République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la vie

Département de Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers.

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

Méthodologie d'étude de faisabilité d'un ouvrage de recharge artificielle en zone semi-aride : Cas de la région d'El Ma El Abiod (N.E Algérie)

Présenté par :

Sakher Radja

Devant le jury :

Président	**BAALI FETHI**	**Professeur**	**Echahid Larbi Tébessi -Tébessa**
Encadreur	**BENHAMMADI HOCINE**	**MCA**	**Echahid Larbi Tébessi -Tébessa**
Aide Encadreur	**FEHDI CHEMSEDDINE**	**Professeur**	**Echahid Larbi Tébessi -Tébessa**
Examinateur	**SEGHIR KARIMA**	**MCA**	**Echahid Larbi Tébessi -Tébessa**

Année universitaire : 2025/2024



Remerciements



Louange infinie à Dieu, le Tout-Puissant, source de science et de sagesse, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force intérieure qui ont guidé mes pas jusqu'à l'accomplissement de ce travail.

Avec un profond respect et une sincère gratitude, je dédie ce modeste travail à ceux dont la bienveillance et l'engagement ont marqué mon parcours académique :

À Monsieur le Professeur Baali Fethi, président du jury, dont la rigueur scientifique et la générosité intellectuelle ont rehaussé la valeur de ce mémoire.

À Monsieur le Professeur Fehdi Chemseddine, rapporteur attentif et guide éclairé, pour son accompagnement constant, ses conseils judicieux et sa confiance indéfectible qui ont nourri ma réflexion et soutenu mon cheminement.

À Madame Seghir Karima, examinatrice, pour sa lecture exigeante et ses remarques précieuses qui ont enrichi ce travail.

À Monsieur Benhamadi, maître de conférences, pour sa disponibilité, ses encouragements sincères et ses conseils toujours pertinents.

À mes parents bien-aimés, piliers de mon existence, dont l'amour inconditionnel, les sacrifices silencieux et les prières constantes m'ont porté dans chaque étape de ce voyage : ce travail vous appartient autant qu'à moi.

Et à toutes celles et ceux — enseignants, camarades, amis — qui, par un mot, un geste ou une présence, ont contribué, de près ou de loin, à nourrir ma quête de savoir : recevez ici l'expression de ma reconnaissance la plus profonde.







Dédicaces



Louange à Dieu، grâce à Lui s'accomplissent toutes les bonnes œuvres, et par Sa grâce, j'ai pu achever ce modeste travail.

À mon cher père, Sakher Bachir, qui a toujours été mon soutien et mon pilier à chaque étape, que Dieu le protège et le garde.

À ma chère mère, Hadda Bouziane, source d'amour et de générosité, je prie Dieu de lui accorder longue vie, santé et bien-être.

À mon frère bien-aimé, Saleh Sakher, compagnon de route et soutien constant, que Dieu le bénisse et le protège.

À ma sœur adorée, Abir Sakher, fleur de la maison et de l'âme, je demande à Dieu de lui accorder bonheur et succès dans sa vie.

À l'âme de mon grand-père bien-aimé, feu Saleh Sakher, que Dieu ait pitié de lui, le couvre de Sa miséricorde, et fasse de sa tombe un jardin du Paradis.

À ma grand-mère respectable, feu Bahia Behiri, je prie Dieu de lui pardonner, de lui faire miséricorde, et de lui accorder le plus haut des Paradis par Sa grâce.

À ma grand-mère bien-aimée, Oum El-Zine Sakher, pour qui nous prions pour la santé et la longévité, que Dieu la protège et la garde.

À mon grand-père cher, Labidi Bouziane, dont la présence illumine et bénit notre vie, je demande à Dieu de lui accorder santé et bien-être.

Enfin, à mes chères amies, Nada, Noussaiba, Khawla, Ranin, Zineb, Asmaa, Khouloud, qui ont été un soutien et une source de joie tout au long de mon parcours, je prie Dieu qu'Il nous rassemble toujours dans le bien et la bénédiction.

À vous tous, j'offre ce modeste travail en signe de reconnaissance et de gratitude, et je demande à Dieu de vous récompenser au centuple et de nous accorder à tous le Paradis éternel.

الملخص

تُعدّ المياه مورداً أساسياً، خصوصاً في المناطق شبه الجافة حيث تكون التساقطات ضعيفة، غير منتظمة، وغالباً غير كافية لتلبية الاحتياجات المتزايدة. وتُجسّد منطقة الماء الأبيض (تبسة) هذه الإشكالات بوضوح، نظراً للضغط الكبير الذي تعاني منه الطبقات الجوفية نتيجة الاستغلال المفرط ونقص البدائل المائية.

تهدف هذه الدراسة الى وضع منهجية لتقييم جدوى إنشاء منشآت للتغذية الاصطناعية للمياه الجوفية، بهدف تعزيز الموارد المائية الجوفية بشكل مستدام. ويتمثل المشروع النموذجي في إنشاء حوض مائي وبناء سدود ترابية على مستوى ثلاثة أودية فرعية (وادي القوسة، وادي الملسود، وواد الزنيد) والتي تصب جميعها في وادي الماء الأبيض.تعتمد هذه المقاربة على تحليل متعدد المعايير يأخذ بعين الاعتبار الخصائص الجيولوجية والهيدرولوجية والطبوغرافية للمنطقة، من أجل تحديد المواقع الأنسب للتغذية الاصطناعية وتقييم آثارها المحتملة على البيئة وتوفر المياه.

Résumé

L’eau constitue une ressource essentielle, en particulier dans les régions semi-arides où les précipitations sont faibles, irrégulières et souvent insuffisantes pour répondre aux besoins croissants. La région d’El Malabiod (Tébessa) illustre clairement ces problématiques, en raison de la forte pression exercée sur les nappes phréatiques, due à la surexploitation et au manque d’alternatives en matière de ressources en eau.

Cette étude vise à établir une méthodologie d’évaluation de la faisabilité de la mise en place d’ouvrages de recharge artificielle des nappes phréatiques, dans le but de renforcer durablement les ressources en eau souterraine. Le projet pilote envisagé consiste en la création d’une mare d’eau et la construction de digues en terre au niveau de trois sous-bassins versants (Oued El Goussa, Oued El Malassoued et Oued E’Zned) qui se jettent tous dans l’Oued El Ma El Abiod. Cette approche repose sur une analyse multicritère prenant en compte les caractéristiques géologiques, hydrologiques et topographiques de la région, afin d’identifier les sites les plus appropriés pour la recharge artificielle et d’évaluer ses impacts potentiels sur l’environnement et la disponibilité de la ressource en eau

Abstract

Water is an essential resource, particularly in semi-arid regions where rainfall is low, irregular, and often insufficient to meet growing needs. The region of El Malabiod (North east of Algeria) clearly illustrates these issues due to the heavy pressure on groundwater reserves caused by overexploitation and the lack of alternative water resources.

This study aims to establish a methodology for assessing the feasibility of implementing artificial groundwater recharge structures, with the goal of sustainably enhancing groundwater resources. The proposed pilot project involves the creation of a water pond and the construction of earthen dams in three sub-watersheds (Oued El Goussa, Oued El Malassoued, and Oued E'Zned), all of which flow into Oued El Ma El Abiod. This approach is based on a multi-criteria analysis that considers the geological, hydrological, and topographical characteristics of the region in order to identify the most suitable sites for artificial recharge and to assess its potential impacts on the environment and water resource availability.

Contenu

Introduction générale……1

Chapitre 01 : …….. 3

1 Introductions 4
2 Situation géographique 4
3 Topographie et géomorphologie de la région étudiée 6
4 La géologie de la région 6
4.1 Stratigraphie 7
4.1.1 TRIAS 7
4.1.2 CRÉTACÉ 7
4.1.3 TERTIAIRE 11
4.1.4 Quaternaire 12
5 TECTONIQUE 15
5.1 Première phase 15
5.2 Deuxième phases 15
6 Styles tectoniques 16
6.1 Mouvements récents 16
7 Paléogéographie 17
8 Conclusion 18

Chapitre 02 ……...19

1 Introductions 20
2 Étude de la région d'El Malabiod par prospection électrique 20
3 Les coupes géo-électriques 21
3.1 Coupe transversale 1 (Nord-Sud) 21
3.2 Coupe transversale II. (Nord-Sud) 23
3.3 Coupe transversale III. (Nord-Sud) 24
3.4 Coupe transversale IV. (Sud-ouest - nord-est) 25
3.5 Coupe transversale V. (sud-ouest - nord-est) 27
4 Les Cartes isopaches 27
4.1 Carte d'égales épaisseurs des sables. 27
4.2 Carte d'égale épaisseur des grès 28
4.3 Carte d'égale épaisseur des argiles sableuses 29
5 Conclusion 29

Chapitre 03 : ……30

1 Introductions 31
2 Type de climat de la région d'El Malabiod 31
2.1 Indice d'aridité de DE. Martonne 31
3 Précipitation 32
3.1 Variations interannuelles des précipitations 32
4 Température 33
4.1 Variations de la température moyenne mensuelle 34
5 Vent 35
6 Bilan hydrologique 35
6.1 Estimation des paramètres du bilan hydrologique 35
6.1.1 Evapotranspiration potentielle (ETP) 35
6.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) 37
6.1.3 Équation de Turc pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) 37
6.2 Les différentes composantes du bilan 38
6.2.1 Le ruissellement 38
6.2.2 Infiltration 38
7 Réserves facilement utilisables (R.F.U) 38
8 Calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite : 39
9 Paramètres morphométriques des bassins versants de la région d'El Malabiod 43
10 Conclusion 44
Chapitre 04 45
1 Introduction 46
2 Définition de la recharge artificielle 46
3 Les objectifs de la recharge artificielle 48
4 Les méthodes de recharge artificielle 48
4.1 Les méthodes d'injection directe 49
4.2 La recharge artificielle indirecte 49
4.3 Les bassins d'infiltration 50
5 Critères de sélection des sites de recharge artificielle 52
5.1 Critères géologiques et hydrogéologiques 52
5.2 Critères hydrologiques 52
5.3 Critères physiques (topographiques) 52
5.4 Qualité de l'eau 52
5.5 Considérations environnementales et économiques 52

5.6 Critères administratifs et légaux 52
6 Les facteurs influençant l'efficacité de la recharge artificielle 52
7 Utilisation des carrières désaffectées comme dispositif de recharge artificielle des eaux souterraines 53
7.1 Le rôle des carrières abandonnées dans la recharge artificielle 55
7.2 Conditions requises pour exploiter des carrières abandonnées 56
7.3 Les Avantages : 56
8 Les barrages écrêteurs de crues 56
9 Le rôle dans la recharge artificielle des nappes phréatiques 56
10 Exemple de recharge artificielle au Maroc 57
11 Conclusion 59
Chapitre 05 : 60
1 Introduction 61
2 Etude hydrologique 62
2.1 Détermination des paramètres hydrologique 62
2.1.1 Coefficient D'écoulement Instantané 62
2.1.2 Le temps de concentration 62
2.1.3 Vitesse d'écoulement 63
2.1.4 Intensité pluie 63
2.1.5 Estimation de la lame d'eau ruisselée 64
2.1.6 Estimation de transport Solide 64
2.1.7 Estimation de l'apport en eau de surface 64
2.1.8 Estimation de débit de crue 65
3 Caractéristiques des mares d'eau 66
3.1 Type de mare 66
3.2 Dimensionnement de la digue 66
3.2.1 Hauteur de la digue 66
3.2.2 Largeur en crête 67
3.2.3 Pente des talus 67
3.2.4 . L'évacuateur de crue 68
4 Le chantier 72
4.1 Organisation du chantier 72
4.1.1 Les moyens de chantier 72
4.1.2 Les matériaux 72
4.1.2.2 Le Matériel de Compactage 72

4.2 La programmation du chantier 72
4.3 Exécution des travaux 73
4.3.1 Excavation des eaux....73
4.3.2 Construction de l'évacuateur de crue 73
4.3.3 Construction de la digue 73
5 Surveillance et entretien de la mare....73
5.1 Surveillance....73
5.2 Entretien 74
6 Etude économique 74
6.1 Devis quantatif et estimatif des projets de mares....74
7 Conclusion....76
Conclusion générale……...78

Liste des Figures

Figure 1: Situation géographique de la région de El Malabiod (in, M. Tatar, 2024).....5
Figure 2: Esquisse géologique de la région d'El Ma El Abiod d'après G. DUROZOY. (modifiée par Rouabhia.A, 2006). 13
Figure 3: coupes géologiques Dj. Anoual au Nord à Dj Guelia au Sud par Durozoy 1948 15
Figure 4: Carte du système de failles (UGF-BRNO 1971).....17
Figure 5: Carte de position des sondages électriques de la région d'El Malabiod 21
Figure 6:Coupe géoélectrique transversale I. passant par les forages M_7, M_5, M_4, et M_{15}.....22
Figure 7: Coupe géœlectrique transversale II. Passant par les forages M_{10}, M_9, et M_6. 23
Figure 8: Coupe géœlectrique transversale III. Passant par les forages M_6, P_{23}, M_1. 24
Figure 9: Coupe géœlectrique transversale IV. Passant par les forages. M_{15}, M_2, M_{13}, M_{10}. 25
Figure 10: Coupe géœlectrique transversale V. Passant par les forages M_3, M_8, M_5 et S_{23}. 27
Figure 11: Carte d'égale épaisseur des sables.....28
Figure 12 : Carte d'égale épaisseur des Grès (in, A. Rouabhia, 2006). 28
Figure 13: Carte d'égale épaisseur des Argiles sableuses.....29
Figure 14: Évolution des précipitations annuelles (2005-2018) 33
Figure 15:Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles pour la période de (2005-2018) 33
Figure 16 : variation de température moyenne mensuelle (2005-2018) 34
Figure 17 : Schéma comparatif de la recharge naturelle et artificielle des nappes phréatiques. 48
Figure 18 : Schéma des techniques de recharge artificielle directe et indirecte des nappes. 49
Figure 19 : Schéma simplifié de la technique de recharge par bassin d'infiltration.....50
Figure 20 : Carrière abandonnée à coté de – Mosquée El Hidaya, RN16 (in. Google maps , 2025) 53
Figure 21 : Carrière abandonnée – Zone Abdelbasset Ben Ammar (in. Google maps ,2025) 54
Figure 22 : Carrière abandonnée – Route N10, Draa Djoudj (in. Google maps ,2025).....54
Figure 23 : Carrière abandonnée – Oued El Goussa (in. Google maps ,2025).....55
Figure 24 : Barrage collinaire 57
Figure 25: Canal d'écoulement.....58
Figure 26 : Barrage en pierres.....58
Figure 27 : Photographie de l'oued El Goussa. 61
Figure 28 : Schéma générale des ouvrages 69
Figure 29 : Schéma digue mare.....70
Figure 30 : Réseau hydrographique du bassin d'El Malabiod.....71
Figure 31 : Réseau hydrographique et ordre des cours d'eau des trois sous-bassins versants 71

Liste des Tableaux

Tableau 1: Permis DJEBEL DOUKKANE : FORAGE PÉTROLIER BOUDJELLAL-2 [BDJ-2].....10
Tableau 2: classification des formations géologiques selon la résistivité électrique.....20
Tableau 3:Lithologie et résistivités des forages M $_4$ et M $_5$ de région d'El Malabiod.....22
Tableau 4: Lithologie et résistivités des forages M6 et M9 et M10 de région d'El Malabiod 24
Tableau 5: Lithologie et résistivités des forages M $_1$ et P $_{22}$ et M $_6$ de région d'El Malabiod.....25
Tableau 6: Lithologie et résistivités des forages M_2 et M_{15} et M_{10} et M_{13} de région d'El Malabiod 26
Tableau 7: Coordonnées de la station d'El Malabiod (ANRH). 31
Tableau 8: Evolution des précipitations moyennes annuelles pour la période de (2005-2018) 32
Tableau 9 : Variations de la température moyenne mensuelle à la station de Tébessa 34
Tableau 10 : vitesses du vent enregistrées par la station de Tébessa. 35
Tableau 11: Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite pour la région d'El Malabiod. 37
Tableau 12 : Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une période de 12 ans.....40
Tableau 13 : Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année déficitaire (2005).....41
Tableau 14 / Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année excédentaire (2008). 42
Tableau 15 Résumé des paramètres morphométriques des trois sous-bassins et du bassin d'Oued El Malabiod 43
Tableau 16 : Comparaison entre la recharge naturelle et la recharge artificielle des eaux souterraines.47
Tableau 17 : : Avantages et inconvénients des techniques de recharge artificielle 51
Tableau 18: temps de concentration.....63
Tableau 19 ; Résultats de la vitesse d'écoulement.....63
Tableau 20 : Résultats des intensités de pluie.....63
Tableau 21 ; Résultats de l'estimation de la lame d'eau ruisselée.....64
Tableau 22 : Résultats des estimations de Transport Solide.....64
Tableau 23: Résultats des estimations de l'apport en eau de surface 65
Tableau 24 : Résultats des estimations de débit de crue.....65
Tableau 25 : Pentes des talus en fonction de la hauteur et du type de barrage.....67
Tableau 26 : Résultats des dimensionnements de la digue 68
Tableau 27 : Etude économique du sous -bassin versant d'El Goussa 74
Tableau 28 : Etude économique du sous- bassin versant d'El Malassoued et E'Zned.....75
Tableau 29 : Etude économique du bassin versant El Malabiod 75

Introduction générale

Compte tenu d'un contexte mondial marqué par le changement climatique, la croissance démographique et l'augmentation de la demande en eau, les zones arides et semi-arides figurent parmi les régions les plus vulnérables face à la rareté des ressources hydriques.

L'Algérie, en tant que pays à climat majoritairement aride à semi-aride, subit une pression croissante sur ses ressources en eau, aggravée par l'irrégularité des précipitations, la surexploitation des nappes souterraines et la dégradation de la qualité des eaux. Face à ces défis, l'intérêt pour des solutions alternatives et durables s'est accru, en particulier pour les techniques de recharge artificielle des nappes, qui visent à renforcer les réserves souterraines, à lutter contre la baisse des niveaux d'eau dans les puits, à atténuer les effets des périodes de sécheresse et à améliorer l'exploitation des eaux de pluie et des eaux de surface saisonnières en les dirigeant vers les nappes afin d'en rehausser le niveau et d'en assurer la durabilité.

Dans ce cadre, cette étude porte sur l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation de la faisabilité de la réalisation d'ouvrages de recharge artificielle dans la région d'El Mlabiod, wilaya de Tébessa, une zone caractérisée par un climat semi-aride, souffrant de la rareté et de l'irrégularité des ressources en eau.

L'étude repose sur des modèles d'application concrets, consistant en la réalisation de digues en terre sur des oueds saisonniers (El Goussa, E'Zned, El Malassoued et El Mlabiod). Ces digues ont pour objectif de retenir les eaux de crue afin de favoriser leur infiltration dans le sol et ainsi recharger les nappes phréatiques, au lieu de les laisser se perdre sur les pentes.

Ces oueds représentent des sites prometteurs en raison de leurs caractéristiques topographiques et hydrogéologiques, ainsi que de leur localisation dans un bassin versant actif en matière d'écoulement de surface.

L'étude prévoit également la réutilisation des carrières abandonnées, aménagées pour servir de réservoir naturel de collecte des eaux de crue, permettant ainsi une recharge directe de la nappe souterraine, grâce à la perméabilité du sol et aux cavités géologiques issues de l'exploitation passée.

Parmi les solutions proposées, un bassin en terre (mare) sera également créé : il s'agit d'un ouvrage simple, destiné à recueillir temporairement les eaux de pluie et les eaux de ruissellement, qui s'infiltreront progressivement vers les nappes souterraines. Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté aux zones à sol perméable et à faible pente.

Cette étude repose sur l'exploitation d'un ensemble intégré d'outils et de données, incluant les paramètres climatiques, géologiques, hydrogéologiques et topographiques propres à la zone d'étude. L'approche adoptée, fondée sur la combinaison de plusieurs modèles, vise à élaborer une stratégie

opérationnelle et reproductible à l'échelle locale, tout en offrant un potentiel de transposition vers d'autres régions présentant des conditions similaires. Ce travail s'inscrit ainsi dans une perspective de promotion du développement durable et de renforcement de la sécurité hydrique dans les zones arides et semi-arides.

Ce travail est structuré en les chapitres suivants :

Chapitre 1 : Présente le cadre géologique et la situation géographique de la zone d'étude, en mettant en évidence les principales formations géologiques, les structures tectoniques, ainsi que la localisation et les caractéristiques physiques générales du site.

Chapitre 2 : Porte sur l'étude géophysique de la région, en explorant les méthodes utilisées pour l'analyse du sous-sol et en fournissant des informations précieuses sur les caractéristiques des aquifères et leur extension spatiale.

Chapitre 3 : Traite des aspects hydroclimatologiques, en analysant les données climatiques telles que la pluviométrie, les températures et le bilan hydrique, afin de mieux comprendre le contexte climatique influençant la recharge en eau.

Chapitre 4 : Est consacré à la recharge artificielle des aquifères, en décrivant les principes, les techniques et les conditions nécessaires à sa mise en œuvre, tout en évaluant son intérêt pour les régions arides et semi-arides.

Chapitre 5 : Présente une étude détaillée sur la faisabilité d'un ouvrage de type mare d'eau, en s'appuyant sur des critères topographiques, hydrogéologiques et techniques pour proposer un aménagement adapté au contexte local.

Ainsi, cette étude ambitionne de proposer des solutions durables et adaptées pour la gestion optimale des ressources en eau dans la région d'El Mlabiod, en contribuant à la préservation et à la valorisation des nappes phréatiques locales.

CHAPITER 01 :

Cadre géologique et situations géographique

1 Introductions

Les études hydrogéologiques reposent sur des facteurs géographiques et géologiques jouant un rôle essentiel dans la gestion des ressources en eau. En effet, la localisation, et le relief et le climat influencent directement la recharge, la disponibilité et la qualité de l'eau, tandis que la nature des formations géologiques détermine leur capacité à distribuer, déplacé et stocker les eaux souterraines. L'étude de ces facteurs contribue à la protéger les sources en eau contre la pollution et la surexploitation.

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel d'examiner la situation géographique et le cadre géologique de la région d'El Malabiod, située à la frontière entre l'Algérie et la Tunisie et faisant partie de l'Atlas saharien. Cette région présente des formations géologiques reflétant son histoire tectonique et sédimentaire complexe. Sa géologie se caractérise par une grande diversité lithologique, incluant des formations sédimentaires datant du Crétacé et du Miocène, ce qui en fait un réservoir stratégique de grande importance.

Ce chapitre se diviser en deux parties : la première partie décrit situation géographique de la région, et la deuxième partie présente le cadre géologique en mettant l'accent sur les formations lithologiques et leur influence sur la dynamique des eaux souterraines.

2 Situation géographique

El Malabiod est située dans le nord-est de l'Algérie, plus précisément dans la wilaya de Tébessa. Elle se trouve à environ 28,7 km de cette dernière. Elle est bordée au sud par la daïra d'Oum Ali, à l'est par la frontière avec la Tunisie, au nord par la wilaya de Tébessa et à l'ouest par la plaine de Chérai, ce qui lui confère une position stratégique influencée par le climat méditerranéen semi-aride.

La plaine d'El Malabiod appartient aux Hauts Plateaux et se caractérise par un relief varié, comprenant des montagnes, des dépressions et des vallées, mais avec une absence de lacs fermés (in.

Limites géographiques :

- Nord : Djebel Doukane, Djebel Anoual, Djebel Bouromane, qui forment une ligne de partage des eaux entre les bassins méditerranéen et saharien.
- Est : La frontière tunisienne.
- Ouest : La plaine de Chéraï, la plus élevée en altitude, ainsi que la plaine de Telidjen, caractérisée par un réseau hydrographique peu développé.
- Sud : Djebel Boudjellal, Djebel Gallal.

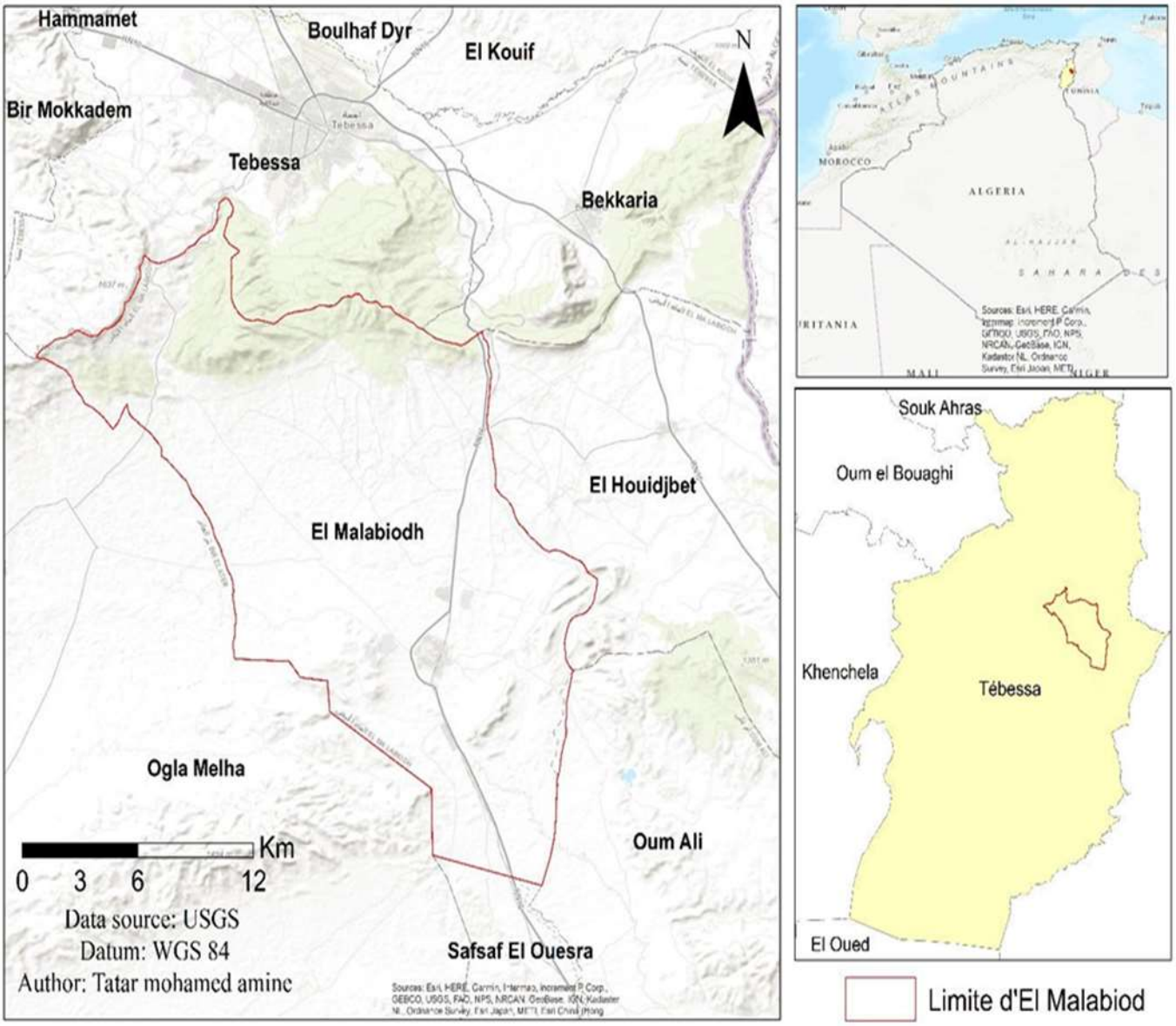


Figure 1: Situation géographique de la région de El Malabiod (in, M. Tatar, 2024).

3 Topographie et géomorphologie de la région étudiée

La région d'El Malabiod présente un relief en forme de bassin, avec une altitude relativement basse au centre (1050 mètres), qui s'élève progressivement vers le nord, atteignant 1300 mètres. Le point le plus élevé de la région est le mont Doukane, qui culmine à 1712 mètres.

La région d'El Malabiod est soumise à divers processus géomorphologiques, ce qui a entraîné la formation de reliefs variés influençant directement la disponibilité et la répartition des ressources en eau souterraine, sont les suivants :

- Le bassin hydrologique est constitué de formations du Crétacé telles que la marne et la marne calcaire, caractérisées par des failles et des plis. De plus, il contient du calcaire karstique, qui est important d'un point de vue hydrogéologique.
- Le bassin miocène est composé d'argile rouge, de sable et de grès, recouverts de colluvions et de dépôts alluviaux. Ces formations se caractérisent par une forte perméabilité, ce qui leur permet de contenir une nappe phréatique importante.
- Les collines, vestiges du bassin versant soumis à une forte tectonique, apparaissent comme des « îles » entre les formations du Miocène. Leur rôle hydrogéologique dépend de leur perméabilité : les roches imperméables forment des retenues souterraines, tandis que les calcaires karstifiés alimentent la nappe phréatique.
- Les lits des oueds : résultent de l'érosion, constituée de terrasses et de formations du Miocène supérieur.
- Les sources : localisées au contact entre les formations du Crétacé et celles du Miocène, actuellement à sec.
- La limite entre le bassin versant et la cuvette du Miocène est constituée d'éboulis, particulièrement présents au nord de la région étudiée. Ces éboulis sont très perméables et favorables à la prospection des eaux souterraines.

4 La géologie de la région

La région se caractérise par un relief montagneux constitué de masses calcaires et de plaines à faible pente. Elle a été influencée par deux phases tectoniques qui ont façonné sa structure actuelle. Aucune étude géologique approfondie n'a été réalisée, mais des opérations et des études géophysiques ont été menées dans le but de rechercher de l'eau et du pétrole. Le bassin sédimentaire est composé de formations continentales superficielles, ainsi que de couches de grès et d'argiles colorées, en plus des formations triasiques diapiriques. Les couches crétacées ont également subi des plissements, contribuant à la formation de la structure géologique actuelle.

4.1 Stratigraphie

La région est composée de deux principales formations :

- ❖ Les formations crétacées : elles apparaissent en bordure de la plaine et constituent le premier groupe.
- ❖ Les formations miocènes et quaternaires : elles recouvrent l'ensemble de la plaine et forment le deuxième groupe.

Ces formations se succèdent chronologiquement du plus ancien au plus récent.

4.1.1 TRIAS

La formation géologique la plus ancienne de la région est composée de calcaires dolomitiques, de dolomies rouges et noires, d'argiles rouges et vertes, ainsi que de gypses gris et roses contenant du quartz bipyramidal. Son affleurement est observé en plusieurs points sous forme de pointements diapiriques, notamment à Dj Draâ M'taa El Malabiod (Dj Dalaâ Er-Rouaïl) et au nord-est, sur une grande partie de Dj Djebissa. Ce dernier site est également connu pour la présence de gisements métallifères, incluant la limonite et l'hématite.

4.1.2 CRÉTACÉ

4.1.2.1 Aptien moyen et inférieur

Dans le nord de la zone d'étude, au niveau du Dj Bouroman, les formations superficielles sont constituées de calcaire et de dolomie, tandis que la partie inférieure des formations est presque entièrement dominée par la dolomie. De plus, elle contient une grande quantité d'Orbitolines. Il a également été retrouvé des rudistes, un type de mollusques bivalves géants aujourd'hui disparus. Ils vivaient dans des environnements marins peu profonds.

L'épaisseur moyenne de cette formation est d'environ 400 mètres dans les couches superposées de roches calcaires siliceuses.

Au sud de la région, le forage pétrolier BDJ2 a intercepté les formations de l'Aptien moyen et inférieur aux profondeurs respectives de 2531 m et 2786 m.

• L'Aptien moyen est composé de calcaires compacts, légèrement dolomitiques, avec des passes d'argiles vertes et grises. Son épaisseur est d'environ 225 m.

• L'Aptien inférieur présente une alternance de marnes et de calcaires gris foncé, compacts et carbonatés, avec une épaisseur moyenne de 107 m.

4.1.2.2 Aptien supérieur

Les formations géologiques des roches du Dj Bouroman, situées dans la partie nord de la région, sont constituées de calcaires massifs gris ou rougeâtres avec des intercalations de marnes et de marno-calcaires, et contiennent fréquemment des Orbitolines. C'est un indicateur biologique d'un environnement marin chaud, car ces organismes sont un groupe de foraminifères ayant vécu durant le Crétacé. L'Aptien supérieur a été rencontré dans le forage BDJ2 à une profondeur de 2316 m, composé de calcaires riches en bioclastes, parfois silteux et pyriteux. Son épaisseur est de 215 m.

4.1.2.3 Albien inférieur

L'étage géologique du Dj Bouroman apparaît sous forme de couches épaisses de calcaire et de dolomie. Ces roches représentent d'anciens environnements de dépôt marins.

Le puits pétrolier BDJ2, situé au sud de la région, révèle une succession composée de calcaire oolithique, suivie d'une alternance de calcaire et d'argile, puis de couches de dolomie. Cette succession reflète des environnements marins peu profonds et variables, accompagnés de processus de diagenèse ultérieurs.

4.1.2.4 Albien supérieur

Au nord de Bouroman, la succession géologique est constituée de calcaire et de marno-calcaires, mais elle est totalement hétérogène en raison de l'intercalation de certaines couches de marne brune. Cette formation est importante car elle contient des fossiles tels que des ammonites et des bélemnites, indiquant l'existence d'un ancien environnement marin, avec une épaisseur de 150 m.

À l'emplacement d'Adeila (puits BDJ2), il est composé d'alternances de calcaire argileux, d'argile et de marne sur une profondeur totale de 245 m.

4.1.2.5 Cénomanien

Le Cénomanien apparaît dans certaines régions du nord-est de l'Algérie sous forme d'une succession lithologique variée en contact tectonique avec les roches du Trias. Il est constitué de marnes jaunes et grises intercalées avec des couches de calcaire riche en fossiles marins tels que (Ostréa, Exogyra et Cardita) avec une épaisseur atteignant 560 m.

En se basant sur les observations de surface et les données du puits BDJ2 dans la région d'Adeila, la succession stratigraphique de cette série a été déterminée du bas vers le haut :

- 238 m : Argiles grises à gris-foncées carbonatées.
- 130 m : Alternance de calcaires gris-clairs et d'argiles grises à gris-verdâtres feuilletées.
- 76 m : Calcaires gris à gris-clairs cryptocristallins avec intercalations d'argiles feuilletées.
- 73 m : Alternance de calcaires gris à gris-clairs lumachelliques et d'argiles gris-foncées.
- À 209,5 m : Argiles grises à gris-verdâtres avec intercalations de calcaires blancs crayeux.
- À 204,5 m : Alternance de calcaires blancs lithographiques et d'argiles grises à gris-verdâtres feuilletées.
- 39 m : Calcaires blancs à crèmes, cryptocristallins à crayeux.
- 72 m : Argiles gris-verdâtres calcaires, fossilifères, devenant marneuses vers la base (derniers 16 m), avec des intercalations de calcaires gris blanchâtres lumachelliques.

4.1.2.6 Turonien

Les formations géologiques au nord de la région (Dj Bouroman, Dj EL-Koreiz, Tenoukla) sont constituées de calcaire marneux gris, présent en fines couches ne dépassant pas une profondeur de 60 à 70 mètres. En dessous, on trouve une épaisse couche de calcaire beige et de dolomie, avec des nodules de silex dans la partie supérieure.

Dans la région de Tenoukla (Turonien supérieur – 150 mètres), il se compose de trois couches :

- Des marnes noires riches en gypse.
- Des marno-calcaires gris en plaquettes.
- Des marnes noires riches en fossiles de coquillages et en nodules rocheux.
- Résultats du forage pétrolier BDJ2 (à 8 km à l'ouest).

Le forage révèle la présence de calcaire brun crayeux, légèrement dolomitique et partiellement lumachellique, avec une épaisseur de 109,5 m et Des calcaires gris clair, compacts, avec intercalation d'argile marneuse grise à gris foncée : 131.5m d'épaisseur.

Tableau 1: Permis DJEBEL DOUKKANE : FORAGE PÉTROLIER BOUDJELLAL-2 [BDJ-2]

Cote (m)	Description lithologique	Étage
138	Calcaire blanc, compact. Biomecrite argileuse à faune pélagique	Mæstrichtien, campanien sup.
576	Marne gris verdâtre et argile brun rougeâtre Argile gris foncé, calcareuse avec de rares bancs calcaires gris clair Argile grise avec quelques bancs de calcaire gris clair fossilifères Calcaire gris compact, marneux à foraminifères Marne grise indurée, légèrement dolomitique, intercalation de calcaire brun –rouge, souvent marneux	Campanien inférieur Emschérien
917	Calcaire gris claire, argileux, granuleux, partiellement lumachellique, compact avec fractures remplies de calcite, intercalations d'argile marneuse, grise a grise foncée, trace de calcite et de pyrite. Calcaire brun, multicolore, moyen dure, crayeux légèrement dolomitique, partiellement lumachellique bitumineux, trace de calcite blanche, translucide avec bandes d'argile verte à grise verdâtres, gluconique	Turonien
1010	Argile gris verdâtre, calcareuse, pyriteuse, fossilifère devenant marneuse à partir de 873m avec fines passées de calcaire gris blanchâtre, lumachellique Calcaire blanc à crème parfois gris cryptocristallin à crayeux, pyriteux Alternance de calcaire blanc lithographique, cryptocristallin, crayeux moucheté, lumachellique d'argile gris à gris verdâtre, feuilletée marneuse	Cénomanien
2025	Alternance de calcaires gris, gris foncés parfois noirâtres, argileux. Alternance de calcaire gris clair, beige, crayeux cristallin.	Albien sup.
2093	Dolomie blanche à gris brunâtre, microcristallin bitumineuse, compacte. Alternance de calcaire, gris claire blanchâtre souvent bioclastique. Calcaire gris claire blanchâtre, brunâtre, compacte, souvent crayeux, rarement bioclastique ou graveleux, oolithique, traces de foraminifères. Calcaire gris clair, gris foncé, oolithique, bioclastique, parfois cryptocristallin. Calcaire gris claire, légèrement dolomitique avec fines passées d'argiles vertes. Alternance de marnes gris foncée compactes, argiles grises à gris foncé, feuilleté, carbonaté	Albo-aptien
3058	Grès blanc à gris, fins à très fin, bien consolidé, quartzitique, ciment silico dolomitique glauconieux avec passées d'argiles grises à gris noirâtre, compact, silteuse, carbonaté Intercalations de grès quartzitique, de siltes, d'argiles dolomitiques et de dolomies	Baremien
3560	Dolomies, grises, brunes et beiges, cryptocristallin à microcristalline, fines passées d'argiles grises et grises noirâtres. Dolomies moyennes à fantôme de débris. Alternance de dolomies oolithiques, de calcaires dolomitiques de grés quartzitiques et d'argiles dolomitiques silteuses à 3760m. dolomies fines à huîtres.	Néocomien

Coordonnées

Géographiques	Lambert (km)	
X= 8°07'35" E	X = 993.533,5	
Y = 35°13'12" N	Y = 227.121,2	Z/sol = 1 120m

4.1.2.7 Campanien inférieur-Emscherien

Ces formations géologiques sont présentes au Dj Ed-Dalaa ainsi qu'au nord-ouest de la région, au Dj Doukkane. Elles sont principalement constituées de marnes (argiles calcaires) et de calcaires lumachelliques, un type de calcaire riche en débris de coquilles d'organismes marins anciens. Des affleurements de moindre étendue de marnes et de calcaires lumachelliques sont également observés dans certaines localités telles que M'Taguinaro, Adeila et Tnoukla, situées au sud-ouest de la région d'El Malabiod.

Les résultats du forage pétrolier BDJ2 révèlent une succession stratigraphique des roches de la base vers le haut.

- Argile brun rougeâtre et marnes gris verdâtres : 47m d'épaisseur.
- Argile grise avec quelques bancs de calcaires gris clair : 83m d'épaisseur.
- Argile grise avec quelques bancs de calcaires gris clair fossilifères : 242m.
- Calcaire gris compact, marneux à foraminifères : 24m.
- Marne grise indurée, légèrement dolomitique, intercalation de calcaire brun-rouge souvent marneux : 88m d'épaisseur.

4.1.2.8 Campanien supérieur-Mæstrichtien

Ces formations sont constituées de calcaire et de marno-calcaire blanc contenant des fossiles d'Inocerames. Elles sont localisées au nord-ouest, au Djebel Koreiz, ainsi qu'au centre de la plaine dans la région de M'Taguinaro, et se retrouvent également dans les zones proches des environs de El Malabiod. Dans la région d'Adeila, ces roches apparaissent largement sous forme de marno-calcaire blanc riche en fossiles d'Inocerames, ce qui indique un environnement marin.

Le forage pétrolier BDJ2 à travers celui-ci, ces formations ont été identifiées à une profondeur de 67 m, où elles sont composées de calcaire blanc compact et de biomicrite argileuse contenant une faune pélagique.

4.1.3 TERTIAIRE

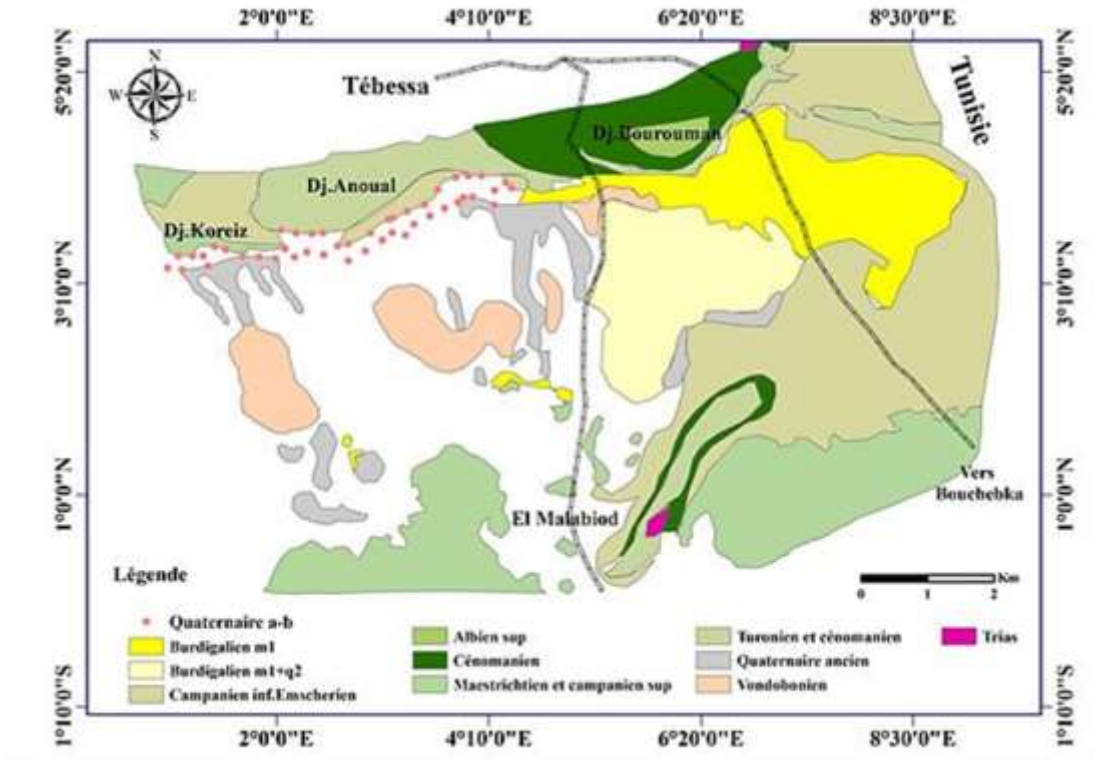
4.1.3.1 Miocène

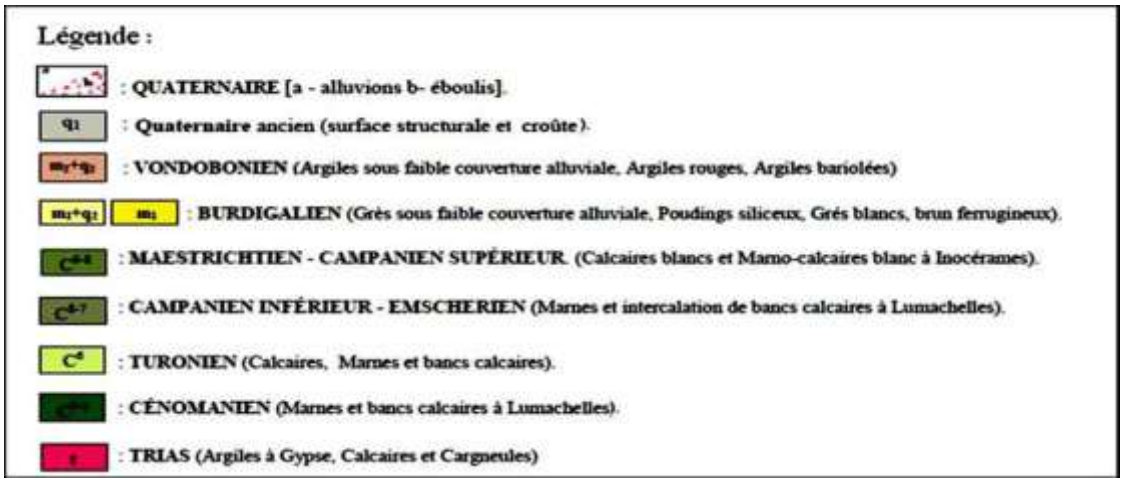
Ces formations géologiques se sont constituées selon le rapport de G. DUROZOY de 1949 et les données des forages d'eau souterraine dans la région. Le Miocène apparaît à l'est et est recouvert par le Quaternaire au centre. La série commence par des conglomérats siliceux composés de galets de silex, dont la taille varie : dans le sud et l'est de la région, les galets sont grands, tandis qu'au centre, ils sont plus petits. Au-dessus de ces couches, se trouvent des grès grossiers contenant des cristaux de quartz, suivis de sables et de grès ferrugineux. Au centre de la plaine, les sables et grès blancs sont situés au-dessus des calcaires maestrichtiens, tandis qu'ailleurs, ils reposent sur des marnes émchériennes. Des

sables très cohérents forment des falaises appelées « Hdjar Safra ». Cette série géologique atteint une profondeur maximale de 200 mètres, et son épaisseur varie, avec des maxima au centre et au nord-est de la plaine.

4.1.4 Quaternaire

Ces formations géologiques couvrent presque toute la plaine, constituant la couche superficielle qui recouvre les roches plus anciennes présentes dans la région. L'épaisseur du Quaternaire est très faible, ne dépassant pas quelques mètres. Il est constitué de types anciens de roches, tels que (des conglomérats, des croûtes calcaires) et de roches récentes, comme des débris limoneux.





Failles

Anticlinaux Anti-Miocène plis SW-NE

Synclinaaux

Anticlinaux Ante-Miocènes Postérieur plis E-W et NW-SE

Figure 2: Esquisse géologique de la région d'El Ma El Abiod d'après G. DUROZOY. (modifiée par Rouabhia.A, 2006).

4.1.4.1 Conglomérats

À l'aide des forages hydrogéologiques, des formations géologiques ont été découvertes au nord de la région, composées d'argile, de gravier, de petits galets et de galets calcaires, avec une profondeur de 20 m.

4.1.4.2 Croûte calcaire

Ces formations géologiques sont présentes au nord de la région. Elles sont de couleur blanche et composées d'éléments fins, avec une épaisseur variable. Au niveau du ravin à l'ouest d'Oglat Chaachaa, on peut observer cette croûte géologique d'une épaisseur de 30 mètres, reposant directement sur les sables miocènes. Elle contient des coquilles d'escargots bien conservées et des roches siliceuses.

4.1.4.3 Dépôts de source

La présence de tuf et de travertin, résultant de la précipitation de carbonates de calcium, a été observée à la source de Tnoukla, qui s'est asséchée. De plus, la présence de tuf a été détectée lors de la réalisation du forage S1.

4.1.4.4 Nappe des cailloux

Des formations géologiques couvrent une vaste zone à l'ouest de la route Tébessa - El Malabiod. Elles sont de petite taille et ne forment pas de grandes accumulations, sauf à proximité des reliefs et des collines, où elles sont de plus grande dimension et plus visibles.

4.1.4.5 Dépôts actuels

Les formations géologiques les plus récentes couvrent la majorité des zones basses de la région. Ces formations sont constituées de couches limoneuses et deviennent progressivement saturées en sels. Pendant l'été, en raison de l'évaporation, les sels se concentrent à la surface, ce qui conduit à la formation de cristaux de sel visibles.

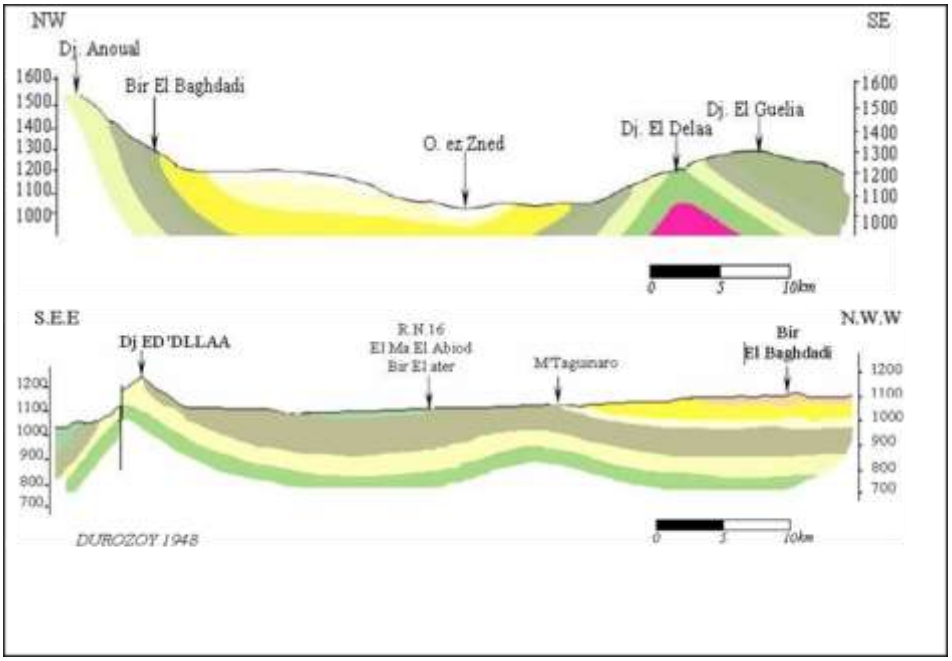


Figure 3: coupes géologiques Dj. Anoual au Nord à Dj Guelia au Sud par Durozoy 1948 (in, A. Rouabhi, 2006).

5 TECTONIQUE

La région d'El Malabiod a traversé deux phases tectoniques.

5.1 Première phase

Connue sous le nom de phase atlantique, elle a débuté à la fin du Crétacé et s'est prolongée jusqu'au du Miocène inférieur. Cette phase tectonique a été marquée par des plissements majeurs orientés SW-NE. Au cours de cette période, des collines et des montagnes, comme le Djebel Bouromane, se sont formées. Des failles importantes, telles que la faille de Tnoukla et d'autres failles orientées NW-SE, sont également apparues. Le diapirisme des roches triasiques a commencé durant cette phase et s'est poursuivi jusqu'au Villafranchien.

5.2 Deuxième phases

Cette phase est survenue après les plissements de la première phase et a entraîné des mouvements tectoniques cassants, caractérisés par des déformations importantes du socle rocheux. Ces mouvements ont conduit à la formation de grands bassins entre les chaînes montagneuses plissées, contribuant ainsi à la création de la plaine d'El Malabiod dans sa configuration actuelle.

6 Styles tectoniques

Le style tectonique de la région est caractérisé par deux directions principales, SW-NE et E-W, qui influencent la forme des plis et des failles, et se reflètent partiellement sur le réseau hydrographique. Les plis dans la région sont similaires à ceux trouvés dans l'Atlas Saharien. Ils sont étroits et verticaux en raison d'un fort raccourcissement du couvert sédimentaire dû à la pression tectonique. En revanche, le socle rocheux situé sous le couvert sédimentaire est plus rigide et moins sujet à la déformation. Par conséquent, la déformation principale s'est produite uniquement dans les couches sédimentaires, ce qui signifie que la région est soumise à une tectonique de couverture et non à une tectonique du socle.

6.1 Mouvements récents

La région d'El Malabiod a été soumise à une tectonique récente qui n'a pas affecté l'organisation des plis plus anciens, mais a ajouté de nouveaux types de fractures et de failles. L'effet de cette tectonique varie en fonction de la nature des roches On constate que

- Les formations crétacées (comme les roches turoniennes et cénomaniennes) ont subi une fracturation importante, entraînant la fissuration de la falaise turonienne dans la région de Tnoukla et le délitement de l'anticlinal cénomanien-turonien de Draa M'Ta Abiod.
- Les formations miocènes, en revanche, ont été soumises à des plissements et des compressions plutôt qu'à des fractures, ce qui a conduit au plissement du grès miocène dans le col de Tnoukla.

La plupart des formations géologiques de la plaine d'El Ma El Abiod remontent à la phase atlasique, qui était une phase compressive avec une contrainte principale orientée nord-nord-ouest vers sud-sud-est (NN-SE), conduisant à la formation des plis et des grandes failles.

Au cours du Plio-Quaternaire, les mouvements tectoniques ont entraîné d'importants coulissements et des déchirures dans les couches supérieures en raison des influences méditerranéennes, aboutissant à la formation de trois failles principales orientées nord-est - sud-ouest (NE-SW), avec des rejets atteignant jusqu'à 30 km.

- Faille F1 : située à l'Est de la ville d'El Ma El Abiod de 6km de longueur.
- Faille F2 : à décrochement très important, passe au milieu de la plaine. D'orientation NE-SW; elle change de direction et devient EW plus à l'Est près du village de l'Houidjbate. On observe environs, 30 Km de rejet.
- Faille F3 : jalonne la partie Nord de la plaine de direction NE-SW, le rejet est Important, de l'ordre de 22 km.

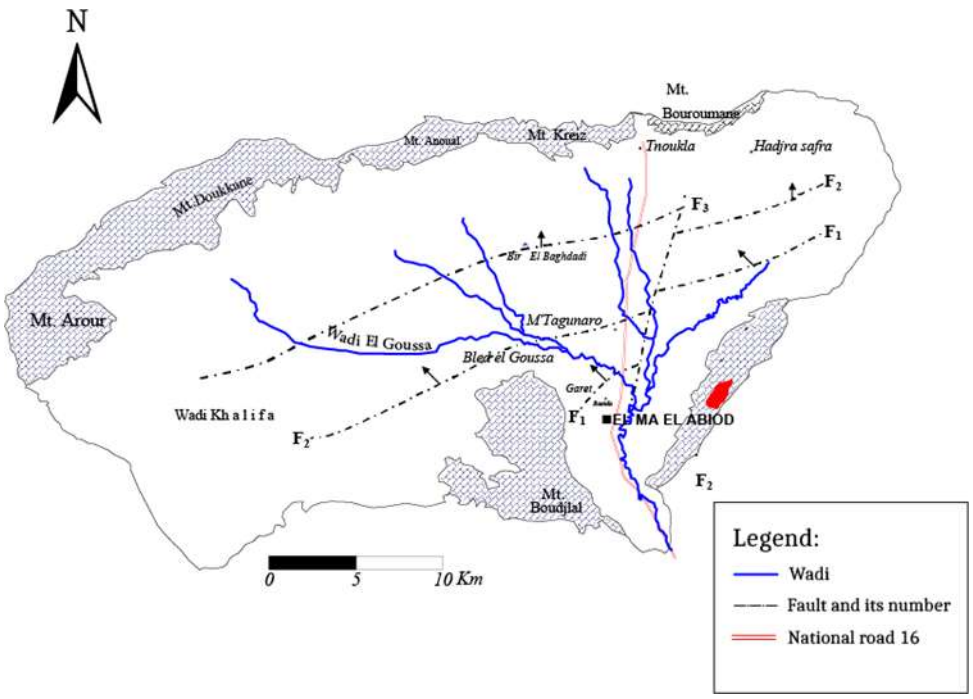


Figure 4: Carte du système de failles (UGF-BRNO 1971)

(In, A. Rouabhia, 2006).

7 Paléogéographie

L'évolution paléogéographique de la région d'étude a été marquée par plusieurs phases géologiques influençant directement la structure et la dynamique des aquifères.

Formations anciennes : Les roches les plus anciennes affleurant dans la région datent de l'Aptien, visibles dans l'anticlinal de Bouroumane. Les données du forage de Boudjelal révèlent la présence du Barrémien (2890 m) et du Néocomien (3368 m).

- Néocomien : Environnement marin peu profond avec des dolomies et calcaires, influencé par des apports terrigènes.
- Hauterivien - Barrémien : Régression marine progressive avec une augmentation des dépôts sableux terrigènes, atteignant 400 m d'épaisseur dans certaines zones.
- Aptien inférieur : Retour de la mer avec des dépôts carbonatés de plateforme, avec une subsidence plus marquée au nord qu'au sud.
- Albien : Réduction des dépôts carbonatés au profit de sédiments calcaro-argileux plus profonds, avec une épaisseur de 100-250 m contre 700 m au nord.
- Cénomanien : Poursuite de l'enfoncement de la plateforme avec des dépôts homogènes.
- Turonien : Dominance des sédiments carbonatés récifaux, remplaçant ceux de plateforme, avec une réduction de l'épaisseur des dépôts (30 m).

8 Conclusion

L'analyse de la situation géographique et géologique de la région d'El Malabiod a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs influençant l'alimentation des nappes phréatiques.

Géographiquement, la plaine d'El Malabiod est caractérisée par un climat semi-aride, avec de été chaud et de hiver froid, accompagnés de faibles précipitations, ce qui impacte la recharge des eaux souterraines. Située dans les hautes plaines orientales de l'Atlas Saharien, la région est influencée par sa topographie et son hydrographie locales, qui jouent un rôle essentiel dans l'écoulement et l'infiltration de l'eau vers les nappes phréatiques.

Géologiquement, d'un point de vue géologique, la région a connu une évolution tectonique à travers les âges. Elle est entourée par des plis orientés Nord-Est – Sud-Ouest, au nord et au sud, ce qui en fait une partie intégrante des hautes plaines. On distingue deux grands ensembles géologiques :

Les formations crétacées, visibles en bordure, comprenant du calcaire et des marnes.

Les formations miocènes et quaternaires, qui recouvrent l'ensemble de la plaine et sont constituées de sables, de grès et de dépôts limoneux.

Les phases tectoniques qu'a traversées la région ont conduit à la formation du bassin actuel d'El Malabiod, dont la base est constituée de calcaire et de marnes crétacées, séparée des formations miocènes par une couche de dépôts très perméables.

CHAPITRE 02

Géophysique

1 Introductions

Les études géophysiques constituent une étape fondamentale dans la caractérisation, l'exploration et l'évaluation des réservoirs souterrains. Grâce à des méthodes indirectes telles que la prospection électrique et magnétique, il est possible d'identifier la distribution des formations perméables et imperméables, d'estimer l'épaisseur et l'extension des aquifères, ainsi que de déterminer les structures géologiques influençant la circulation et le stockage des eaux souterraines.

Dans ce chapitre, nous présenterons l'étude géophysique menée dans la région d'El Malabiod, en mettant en évidence les résultats obtenus et leur contribution à l'optimisation des stratégies de recharge artificielle des nappes

2 Étude de la région d'El Malabiod par prospection électrique

En 1970, une étude géophysique par prospection électrique a été réalisée par la société Transakta-Géometal dans la région d'El Malabiod, couvrant une vaste superficie de 420 km² dans la plaine. Dans ce cadre, 315 points de mesure électrique ont été effectués avec un espacement AB = 2000 m, permettant d'explorer les couches superficielles. En complément, 120 points de mesure ont été réalisés avec un espacement AB = 6000 m, offrant ainsi la possibilité d'investiguer les formations géologiques plus profondes (fig. 05).

En comparant les résultats des mesures paramétriques avec les coupes stratigraphiques des forages situés dans la même région, les valeurs types de la résistivité électrique des différentes formations ont été déterminées comme suit :

Tableau 2: classification des formations géologiques selon la résistivité électrique

Type de formation géologique	Plage de résistivité électrique (Ωm)	Interprétation géologique
Argile	2 à 15 Ωm.	Sol imperméable à haute teneur en eau.
Argile sableuses	20 à 60 Ωm.	Mélange d'argile et de sable, à perméabilité limitée à l'eau.
Alluvions, et formations quaternaires	20 à 150 Ωm.	Couches superficielles constituées de différents matériaux comme le sable, le gravier et, l'argile.
Sables et graviers	50 à 250 Ωm	Matériaux poreux avec une perméabilité élevée, constituant de très bons réservoirs d'eau souterraine.
Grès ou calcaires	plus de 200 Ωm	Roches dures et solides pouvant contenir des réservoirs d'eau si des fissures ou des porosités existent.

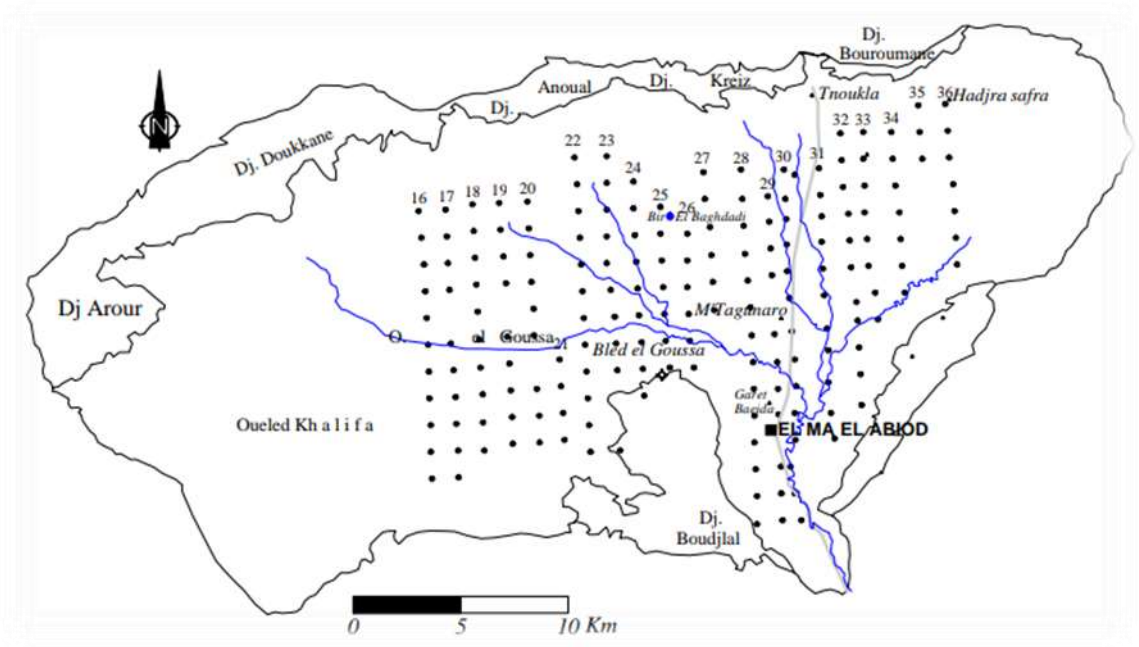


Figure 5: Carte de position des sondages électriques de la région d'El Malabiod (In, A. Rouabhia, 2006).

Les valeurs de résistivité ne sont pas toujours fixes ni précises. En effet, le calcaire fissuré peut présenter la même résistivité que le grès, et les formations altérées possèdent souvent une résistivité similaire à celle des sables ou des graviers. Afin de garantir l'exactitude de ces résultats, cinq profils géoélectriques ont été établis pour analyser ces variations avec précision.

3 Les coupes géo-électriques

Les coupes géoélectriques sont un outil important en hydrogéologie, car elles permettent de déterminer la répartition des couches géologiques, d'identifier les aquifères, d'évaluer leur épaisseur et leur extension. Elles contribuent également à l'étude des zones de recharge artificielle des nappes phréatiques. Cinq profils géoélectriques ont été réalisés et répartis de manière à s'aligner avec les trajectoires géophysiques et les forages d'exploration, afin d'assurer des résultats plus précis.

3.1 Coupe transversale 1 (Nord-Sud)

L'analyse de la coupe géologique repose sur les données des forages d'exploration M7, M5, M4, M15 qui traversent quatre horizons géologiques relativement homogènes, mais avec des résistivités électriques différentes, à l'exception du dernier horizon qui se caractérise par une résistivité électrique faible, variant entre 3 et 7 Ω.m, ce qui en fait une couche conductrice, contrairement aux horizons supérieurs qui présentent une résistivité électrique élevée (fig.6).

Le premier horizon montre une variation de la résistivité électrique, allant de 90 à 150 Ω.m, en raison de son hétérogénéité géologique. Son épaisseur atteint 85 m, mais il n'est pas continu tout au long de la

coupe. Il est composé d'un mélange hétérogène d'argile, de sable, de gravier et d'argile sableuse, ce qui explique la variation de sa résistivité électrique.

Le deuxième horizon se caractérise par sa continuité tout au long de la coupe, avec des résistivités électriques élevées, variant entre 220 et 1700 Ω•m. Son épaisseur varie entre 35 et 120 mètres et il est principalement composé de grès consolidé.

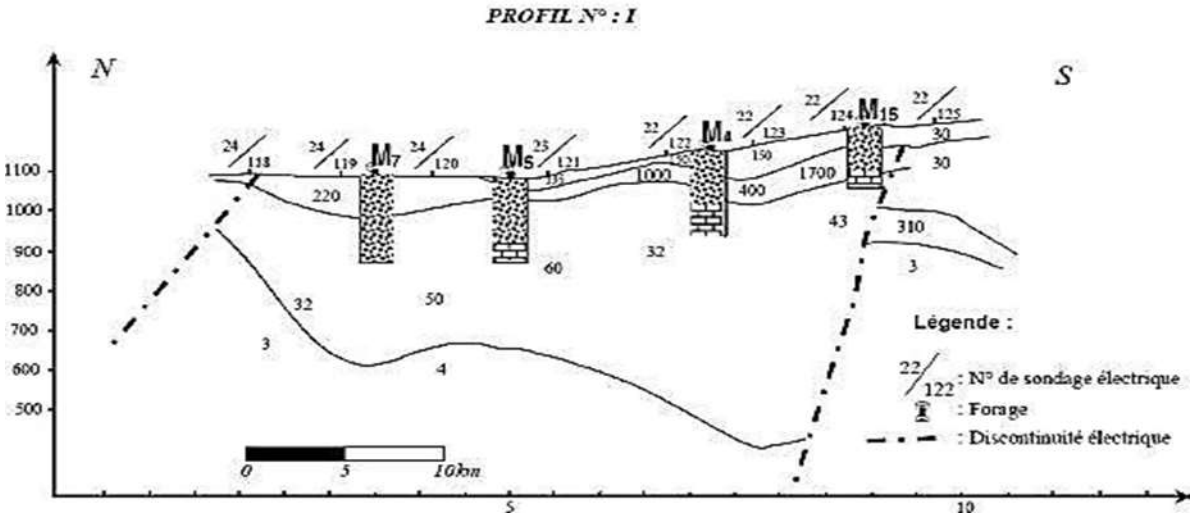


Figure 6:Coupe géoélectrique transversale I. passant par les forages M_7, M_5, M_4, et M_{15}.

(in, O. Guefaifia, 1996)

Le troisième horizon présente une diminution de la résistivité électrique en raison de la variation des formations géologiques. Il est composé d'argile sableuse (Miocène) et de calcaire marneux (Maestrichtien), ce qui explique les valeurs enregistrées lors de la prospection électrique.

Tableau 3:Lithologie et résistivités des forages M_4 et M_5 de région d'El Malabiod

Forages	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M_4	0 – 87m : argiles et argiles sableuses 87- 150m : sables argileux avec passées argileuses 150-164m : sables moyens	0 – 50m : R= 150Ωm 50-100m : R= 400Ωm ›100m : R= 32Ωm
M_5	0 - 29 : alternance d'argile et de grès 29 – 61m : sables argileux et grès 61 –156m : alternance d'argile et de sable	00-25m : R= 135Ωm 25 – 65m : R=330Ωm ›65m : R= 60Ωm

3.2 Coupe transversale II. (Nord-Sud)

Une coupe géologique représente les trois forages d'exploration M 10, M 9 et M 6 , mettant ainsi en évidence trois horizons discontinus et hétérogènes fig.7 . L'horizon premier est composé de roches dures avec une résistivité élevée de 110 à 600 Ωm. Il présente une épaisseur régulière de 85 mètres, mais dans le côté nord, il devient plus épais, atteignant 175 mètres, formant ainsi un (synclinal).L'horizon deuxième est initialement résistant et continu, mais il disparaît au centre de la zone étudiée et sur son flanc sud. Il est remplacé par un horizon conducteur, indiquant un changement des propriétés lithologiques. Son épaisseur est d'environ 200 mètres, avec une résistivité variant entre 50 et 110 Ωm.

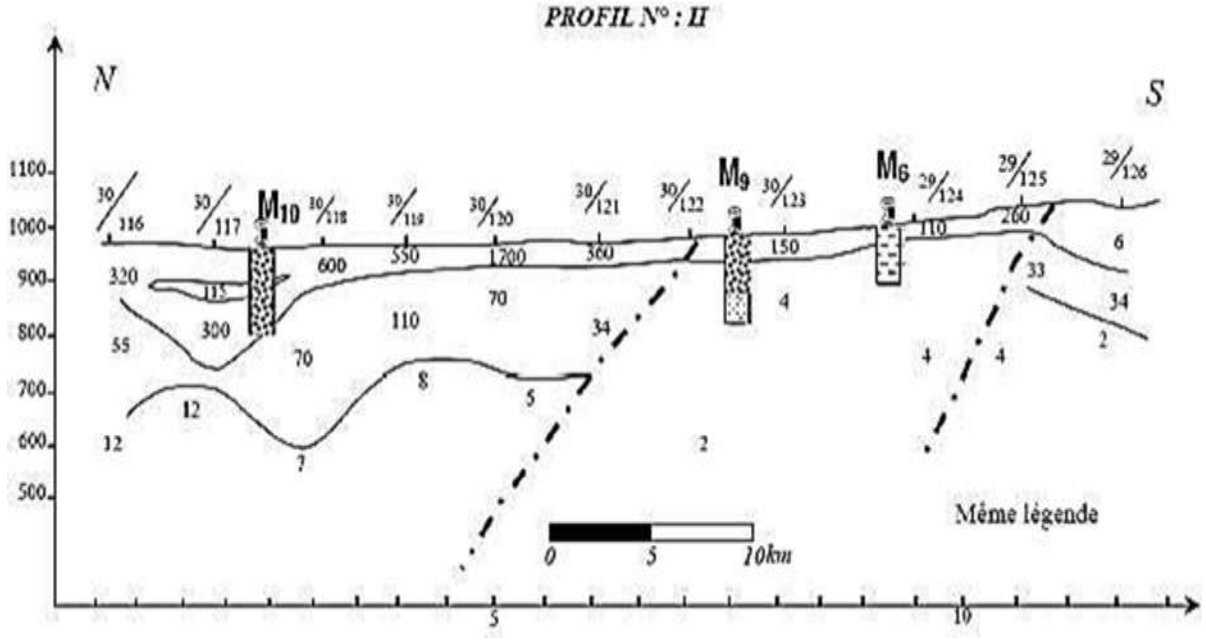


Figure 7: Coupe géœlectrique transversale II. Passant par les forages M_{10}, M_9, et M_6.

(in, O. Guefaifia, 1996)

L'horizon troisième se caractérise par une résistivité variant entre 16 et 20 Ωm et constitue la base géologique de ces formations. La présence de deux discontinuités électriques indique L'existence de deux failles géologiques, suggérant une activité géologique ancienne ou récente, qui pourrait influencer le mouvement des eaux souterraines.

Tableau 4: Lithologie et résistivités des forages M6 et M9 et M10 de région d'El Malabiod

Forages Lithologie	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M_6	0 – 16m : gravier, calcaire argileux 16- 20m : argile et graviers	0 – 20m : R= 110Ωm ›20m : R= 160Ωm
M_9	0 – 5m : Argiles 05 – 45m : Argile, sables Argileux	00-55m : R= 140Ωm ›55m : R= 60Ωm
M_{10}	0 – 152m : Grès avec variation de faciès dépendant de la grosseur des graviers et une faible présence d'argiles.	00-150m : R= 140Ωm 150 - 350m : : R= 70Ωm

3.3 Coupe transversale III. (Nord-Sud)

Cette coupe possède les mêmes caractéristiques que la coupe II et est traversée par les forages M_6, P_{23}, M_1 fig.8.

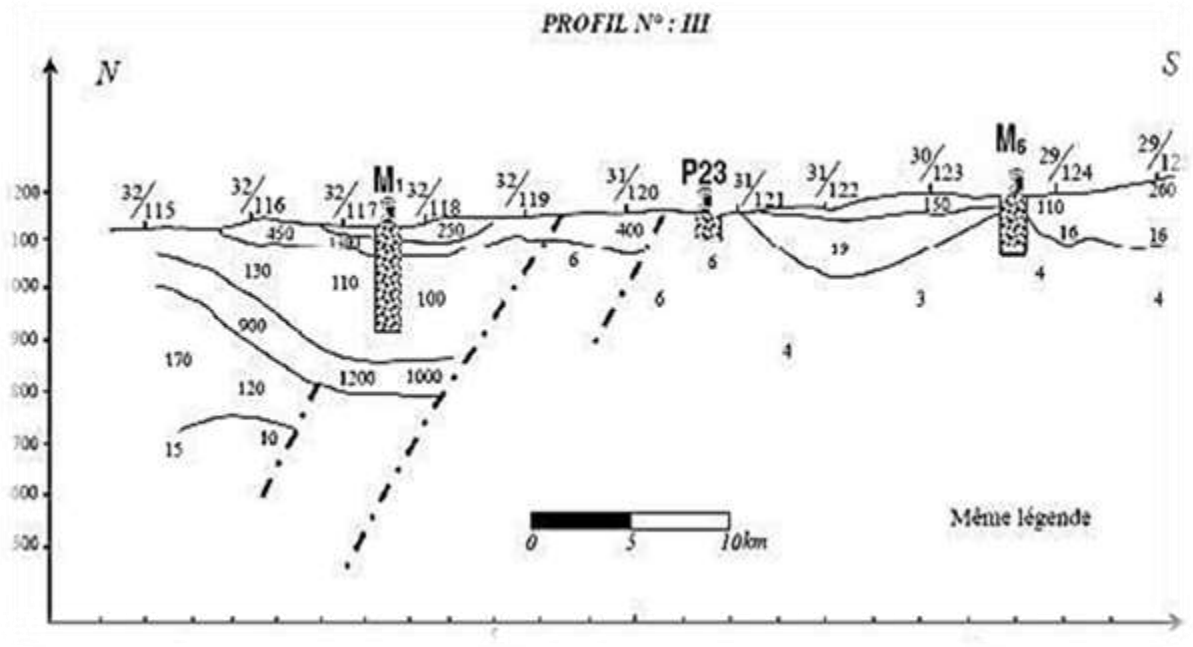


Figure 8: Coupe géœlectrique transversale III. Passant par les forages M_6, P_{23}, M_1.

(in, O. Guefaifia, 1996)

Le tableau suivant illustre la correspondance entre les formations géologiques et les résultats des sondages.

Tableau 5: Lithologie et résistivités des forages M $_1$ et P $_{22}$ et M $_6$ de région d'El Malabiod

Forages	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M $_1$	0 – 125m : sables argileux, les grains sont plus fins au niveau du toit. 125- 200m : marnes grises	0 – 55m : R= 250 à 1500Ωm 55 –285m : R= 100Ωm 285 - 325m : R= 1000Ωm >325m : R= 10Ω
P $_{23}$	0 – 7m : Argiles sableuses 07 – 41m : Sable à grains moyen.	00- 40m : R= 19 -60Ωm >40m : R= 6Ωm
M $_6$	0 – 16m : Gravier, calcaire argileux graviers 16 – 20m : argiles et graviers	00-20m : R= 110Ωm >20m : R= 16Ωm

3.4 Coupe transversale IV. (Sud-ouest - nord-est)

La coupe géologique présente trois horizons répartis entre deux horizons résistants et un horizon conducteur, et est traversée par quatre forages M $_{15}$, M $_2$, M $_{13}$, M $_{10}$ fig.9.

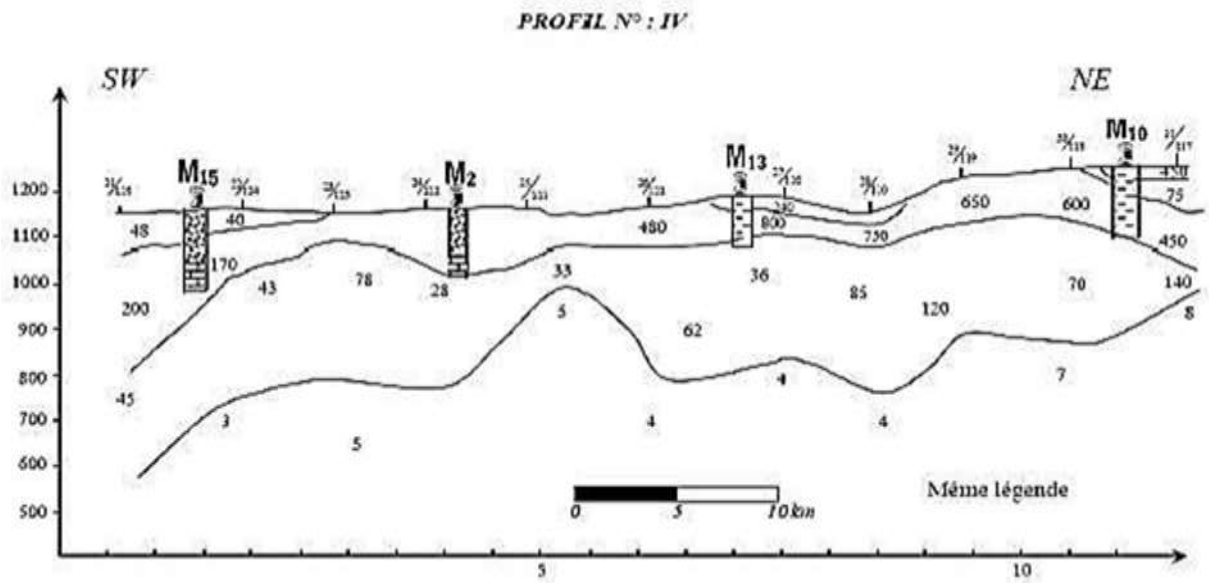


Figure 9: Coupe géœlectrique transversale IV. Passant par les forages. M $_{15}$, M $_2$, M $_{13}$, M $_{10}$.

(In, O. Guefaifia, 1996)

L'horizon supérieur à une épaisseur d'environ 80 m au centre et atteint 170 m sur les flancs. Il est constitué de formations résistantes dont la résistivité varie entre 250 et 650 Ω.m au centre, tandis qu'elle fluctue entre 75 et 1500 Ωm sur le flanc nord.

Le deuxième horizon se caractérise également par une haute résistivité, variant entre 280 et 120 Ωm. Il a été traversé par un seul forage (M_{13}). La grande variation de sa résistivité est due à l'hétérogénéité de sa composition rocheuse. Son épaisseur est d'environ 300 mètres.

Le troisième horizon constitue la base principale (le substratum rocheux), avec une résistivité variant entre 30 Ωm et 10 Ωm.

Remarque

- La disparition des discontinuités électriques suggère que le bassin d'El Ma El Abiod est traversé par deux failles longitudinales situées à ses limites nord et sud.
- L'absence de certaines couches visibles sur les coupes géologiques transversales.
- L'homogénéité des formations géologiques dans la région.

Tableau 6: Lithologie et résistivités des forages M_2 et M_{15} et M_{10} et M_{13} de région d'El Malabiod

Forage	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M_{13}	0 – 30m : sables fins et moyens. 30 - 70m : grès 70- 88m : argile sableuse 88 - 100m : marnes grises	0 – 30m : R= 240Ωm 30 – 70m : R= 800Ωm 70 - 270m : R= 36Ωm >270m : R= 40Ωm
M_2	0 – 77,5m : Sable quartzeux avec parfois des passages argileux 77,5 – 110m : marno-calcaire et calcaire- marneux.	00- 120m : R= 200Ωm
M_{10}	0 – 152m : grès avec une variation de faciès, qui dépendent de la grosseur des graviers, et faible présence d'argile.	00-30m : R= 400Ωm 30 - 110m : R= 75Ωm 110 - 260m : R=450Ωm
M_{15}	0 – 16m : argiles avec graviers. 16 - 25 m : marnes bariolées 25- 48m : sable gros à moyen 48 - 55m : marnes verdâtres 55- 70m : sables grossiers 70 - 142m : calcaires blancs friables avec parfois des passées marneuses	00-70m : R= 90Ωm >90m : R= 200Ωm

3.5 Coupe transversale V. (sud-ouest - nord-est)

Ce profil se caractérise également par deux horizons résistants et un horizon conducteur, dont les épaisseurs et les résistivités varient comme suit :

- Le premier horizon : R = 90 à 1300Ωm et H = 60 à 150m.
- Le deuxième horizon : R = 50 à 150Ωm et H = 250 à 450m.
- Le troisième horizon : R = 3 à 10Ωm, l'épaisseur est indéterminée.

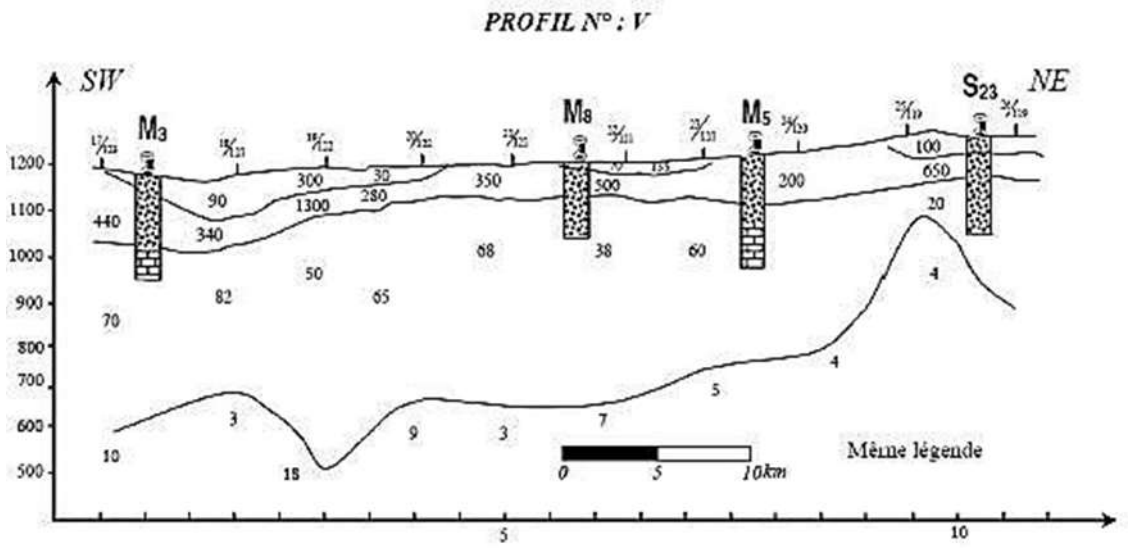


Figure 10: Coupe géœlectrique transversale V. Passant par les forages M_3, M_8, M_5 et S_{23}.

(In, O. Guefaifia, 1996)

4 Les Cartes isopaches

Les cartes isopaches représentent la répartition de l'épaisseur des formations géologiques. Elles constituent un outil essentiel pour évaluer les variations des dépôts géologiques et identifier les zones contribuant à la recharge des eaux souterraines.

Trois horizons aquifères ont été représentés à l'aide des courbes isopaches dans la région d'El Malabiod, comme suit :

- Les sables du Miocène : R = 50 à 250Ωm
- Les grès du Miocène : R >250m
- Les argiles sableuses : R = 20 à 50

4.1 Carte d'égales épaisseurs des sables.

La carte révèle l'existence de deux zones distinctes en termes d'épaisseur des couches. La première, de petite superficie, est située à l'ouest de la région et présente une épaisseur ne dépassant pas 65 mètres. En revanche, la seconde se distingue par une épaisseur relativement importante, variant entre 100 et

145 mètres. Elle occupe la partie centrale de la zone étudiée et est à la fois plus vaste et plus significative en termes d'extension fig.11.

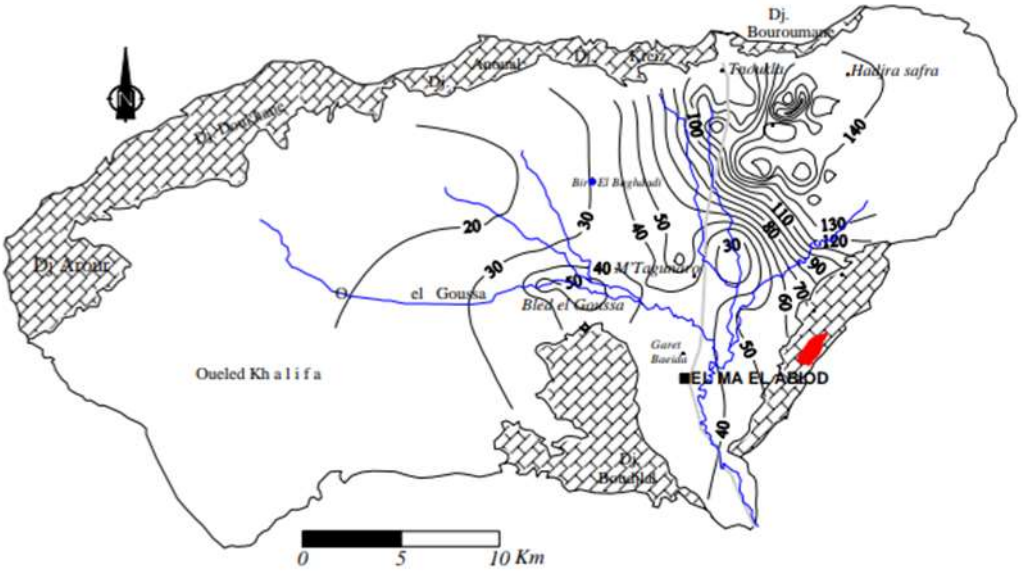


Figure 11: Carte d'égale épaisseur des sables

(In, A. Rouabhi, 2006).

4.2 Carte d'égale épaisseur des grès

Deux zones favorables ont été identifiées à l'est et à l'ouest de la plaine. La zone orientale se distingue par une épaisseur atteignant 90 mètres et s'étend sur une large superficie, tandis que la zone occidentale s'étend de manière significative mais dans une moindre mesure par rapport à l'est, avec une épaisseur des couches atteignant 75 mètres fig.12.

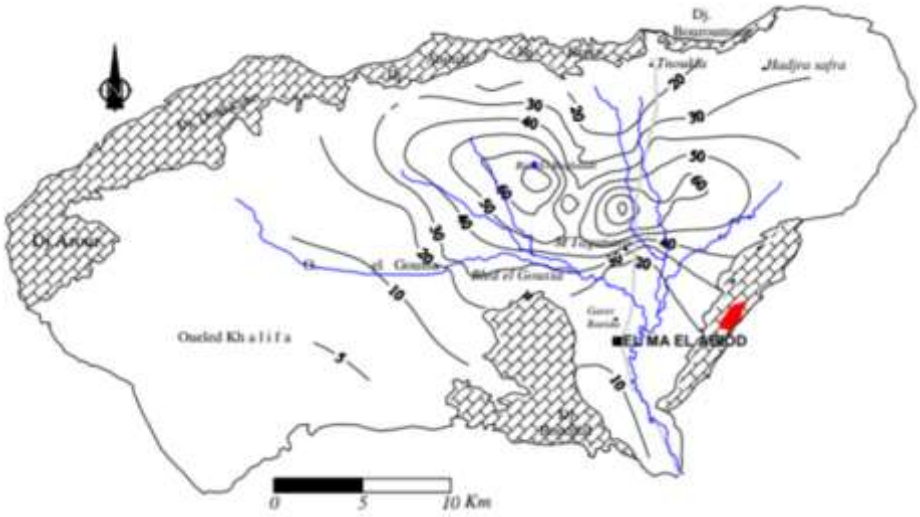


Figure 12 : Carte d'égale épaisseur des Grès (in, A. Rouabhia, 2006).

4.3 Carte d'égale épaisseur des argiles sableuses

Deux zones principales de grande extension ont été identifiées. La zone occidentale (Bled El Goussa) s'étend sur une vaste superficie et se caractérise par une épaisseur importante atteignant 290 mètres. La zone orientale (Draa El Hrakel), où l'épaisseur ne dépasse pas 270 mètres, s'étend également de manière significative, mais moins que la zone occidentale fig.13.

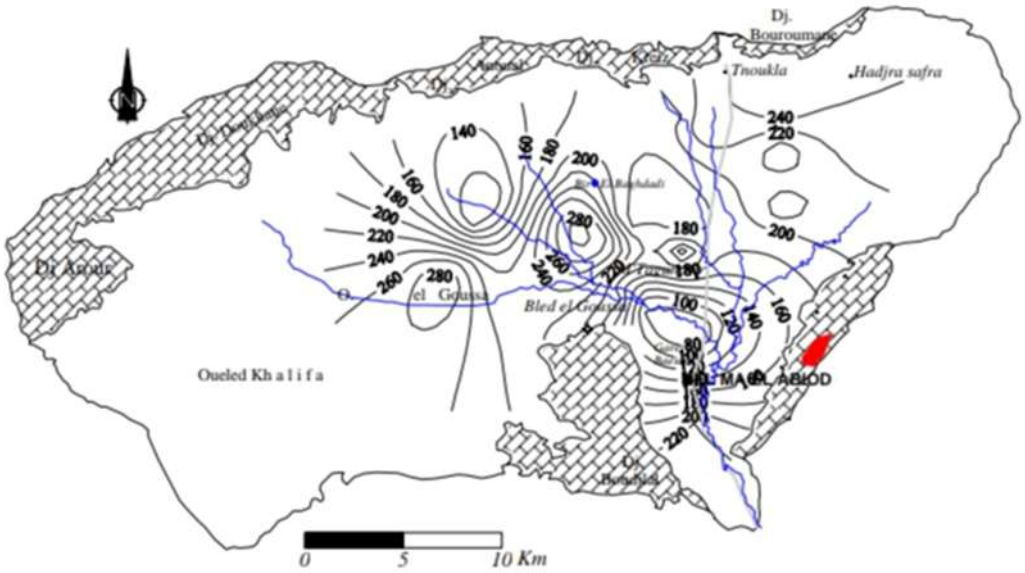


Figure 13: Carte d'égale épaisseur des Argiles sableuses

(in, A. Rouabhia , 2006).

5 Conclusion

L'étude géophysique a permis de déterminer les formations géologiques du bassin d'El Malabiod. L'analyse de la résistivité électrique a mis en évidence des zones à forte porosité. L'interprétation générale a révélé l'existence de trois nappes aquifères superposées.

• Le premier horizon est composé de sables à grains fins et moyens.

• Le deuxième horizon est constitué de grès.

• Le troisième horizon est formé d'argiles sableuses.

De plus, l'analyse des cartes isopaches a mis en évidence la variation de l'épaisseur des formations aquifères, identifiant les zones épaisses comme des sites prometteurs pour la recharge et le stockage. Ces résultats sont essentiels pour orienter les stratégies de gestion des ressources en eau et optimiser les sites de recharge artificielle, contribuant ainsi à une exploitation durable des eaux souterraines dans la région.

.

CHAPITRE 03

Hydroclimatologie

1 Introductions

Les facteurs climatiques comptent parmi les principaux déterminants de l'équilibre des ressources en eau, influençant directement la dynamique des eaux de surface et souterraines. Dans le bassin d'El Malabiod, qui se caractérise par un climat semi-aride, l'irrégularité des précipitations et les taux élevés d'évapotranspiration entraînent une variation significative des taux de recharge des nappes phréatiques, rendant ainsi la durabilité des ressources en eau un défi majeur.

L'étude de l'hydroclimatologie joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la disponibilité des eaux souterraines et l'analyse des possibilités de renforcement de leur recharge artificielle. En examinant la répartition spatio-temporelle des précipitations, en analysant le bilan hydrologique et en comprenant l'impact des changements climatiques, il est possible de déterminer les périodes et les sites les plus appropriés pour la mise en œuvre des techniques de recharge artificielle.

2 Type de climat de la région d'El Malabiod

La région d'El Malabiod bénéficie d'un climat semi-aride, caractérisé par des précipitations irrégulières et une évapotranspiration élevée. Ces conditions climatiques influencent directement la disponibilité des ressources en eau, rendant ainsi indispensable une gestion efficace des aquifères.

La station météorologique d'El Malabiod (ANRH) :

Tableau 7: Coordonnées de la station d'El Malabiod (ANRH).

Station	Code (ANRH)	Coordonnées X	Y	Altitude	Date de mise en service
El Malabiod	062802	997.62	225.15	1020 m	01.01.1974

2.1 Indice d'aridité de DE. Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne (1923) est un outil permettant de quantifier le degré d'aridité d'une région. Afin de caractériser le climat de la région d'El Malabiod, nous avons eu recours à cet indice, défini par la relation suivante :

$$\mathbf{I} = \frac{\boldsymbol{P}}{(\boldsymbol{T}+\mathbf{10})}$$

Avec

P : Précipitation annuelle moyenne (mm).

T : Température annuelle moyenne (°C).

I : indice d'aridité de DE. Martonne.

• I<5 : climat hyperaride.

• 5<I<7,5 : climat désertique.

• 7, 5<I<10: climat steppique.

• 10<I<20: climat semi-aride.

• 20<I<30 : climat tempère.

Dans ce cas I= 10.68 mm, une précipitation P = 267.60 mm et une température moyenne T = 15.04°C, le climat de la région peut être classé comme semi-aride.

3 Précipitation

Les précipitations sont toutes formes d'eau qui tombent de l'atmosphère vers la surface de la Terre, que ce soit sous forme de pluie, de neige, de grêle ou de brouillard épais. Elles constituent une partie essentielle du cycle hydrogéologique en rechargeant les aquifères. Elles contribuent également au ruissellement et déterminent le bilan hydrique de la région. Leur intensité et leur répartition influencent la qualité et la quantité des ressources en eau.

3.1 Variations interannuelles des précipitations

Tableau 8: Evolution des précipitations moyennes annuelles pour la période de (2005-2018)

Années	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
P.moy. Annuelle (mm)	476	268	391	242	462.7	364	425	386	403.6	314	474	294.9	287	405.3

L'histogramme ci-dessous montre une fluctuation notable des précipitations entre 2005 et 2018, avec des valeurs maximales enregistrées en 2005 et 2015, dépassant 450 mm, tandis que des années comme 2007, 2008 et 2016 ont connu de faibles précipitations, inférieures à 300 mm, ce qui reflète l'irrégularité des précipitations et leur impact potentiel sur les ressources en eau ;

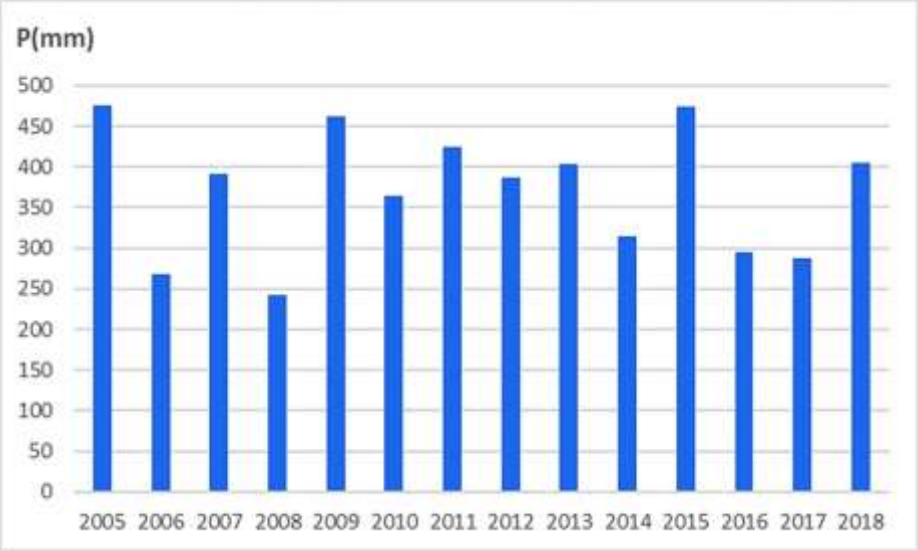


Figure 14: Évolution des précipitations annuelles (2005-2018)

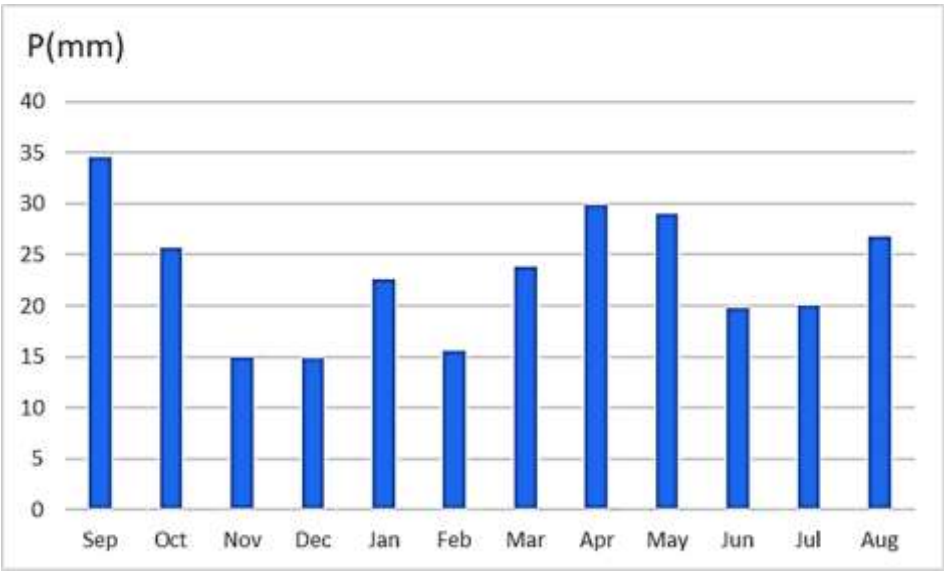


Figure 15:Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles pour la période de (2005-2018)

4 Température

La température est le principal facteur du processus d'ascension de la vapeur d'eau, jouant un rôle important dans l'établissement du bilan hydrique en influençant le taux d'évaporation et de transpiration au sein des bassins hydrologiques et hydrogéologiques. Dans la zone d'étude, les données de température sont enregistrées par la station météorologique de l'aéroport de Tébessa. Pour combler les lacunes dans certaines données, le site OGIMET Climat a été utilisé, conformément aux indications d'une étude récente.

Station : TEBESSA aéroport

Latitude (°déc) : 35.48

Longitude (°déc) : 8.13

Altitude approximative (m) 813

4.1 Variations de la température moyenne mensuelle

Le tableau suivant montre l'évolution de la température moyenne mensuelle enregistrée à la station de Tébessa sur une période de 12 ans (2005 à 2017 / 2018) :

Tableau 9 : Variations de la température moyenne mensuelle à la station de Tébessa

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	Moyenne Annuelle
T°C	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	21.31	17.57	11.22	6.79	15.57

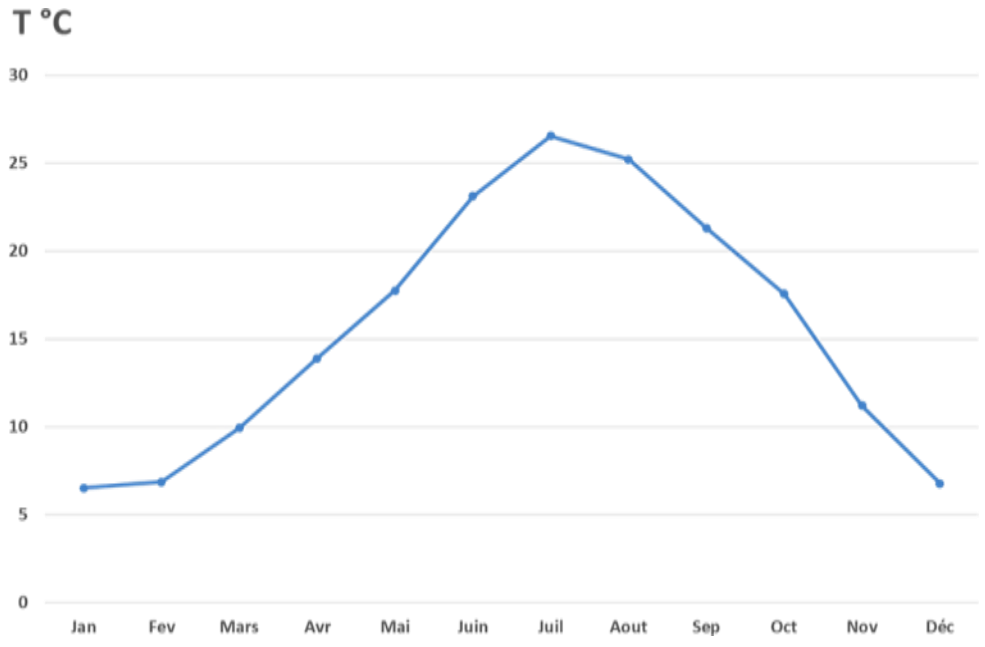


Figure 16 : variation de température moyenne mensuelle (2005-2018)

5 Vent

Le mouvement de l'air extérieur influence l'évaporation, la transpiration et la répartition des précipitations, impactant ainsi la recharge des eaux souterraines, notamment dans les régions arides et semi-arides.

La vitesse maximale du vent dans la région atteint son pic en mars (104,4 km/h), avec une activité intense au printemps et au début de l'été, tandis qu'elle est moins forte en automne et en hiver (79,2 km/h). Ces valeurs reflètent la présence de vents puissants dominants dans la région, surtout au printemps. Voici ce que montre le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : vitesses du vent enregistrées par la station de Tébessa.

Mois	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
V max (Km /h)	72.0	104.4	90/0	82.8	98.4	90.0	90.0	--	79.2	79.2	79.2

6 Bilan hydrologique

L'équilibre hydrologique est l'étude de la distribution de l'eau dans l'environnement, où l'on calcule la quantité d'eau qui pénètre dans le sol (comme les précipitations) et celle qui en sort (comme l'évaporation et le ruissellement) .Il est déterminé à l'aide de la relation suivante (G. Castany 1 982) :

$$\mathbf{P = ETR + R + I + (\pm \Delta w)}$$

Soit:

ETR : l'évapotranspiration annuelle (mm),

I : infiltration (mm),

P : précipitation (mm),

R : ruissellement (mm),

ΔW : La variation des réserves d'eau (mm).

6.1 Estimation des paramètres du bilan hydrologique

6.1.1 Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP (évapotranspiration potentielle) est la quantité d'eau qui peut s'évaporer de la surface de la Terre ou des plantes dans des conditions climatiques idéales. Ce concept repose sur des facteurs climatiques

tels que la température, l'humidité et le vent. Elle est calculée à l'aide de différentes relations, et la formule de Thornthwaite (1948) est la plus couramment utilisée.

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

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en (mm)

t : température moyenne mensuelle en (°C)

I : Indice thermique annuel

Avec $I = \Sigma i$

Où :

i : indice thermique mensuel

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

Où :

a : exposant climatique donné par Serra en 1954 [38]

$a = 0.016 I + 0.5$

Les estimations des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode de CW Thornthwaite sont souvent élevées dans les régions tropicales humides et équatoriales, tandis qu'elles tendent à être sous-estimées dans les régions arides et semi-arides. Pour corriger ces écarts, de nombreux chercheurs recommandent l'application d'un facteur de correction (K), qui dépend de facteurs tels que la période de l'année, la durée d'observation et la latitude de la zone étudiée.

$ETPc = K \times ETP$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm),

ETPc : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm),

K : facteur de correction dans les climats semi arides

Tableau 11: Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite pour la région d'El Malabiod.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T(°C)	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	/
I	6.45	5.32	3.39	2.05	1.98	2.08	3.01	4.20	5.38	7.00	8.03	7.63	/
I= Σi							56.52						/
A							1.40						/
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	/
ETP (mm)	102.57	78.29	41.78	20.68	19.62	21.06	35.31	56.39	79.54	114.97	139.54	129.86	839.61
ETPc(mm)	105.64	75 .94	35.93	16.75	17.06	17.90	36.36	62.02	96.24	140.26	173.02	150.63	927.75

6.1.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau effectivement perdue du sol et des plantes vers l'atmosphère par les processus d'évaporation et de transpiration. L'ETR est inférieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP) lorsque la quantité d'eau disponible est insuffisante, comme c'est le cas en période de sécheresse ou en situation de déficit hydrique. L'ETR est estimée à l'aide de modèles et d'équations basés sur des facteurs climatiques, notamment la température, les précipitations, ainsi que les caractéristiques du sol et des plantes.

6.1.3 Équation de Turc pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Cette équation est utilisée mondialement dans les différentes régions climatiques, car elle est simple et facile à appliquer en utilisant les données climatiques disponibles. Elle repose sur les précipitations et la température et permet de calculer l'évapotranspiration réelle.

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

Où :

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

L = 300+25T+0.05T3

T : température moyenne annuelle (°C).

6.2 Les différentes composantes du bilan

6.2.1 Le ruissellement

Il représente le mouvement des eaux de surface résultant des précipitations. Ce flux se produit à la surface du sol en direction des cours d'eau, notamment des rivières, des oueds et des lacs. Le ruissellement est influencé par plusieurs facteurs, tels que l'intensité des précipitations, la nature du sol, la couverture végétale et la pente topographique. Pour estimer le ruissellement, la méthode de Tixeron et Berkaloff est couramment utilisée pour analyser le ruissellement annuel moyen. Cependant, cette équation fait l'objet de controverses, car elle ne prend pas en compte les variations de la perméabilité du sol en fonction de la topographie et des caractéristiques lithologiques.

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

Où :

R : le ruissellement moyen annuel en (mm)

P : la hauteur des précipitations annuelles en (mm)

ETP : l'évapotranspiration potentielle annuelle en (mm)

6.2.2 Infiltration

Il représente le processus d'infiltration de l'eau dans le sol et les couches souterraines sous l'effet de la gravité et de la pression, contribuant ainsi à l'alimentation des eaux souterraines et à la réduction du ruissellement.

$$\mathbf{I = P- (ETR + R)}$$

Soit :

I : L'infiltration en (mm) ;

P : précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm) ;

R : La lame d'eau ruisselée en (mm) ;

7 Réserves facilement utilisables (R.F.U)

C'est la quantité d'eau stockée dans le sol que les plantes peuvent absorber facilement sans subir de stress hydrique. La quantité d'eau stockée dépend de plusieurs facteurs principaux :

- Les caractéristiques du sol, notamment son type, sa porosité et sa perméabilité.
- La composition du sol et l'épaisseur de la couche superficielle.
- La profondeur et le niveau des eaux souterraines.
- La couverture végétale.

- Les conditions climatiques.
- La structure du sol et ses propriétés hydrologiques.

La RFU Donné par la formule de (J. Richard 1979) :

$$RFU = 1/3 (Da. He. P)$$

Avec:

R.F.U : Réserve facilement utilisable.

Da : Densité apparente du sol.

He : Profondeur de la couche de la terre par courrier par les racines en (mm).

8 Calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite :

Le bilan hydrique est utilisé pour analyser le mouvement de l'eau résultant des précipitations afin d'évaluer le niveau d'humidité du sol. Il est calculé mensuellement.

Les réserves facilement utilisables (RFU) correspondent à la quantité d'eau stockée dans le sol, que les plantes peuvent absorber facilement par évaporation. La quantité d'eau stockée dans la RFU varie entre 0 mm (lorsque le stock d'eau est vide) et RFU max (capacité maximale), qui dépend généralement du type de sol et de ses caractéristiques géologiques. Cette valeur se situe généralement entre 0 et 200 mm, avec une moyenne d'environ 26 mm

Le bilan hydrologique est calculé mensuellement selon la méthode de Thornthwaite, permettant ainsi de déterminer les valeurs suivantes pour chaque mois :

- L'évapotranspiration réelle (ETR).
- Les réserves facilement utilisables (RFU).
- Le déficit agricole (Da).
- L'excédent en eau (Ex).

Tableau 12 : Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une période de 12 ans

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T (°C)	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	/
P (mm)	34.55	25.7	15	14.76	22.53	15.52	23.78	29.8	28.95	19.8	19.95	26.26	277.1
ETPc (mm)	105.64	75.94	35.93	16.75	17.06	17.90	36.36	62.02	96.24	140.26	173.0	150.36	927.75
RFU (mm)	0	0	0	0	5.47	3.09	0	0	0	0	0	0	0
ETR (mm)	34.55	25 .7	15	14.76	17.06	17.90	26.87	29.8	28.95	19.8	19.95	25.75	277.1
DA (mm)	71.09	50.24	20.93	1.99	0	0	9.49	32.22	67.29	120.46	153.07	123.88	650.66
Ex (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Les résultats de la vérification du bilan hydrique ont révélé que l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépasse largement la quantité des précipitations. Sur la base de l'évaluation réalisée, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Les précipitations atteignent leur pic en septembre avec 34,35 mm, tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son niveau le plus bas en décembre avec 16,75 mm
- Le déficit agricole s'étend de mars à décembre, atteignant son maximum en juillet avec 153,07 mm
- Les réserves facilement utilisables (RFU) n'ont pas atteint leur capacité maximale.
- Le taux le plus élevé d'évapotranspiration potentielle (ETP) est enregistré en juillet, atteignant 173,02 mm, tandis que les précipitations ne dépassent que 19,95 mm durant cette période.

Vérification du bilan hydrique :

Σ ETP = Σ ETR + Σ Da → 277.1+650.66= 927.75

Σ P= ΣETR + ΣEX→277.1+0 = 277.1

Tableau 13 : Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année déficitaire (2005)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T(°C)	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	/
P(mm)	37.43	27.83	16.24	16 .00	24.41	16.82	25.76	32.28	31.36	21.45	21.62	28.98	300.18
ETPc (mm)	105.64	75.94	35.93	16.75	17.07	17.90	36.36	62.02	96.24	140.26	173.02	150.63	927.75
RFU(mm)	0	0	0	0	7.35	6.27	0	0	0	0	0	0	/
ETR (mm)	37.43	27.83	16.24	16.00	17.06	17.90	32.03	32.28	31.36	21.45	21.62	28.98	300.18
DA(mm)	68.21	48.11	19.69	0.75	0	0	4.33	29.74	64.88	118.81	151.4	121.65	627.57
EX (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vérification du bilan :

Σ ETP = Σ ETR + Σ Da → 300.18+62

7.57= 927.75

Σ P= ΣETR + ΣEX→300.18+0 = 300.18

Tableau 14 / Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année excédentaire (2008).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
T(°C)	21.31	17.57	11.22	6.79	6.54	6.88	9.95	13.9	17.77	23.12	26.55	25.22	/
P(mm)	60.3	44.1	11.6	24.4	53.9	4.9	31.8	29.8	55.9	12.5	0	41.2	370.4
ETPc (mm)	105.64	75.94	35.93	16.75	17.06	17.90	36.36	62.02	96.24	140.26	173.02	150.63	927.75
RFU(mm)	0	0	0	7.65	26	13	8.44	0	0	0	0	0	/
ETR(mm)	60.3	44.1	11.6	16.75	17.06	17.90	36.36	38.24	55.9	12.5	0	41.2	351.91
DA(mm)	45.34	31.84	24.33	0	0	0	0	23.78	40.34	127.26	173.02	109.43	574.84
EX(mm)	0	0	0	0	18.49	0	0	0	0	0	0	0	18.49

9 Paramètres morphométriques des bassins versants de la région d'El Malabiod

Dans le cadre de cette étude, une analyse morphométrique a été réalisée dans la région de El Ma El Abiod: Oued El Goussa, Oued El Malassoued, Oued E'Zned et Oued Malabiod. Cette analyse vise à évaluer les caractéristiques naturelles et hydrologiques de chaque sous-bassin à travers le calcul de plusieurs indicateurs essentiels tels que la superficie, le périmètre, la pente et la densité de drainage.
Le tableau suivant résume les principaux paramètres morphométriques obtenus :

Tableau 15 Résumé des paramètres morphométriques des trois sous-bassins et du bassin d'Oued El Malabiod

Paramètre			Résultat			
Paramètre	Unité	Formule / moyen de détermination	El Goussa	El Malassoued	E'Zned	El Malabiod
Surface (A ou St)	km^2	Planimètre sur carte topographique	297.11	85.01	73.78	648.00
Périmètre (P)	Km	Curvimètre sur carte topographique	95.75	61.51	61..90	111.8
Indice de compacité (Kc)	/	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.56	1.87	2.02	1.39
Longueur du rectangle équivalent (L)	Km	$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12}(1+\sqrt{1-(\frac{1.12}{Kc})^2})$	40.72	27.72	28.38	39.67
Largeur du rectangle équivalent (l)	Km	$l = \frac{A}{L}$	7.30	3.07	2.60	16.33
Altitude maximale (Hmax)	M	Lue sur carte topographique	1704	1349	1578	1650
Altitude moyenne (Hmoy)	M	Lue sur carte topographique	1197.49	1158.16	1113.83	1148
Altitude minimale (Hmin)	M	Lue sur carte topographique	1029	1039	1039	1020
Dénivelée spécifique (Ds)	M	$D_S = D\sqrt{\frac{l}{L}}$	118.55	26.62	30.27	239.31
Densité de drainage (D_d)	Km /Km^2	$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$	0.11	0.22	0.18	2.27
Indice de pente moyenne (I_m)	%	$I_m = \frac{D}{l}$	54.79	65.15	73.08	22.84
Indice de pente global (I_g)	%	$I_g = \frac{D}{L}$	0.98	0.72	0.66	9.40

10 Conclusion

L'analyse hydroclimatique de la région d'El Malabiod a mis en évidence un climat semi-aride caractérisé par une irrégularité des précipitations et des températures élevées qui accentuent l'évapotranspiration. Les précipitations, bien que variables d'une année à l'autre, restent faibles, ce qui limite la recharge naturelle des nappes phréatiques. Les résultats montrent que l'indice d'aridité de De Martonne classe la région parmi les zones soumises à un déficit hydrique marqué. L'évapotranspiration potentielle élevée, calculée par la méthode de Thornthwaite, dépasse largement les précipitations reçues, réduisant ainsi l'eau disponible pour l'infiltration et augmentant le ruissellement superficiel.

Ces résultats soulignent l'importance de la gestion des ressources en eau dans la région d'El Malabiod, où les conditions climatiques limitent la recharge naturelle des nappes. Par conséquent, l'étude de ces facteurs climatiques est essentielle pour améliorer les stratégies d'exploitation et de conservation des eaux souterraines, et ainsi assurer une utilisation durable des ressources en eau.

Dans le cadre de l'analyse hydroclimatique, l'étude morphométrique des trois sous-bassins versants d'El Goussa, d'El Malassoued et d'E'Zned, qui alimentent le bassin principal de l'Oued El Malabiod, révèle des caractéristiques topographiques variées influençant directement le comportement hydrologique de la région. Les surfaces de ces sous-bassins sont respectivement de 297,11 km² pour El Goussa, de 85,01 km² pour El Malassoued et de 73,78 km² pour E'Zned, avec des indices de compacité (Kc) allant de 1,56 à 2,02, ce qui traduit des formes plutôt allongées. L'analyse montre également des dénivelés spécifiques importants, notamment dans le bassin d'El Goussa (Ds = 118,55 m), ainsi que des pentes moyennes élevées dépassant 50 %, en particulier dans le bassin d'E'Zned (73,08 %). Bien que la densité de drainage soit relativement faible dans El Goussa (0,11 km/km²), elle est plus marquée dans les deux autres sous-bassins. Ces paramètres traduisent une forte propension au ruissellement et une capacité d'infiltration limitée, en cohérence avec les contraintes climatiques observées. Par conséquent, ces paramètres morphométriques sont essentiels pour identifier les sites les plus favorables à l'implantation d'ouvrages de recharge artificielle. Ils permettent de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement des eaux superficielles et d'optimiser l'utilisation des eaux pluviales et de crue pour renforcer la recharge des nappes phréatiques, tout en réduisant les pertes liées au ruissellement ou à l'évaporation, un enjeu crucial dans le contexte de rareté des ressources hydriques de la région de l'Oued El Malabiod.

Chapitre 04

La recharge artificielle

1 Introduction

La recharge artificielle des eaux souterraines est l'une des études les plus importantes et récentes, contribuant à augmenter le volume des eaux souterraines et à résoudre le problème de la baisse des niveaux de la nappe phréatique à l'échelle mondiale, en particulier dans les zones semi-arides. Cela est dû au pompage excessif des eaux souterraines, qui dépasse le taux de recharge naturelle. La recharge artificielle consiste à augmenter la quantité d'eau dans les aquifères par des moyens contrôlés par l'homme, tels que des bassins d'infiltration, des étangs, des rigoles d'irrigation ou des systèmes d'aspersion, ou encore en injectant directement l'eau dans les aquifères à l'aide de puits d'injection.
Cette technique constitue l'une des solutions les plus efficaces pour faire face à la pénurie d'eau, notamment dans les régions arides et semi-arides, et elle contribue à la durabilité des ressources en eau.

2 Définition de la recharge artificielle

La recharge artificielle des nappes phréatiques est une technique visant à réalimenter les aquifères en eau par diverses méthodes permettant le transfert des eaux de surface vers les couches souterraines. Cela se fait notamment par l'injection directe d'eau dans l'aquifère au moyen de puits d'injection atteignant les couches profondes, ou encore par des bassins d'infiltration, des mares, des rigoles d'irrigation, ainsi que par des systèmes d'aspersion. Cette pratique a grandement contribué à pallier le problème du déficit hydrique, notamment dans les zones arides et semi-arides, en compensant le manque de ressources en eau.

Tableau 16 : Comparaison entre la recharge naturelle et la recharge artificielle des eaux souterraines

Cratère	La recharge naturelle	La recharge artificielle
Définition	Infiltration des eaux (pluie, ruissellement) sans intervention humaine.	Intervention humaine pour augmenter la recharge des nappes phréatiques
Source	Fonte des neiges, rivières, crues, précipitations.	Eau de surface, eau d'irrigation excédentaires eaux usées traitées
Contrôle	Non contrôlable – dépend des conditions naturelles .	Contrôlable–quantité, emplacement et moment définis.
Efficacité	Limitée dans les zones arides ou à faible précipitation.	Très efficace pour compenser les déficits en zones arides ou semi-arides.
Objectif	Maintien naturel de l'équilibre de la nappe.	Augmentation du niveau piézométrique stockage, amélioration de la qualité.
Méthodes	Infiltration directe à travers les sols ou zones non saturées.	Bassins d'infiltration, injection dans des puits, tranchées, digues
Temps requis	Lent – effets sur de longues périodes.	Rapide – résultats visibles en peu de temps.
Coût	Négligeable–pas de dépenses directes	Élevé –nécessite des infrastructures et un suivi régulier.
Durabilité	Dépend du respect de l'environnement naturel.	Dépend de la planification et d'une gestion durable
Impact environnemental	Très faible.	Variable – peut être positif ou négatif selon la méthode utilisée

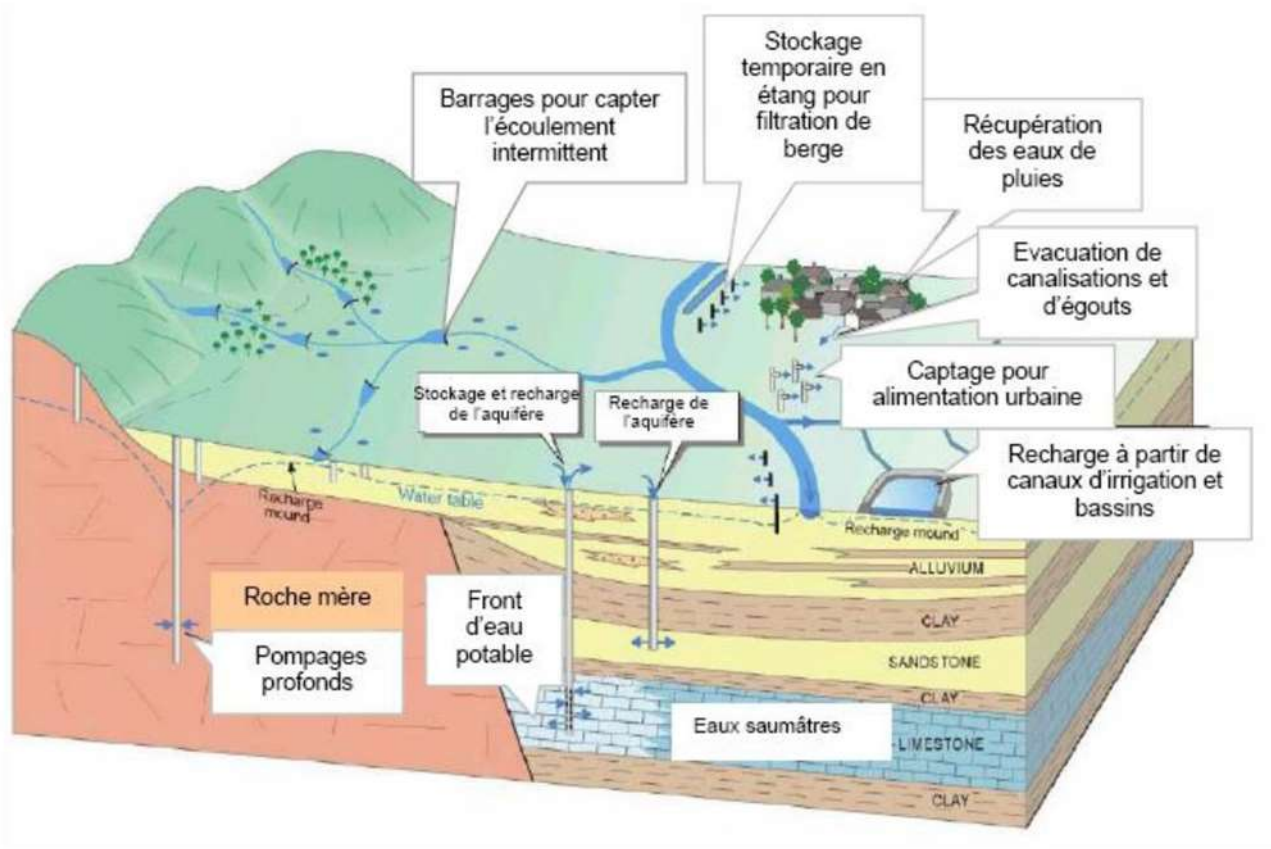


Figure 17 : Schéma comparatif de la recharge naturelle et artificielle des nappes phréatiques.

(BRGM – SIGES Seine-Normandie, 2013)

3 Les objectifs de la recharge artificielle

La recharge artificielle vise à atteindre un ensemble d'objectifs contribuant à l'amélioration de la ressource en eau, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Elle permet de réduire la salinisation, de contrôler la baisse du niveau piézométrique et, surtout, de restaurer les nappes phréatiques surexploitées en raison d'un pompage excessif, lequel entraîne une diminution du niveau des eaux souterraines. Cette technique contribue également à l'amélioration de la qualité des nappes par la réduction de la concentration de certains éléments chimiques, tels que les nitrates, soit par dilution, soit en exploitant la capacité naturelle du sol à assurer une épuration.

4 Les méthodes de recharge artificielle

La surexploitation des nappes phréatiques et l'irrégularité des précipitations, notamment dans les régions arides et semi-arides, ont conduit au développement de techniques de recharge artificielle visant à renforcer les ressources en eau souterraine. Ces techniques varient en fonction du type de projet et des caractéristiques de la région.

Les méthodes se divisent en :

4.1 Les méthodes d'injection directe

Ces méthodes consistent à injecter directement l'eau dans les aquifères captifs, à travers des puits, afin d'augmenter leur capacité.

Cette technique nécessite une surveillance rigoureuse de la qualité de l'eau utilisée, afin d'éviter toute contamination. Elle est considérée comme l'une des méthodes les plus utilisées et les plus répandues à travers le monde, et elle est souvent employée avec les aquifères captifs, qui sont des couches entourées de formations imperméables en haut et en bas, stockant l'eau sous pression.

4.2 La recharge artificielle indirecte

Cette méthode, connue sous le nom de « réalimentation artificielle induite », repose sur des techniques indirectes de recharge des eaux souterraines. Elle consiste à choisir un cours d'eau (comme un fleuve ou un oued) situé à proximité d'une nappe alluviale (généralement constituée de matériaux graveleux), puis à forer des puits de pompage près des berges de ce cours d'eau.

Lors du transfert, l'eau est naturellement filtrée à travers les berges, ce qui contribue à l'amélioration de sa qualité avant d'atteindre la nappe souterraine.

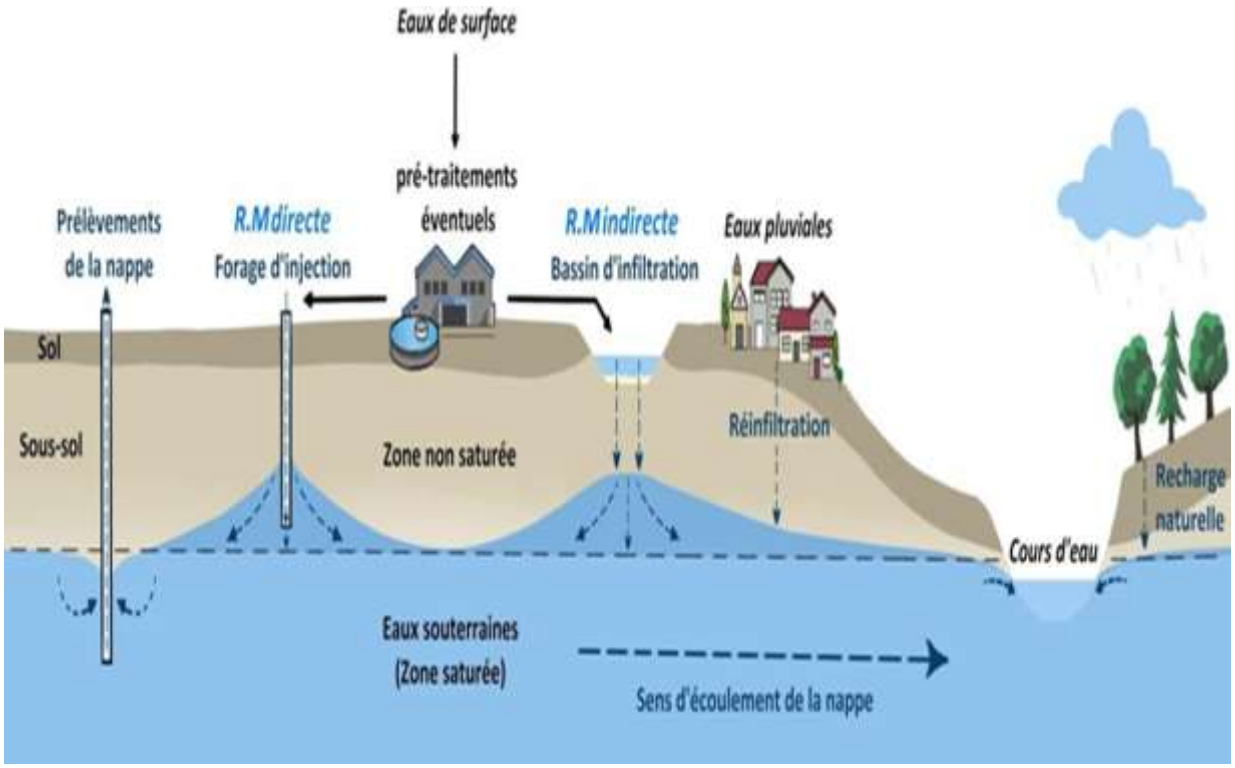


Figure 18 : Schéma des techniques de recharge artificielle directe et indirecte des nappes.

(SDAGE Rhône-Méditerranée, 2022)

4.3 Les bassins d'infiltration

Cette technique repose sur l'utilisation de bassins d'infiltration, qui sont des ouvrages conçus pour permettre à l'eau de s'infiltrer naturellement jusqu'à la nappe phréatique. Cela contribue à la purification de l'eau en tirant parti des capacités naturelles d'épuration du sol. Elle est généralement utilisée pour la réalimentation des nappes libres ou pour la création de barrières hydrauliques de protection. Elle permet également de conserver l'eau qui aurait autrement été perdue par ruissellement vers la mer ou par évaporation.

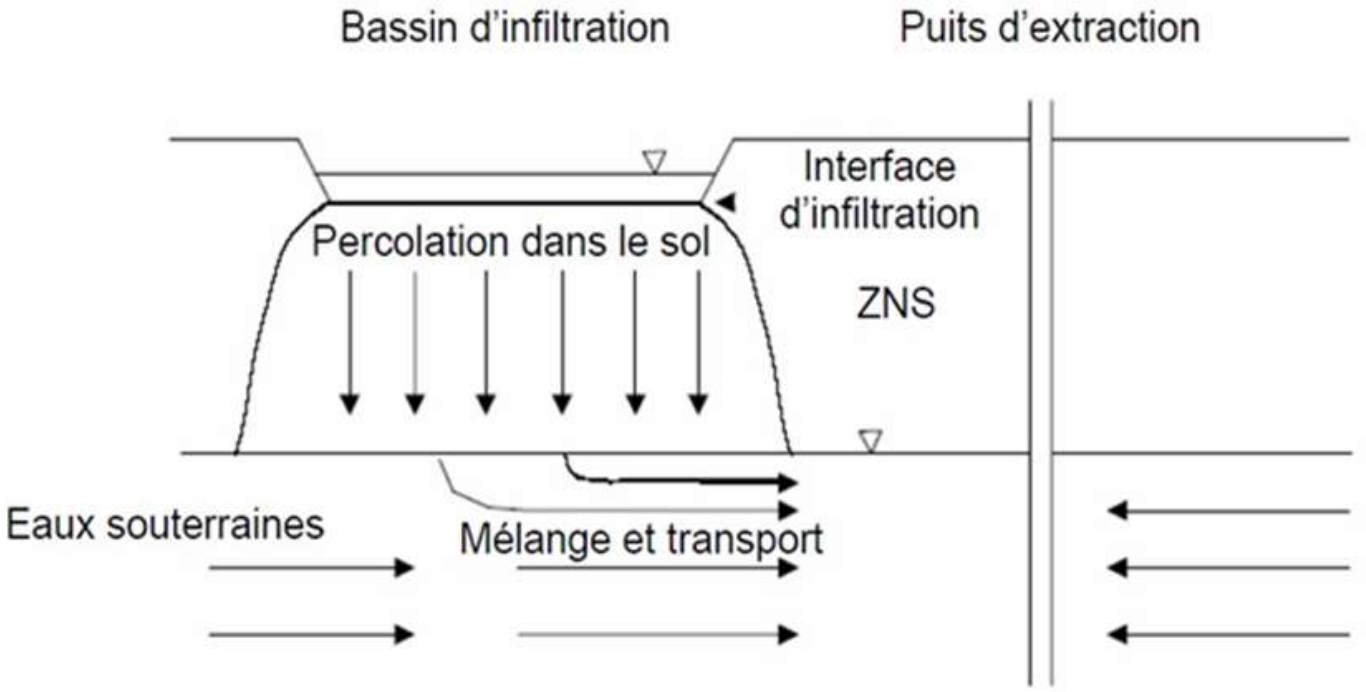


Figure 19 : Schéma simplifié de la technique de recharge par bassin d'infiltration (D'après Pettenati, 2007, Eusseuff et Lansey, 2004).

Tableau 17 : Avantages et inconvénients des techniques de recharge artificielle

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Injection indirecte	Infiltration de grands volumes d'eau, notamment pendant les périodes de pluie en cas d'excès d'eau. Processus de filtration naturelle, réduisant ainsi le besoin de traitement préalable. Coût relativement faible. -Facilité d'entretien.	L'accumulation de particules fines telles que l'argile et les matières organiques réduit la capacité du sol à infiltrer l'eau. Le processus de colmatage est difficile à inverser ou à traiter. Le taux d'infiltration diminue avec le temps, ce qui réduit l'efficacité du système à long terme.
Injection directe	La technique de pompage-injection réduit les problèmes de colmatage. Elle peut être mise en œuvre sur des sites de petite taille. Elle permet un contrôle précis du temps de séjour de l'eau dans la nappe. Possibilité d'utiliser des nappes profondes (captives ou semi-captives) et/ou contaminées.	Une eau de recharge de mauvaise qualité peut contaminer la nappe. Il est difficile de maintenir un débit d'injection stable. Un contraste de salinité entre les eaux peut poser des problèmes. Le temps de stockage est limité afin d'éviter un mélange excessif des eaux.
Bassin d'infiltration	Capacité à infiltrer de grands volumes d'eau. Amélioration de la qualité de l'eau par filtration naturelle. Coût de mise en œuvre relativement faible. Facilité d'entretien. Diversité des sites d'implantation grâce à la présence importante de nappes alluviales. Solution adaptée à l'alimentation en eau potable (AEP).	Colmatage permanent dû à des causes physiques, biologiques ou chimiques. Besoin de grandes surfaces au sol. Diminution du taux d'infiltration avec le temps. Variation du taux d'infiltration selon la technique utilisée.

5 Critères de sélection des sites de recharge artificielle

Les étapes de sélection du site pour la mise en œuvre d'un projet de recharge artificielle des eaux souterraines dépendent d'un ensemble de critère visant à garantir le succès du projet et à éviter son échec. Ces critères sont les suivants :

5.1 Critères géologiques et hydrogéologiques

- Présence de couches aquifères ayant une haute perméabilité (comme le sable et le gravier)
- Épaisseur adéquate de la couche aquifère
- Profondeur appropriée de la nappe phréatique (ni trop profonde, ni trop proche de la surface)
- Absence de formations non perméables (comme l'argile ou le marne) à la surface

5.2 Critères hydrologiques

- Disponibilité d'une source d'eau permanente ou saisonnière (pluies, rivières, barrages)
- Présence d'un excédent d'eau pouvant être utilisé pour la recharge sans affecter d'autres usages
- Adéquation du taux de précipitation et du régime des écoulements superficiels

5.3 Critères physiques (topographiques)

- Pente topographique appropriée pour éviter l'érosion superficielle
- Éviter les sites avec des pentes abruptes ou des dépressions argileuses

5.4 Qualité de l'eau

- L'eau utilisée pour la recharge doit être exempte de contaminants nuisibles (chimiques ou biologiques)
- La qualité de l'eau doit répondre aux normes de recharge des nappes phréatiques acceptées

5.5 Considérations environnementales et économiques

- L'impact sur l'écosystème doit être minimal
- Accessibilité facile du site avec un coût d'infrastructure et de maintenance bas
- Acceptation communautaire et politique du projet

5.6 Critères administratifs et légaux

- Propriété des terres
- Existence de réglementations permettant l'utilisation des eaux et la recharge artificielle

6 Les facteurs influençant l'efficacité de la recharge artificielle

Pour garantir le succès du projet après sa mise en œuvre, plusieurs facteurs importants contribuent à sa réussite, à savoir :

- Caractéristiques de l'aquifère : porosité, perméabilité, épaisseur
- Qualité de l'eau utilisée pour la recharge
- Gestion de la quantité d'eau et de la vitesse de recharge
- Type de recharge artificielle selon les conditions du site
- Niveau de pollution de l'eau utilisée
- Activités humaines environnantes
- Financement et coûts d'exploitation et de maintenance
- Planification intégrée de la gestion des ressources en eau

7 Utilisation des carrières désaffectées comme dispositif de recharge artificielle des eaux souterraines

Dans le domaine de la recharge artificielle des eaux souterraines, les carrières abandonnées représentent une option efficace parmi les techniques de stockage et de réalimentation en eau, notamment dans les régions semi-arides telles que la zone d'El Malabiod, connue par le nombre important de carrières à ciel ouvert, exploitant les sables du Miocène, souvent ces carrières sont abandonnées constituent un véritable danger pour la population locale et le cheptel.

Dans cette étude nous proposons diverses carrières abandonnées ou en cours d'exploitation pour qu'elles soient destinées à la recharge de la nappe des sables et notamment les sablières proches des cours d'eau (figures 20, 21, 22, 23)



Figure 20 : Carrière abandonnée à coté de – Mosquée El Hidaya, RN16 (in. Google maps , 2025)

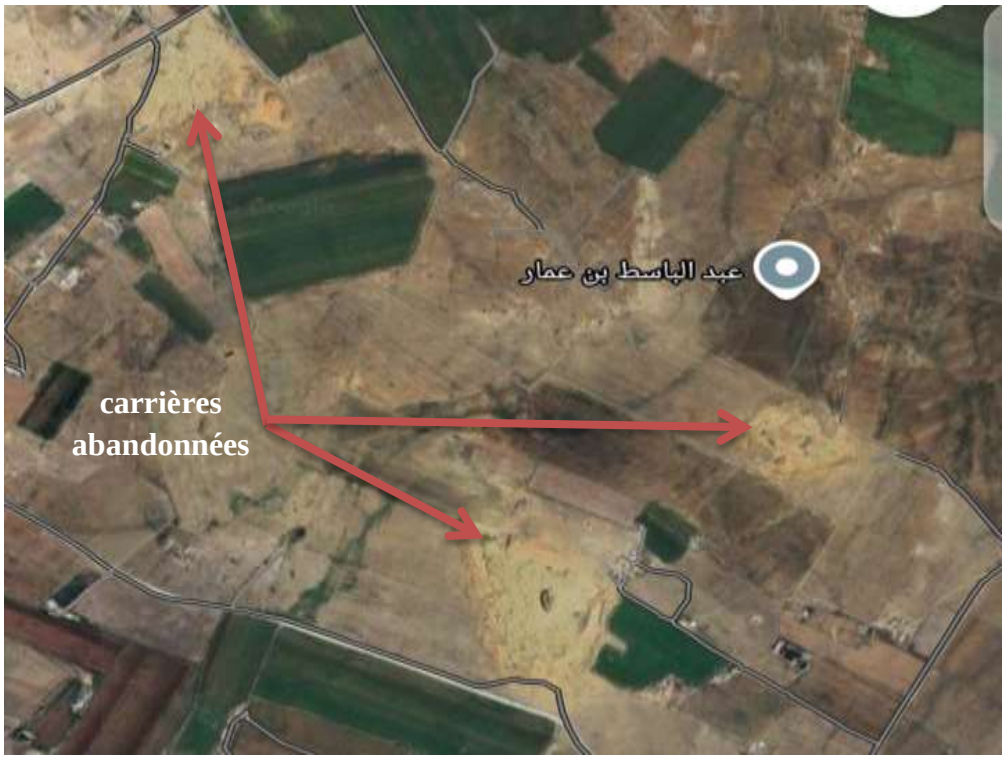


Figure 21 : Carrière abandonnée – Zone Abdelbasset Ben Ammar (in. Google maps ,2025)



Figure 22 : Carrière abandonnée – Route N10, Draa Djoudj (in. Google maps ,2025)



Figure 23 : Carrière abandonnée – Oued El Goussa (in. Google maps ,2025)

7.1 Le rôle des carrières abandonnées dans la recharge artificielle

1. Comme sites de stockage de l'eau

Les carrières abandonnées peuvent être utilisées comme des bassins de collecte des eaux de pluie ou des eaux traitées (comme celles provenant d'une station d'épuration).

Grâce à leur grande profondeur et, le cas échéant, à la perméabilité de leur sol, elles permettent une infiltration progressive de l'eau vers les nappes souterraines.

2. Comme sites de recharge artificielle directe

Si le fond de la carrière est en contact direct avec une zone non saturée, l'eau accumulée peut alimenter directement la nappe phréatique.

L'efficacité peut être améliorée en tapissant le fond de la carrière avec des matériaux hautement perméables (comme du gravier ou du sable grossier).

3. Réhabilitation environnementale

L'exploitation des carrières abandonnées dans ce contexte constitue également une forme de réhabilitation des sites dégradés sur le plan environnemental.

Elles peuvent contribuer à l'amélioration du paysage naturel et au stockage de l'eau à d'autres fins, comme l'irrigation ou la lutte contre les incendies.

7.2 Conditions requises pour exploiter des carrières abandonnées

- ❖ Emplacement : De préférence proche d'un oued ou d'une zone naturelle de concentration des eaux
- ❖ Perméabilité : Le fond de la carrière doit être perméable (sable, gravier) ou amélioré (enlevant l'argile par exemple)
- ❖ Propreté : Vérifier que la carrière n'a pas été utilisée comme décharge ou contaminée.
- ❖ Test du sol : Réaliser un test de percolation pour évaluer la vitesse d'infiltration.
- ❖ Faisabilité d'aménagement : Possibilité de stabiliser les berges, créer un déversoir, installer des canaux d'amenée, ou des piézomètres.

7.3 Les Avantages :

- Valorisation d'un espace abandonné à des fins écologiques.
- Réduction des pertes d'eau de ruissellement.
- Soutien des niveaux de la nappe phréatique.
- Moins coûteux qu'une infrastructure nouvelle.

8 Les barrages écrêteurs de crues

Les barrages écrêteurs de crues sont des ouvrages hydrauliques conçus principalement pour ralentir et réguler les crues dans les oueds temporaires. Contrairement aux barrages de retenue permanents, ils ne stockent pas l'eau sur de longues périodes, mais permettent plutôt de dissiper l'énergie des crues et de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol, contribuant ainsi à la recharge des nappes phréatiques.

Ces barrages sont particulièrement efficaces dans les régions semi-arides où les précipitations sont rares mais intenses, générant des crues soudaines. En retenant temporairement ces volumes d'eau, le barrage augmente le temps de séjour de l'eau dans le lit de l'oued, ce qui accroît les échanges avec le sous-sol perméable.

9 Le rôle dans la recharge artificielle des nappes phréatiques

Quand ce type de barrage est implanté dans une zone à sol perméable, il permet :

- L'accumulation temporaire des eaux de crue derrière le barrage,
- Une infiltration naturelle de l'eau vers la nappe souterraine grâce à la perméabilité du sol,
- Cette infiltration constitue une recharge directe de la nappe phréatique.

Ainsi, ce type d'ouvrage a une double vocation :

- ***Hydraulique :*** pour la gestion des crues,
- ***Hydrogéologique :*** pour renforcer les ressources souterraines.

10 Exemple de recharge artificielle au Maroc

Le projet de la plaine du Haouz, situé dans la province de Marrakech, au sud-ouest du Maroc, concerne une région confrontée à une pénurie aiguë de ressources en eau, due au changement climatique et à l'augmentation continue de la population. Une étude approfondie a été menée en vue de la réalisation de bassins d'infiltration et de petits barrages, avec pour objectifs principaux de renforcer la rétention des eaux, de réduire les pertes et d'améliorer la durabilité des ressources hydriques. Par ailleurs, le projet prévoit le redéploiement des eaux collectées vers les nappes phréatiques, au moyen de canalisations et de réseaux de distribution adaptés



Figure 24 : Barrage collinaire



Figure 25: Canal d'écoulement



Figure 26 : Barrage en pierres

11 Conclusion

À la fin de ce chapitre sur la recharge artificielle, on peut dire que cette technique représente l'un des moyens importants de renforcer les ressources en eaux souterraines, notamment dans les zones arides et semi-arides qui souffrent de rareté et de limitation des ressources de surface. Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principes de base de la recharge artificielle, son importance, ses différentes formes, ainsi que les conditions hydrogéologiques nécessaires pour garantir son succès. La réalisation d'un bénéfice optimal de la recharge artificielle nécessite une approche intégrée combinant les aspects techniques, environnementaux et sociaux, ce qui en fait une option stratégique majeure dans le cadre de la gestion durable des ressources en eau.

Chapitre 05

Etude du dimensionnement des ouvrages de recharge

1 Introduction

Dans le cadre de la recherche de solutions innovantes et durables pour faire face à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines, la technique de la recharge artificielle s'impose comme une option efficace et appropriée, notamment dans les zones arides et semi-arides qui souffrent de l'irrégularité des précipitations et de l'épuisement des ressources en eau. Parmi les ouvrages adoptés dans ce contexte, les mares d'eau formées en amont des petits barrages ou des digues en terre constituent des points de rétention essentiels, permettant le stockage temporaire des eaux de ruissellement afin de favoriser leur infiltration vers les nappes aquifères.

Ce chapitre se concentre sur l'étude hydrologique des bassins situés dans la région d'El Malabiod (figure 27). Il présente également une étude de cas d'une mare d'eau résultant de la construction de barrages en terre dans la zone d'étude, en analysant ses composantes structurelles, ses caractéristiques hydrogéographiques, son mode de fonctionnement et son impact sur la recharge de la nappe souterraine avoisinante. Le chapitre détaille en outre les étapes techniques de la construction du barrage, depuis le choix du site, en passant par la conception technique, jusqu'aux méthodes de contrôle des pertes par infiltration et de gestion des flux hydriques. Cette étude vise à évaluer l'efficacité de cet ouvrage dans la réalisation de son objectif principal : renforcer la recharge de l'aquifère de manière contrôlée et sécurisée.



Figure 27 : l'oued El Goussa.

2 Etude hydrologique

L'étude hydrologique vise à connaître le volume d'eau pouvant être stocké ou retenu pendant une période donnée, ainsi qu'à évaluer les débits, ce qui est essentiel pour concevoir les ouvrages de drainage de manière à ce qu'ils puissent supporter ces volumes sans provoquer d'inondation ni engendrer de problèmes , l'étude hydrologique repose sur des données hydrographiques, climatiques et hydrologiques, nous avons utilisés les documents l'évacuateur des eaux.

- Les cartes topographiques
- Les pluies moyennes de la station d'El Ma El Abiod.
- Les pluies maximales de 24 heures de la station d'El Ma El Abiod.
- Les données de I 'évaporation au niveau de quelques stations.
- Le vent direction et vitesse.

2.1 Détermination des paramètres hydrologique

2.1.1 Coefficient D'écoulement Instantané

Le coefficient de ruissellement instantané représente la proportion des eaux qui s'écoulent directement après la pluie par rapport à la quantité de précipitations tombées. En l'absence de moyens de mesure, on utilise des estimations basées sur les caractéristiques du bassin et du sol, telles que les sols argileux. Dans cette étude, une valeur estimée de (e = 1,5) a été adoptée.

2.1.2 Le temps de concentration

Le temps de concentration désigne la durée nécessaire à l'eau tombée au point le plus éloigné hydrauliquement pour atteindre le point d'exutoire. Ce paramètre dépend de la forme du bassin versant. Il dépend principalement de la forme du bassin. En effet, plus le bassin est allongé, plus le temps de concentration sera élevé. Une estimation raisonnable de ce temps peut être obtenue à l'aide de la formule empirique suivant

$$\mathbf{TC}= \frac{4\sqrt{A+1.5\times L}}{0.8\sqrt{Hmoy-Hmin}}$$

TC: temps de concentration en heures

A: surface de bassin versant en Km2

L: longueur de talweg principale en Km

H moy: Altitude moyenne en m

H min : Altitude min en m

Tableau 18: temps de concentration

Mares	Aire (Km^2)	L (Km)	Alt min	Alt moy	Alt max	TC (heure)
El Goussa	297.11	40.72	1029	1197.49	1704	7.29
El Malassoued	85.01	27.72	1039	1158.16	1349	5.15
E'Zned	73.78	28.38	1039	1113.83	1578	6.23
Oued El Malabiod	648.00	39.67	1020	1148	1650	11.75

2.1.3 Vitesse d'écoulement

La vitesse d'écoulement peut être approximée en divisant la longueur du talweg principal par le temps de concentration, selon la relation suivante :

Ve = L/TC

L : Longueur de talweg en Km

Tc : Temps de concentration en heures.

Tableau 19 ; Résultats de la vitesse d'écoulement

Mares	L(Km)	TC (heure)	Ve (Km /heure)
El Goussa	40.72	7.29	5.58
El Malassoued	27.72	5.15	5.38
E'Zned	28.38	6.23	4.55
Oued El Malabiod	39.67	11.75	3.37

2.1.4 Intensité pluie

Pour calculer l'intensité des précipitations, on utilise la formule suivante

$$\mathbf{Ip = 0.33 \times H \times TC^{-0.6}}$$

Ip : intensité de la pluie (mm/h)

H : hauteur de la pluie de 24 heures (mm) ; On prend H = 58.8

Tc : Temps de concentration (h)

Tableau 20 : Résultats des intensités de pluie

Mares	TC (heure)	Ip (mm /h)
El Goussa	7.29	5.89
El Malassoued	5.15	7.25
E'Zned	6.23	6.47
Oued El Malabiod	11.75	4.42

2.1.5 Estimation de la lame d'eau ruisselée

La lame d'eau ruisselée représente l'épaisseur d'eau qui s'écoule à la surface du sol après les précipitations. Elle est indispensable pour le calcul du transport solide dans le bassin versant. Son estimation se fait à l'aide des équations empiriques suivantes :

- Formule de SAMIE H = P × ($\sqrt{A}$ × 0.045-0.164)
- Formule de COUTAGNE H = P^2 (293 – 2.2 ×$\sqrt{A}$) 10^{-6} p = 200 mm
- Formule de MALLET ET GAUTTIER H = 0.6 (1 –$\mathbf{10^{0.36P}}$) P

Tableau 21 ; Résultats de l'estimation de la lame d'eau ruisselée

Mares	A (Km^2)	H (mm) SAMIE	H (mm) COUTAGNE	H (mm) MALLET ET GAUTIER
El Goussa	297,11	122.33	10.20	120
El Malassoued	85.01	50.18	10.90	120
E'Zned	73.78	44.50	10.96	120
Oued El Malabiod	648.00	196.30	9.47	120

2.1.6 Estimation de transport Solide

Elle représente la quantité de sédiments transportée par les eaux de ruissellement dans les oueds.

La formule de Tixeront est une équation empirique fondée sur les caractéristiques des bassins versants à perméabilité faible ou moyenne. Elle a été développée pour s'adapter à la nature des oueds en Algérie et est donnée comme suit :

$$\mathbf{Ts = 75 \times H^{0.15}}$$

Ts : Transport solide

H : La lame d'eau ruisslée

Tableau 22 : Résultats des estimations de Transport Solide

Mares	H (mm)	Ts T/m3/an
El Goussa	10.20	106.25
El Malassoued	10.90	107.31
E'Zned	10.96	107.40
Oued El Malabiod	9.47	105.07

2.1.7 Estimation de l'apport en eau de surface

Les apports en eaux de surface, mensuels et annuels, au droit du site de la retenue ont été estimés à l'aide de la formule SAMIE III, en se basant sur les données de la période allant de l'année 2000 à l'année 2023. La moyenne annuelle pour cette période a été calculée conformément aux résultats de la formule adoptée (SAMIE III).

$$\mathbf{Le = P2\ (293 - 2.2 - S^{1/2})}$$

$$\mathbf{Q = 10^{-3} \times Le \times S}$$

Formule de SAMIE IV

$$\mathbf{Le = 0.784\ (P - 0\ .232)^2}$$

$$\mathbf{Q = 10^{-3} \times Le \times S}$$

Le : Lame d'eau écoulé (m/an)

S : Surface du bassin versant Km2

P : Pluie moyenne annuelle (mm) ; On prend P = 200 mm

Tableau 23: Résultats des estimations de l'apport en eau de surface

		SAMIE III		SAMIE IV	
Mares	Surface BC (Km2)	Le (mm/an)	Q (m3/an)	Le (mm/an)	Q (m3/an)
El Goussa	297,11	11629679 .39	3455294.04	31287.28	9295.76
El Malassoued	85,01	11627661.64	988467.51	31287.28	2659.73
E'Zned	73,78	11627343.16	857865.378	31287.28	2308.37
Oued El Malabiod	648.00	10613766.23	6877720.51	31287.28	20274.15

2.1.8 Estimation de débit de crue

Les crues résultent des précipitations et des averses orageuses qui se forment dans le bassin versant. Elles sont estimées à l'aide d'une formule mathématique établie par MAILLET Et GATTIER, exprimée par l'équation suivante :

$$\mathbf{Qmax = 2K \times log \times (1 + A \times Pmoy) \times S \times \sqrt{1 + 4logT - logS} / \sqrt{L}}$$

Qmax : Débit maximal de crue pour une fréquence donnée (en m³/s).

Pmoy : Pluviométrie annuelle moyenne ; on prend Pmoy = 0,20 m.

L : Longueur de talweg principale en Km

Kc : Coefficient qui dépend de la morphologie de bassin versant

S : Surface du bassin versant en Km^2

P : Périmètre du bassin versant

A : Constante égale à 20 pour l'Algérie

Tableau 24 : Résultats des estimations de débit de crue

					Qmax (m3/s)		
Mares	L en Km	Surface BV (Km2)	Périmètre BV (KM)	Kc	T=10	T=50	T=100
El Goussa	40.72	297.11	95.75	1.56	60,32	87,55	96,95
El Malassoued	27.72	85.01	61.51	1.87	40,14	55,48	60,91
E'Zned	28.38	73.72	61.90	2.02	36,75	50,56	55,45
Oued El Malabiod	39.67	648.00	111.8	1.39	137.21	193.59	213.01

3 Caractéristiques des mares d'eau

Dans le cadre de cette étude, l'accent sera mis sur la faisabilité de la réalisation de seuils en terre dans trois oueds situés en zone semi-aride, en tant que solution économique et adaptée pour renforcer la recharge artificielle des nappes souterraines.

3.1 Type de mare

La réussite de la construction de la mare dépend des caractéristiques du sol ou des matériaux utilisés. Ces matériaux doivent être compactables, et il est nécessaire de les arroser pendant ou après le compactage afin d'améliorer leur cohésion. L'objectif du compactage et de l'arrosage est d'assurer une étanchéité suffisante. L'entreprise exécutante doit, au cours de ces deux étapes, prélever des échantillons tous les 30 cm de profondeur pour des analyses en laboratoire, afin de garantir la qualité. La hauteur du seuil est fixée par le maître d'ouvrage et doit être en adéquation avec la topographie du site. Les seuils doivent être équipés d'un dispositif d'évacuation des eaux, situé soit à droite, soit à gauche. Il est également nécessaire de protéger l'ouvrage à l'aide de rip-rap, une couche de grosses pierres appelée également blindage en enrochement.

3.2 Dimensionnement de la digue

3.2.1 Hauteur de la digue

- La revanche

$$\mathbf{HV = 1/2 + 1/3\ \sqrt{L}}$$

Hv : Hauteur des vagues en (m)

L: Longueur du plan d'eau en (km)

V: La vitesse de propagation des vagues en (m)

V= 3/2+2/3 Hv

$$\mathbf{Hr = Hv + V^2 / V*g}$$

Hr: la revanche en (m)

g : la pesanteur (m/s^2)

La hauteur de la digue sera égale à:

$$\mathbf{Hd= He+H +Hr}$$

Avec He niveau de l'eau de la courbe de niveau A Jusqu'au la courbe de niveau B

H=1.00 m par la vérification du BLACKMOR.

Hr = la revanche en (m)

3.2.2 Largeur en crête

La largeur en crête d'une digue doit être suffisante pour qu'il n'y pas de circulation d'eau importante dans la digue et assure au même temps les besoins de service Cette largeur est égale à :

$$\mathbf{L= 1.65 \sqrt{Hd}}$$

3.2.3 Pente des talus

Les pentes des talus sont fixées par la condition de stabilité de l'ouvrage, elles sont déterminées en fonction des propriétés des matériaux de la digue et sa hauteur.

Talus amont = 1/2

Talus aval =1/2

Tableau 25 : Pentes des talus en fonction de la hauteur et du type de barrage

Hauteur du barrage	Type de barrage	Pentes de talus	
$< 5m$	Homogène	AMONT	AVAL
		1 / 2.5	1/2
5 à 10 m	Zoné	1/2	1/2
	Homogène à granulométrique étendue	1/ 2	1/2
	Homogène à fort (%) d'argile	1/ 2.5	1/2.5
	Zoné	1/2	1/2

Tableau 26 : Résultats des dimensionnements de la digue

Mares	Hv	Long d'eau (Km)	Alt A	Alt B	He	H en m	V	Hr	Hd	L
El Goussa	0 .55	40.72	1704	1029	2.79	1.00	1.86	0.21	4	3
El malassoued	0.56	27.72	1349	1039	2.78	1.00	1.87	0.22	4	3
E'Zned	0.56	28.38	1578	1039	2.78	1.00	1.87	0.22	4	3
Oued El Malabiod	0.55	39.67	1704	1020	2.79	1.00	1.86	0.21	4	3

3.2.4 L'évacuateur de crue

Le système d'évacuation des crues est initialement constitué d'un réservoir d'eau équipé d'un déversoir dont le niveau s'étend généralement le long d'une ligne droite. Ce niveau débouche dans un cours d'eau qui peut être parallèle ou perpendiculaire à cette ligne. Ce canal, caractérisé par une faible pente, dirige l'eau vers le côté aval du barrage. Dans notre cas, le choix s'est porté sur un dispositif d'évacuation composé de murs en (gabion) remplis de pierres, permettant ainsi l'évacuation directe des eaux de crue vers les oueds voisins

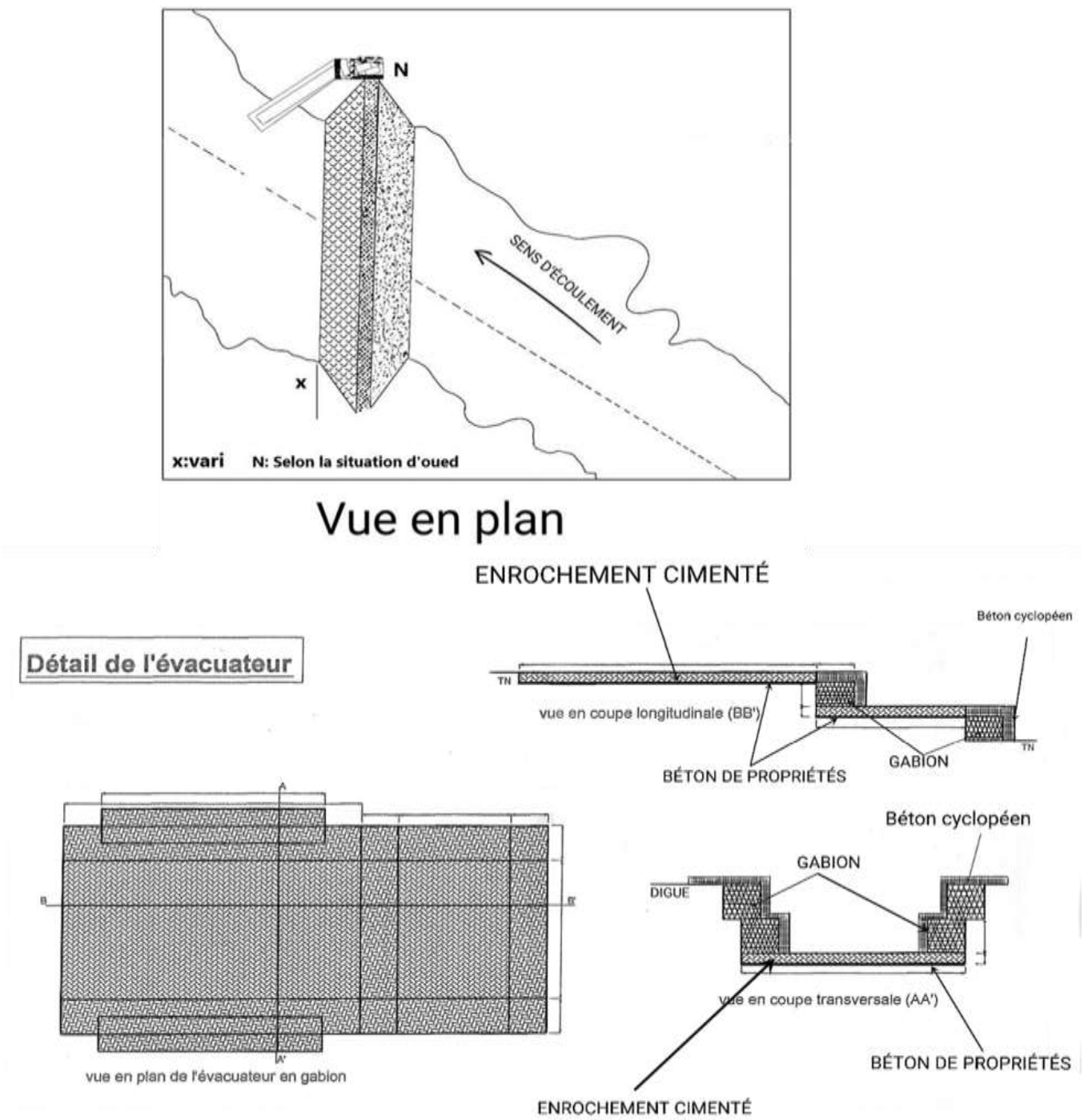


Figure 28 : Schéma générale des ouvrages

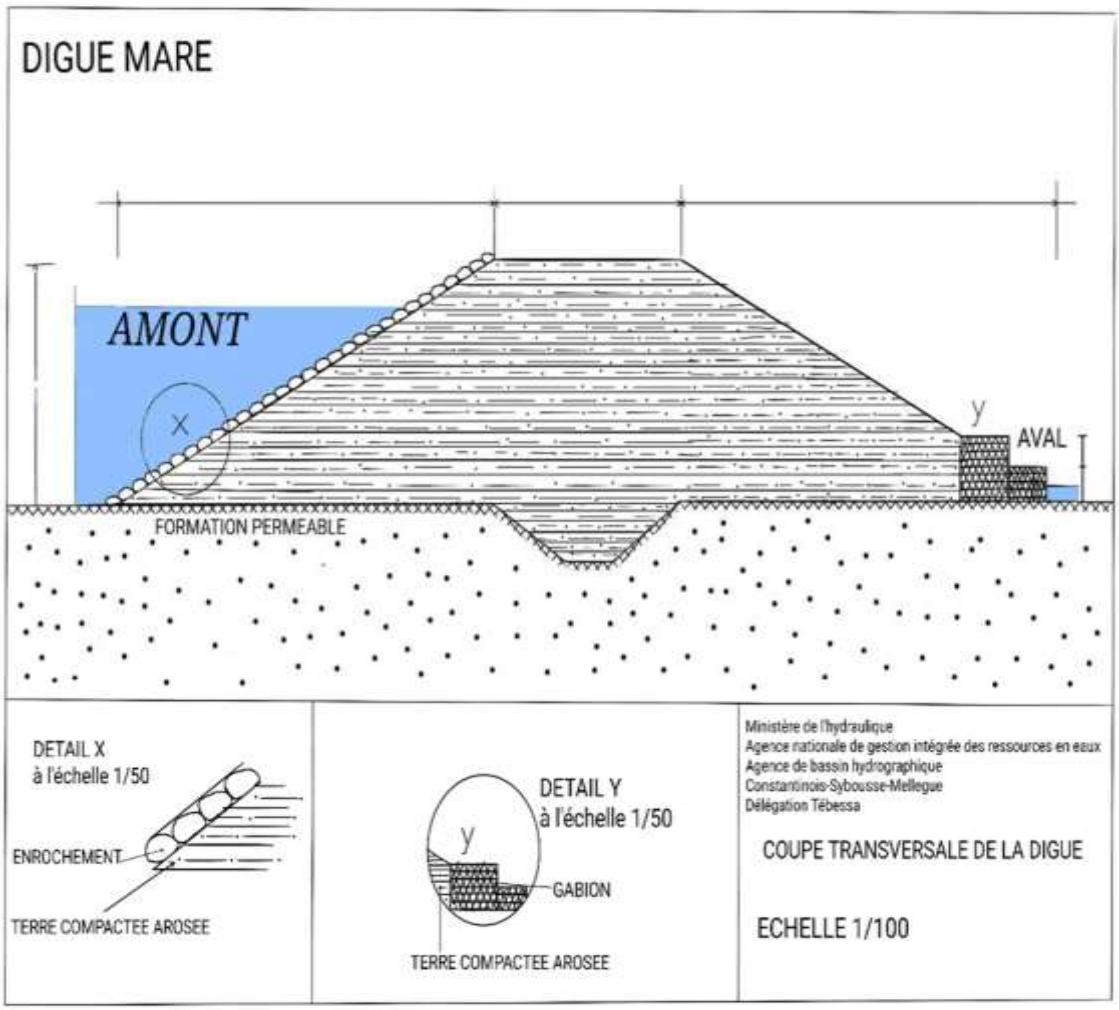


Figure 29 : Schéma digue mare

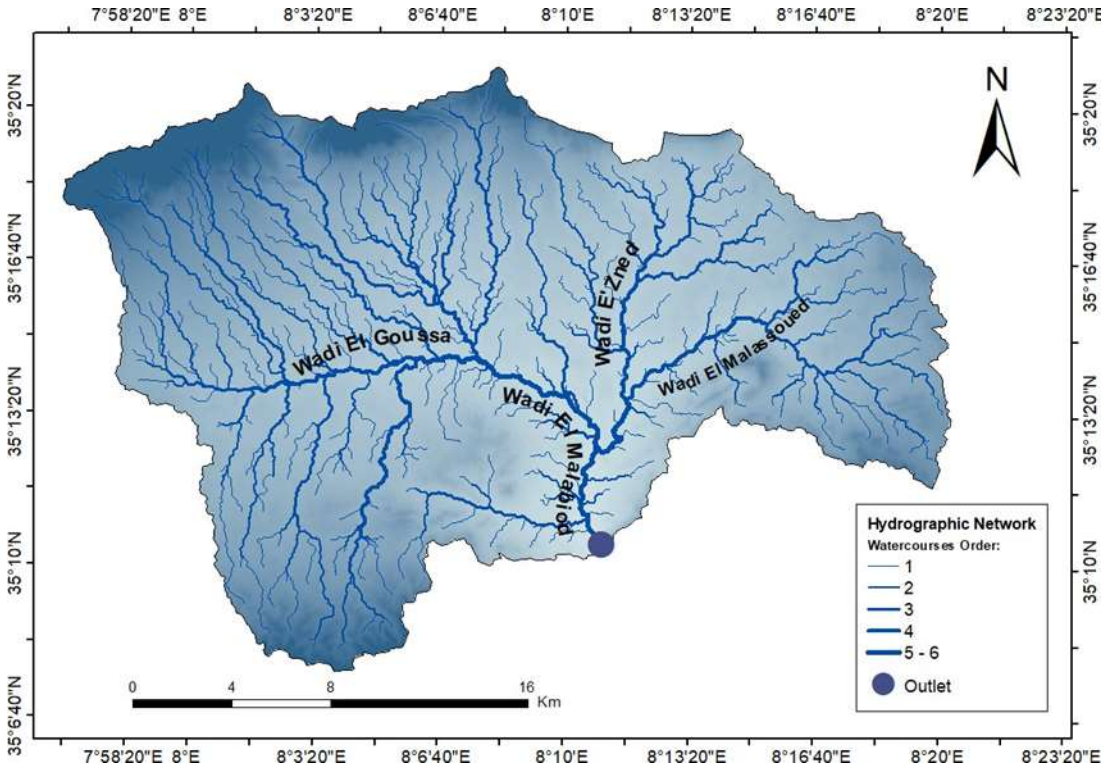


Figure 30 : Réseau hydrographique du bassin d'El Malabiod

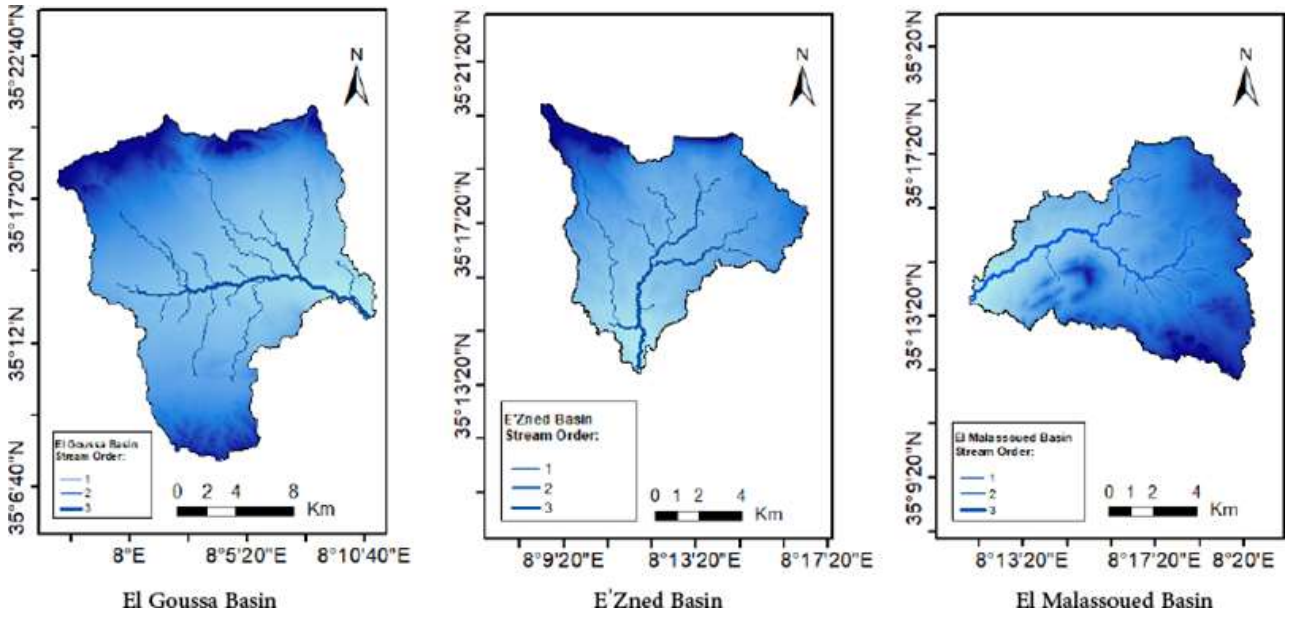


Figure 31 : Réseau hydrographique et ordre des cours d'eau des trois sous-bassins versants

4 Le chantier

Pour réussir la construction d'une mare, il ne suffit pas seulement de bien connaître le site et de concevoir une bonne installation ; il faut également accorder une grande attention à l'exécution des travaux, à la mise à disposition des moyens nécessaires, ainsi qu'au choix d'un exécutant compétent et expérimenté.

4.1 Organisation du chantier

4.1.1 Les moyens de chantier

Il ne suffit pas que l'entreprise compte uniquement sur ses ouvriers et ses ressources humaines pour réussir la construction d'une digue en terre. Il est nécessaire de disposer d'équipements et d'engins mécaniques variés, capables d'assurer les opérations de scarification, d'excavation, de transport, de nivellement et de compactage, afin de garantir la qualité de l'exécution.

4.1.2 Les matériaux

Durant la construction des mares ; on aura besoin de deux types de matériel à savoir :

4.1.2.1 Le Matériel de terrassement

- Un Bulldozer :

(Excavation du sol) : puissance I00 CV ; vitesse 6 Km Ih. Lame = 4,53 m.

- Pelle Hydraulique :

Chargement des matériaux avec un rendement de 50 m3/h.

4.1.2.2 Le Matériel de Compactage:

- Compacteur :

Une Puissance de l23 CV. Vitesse 5 Km /h.

Epaisseur couche H= 50 cm à raison de 07 passes / couche,

- Camions :

Capacité de l0 m3.

4.2 La programmation du chantier

La période durant laquelle le projet de la mare en terre compactée est réalisé s'étend de mai à octobre. C'est la période la plus favorable sur le plan climatique, ce qui permet aux engins de fonctionner avec une efficacité maximale.

Les différentes opérations pour chaque mare sont représentées comme suit

1. Installation du chantier et délimitation de la zone d'emprunt (1 jours).
2. Décapage général (2 jours).

3. Excavation de la tranchée d'encrage (5 jours).
4. Remblais et compactage général (20 jours).
5. Réalisation de l'évacuateur de crue (10 jours).
6. Revêtement des talus amont et aval (10 jours).
7. Finition (2 jours).

4.3 Exécution des travaux

4.3.1 Excavation des eaux

Les travaux sont réalisés pendant la saison sèche et s'achèvent avant l'arrivée des saisons pluvieuses. De ce fait, il n'y a aucun problème lié à l'évacuation des eaux de ruissellement durant la période d'exécution des travaux.

4.3.2 Construction de l'évacuateur de crue

L'évacuateur de crue est construit en parallèle avec la digue, afin de remplir sa fonction dès le début de l'exploitation de la mare.

4.3.3 Construction de la digue

Pour construire la digue, il faut suivre les étapes suivantes :

- Décapage de la couche végétale et alluvionnaire sur la surface de la fondation.
- Nettoyage de l'assise pour faciliter le creusage de la tranchée d'encrage de la digue.
- Creusement du tranché d'encrage au centre de la digue, sur 2.5m de profondeur sur 6m de largeur.
- Exécution des remblais en terre en couche de 0.3 à 1m avec compactage.
- Couverture du talus amant en enrochement sur une épaisseur de 10 à 20 cm.
- Réalisation des ouvrages d'évacuateur de crue en gabions.
- Travaux de finitions.

5 Surveillance et entretien de la mare

5.1 Surveillance

Après l'achèvement de la construction du barrage en terre, le remplissage initial avec de l'eau ne représente pas la fin des travaux, mais bien le début d'une étape très importante : celle de la surveillance. Il est nécessaire d'assurer une surveillance continue pour bien comprendre le fonctionnement de l'ensemble. Il est essentiel de surveiller le comportement du barrage dès le début de son existence.

Pendant cette phase :

- Il faut mesurer les infiltrations, car elles peuvent entraîner une érosion interne ou des problèmes de stabilité.

- Il faut également suivre les tassements progressifs des digues, car le sol s'adapte au nouveau poids de l'eau, mais ces tassements doivent rester dans des limites sûres.

Les deux premières années sont très importantes, car la majorité des tassements se produisent pendant cette période.

5.2 Entretien

Au bout de deux années, la digue sera stabilisée et les débits de fuites seront moins importants. Cependant la digue peut exiger un minimum d'entretien périodique :

- On devra de temps à autre inspecter les talus de la digue.
- Nettoyer les ouvrages d'évacuation après chaque crue pour ne pas gêner l'écoulement d'eau.
- Détecter les fissurations après chaque crue.
- Détruire la culture arbustive qui se produira sur le talus.

6 Etude économique

6.1 Devis quantatif et estimatif des projets de mares

Tableau 27 : Etude économique du sous -bassin versant d'El Goussa

Désignation	Unité	Quantité
Terrassement		
Décapage sure 03 m	jour	06
Excavation du terrain	Jour	06
Construction		
Remblais et compactage	jour	30
Filtre et drain en gabion aval	M^3	40
Enrochement du talus amont	M^3	19.05
Ouvrage		
Déversoir en gabionnage	M^3	25
Gabionnage et CES en amont	M^3	11.2

Tableau 28 : Etude économique du sous- bassin versant d'El Malassoued et E'Zned

Désignation	Unité	Quantité
Terrassement		
Décapage sure 03 m	jour	04
Excavation du terrain	jour	05
Construction		
Remblais et compactage	jour	15
Filtre et drain en gabion aval	M^3	50
Enrochement du talus amont	M^3	24
Ouvrage		
Déversoir en gabionnage	M^3	30
Gabionnage et CES en amont	M^3	16

Tableau 29 : Etude économique du bassin versant El Malabiod

Désignation	Unité	Quantité
Terrassement		
Décapage sure 03 m	Jour	06
Excavation du terrain	Jour	03
Construction		
Remblais et compactage	Jour	15
Filtre et drain en gabion aval	M^3	40
Enrochement du talus amont	M^3	13.75
Ouvrage		
Déversoir en gabionnage	M^3	11
Gabionnage et CES en amont	M^3	10

7 Conclusion

Dans le cadre de l'étude de terrain réalisée dans la région d'El Malabiod, trois sous-bassins ont été identifiés : Oued El Goussa, Oued El Malassoued et Oued E'Zned, qui font partie du bassin principal d'Oued El Malabiod. Ces sous-bassins ont été sélectionnés pour la mise en place de mares collinaires ou de petites digues, destinées à collecter les eaux de ruissellement pendant les périodes de précipitations. Cette étude s'appuie sur une analyse hydrologique approfondie, permettant de déterminer les paramètres essentiels tels que le volume des crues et le débit, ce qui a facilité la définition du type de mare adapté à chaque sous-bassin, ainsi que la planification précise du chantier de construction et les modalités de surveillance et d'entretien nécessaires pour garantir la durabilité et l'efficacité des ouvrages. Par ailleurs, une étude économique a été intégrée afin d'évaluer les coûts de réalisation et de maintenance, en regard des bénéfices attendus, notamment le renforcement de la recharge de la nappe phréatique, l'amélioration de la disponibilité de l'eau pour l'agriculture et les usages domestiques, ainsi que les impacts positifs sur l'équilibre écologique et la couverture végétale.
Ainsi, ces aménagements représentent une solution pratique et écologique, adaptée au contexte semi-aride de la région. Ils traduisent une volonté claire d'une gestion durable et intégrée des ressources en eau, en cohérence avec les objectifs du développement durable et le renforcement de la résilience des écosystèmes locaux face aux changements climatiques.

Conclusion générale :

Face aux défis croissants liés à la rareté des ressources en eau, notamment dans les régions arides et semi-arides, les techniques de recharge artificielle des nappes phréatiques apparaissent comme une option stratégique pour renforcer la sécurité hydrique et assurer la durabilité des ressources. L'étude menée dans la région d'El Malabiod a permis de construire une compréhension approfondie des facteurs naturels, environnementaux et hydrogéologiques qui conditionnent la faisabilité de la recharge artificielle dans ce contexte.

Les données géologiques et structurales ont révélé la présence de formations favorables au stockage des eaux, notamment grâce à leur perméabilité élevée et à leur extension spatiale adéquate. L'analyse géophysique a, quant à elle, mis en évidence la présence de plusieurs horizons aquifères superposés, dotés de caractéristiques distinctes en termes de capacité de rétention et de structure.

Sur le plan climatique et hydrologique, l'étude a montré que la région souffre d'une faible pluviométrie, irrégulière dans le temps, et d'un taux élevé d'évaporation, ce qui limite fortement la recharge naturelle. Toutefois, ce contexte contraignant offre aussi une opportunité d'intervention par des aménagements techniques permettant la collecte des eaux de ruissellement et leur infiltration dirigée vers les aquifères, à travers des ouvrages simples, peu coûteux mais hautement efficaces s'ils sont bien localisés.

L'intérêt majeur de cette étude réside dans son approche intégrée, reliant l'analyse scientifique rigoureuse des composantes naturelles (géologie, climat, morphométrie) à une vision opérationnelle et économique visant à identifier des sites propices à l'implantation de micro-barrages ou de mares collinaires, tout en évaluant leur viabilité à long terme.

Les résultats obtenus confirment que la recharge artificielle ne constitue pas seulement une réponse ponctuelle à la crise hydrique, mais une véritable stratégie de gestion durable qu'il convient d'intégrer dans les politiques publiques, notamment dans les environnements vulnérables. Sa réussite dépend toutefois d'une planification rigoureuse, fondée sur des données fiables, d'une concertation entre les acteurs locaux et d'un suivi continu des performances.

Ainsi, cette recherche ouvre la voie à une vision méthodologique cohérente pour la valorisation des eaux souterraines, en tenant compte des spécificités écologiques et socio-économiques des régions semi-arides, et en contribuant à l'établissement d'un modèle efficace de gestion intégrée fondé sur l'anticipation, l'efficience et l'équité dans l'accès et l'usage de l'eau.

La bibliographie

ANONYME, (1973-1975) : Fiche technique des forages : M1, M2, M3, M4, M6, M8, M9, M10, et AT1.

AMRAOUI N. (1996) : Etude de l'infiltration dans les sols fins non saturés. Thèse de Doctorat. Nancy. Institut polytechnique de lorraine, Ecole nationale supérieur de géologie de nancy. 325p.

ASTIER J.L. (1971) : La géophysique appliquée à l'Hydrogéologie. Masson et Cie. Edition, Paris 277p.

ALILAOUAR A. (1986) : Ressource en eau d'une région semi-aride d'Algérie. Plaine d'El Ma El Abiod. Hydrodynamique et hydrochimie Thèse Doc-Ing. Université Paul Sabatier Toulouse 204p.

BAALI F. LATRECHE Dj. (1994) : Approche hydrogéologique de la région d'El Ma El Abiod. Mémoire d'Ing. IST Université d'Annaba 168p.

CASTANY G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.

CASTANY G. et MARGAT (1977) : Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249p.

CASTANY G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod Paris France 683p

CASTANY G. (1982) : Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.

CONDAPPA D. (2005) : Etude de l'écoulement à travers la zone non saturée des aquifères de socle à l'échelle spatiale du bassin versant. Application à l'évaluation de la recharge au sein du bassin versant de Maheshwaram, Inde. Thèse de doctorat. Université Joseph fourier. Pp27-66.

DJABRI L. (1987) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa «essai de modélisation » Thèse de Doc. Ing. Univers. Franche

DJABRI L. (1996) : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université d'Annaba 280p

DUROZOY G. (1956) : Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et ça notice explicative.

GUEFAIFIA O. (1996) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe. Aquifère d'El Malabiod. Thèse de Magistère Univers. Annaba, 143p.

ROUABHIA A, BAALI F. , KHERICI N, DJABRI L .2004 : Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie).

DJEBARI H, 2011 : Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin d4el Malabiod W. de Tébessa, Nord- Est Algérien

HAMAD A, (2024). Étude de mare d'eau : la recharge artificielle dans les plaines de Tébessa, Chéria et El Malabiod, Wilaya de Tébessa. Agence de Bassin Hydrographique Constantinios-Seybousse-Mellegue, Délégation de Tébessa.

CASANOVA J, CAGNIRMEL M, DEVAU N, PETTENTI M. 2013 : Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives (Rapport final). BRGM / ONEMA

LES SITES WEB

https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/artificial-groundwater-recharge

https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/artificial-recharge

https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article103

https://www.oryxeleven.com/secheresse/recharge-artificielle-des-nappes-phreatiques/

https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61821-FR.pdf

https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article103

https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/

https://www.oryxeleven.com/

ANNEXE

Dimensions	Actions							
		Terrassements			Enrochements			
		cuvette	Canal d'amenée	Evacuateur	Batte protection	Digue	Paroi	Evacuateur
El Goussa	Langueur	200	/	12	/	100	/	/
	Largeur	100	/	4	/	6	/	/
	Profondeur	3	/	1 ,5	/	0,3	/	/
E'Zned/ Malassoued	Langueur	170	/	12	/	90	/	/
	Largeur	90	/	3	/	6	/	/
	Profondeur	3	/	1,5	/	0,3	/	/
EL Malabiod	Langueur	250	/	12	/	250	/	/
	Largeur	60	/	6	/	4	/	/
	Profondeur	1	/	1,5	/	0,3	/	/

EVALUATION ECONOMIQUE :

- Durée théorique de l'ouvrage : 10 ans
- Rentabilité de l'ouvrage : voir l'étude de recharge artificielle d'El Malabiod
- Sédimentation : 0.2 m3/L
- Evaluation des productions
- Evaluation du court de la production : Kg/Da