enregistré au niveau de la station D'Ain Tagourait en 1993 (figure 48). Le déficit pluviométrique est plus important, en nombre d'années successives, de 1987 à 1993, de 1998 à 2001 et de 2010 à 2015.

La première phase de déficit pluviométrique s'est étalée sur sept ans (1987-1993) avec un taux maximal de - 50 % (1993). La seconde phase est marquée par quatre années de déficit pluviométrique et un taux maximal de - 36 % enregistré dans la station d'Ain Tagourait en 2001.

L'excès pluviométrique, pour cette période 1982-2015 est observé en 1984, 1986 et 1998 avec, respectivement, 78 %, 65 % et 61 %.

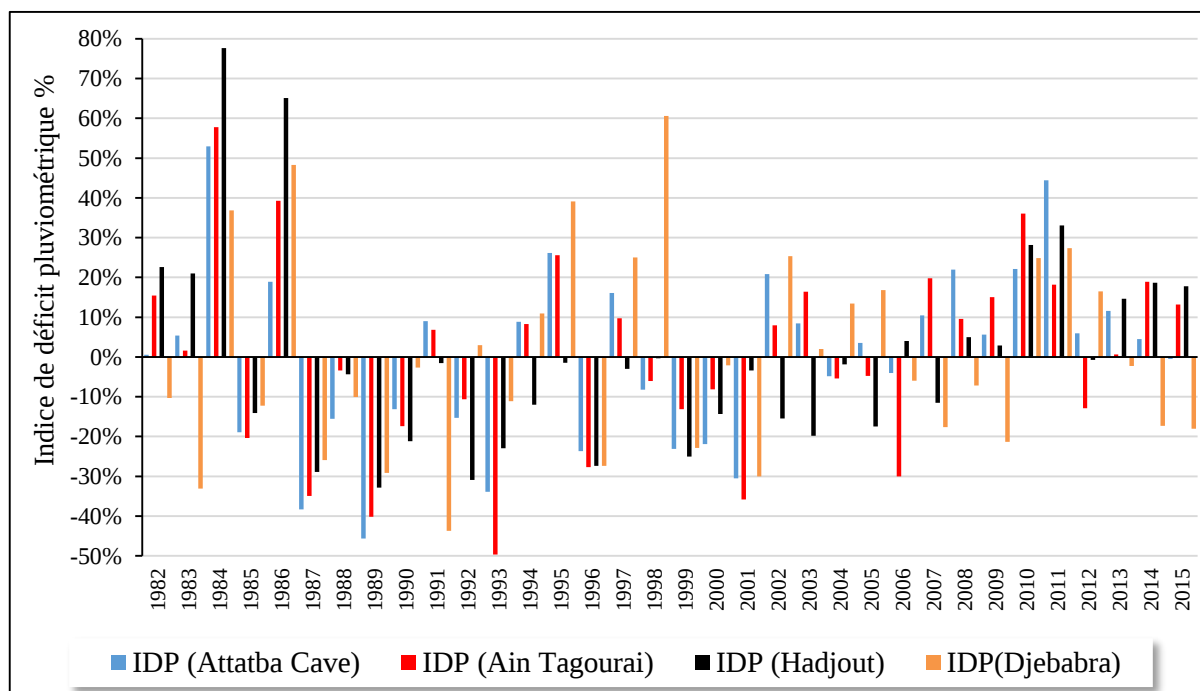


Figure 416. Indice de Déficit Pluviométrique (IDP %) des stations d'Attatba Cave, Hadjout, Ain Tagourait et Djebabra (1982-2015).

3.3.3. Indice de pluviosité (IP)

Le graphique de l'évolution de l'indice de pluviosité a permis de constater que les épisodes de sécheresse de 1985 à 1999 et de 2010 à 2015 sont d'une intensité allant de légère à modérée (figure 47).

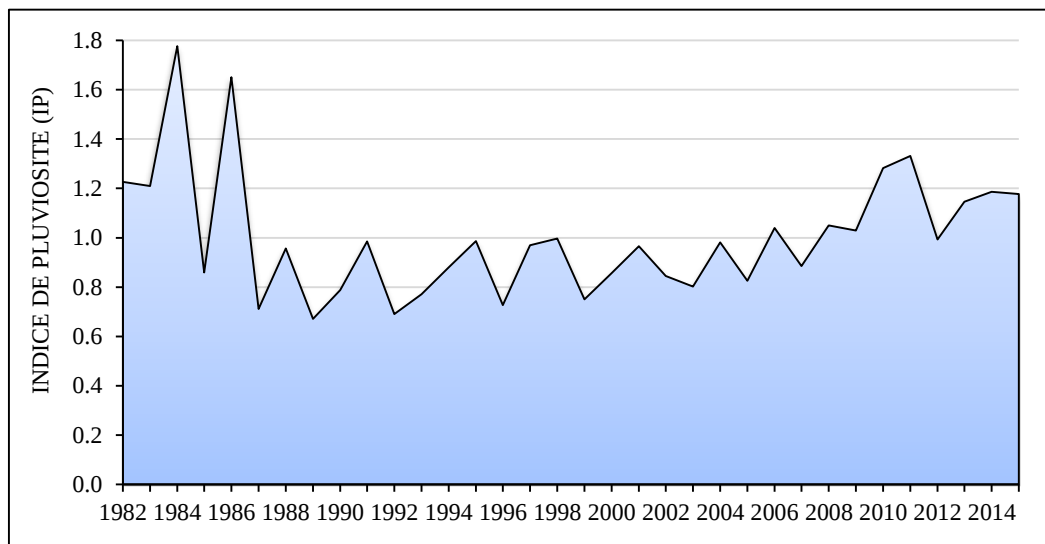


Figure 47. Indice de Pluviosité (IP) des stations d'Attatba Cave et de Hadjout (1982-2015).

3.3.4. Indice de sécheresse (IS)

La détermination du niveau de sévérité des sécheresses vécues est effectuée par le calcul de l'indice de l'écart à la moyenne. L'analyse de la figure 50 a rendu encore possible la confirmation d'une sécheresse légère à modérée observée dans la série pluviométrique des stations d'Attatba Cave et de Hadjout durant la période 1982-2015.

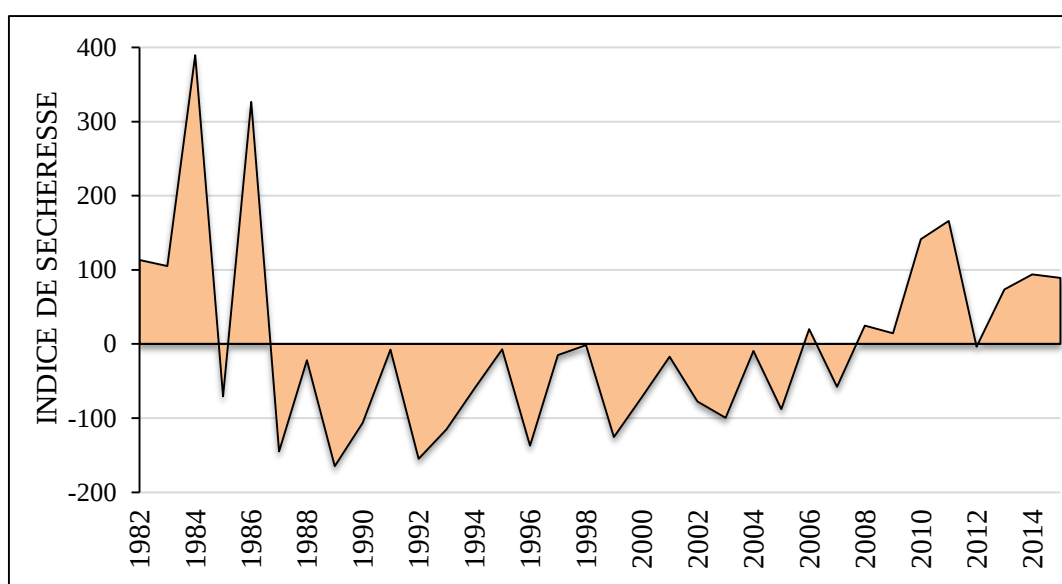


Figure 48. Indice de Sécheresse des stations d'Attatba Cave et de Hadjout (1982-2015).

4. Relation entre l'évolution du niveau piézométrique de la nappe et le changement climatique dans la zone d'étude

La détermination de fluctuation de la surface piézométrique de la nappe souterraine de la plaine de l'Oued Nador est basée, d'une part sur les mesures de la piézométrie relevés par les services du l'ANRH, et d'une autres part les données et les résultats des études menés par d'autres travaux.

De nombreuses campagnes piézométriques ont été effectuées dans notre zone d'étude depuis plusieurs années, notamment par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) qui réalise deux campagnes au minimum chaque année (une en basses eaux et une autre en hautes eaux).

L'analyse de l'évolution du niveau statique dans les quatre points d'eau (P153, P161, P13, PCRf) (Figure 49), montre une baisse importante. Cette baisse commence à partir de la période de hautes eaux en 1988 jusqu'à avril 2000. Cette baisse est dû à une période de sécheresse prolongé de 13 ans (1988 à 2000), qui a sévi dans la région, accompagnée d'une diminution considérable des précipitations pendant cette période et la surexploitation de la nappe de l'Oued Nador pour des fins essentiellement agricoles qui vient compliquer la situation et constitue un autre facteur qui a participé dans la baisse du niveau piézométrique de la nappe.

À partir de 2001, on remarque une remontée du niveau statique de la nappe marquée d'une façon appréciable au niveau du puits numéro 153. Cette remonté est dû principalement à la recharge liée aux précipitations. Cette dernière est confirmée par les indices climatiques.

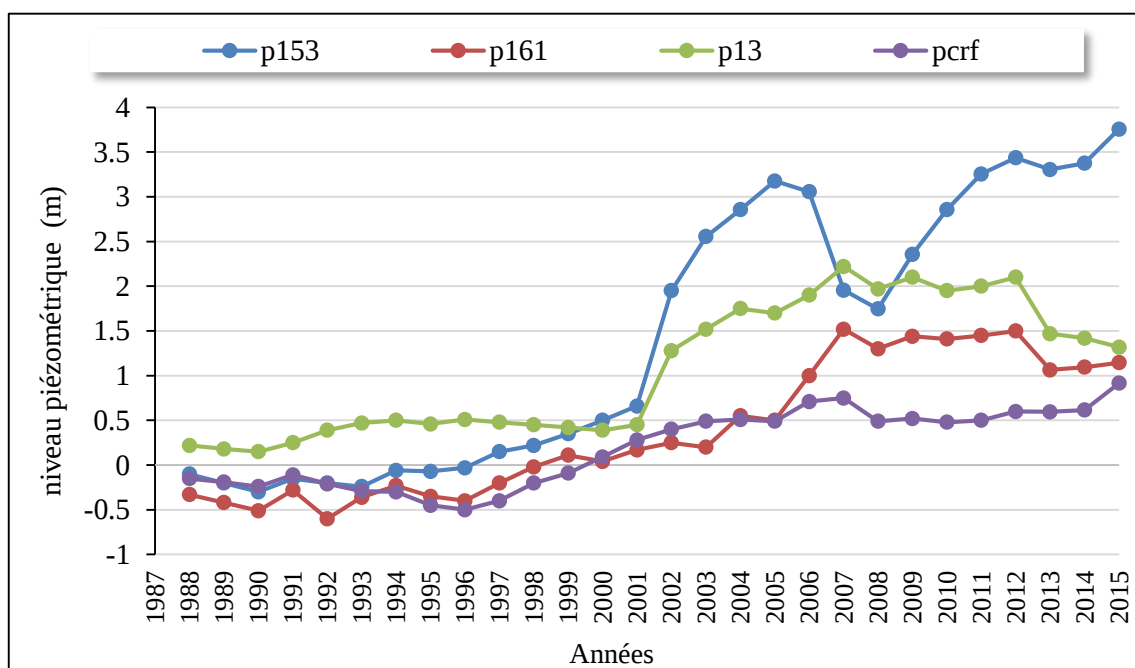


Figure 49. Evolution du niveau statique dans la plaine de l'Oued Nador, période 1988-2015.

5. Conclusion

La détection de la rupture se fait par des tests statiques réalisés à l'aide de xlstat : la statistique U de Buishand (1984), le test de Pettitt (1979). Les résultats obtenus ont montré la présence d'une homogénéité dans les séries pluviométriques pour les cinq (05) stations (Attatba Cave, Hadjout, Ain Tagourait, Djebabra et Boukourdane) utilisées, Cependant plusieurs études ont confirmé la présence d'une rupture dans les années 70 en Algérie caractérisé par un déficit pluviométrique. Dans notre cas, le manque de données de cette période a empêché la détection de ces ruptures.

L'évolution des indices climatiques a montré la présence d'une variabilité temporelle des précipitations avec l'existence des périodes de sécheresse principalement entre 1986 et 2002. À partir de 2002, nous avons une période humide caractérisée par une augmentation de la pluviométrie et une baisse de la température.

L'analyse de la fluctuation du niveau de la nappe a montré que ce dernier a connu un rabattement significatif pendant les années sèches (1988 à 2000). Ce rabattement est dû principalement aux déficits pluviométriques. À partir de 2001, une légère remontée du plan d'eau, dû principalement à l'augmentation de la pluviométrie, est observé.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'évaluer la fluctuation du niveau piézométrique de la plaine de l'Oued Nador dans un contexte de changement climatique que la région subit ces dernières décennies.

La plaine de l'Oued Nador est située à l'Ouest d'Alger. Cette plaine s'étale selon un axe orienté NNE-SSO dont l'axe principal est occupé par l'Oued Nador. Cette plaine referme des potentialités en eau souterraine considérables.

La géologie de la région est très complexe car la région fait partie du domaine tellien constituant la ride du Sahel, formée essentiellement par des sédiments moi-plio-quaternaires. La plaine de l'Oued Nador est constituée par des remplissages plio-quaternaires dont le substratum argileux et marneux est d'âge plaisancien. Le réservoir formant l'aquifère est constitué par un faciès grésocalcaires d'âge astien et par des alluvions quaternaires.

L'ensemble des données climatiques a permis d'attribuer à la région un climat tempéré méditerranéen caractérisé par un hiver humide et pluvieux allant du mois d'octobre au mois d'avril et un été chaud et sec allant du mois de mai au mois de septembre, avec une précipitation moyenne annuelle de 552,5 mm durant la période d'observation qui s'étale sur 34 ans (1982-2015). Selon le bilan hydrologique établi, on a constaté que seulement 8 % de la pluie moyenne s'infiltre pour alimenter la nappe de l'Oued Nador. Ce qui reste des précipitations tombées dans la zone d'étude se partage entre l'évapotranspiration réelle (75,1 %) et le ruissellement (16,9 %).

L'étude hydrogéologique a révélé l'existence nappes superposées constituent un système aquifère. La nappe sous-jacente formée essentiellement des grès, affleure sur le versant su Sahel, cependant, les alluvions quaternaire (nappe sus-jacente) se trouve par endroit, sous un recouvrement de marne et d'argile ou affleurent en formant le cordon dunaire au Nord de la plaine.

L'examen des cartes piézométriques des périodes hautes eaux et basses eaux des années 2003 et 2016, a montré que la nappe de l'Oued Nador est alimentée par les frontières surtout par sa bordure est (pentes du Sahel). L'écoulement souterrain suit un axe de drainage similaire à l'axe de la plaine. La partie aval de la plaine, l'Oued Nador draine la nappe et assure son alimentation par les eaux souterraines.

Une variabilité des précipitations de la plaine de l'Oued Nador a été mise en évidence à l'aide des tests statistiques (test de Pettitt et test de Buishand) et des indices pluviométriques. Une période déficitaire a marqué la zone d'étude vers la fin des années 80 et le début des années 2000. Cette période coïncide avec une tendance à la baisse du niveau piézométrique de la zone d'étude.

À partir des années 2000 nous remarquons une légère remontée du niveau piézométrique qui concorde bien avec des années pluviométriques excédentaires observées durant la décennie 2000.

Nous terminons ce travail par quelques recommandations que nous jugeons indispensables pour une meilleure compréhension des problèmes hydrogéologiques dans la zone d'étude d'une part, et d'autre part pour l'amélioration de ce travail :

- L'installation des stations hydrométriques en amont et en aval du lit de l'Oued Nador et l'élaboration des jaugeages différentiels pour connaître son régime, l'exhaure et l'étude de la relation Oued-Nappe.
- Mener une campagne de sensibilisation des habitants et des agriculteurs exploitants la nappe en leur expliquant les causes et les conséquences qui résultent d'une éventuelle intrusion marine afin de respecter les débits d'exploitation pour éviter l'épuisement des ressources par la surexploitation de la nappe.
- Mettre à l'arrêt l'exploitation de tous les puits et forages fortement contaminés afin de lutter contre l'avancer du biseau salé et éviter la dégradation des sols. D'autres forages de remplacement peuvent être réalisés en amont de la nappe.
- Elaborer des procédures de recharges et de réalimentation artificielle de la nappe de l'Oued Nador.
- Collecter les eaux usées déversées directement dans l'Oued Nador en amont de la plaine vers une STEP afin de procéder à l'épuration de ces eaux et de les réutiliser selon la réglementation en vigueur.

Références Bibliographiques

- Abderrahmani, Belaid. (2014).** Les risques climatiques et leurs impacts sur l'environnement, thèse doctorat en génie de l'environnement, université des sciences et de la technologie d'Oran.
- Achite, Mohammed et al. (2014).** Etude de la variabilité climatique dans le nord-ouest algérien (Bassin versant de l'Oued Mina) : approche statistique. international journal of environment & water .
- Aissaoui, A. (2016).** Hydrologie et hydrogéologie du bassin versant de l'Oued M'zi (Laghouat, Algérie), mémoire Magister, université d'Oran 2, Faculté des sciences de la terre et de l'univers.
- Ait-Ouali, Abdelkader. (2007).** Système hydrogéologique et vulnérabilité à la pollution du système aquifère quaternaire de la Mitidja, mémoire Magister, université des sciences technologiques « Houari Boumediene », Faculté des sciences de la terre.
- Ammari, A. (2012).** Vulnérabilité à l'envasement des barrages (cas du bassin Hydrographique des cotiersd Algérois).
- Andi. (2015).** Agence Nationale de Développement de l'Investissement .
- Ayme A. et al. (1954).** Etude des terrains néogènes de la cluse du Mazafran (Sahel d'Alger). Bull. Sery. Carte géol Algérie, Nouv. Ser, n°1, trav. Coll. Fasc II : 129-150.
- Bafdil et Mokdad. (2016).** Identification des sources de pollution en milieu alluvionnaire Application à la Mitidja Ouest. Zone D'Ahmer el Ain.Mémoire Master . Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Baghdadli, I. (2014).** L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch. 74pages. Mémoire master. université abou bekr belkaid – tlemcen. faculte de technologie. departement d'hydraulique.
- Bates, B. et al. (2008).** Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le GIEC, Genève, 236p.
- Benhammadi, H. (2016).** Effets de la variabilité climatique sur les ressources en eaux d'un aquifère karstique -cas du plateau de Chéria, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba, département de géologie.
- Belkasemi, M. (2012).** annuaire hydrogéologique de la nappe alluviale de l'Oued Nador.
- Benmeddah, K. (2018).** Etablissement de carte de ressources en eaux souterraines de la Wilaya de Tipaza.
- Bouleghlem Z. (2015).** Étude hydrogéologique et évaluation des ressources en eau dans la région azzaba-guerbes, Thèse Magister, université Badji Mokhtar- Annaba, Faculté des sciences de la terre, département de Géologie.

- Beziada, M. (1994).** Etude hydrogéologique et hydrologique de la plaine de la Mitidja Est (Application d'un modèle mathématique «ASM » au bassin Côtier Algérois. Thèse présentée à l'Université de Franche-Comté.
- Binnie et Partners. (1972).** Modèle mathématique de la nappe de la Mitidja.
- Bouillin, J. (1986).** Le bassin maghrébin ; une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique. l'ouest des alpes. Bull. Soc. Géol. France, 8 (2) 547-558.
- Christian, Godin. (2002).** La totalité, Volume 5. Editions Champ Vallon- 954 pages. Disponible sur : " books.google.fr ".
- Djeddis, A. (2018).** SEAAL.
- Djenba, Samir. (2015).** Influence des paramètres : géologique, géomorphologique et hydrogéologique sur le comportement mécanique des soles de la wilaya de Sétif. Thèse Doctorat en sciences, option Hydraulique, Université Mohamed Kheider-Biskra, Faculté des sciences et de la technologie.
- Durand-Delga. (1969).** Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Sery. Géol. Algérie, n°39, 89-131.
- El Ibrahim, A. (2015).** Etude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piezométrique des nappes phréatique superficielle en zone semi-aride (Cas de la plaine de Sais, Nord du Maroc) , European scientific journal.
- Farah, Abdelhafidh, K. (2014).** Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Mémoire magister. universite constantine 1, faculte des sciences de la nature et de la vie, departement de biologie et ecologie.
- Florence, Habets et al. (2011).** Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Eau Seine Normandie. Disponible sur < sisyphus.upmc.fr>.
- Glangeaud, L. (1952).** Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger, Thèse Sciences, Paris et Bull. Sery. Carte Géol. Algérie, Ser, n°2 star n°8.
- Helga-Jane Scarwell, I. R. (2010).** Le changement climatique : Quand le climat nous pousse à changer d'ère. Presses Univ. 358 pages.Disponible sur "books.gogle.fr ".
- Jacques, Dermagne et al. (2006).** Partager la connaissance et ouvrir le dialogue : le changement climatique. Groupe de réflexion Académies et Conseil économique et social.
- Kadi, A. (1997).** La gestion de l'eau en Algérie, Hydrological Sciences (Journal des Sciences Hydrologiques), Vol,42, N°2, 191-197.
- Khaldi, A. (2005).** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saïda". universite d'oran. Faculté des sciences de la terre, de Géographie et l'aménagement du territoire.

- Hachemi, A. (2016).** Etude de l'intrusion marine dans les aquifères côtières. Cas de l'aquifère côtier de l'Oued Nador, thèse de Doctorat, Ecole supérieure agronomie, El Harrach, Alger, département de Génie rural.
- Lespinas, F. (2008).** Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de doctorat. université de perpignan.
- Mesbah, M. (1981).** contribution à l'étude hydrogéologique de la basse vallée de l'oued Nador.
- Mazar, A. (2014).** Impact des changements climatiques sur les ressources en eau superficielles. 60 pages. ENSH Blida.
- Mousselmal, Mohammed. (2015).** Contribution à l'étude de la recharge des nappes par procédés artificielles. Mémoire de magister. Ecole nationale supérieure d'hydraulique-Arbaoui Abdellah, département aménagement et génie hydraulique, option aménagement et ouvrages hydrauliques.
- Omar, Chadid. (2003).** Analyse des séries hydrométriques par la transformée en ondellettes. Ecole de technologie supérieure université de Québec.
- Saida , Niazi. (2007).** Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse doctorat. université mohammed v – agdal .
- Seghir, Karima. (2008).** Vulnérabilité a la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active su sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien), thèse doctorat en Hydrogéologie, université Badji Mokhtar Annaba, faculté des sciences de la terre.
- Tabeaud, Martine. (2008).** La climatologie générale. 3ème édition. Paris : Armand Colin. 126p.
- Tabet, S. (2008).** Le changement climatique en Algérie orientale et ses consequences sur la végétation forestière. Mémoire magistère. universite mentouri - constantine.
- Tommy, Klein. (2009).** Comparaison des sécheresses estivales de 1967 et 2003 en Europe occisentale à l'aide d'indices climatiques.
- Wassila, Khouldja et al. (2014).** Caractérisation de la variabilité climatique : cas du bassin versant de la Medjrada (Nord-Est algérien).
- Watelet, J.-m. (2010).** impact du changement climatique sur la stabilite des cavites souterraines. rapport d'étude. L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques. Disponible sur < ineris.fr>.
- www.coalition-eau.org. (2014).** Le mouvement des ONG françaises engagées pour l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous. Eau et changement climatique : note de recherche. Consulté le 22-07-2019.

Annexe N° 1 : Précipitations moyennes mensuelles des stations étudiées.

mois	Attatba Cave	Pont CW7 Hajout	Ain Tagourait	Djebabra	Boukerdane
septembre	28.07	24.38	27.31	28.38	25.66
octobre	50.84	49.95	47.74	52.73	56.21
novembre	87.39	72.9	82.37	94.47	79.82
décembre	86.77	68.39	70.07	105.04	92.44
janvier	82.58	69.28	71.22	97.23	88.7
février	74.13	59.52	69.59	78.82	80.21
mars	55.47	56.07	50.99	75.18	62.89
avril	52.46	44.55	46.28	63.71	55.33
mai	42.77	29.02	38.77	41.32	36.47
juin	5.83	7.5	6.67	7.3	7.44
juillet	1.75	1.38	1.88	0.51	1.64
août	4.3	0.99	4.43	2.81	1.84

Annexe N° 2 : Précipitations totales annuelles des stations étudiées.

Année	Attatba Cave	Pont CW7 Hadjout	Ain Tagourait	Djebabra	Boukerdane
1982	574.5	614.9	579.4	536.9	682.4
1983	601.9	606.9	509.9	400.7	710.9
1984	873.8	891.3	792.0	819.6	844.1
1985	463.1	430.8	399.7	525.3	613.4
1986	679.2	828.1	699.4	887.7	766.2
1987	352.4	356.6	326.5	443.6	377.1
1988	482.5	479.6	485.1	538.6	571.3
1989	310.6	336.7	300.4	424.3	369.7
1990	496.2	395.2	414.6	582.9	529.6
1991	622.5	493.9	536.5	337.2	614.3
1992	483.8	346.7	448.6	616.5	434.3
1993	377.7	386.5	252.9	532.4	340.6
1994	621.9	441.3	543.6	664.5	613.4
1995	720.5	494.5	630.4	833.1	534.9
1996	435.8	364.5	363.2	434.9	388.7
1997	663.2	486.5	551.1	748.8	513.8
1998	524.4	499.9	471.7	961.6	671.0
1999	439.3	376.1	436.3	461.9	687.9
2000	445.9	429.8	461.1	586.4	430.3
2001	396.9	484.5	322.4	419.0	408.3
2002	690.1	423.9	542.2	750.6	593.5
2003	619.5	402.2	584.4	610.9	572.2
2004	543.7	492.3	475.1	679.0	663.6
2005	591.4	413.9	478.0	699.5	727.8
2006	548.4	521.8	351.2	563.2	565.8
2007	630.9	443.8	601.5	493.1	726.2
2008	696.6	526.5	550.1	555.7	591.0
2009	603.4	516.1	577.6	471.1	655.7
2010	697.4	642.9	682.9	747.7	754.6
2011	824.7	667.6	593.4	762.4	784.4
2012	605.2	497.9	437.4	697.3	693.5
2013	637.4	575.0	505.2	585.0	482.2
2014	597.1	595.3	597.1	495.3	554.7
2015	568.2	590.7	568.2	490.7	546.8
Moy	571.18	501.59	502.03	598.75	588.65

N.B : les valeurs en Gras sont les valeurs comblées.

Résumé

La présente étude est consacrée à la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe de l'Oued Nador dans un contexte du changement climatique. La zone d'étude est une plaine qui fait partie d'un grand ensemble littoral appelé Sahel d'Alger. Elle est située à 75 km à l'Ouest d'Alger. Cette plaine renferme un aquifère composé à sa base par une nappe de grès astien et une nappe alluvionnaire quaternaire sus-jacente recouverte par des marnes par endroits.

L'étude piézométrique a révélé une baisse du niveau d'eau dans le système aquifère entre les années 1980 et le début des années 2000. Le niveau piézométrique a marqué une tendance positive durant la décennie 2000. Une approche statistique basées sur les tests de Pettitt et de Buishand ainsi que des indices pluviométriques a permis de déterminer, d'une part, une période déficitaire qui coïncide avec la période de la baisse du plan d'eau de la nappe, et d'autre part, une tendance à la hausse des précipitations dans la zone d'étude dont les années humides ont contribué à la recharge de la nappe de l'Oued Nador.

Mots clés : Eaux souterraines, Oued Nador, changement climatique, pluviométrie, tests statistiques.

Abstract

This study is devoted to the fluctuation of the piezometric level of the Oued Nador aquifer in the context of climate change. The study area is a plain that is part of a large coastal complex called the Sahel of Algiers. It is located 75 km west of Algiers. This plain contains an aquifer composed at its base by a layer of Astian sandstone and an overlying quaternary alluvial layer covered by marls in places.

The piezometric study revealed a drop in the water level in the aquifer system between the 1980s and the early 2000s. The piezometric level marked a positive trend during the 2000s. A statistical approach based on Pettitt test and Buishand test as well as rainfall indices made it possible to determine, on the one hand, a deficit period which coincides with the period of the decline of the aquifer, and on the other hand, an upward trend in precipitation in the study area, the wet years of which have contributed to the recharge of the Oued Nador aquifer.

Key words : Underground waters, Oued Nador, climate change, rainfall, statistical tests.