



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 : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

THEME :

Méthodologie et faisabilité des barrages d'écrêtement dans la recharge artificielle par l'application du Modflow DSS et le PhreeqC : Cas du grand bassin transfrontalier Algero-tunisien, Oued El Kebir

Réalisé Par :

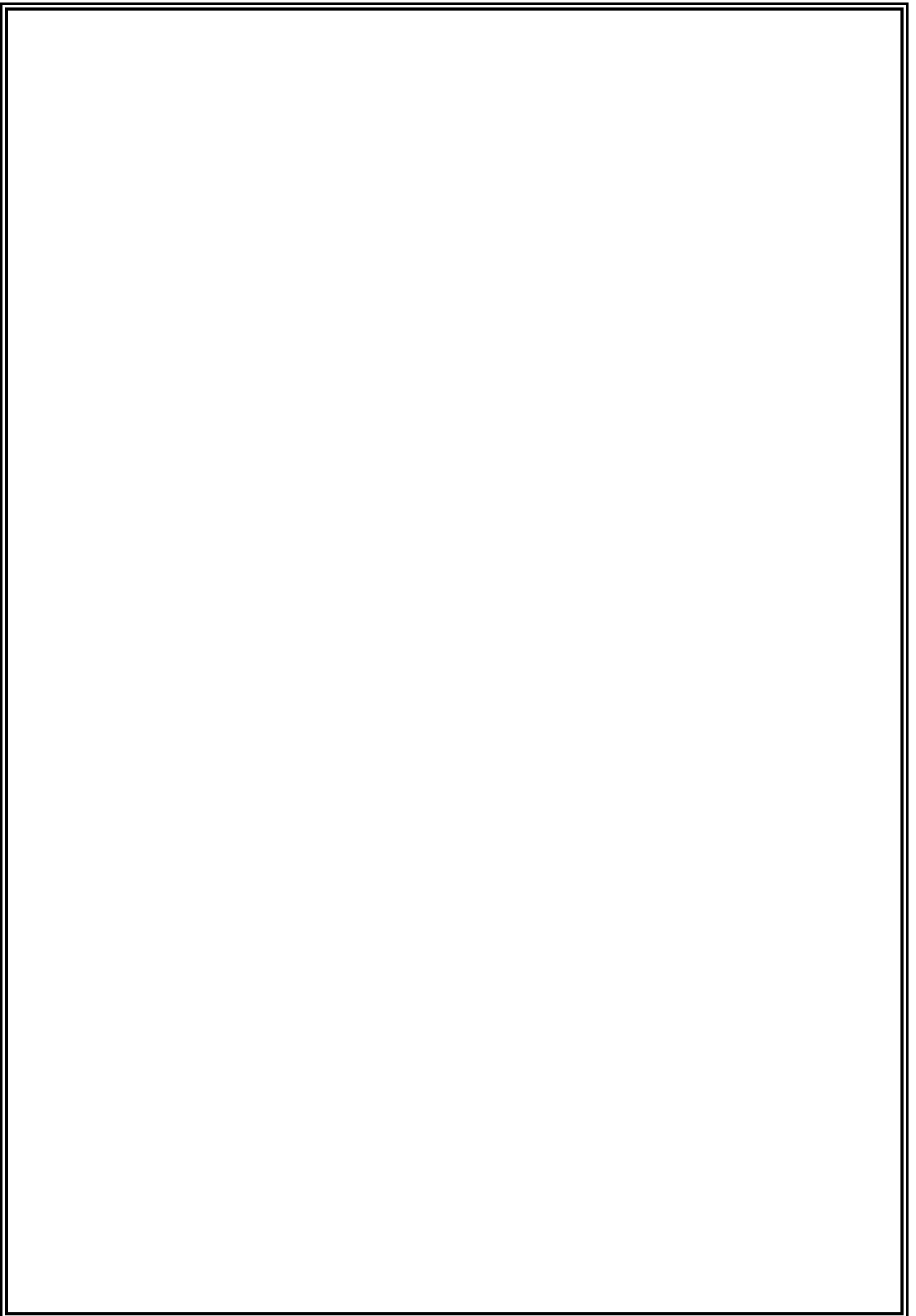
Tatar Mohamed amine

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

BOUBAYA DJAMEL	Pr	Président	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa
BAALI FETHI	Pr	Examineur	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa
FEHDI CHEMESEDDINE	Pr	Rapporteur	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa

Année universitaire : 2023/2024





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 : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

THEME :

Méthodologie et faisabilité des barrages d'écrêtement dans la recharge artificielle par l'application du Modflow DSS et le PhreeqC : Cas du grand bassin transfrontalier Algero-tunisien, Oued El Kebir

Réalisé Par :

Tatar Mohamed amine

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

BOUBAYA DJAMEL	Pr	Président	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa
BAALI FETHI	Pr	Examineur	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa
FEHDI CHEMESEDDINE	Pr	Rapporteur	Echahid Larbi Tébessi – Tébessa

Année universitaire : 2023/2024



Remerciements

*Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné
durant toutes ces années d'étude.*

*En premier lieu, je remercie chaleureusement mon Encadrant, Pr Fehdi chemseddine
pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés, et son soutien constant tout au long de
cette étude. Ses remarques pertinentes et ses encouragements m'ont permis d'approfondir
mes réflexions et de mener à bien ce travail.*

*je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Pr. Boubaya Djamel pour son soutien
indéfectible en tant que président, et à Pr. Baali Fethi pour ses précieux conseils en tant
qu'examineur, tout au long de la réalisation de mon PFE*

*Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à la doctorante Rayene Sirine
Ramdani, dont l'aide précieuse a grandement contribué à la conclusion de ce projet.*

*Je tiens à remercier mon ami Dr Rahim Hamid pour ses précieux conseils et son soutien
ponctuel, qui ont contribué à l'aboutissement de cet mémoire*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr Hacene Hamaidia pour son assistance technique et
son aide précieuse au laboratoire, qui ont été indispensables à la réalisation de ce travail.*

*Un immense merci à mes parents pour leur soutien indéfectible tout au long de mon
parcours universitaire. Leur encouragement et leur amour ont été mes piliers, m'insufflant
la force et la détermination nécessaires pour atteindre mes objectifs.*

*Au terme de ce mémoire, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui, directement ou
indirectement, ont contribué à faciliter ma tâche.*

Merci à tous.





Dédicaces



*À mon père, **Tatar Faouzi**,*

Dont la sagesse et le soutien ont toujours été ma boussole dans la vie.

*À ma mère, **Meskaldji Fella**, dont l'amour inconditionnel et la
tendresse ont illuminé chacun de mes jours.*

*À ma seule sœur, **Tasnim**, complice de mes joies et confidente de mes
peines, merci d'avoir toujours été là.*

*À mes amis, **Chichi, Aymen, Hamouda et Sofiane** qui ont partagé mes
rires, séché mes larmes et rendu chaque instant inoubliable.*

TABLE DES MATIERES

Titre	Page
Remerciements	/
Dédicace	/
Résumé	/
Introduction générale	10

Chapitre I : Cadre général et situation géographique

Situation géographique	13
Couvert végétal	14
Economie de la région	15
Réseau hydrographique	15
Géomorphologie	16

Chapitre II : Géologie de la région d'étude

1-Introduction	19
2- La région d'El Malabiod	19
2.1 - Stratigraphie et Description Lithologique Des Formations	19
2.1 Trias	19
2.2 Crétacé	20
2.2.1 Aptien moyen et inférieur	20
2.2.2 Aptien supérieur	20
2.2.3 Albien inférieur	20
2.2.4 Albien supérieur	21

2.2.5 Cénomannien	21
2.2.6 Turonien	22
2.2.7 Campanien inférieur- Emscherien	22
2.2.8 Campanien supérieur – maestrichtien	23
2.3 TERTIAIRE	23
2.3.1 Miocène	23
2.3.2 Le Burdigalien	23
2.3.3 Le Vindobonien (Helvetien et tortonien)	23
2.4 Quaternaire	24
3- Tectonique	25
3.1 Les Phases de l'orogénèse	25
La phase compressive fini-lutétienne	25
La phase distensive du Miocène Inférieur	25
La phase compressive du Miocène Supérieur	25
La phase compressive du Pliocène Inférieur	26
La phase compressive du Pliocène Supérieur	26
4- Les fossés d'effondrements	27
5- conclusion	28

Chapitre III : Climatologie

1-Introduction	30
2-Type de climat de la région d'étude	30
2-1 Indice d'aridité de DE. Martonne	30
3-Température	31

3-1 Variations de la température moyenne mensuelle	31
4-Précipitation	32
4-1 Variations interannuelles des précipitations	32
5-Vent	34
6-Bilan hydrologique	34
6-1 Estimation des paramètres du bilan hydrologique	35
6-1.1 Evapotranspiration potentielle (ETP)	
6-1.2 Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la région d'El Malabiod	36
6-1.3 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)	36
6-1.4 Formule de Turc pour le calcul de l'ETR	36
6-2 Les différentes composantes du bilan	37
6-2.1 Le ruissellement	37
6-2.2 Infiltration	37
7-Réserves facilement utilisables (R.F.U)	38
8-Calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite	38
-Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année excédentaire (2008)	40
9-Conclusion	41

Chapitre IV : Hydrologie

1-Introduction	43
2-Characterisation du bassin versant d'El MaLabiod	43
2-1 Les caractéristiques morphométriques	43
2-1.1 Le périmètre, la Surface et l'indice de compacité	43
2-1.2 L'indice de forme	44

2-1.3 Le rectangle équivalent	45
3-Les paramètres du relief	45
3-1 La courbe hypsométrique	46
3-2 Les indices de pente	47
3-3 La pente moyenne	47
3-4 L'indice de pente global (Ig)	47
3-5 Dénivelée spécifique (Ds)	48
4-Le réseau hydrographique	48
4-1 Caractéristiques hydrographiques	49
4-1.1 La densité de drainage	49
4-1.2 Le temps de concentration	49
4-1.3 Vitesse de l'écoulement de l'eau	50
5-Conclusion	51

Chapitre V : Hydrogéologie

I-Introduction	53
1-Structure géologique et hydrogéologique du système	53
1-1 Nappe alluviale	53
1-2 Nappe miocène	54
2- Géométrie des horizons de grés	54
2-1 Epaisseur du niveau miocène	54
2-1.1 Discussion	55
2-1.2 Interpretation	56
3-Les calcaires de la plaine d'El Malabiod	56

4-CONDITIONS AUX LIMITES DU SYSTEME AQUIFERE	57
4-1 Nappe alluviale	57
5-Interprétation de la carte des conditions aux limites du système aquifère	60
6-Estimation des réserves de la nappe	61
6-1 Volume moyen de la nappe	61
6-2 Porosité efficace	61
7-Conclusion	62

Chapitre VI : Matériels et méthodes

Introduction	65
I-Les barrages écrêteurs de crue	65
I-1 Barrage à pertuis ouvert	65
I-1.1 Principes de fonctionnement	66
I-1.2 Impacts	66
I-2 Barrage à pertuis vanné	67
I-2.1 Fonctionnement	67
I-2.2 Impacts	68
I-3 Gestion en crue	69
I-4 Surveillance	70
I-4.1 Surveillance visuelle de routine	70
I-4.2 Surveillance visuelle pendant la crue	70
I-4.3 Surveillance post crue	71
I-5 Exemples de Barrages d'écrêtement dans le Monde	72
I-5.1 Barrage Hoover (États-Unis)	72

I-5.2 Barrage d'Assouan (Égypte)	73
I-6 Conclusion	75
1-MODELISATION MATHEMATIQUE EN HYDROGEOLOGIE	76
2-Définition d'un modèle	76
3-Modèle mathématique	76
3-1 Equation de la diffusivité	76
3-2-1 Les conditions aux limites	78
II - Modèle MODFLOW	78
<u>Chapitre VII : Résultats et discussion</u>	
1- Introduction	83
2- Description du logiciel MODFLOW	83
2-1 Entrée de données (data input)	85
2-2 Calibration du modèle	87
2-3 Exploitation du modèle	87
3- Etapes de modélisation conceptuelle	87
3-1 Zone de propriété	87
3-2 Conditions aux limites	88
4- Exécution du modèle conceptuel	90
5- Calibration du modèle	91
6-Perspectives	92
7-Conclusion	92
8- Recommandation	97
Conclusion générale	99
Bibliographie	

Liste des tableaux

Tableau	PAGE
Tab.1 Coordonnées de la station d'El Malabiod(ANRH).....	30
Tab.2 Variations de la température moyenne mensuelle à la station de Tébessa.....	31
Tab.3 Evolution des précipitations moyennes annuelles pour la période de (2005-2017/2018)	32
Tab.4 vitesses du vent enregistrées par la station de Tébessa 2013.....	34
Tab.5 Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la région d'El Malabiod.....	36
Tab.6 Calcul du ruissellement et de l'infiltration dans la région d'El Malabiod.....	38
Tab.7 Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une période de 12ans.....	39
Tab.8 Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année déficitaire (2005)	40
Tab.9 Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une année excédentaire (2008)	40
Tab.1 Classification de l'O.R.O.S.T.O.M pour la dénivelée spécifique Ds.....	48
Tab.2 tableau récapitulatif des différents paramètres du bassin versant d'El Malabiod.....	51
Tab.1 Le tableau montre les épaisseurs des forages (d'après Rouabhia, 2006)	55
Tab.1 différentes données utilisées pour l'élaboration du modèle.....	86
Tab.1 les concentrations en éléments physico-chimiques des eaux de surface (brute) et eau de forage.....	94

Liste des Figures

Figure	Page
Fig.1 situation géographique de la plaine d'El Malabiod	13
Fig.2 normalized difference vegetation index	14
Fig.3 carte du réseau hydrographique du bassin versant d'El Malabiod	16
fig.1 coupes géologiques	24
Fig.2 Esquisse géologique de la région d'étude	25
Fig.1 abaque d'aridité de DE. Martonne pour la région de EL Malabiod	31
Fig.2 variation de température moyenne mensuelle (2005-2017/2018)	33
Fig.3 Evolution des précipitations moyennes annuelles pour la période de (2005-2017/2018)	33
Fig.4 Variation des précipitations moyennes mensuelles pour la période de (2005-2017/2018)	34
Fig.1 Position du bassin versant de la zone d'étude	44
Fig.2 la courbe hypsométrique	46
Fig.3 Le système de drainage de la région d'El Malabiod	49
Fig.1 Carte piézométrique mars 2001 (D'après Rouabhia. A, 2006)	57
Fig.2 Carte piézométrique mars 2004 (D'après Rouabhia. A, 2006)	58
Fig.3 Carte piézométrique septembre 2009 (D'après Djabari, 2009)	59
Fig.4 Carte des conditions aux limites du système aquifère d'El Malabiod	60
Fig.1 schéma de fonctionnement d'un barrage à pertuis ouvert	65
Fig.2 Barrage à pertuis vanné	67
Fig.3 Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues	72
Fig.4 Barrage Hoover (États-Unis)	73
Fig.5 Barrage d'Assouan (Égypte)	74
Fig.1 Diagramme d'exécution d'un model conceptuel	85
Fig.1 les conditions aux limites de la zone d'étude	87
Fig.2 introduction des paramètres hydrodynamiques de la nappe aquifère	88
Fig.3-a définition des conditions aux limites du modèle	88
Fig.3-b définition des conditions aux limites du modèle	89
Fig.4 grille numérique 3D crée pour le modèle d'eau souterraine du miocène	89
Fig.5 conversion du modèle conceptuel en modèle numérique	90
Fig.6 variation de la piézométrie en régime permanent avant l'introduction des puits de pompage (Ramdani et Tatar, 2024).	90
Fig.7 variation de la piézométrie en régime permanent avec l'introduction des puits de pompage (Ramdani et Tatar, 2024).	91
Fig.8 calage du modèle	92

ملخص

الماء هو العنصر الأساسي للحياة ويعتبر من الثروات الضرورية لجميع الأنشطة البشرية، وهو إرث للأمم. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جدوى استخدام السدود الاحتجازية في إعادة شحن المياه الاصطناعية في الحوض الكبير لوادي الكبير، الذي يمتد عبر الحدود بين الجزائر وتونس. تم استخدام أدوات Phreeqc لنمذجة الآثار الهيدروجيولوجية لهذه السدود، بينما استخدمت MODFLOW أداة لتقييم التفاعلات الجيوكيميائية المرتبطة بالشحن الاصطناعي. أظهرت النتائج أن السدود الاحتجازية يمكن أن تساهم بشكل كبير في زيادة معدلات الشحن الطبيعي للمياه الجوفية، وبالتالي استقرار مستويات المياه الجوفية وتعزيز قدرتها على التكيف في هذه المنطقة القاحلة وشبه القاحلة وفي الختام، تبرز هذه الدراسة أهمية وجدوى السدود الاحتجازية كوسيلة لإدارة الموارد المائية بطريقة مستدامة في سياقات المناخ الصعبة، مما يوفر إطارًا منهجيًا قويًا لمشاريع مماثلة

Résumé

L'eau est une ressource vitale pour la vie et toutes les activités humaines, constituant un héritage précieux pour les nations. Cette étude vise à évaluer la faisabilité des barrages d'écêtement pour la recharge artificielle dans le grand bassin transfrontalier Algéro-Tunisien de l'Oued El Kebir. Pour ce faire, nous avons appliqué les outils MODFLOW DSS et PHREEQC.

L'utilisation de MODFLOW DSS a permis de modéliser les impacts hydrogéologiques de ces barrages, tandis que PHREEQC a évalué les interactions géochimiques associées à la recharge artificielle. Les résultats montrent que les barrages d'écêtement peuvent augmenter significativement les taux de recharge naturelle des aquifères, stabilisant ainsi les niveaux d'eau souterraine et améliorant la résilience hydrique dans cette région aride et semi-aride.

En conclusion, cette étude démontre l'importance et la faisabilité des barrages d'écêtement pour la gestion durable des ressources en eau dans des contextes climatiques difficiles, offrant une solution méthodologique robuste pour des projets similaires.

Abstract

Water is a vital resource for life and all human activities, constituting a precious heritage for nations. This study aims to evaluate the feasibility of detention dams for artificial recharge in the large transboundary basin of Oued El Kebir, spanning Algeria and Tunisia. We applied the MODFLOW DSS and PHREEQC tools to achieve this.

MODFLOW DSS was used to model the hydrogeological impacts of these dams, while PHREEQC assessed the geochemical interactions associated with artificial recharge. The results indicate that

detention dams can significantly enhance the natural recharge rates of aquifers, thereby stabilizing groundwater levels and improving water resilience in this arid and semi-arid region.

In conclusion, this study demonstrates the importance and feasibility of detention dams for sustainable water resource management in challenging climatic contexts, offering a robust methodological framework for similar projects.

Introduction générale

INTRODUCTION générale

La gestion durable des ressources en eau est devenue un enjeu majeur dans les régions arides et semi-arides, où la disponibilité en eau est limitée. Dans ce contexte, la recharge artificielle des aquifères émerge comme une solution prometteuse pour renforcer les réserves en eau souterraine et assurer une gestion plus efficace de cette ressource vitale. Les barrages d'écrêtement jouent un rôle crucial dans ce processus, en permettant de stocker l'eau de surface excédentaire pour une utilisation ultérieure dans la recharge des aquifères.

"Comment concevoir une méthodologie intégrée pour l'étude et la faisabilité des barrages d'écrêtement dans la recharge artificielle, en combinant l'utilisation du modèle Modflow, du logiciel DSS et de PhreeqC, pour le cas spécifique du Grand Bassin Transfrontalier Algero-Tunisien, Oued el kebir, afin d'optimiser la gestion des ressources en eau et de garantir la durabilité de ces ouvrages hydrauliques"

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective en proposant une méthodologie d'étude et d'évaluation de la faisabilité des barrages d'écrêtement dans la recharge artificielle, en se basant sur l'application du Modèle MODFLOW, DSS et du logiciel PHREEQC. Ce projet se focalise plus spécifiquement sur le Grand Bassin Transfrontalier Algero-Tunisien, une région caractérisée par une importante pression sur les ressources en eau et des défis croissants liés à leur gestion.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser la pertinence et l'efficacité des barrages d'écrêtement dans la recharge artificielle de l'Oued El Kebir, un affluent majeur du bassin transfrontalier, en utilisant des outils de modélisation avancés. Cette analyse vise à déterminer la capacité des barrages d'écrêtement à améliorer la recharge des aquifères locaux et à contribuer à une gestion plus durable des ressources en eau dans la région.

Le présent travail s'articule autour des chapitres suivants, relatifs à :

Le premier chapitre présente le cadre général de la région d'étude, (en exposant le contexte théorique et les enjeux liés à la recharge artificielle et aux barrages d'écrêtement).

Le deuxième chapitre résume quelques aperçus utiles à l'étude à savoir : aperçu géologique, géomorphologique, stratigraphie et tectonique

Le troisième chapitre : vis à fournir un aperçu approfondi de l'environnement climatologique en mettant en lumière les tendances, les variations et les caractéristiques uniques de l'hydroclimatologie locale tel que (la pluviométrie, régime thermique, bilan hydrique ...)

Dans le chapitre matériels et méthodes, nous avons utilisé une série d'outils et de logiciels spécialisés pour analyser et modéliser les processus hydrologiques,

INTRODUCTION générale

hydrogéologiques et hydrochimiques ; notamment VISUAL MODFLOW Flex 6.1, DSS (Décision Support System) et le PhreeqC.

Cette étude contribue ainsi à la recherche sur la gestion des ressources en eau, en proposant une approche innovante pour la recharge artificielle des aquifères dans les régions arides et semi-arides.

Chapitre I

Cadre général et situation géographique

I- Situation géographique

La circonscription administrative d'EL MALABIOD, située à environ 28,7 km de Tébessa dans le Nord-Est de l'Algérie, est une subdivision de la wilaya. Ses frontières sont clairement définies au Sud se trouve la Daïra d'Oum Ali, à l'Est-elle partage une frontière avec la Tunisie, au Nord elle est limitrophe de la ville de Tébessa, et à l'Ouest elle est adjacente à la Daïra de Chéria.

Le bassin d'EL MALABIOD, objet de notre étude, est situé dans les hautes plaines orientales de l'Atlas saharien, jouant ainsi un rôle important dans le grand bassin du Chott Melghir. Ses limites naturelles comprennent une crête au nord, formée par les Djebels Doukkane, El Khenga et Bouroumane, et des chaînes de montagnes au sud, incluant Boudjellal, El Guelia et Ed'Dalâa. À l'ouest, les frontières sont marquées par le Guebel Er'Rouiss et le Draâ Douamiss, tandis qu'à l'est, elles sont délimitées par le djebel El Kechrid et Koudiet sidi Salah, servant de frontière avec la Tunisie.

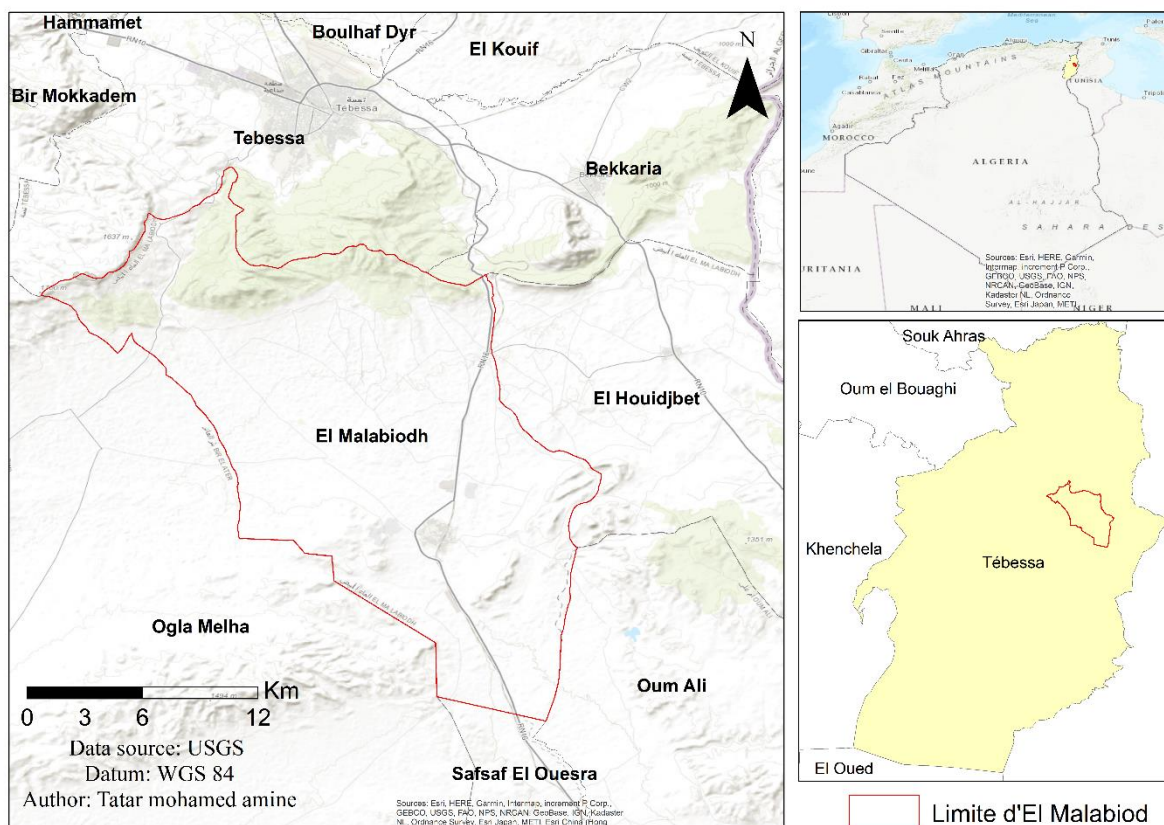


Fig.1 situation géographique de la plaine d'El Malabiod

II- Couvert végétal

La végétation naturelle dans la zone d'étude est principalement constituée de pins d'Alep, plus abondants dans le nord de la région et devenant progressivement plus rares en direction du sud, jusqu'à disparaître complètement au niveau du Djebel Boudjelal. Contrairement aux plaines de Mellégue et aux monts de Tébessa, les montagnes bordant la plaine d'El MALABIOD se distinguent par leur absence quasi totale de végétation arbustive. Une exception notable est l'escarpement septentrional du bassin d'El Malabiod, qui est couvert d'une forêt de pins. On peut également trouver des genévriers denses sur le Djebel Abiod, particulièrement sur les pentes basses méridionales du Djebel Arour. Dans la plupart des autres zones, la roche ou les sols affleurent entre les touffes d'une steppe basse où l'Alfa domine.

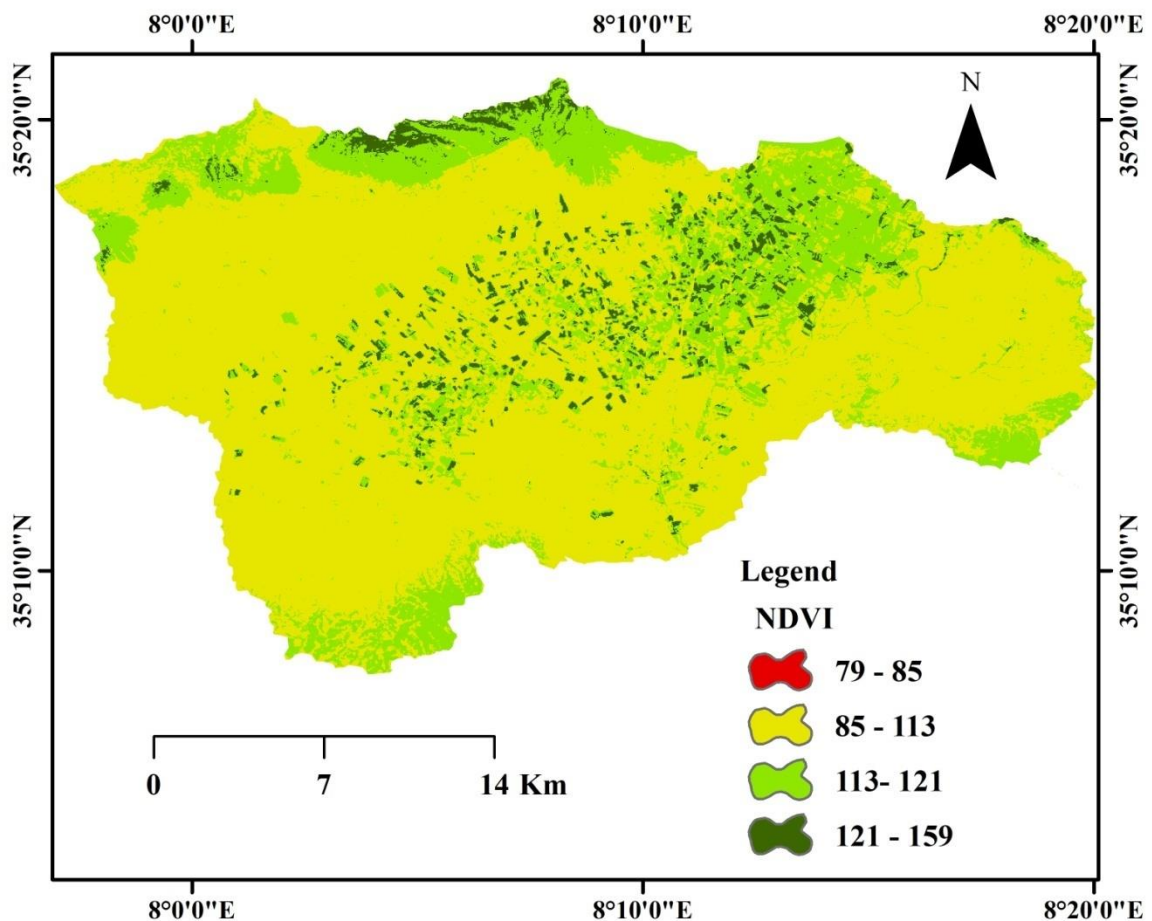


Fig.2 carte de végétation de la zone d'étude (carte Normalized difference vegetation index).

III- Economie de la région

L'économie de la région repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage pastoral. Historiquement, elle a été fortement axée sur le pastoralisme, avec la région servant de zone de parcours et de transhumance pour les troupeaux ovins jusqu'au début des années 90. Cependant, depuis cette période, un changement majeur s'est opéré avec l'émergence d'une activité industrielle significative et une forte demande en eau. Cette industrialisation est principalement représentée par des secteurs tels que la production de ciment Portland (ERCE), de verre (SOVEST) et de tubes roulés (ANABIB).

La plaine d'El Malabiod est traversée par d'importantes voies de communication nord-sud reliant Tébessa à El Oued, et nord-sud-est reliant Tébessa à Bouchebka en direction de la Tunisie. La région abrite également divers vestiges archéologiques témoignant de conditions biogéographiques variées à des époques anciennes. On y trouve des sites néolithiques, appelés "escargotières" en raison de la présence abondante de coquilles d'escargots d'eau douce, qui étaient établis le long des lacs existants à l'époque capsienne.

Des vestiges romains plus récents et plus imposants ponctuent le paysage, comprenant notamment des restes d'anciennes huileries, soulignant l'importance passée de la culture de l'olivier dans la région. Cette abondance de ressources a valu à la région le surnom de "région du blé" par les Romains.

IV- Réseau hydrographique

De nombreux ravins donnant naissance à des rivières secondaires caractérisent le réseau hydrographique dense et bien défini de la zone d'étude. Ces cours d'eau présentent des tracés sinueux, une intermittence dans leur débit et des pentes abruptes. Le drainage de la zone est facilité par trois oueds secondaires qui convergent avant le village d'El Malabiod, créant l'Oued El Malabiod, un cours d'eau qui coule par intermittence du nord au sud.

- Oued El Ma Lassoued : venant de Dj Taga qui après un parcours de 12km environ. Il draine la partie Est de la plaine, il est considéré comme le collecteur des eaux de ruissellement du Nord et du Nord-est du secteur.
- Oued Ez'Zned : prend naissance au Nord, il reçoit l'Oued de T'noukla (issu de Kef T'noukla) et s'écoule, comme ses prédécesseurs, vers le Sud.
- Oued El Goussa : C'est le thalweg principal, sa longueur est 28.2 km, il est considéré comme un collecteur des affluents tel qu'Oued Kriz et celui d'Oued Es Sagui, son drainage s'effectue d'Ouest vers l'Est. (Aouachria et Bekkai, 2020).

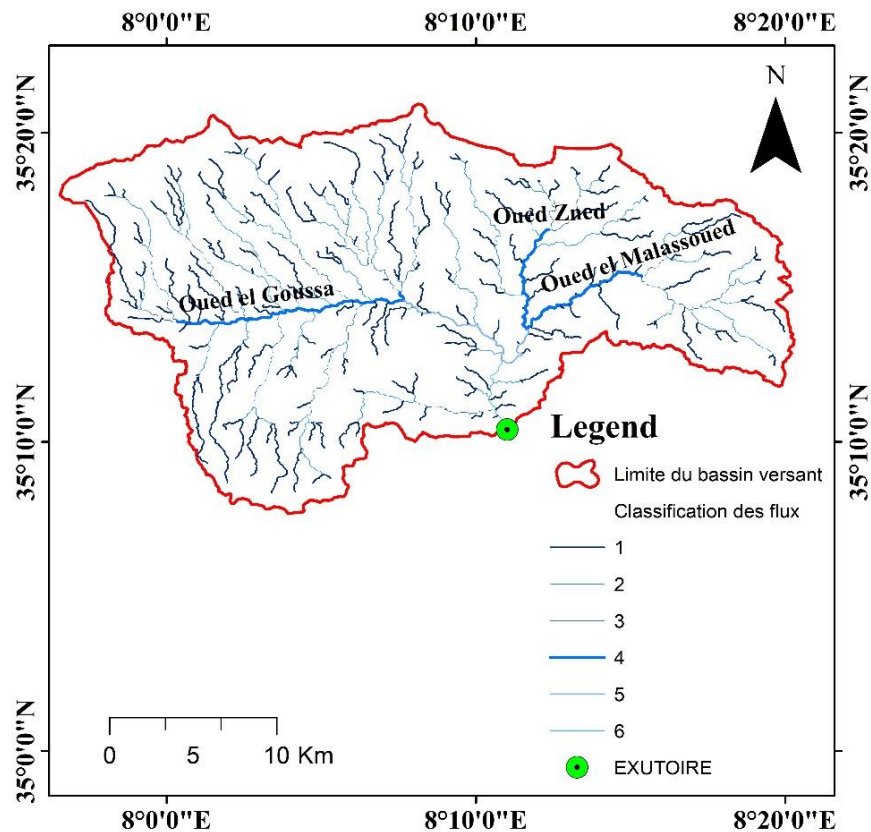


Fig.3 carte du réseau hydrographique du bassin versant d'El Malabiod.

V- Géomorphologie

L'étude géomorphologique de la région d'El Malabiod révèle une diversité de formes et de structures qui influent directement sur la distribution et la disponibilité des ressources en eau souterraine. Ces formes comprennent :

- Le bassin-versant, principalement constitué de formations du Crétacé, comprenant des marnes et des marno-calcaires, souvent affectées par des phénomènes tectoniques tels que les failles et les plissements. Les calcaires karstifiés sont particulièrement importants du point de vue hydrogéologique.
- La cuvette du Miocène, composée de formations de remplissage du Miocène telles que des argiles rouges, des sables et des grès, caractérisées par une perméabilité élevée et formant une nappe aquifère significative.
- Les collines, résultant de processus tectoniques intenses, peuvent jouer un rôle important dans l'alimentation de la nappe aquifère du Miocène
- Les lits des oueds, formés par l'érosion, révèlent souvent les formations du Miocène supérieur.

- Les alluvions quaternaires, bien que présentes, ne présentent pas un intérêt hydrogéologique majeur dans la région.
- Les sources sont principalement localisées au contact entre les formations du Crétacé et celles du remplissage Miocène.

Chapitre II

Géologie de la région d'étude

I-Introduction

Ce chapitre décrit les informations utilisées pour la réalisation de ce travail, ainsi que les éléments pertinents du territoire à l'étude, notamment la géologie, la tectonique. La zone étudiée fait partie de l'Atlas Saharien, la zone soumise à l'étude est connue par son relief contrasté ; dont des plis d'axes Sud-Ouest –Nord-Est limitant, du Nord comme du Sud, une plaine à pente douce.

La limite nord que constitue l'axe Dj Doukkane -Dj Anoual- Dj Bouroumane..., se comporte comme ligne de partage des eaux entre le grand bassin de la Medjerda ; à écoulement vers le Nord (vers la mer) et celui de Melguigh ; qui lui, draine au Sud. La couverture sédimentaire composée de :

- Trias du type germanique en diapirs.
- Grés et Argiles bariolés de la base miocène.
- Dépôts, du type épicontinental avec variations de faciès et d'épaisseur, orientés selon une direction Sud-Ouest – Nord-Est (allant de l'Aptien au Mæstrichtien). Les assises crétacées, ont été affectées à leur tour, par des plissements de direction SW-NE.

II – La région d'El Malabiod :**II – 1 : Stratigraphie et Description Lithologique Des Formations :**

La litho stratigraphie du bassin d'El Malabiod présente deux grands ensembles :

Le premier est constitué essentiellement par les formations crétacées et tertiaires qui affleurent sur les bordures. Le second est formé, en général, par un recouvrement Miocène et Quaternaire qui occupe la quasi-totale de la superficie du bassin. Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique pressente des lacunes (absence des formations éocènes) dont la description, est la suivante : (Cette description est basée sur les travaux de O.Guefaifia 1997 et A. Rouabhia 2006).

II – 2 Trias :

Seule la partie méridionale de la plaine d'El Malabiodà Dj Dalaa Er-Rouail présente un affleurement réduit, sous forme diapirique. Il est représenté par un faciès typique de la région :

- Argile à gypse, calcaires et cargneules. Au Nord-Est et Dj Djebissa, le Trias appariât en diapir.
- Argile rouges à gypse. -calcaire et calcaires dolomitique noirs plaquettes.

II – 3 Crétacé :**II – 3.1 Aptien moyen et inférieur :**

A l'extrémité Nord de la zone d'étude, au flanc Est de Dj Bouroumane affleure un ensemble de calcaire et de dolomie. La partie inférieure est presque entièrement dolomitique. Les orbitolines sont abondantes. Dans les intercalations de calcaire rognon eux, on note la présence de quelques rudistes. L'épaisseur moyenne est de 400m. Au sud de la plaine d'EL Malabiod, à Koudiat Adelia, le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2) a intercepté l'Aptien moyen et inférieur respectivement aux côtes 2531m et 2786m. Ainsi l'Aptien moyen se présente sous forme de calcaire gris clair à gris brunâtres, durs, compacts, bioclastiques, pseudo-oolitique et légèrement dolomitiques, avec de fines passes d'argile verte et grise légèrement carbonatée, souvent feuilletée. Son épaisseur est de l'ordre de 225m. L'Aptien inférieur se détermine par des alternances de marnes gris foncé, compactes, carbonatées et de calcaires gris foncé, compacts, cryptocristallins, parfois argileux. L'épaisseur moyenne est de 107m (Fatah samoun, 2021).

II – 3.2 Aptien supérieur :

Dans la partie Nord, à Dj Bouroumane a été décrit comme des calcaires massifs gris ou roux, avec quelques mètres, d'intercalations de marnes et de marno-calcaires. Il est marqué par une présence très fréquente d'Orbitolines. Il est signalé à 2 316m, au cours de la réalisation du forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2), au Sud, il s'agit de calcaires gris clair, gris foncés, Oolitiques, bioclastiques parfois cryptocristallins, rarement argileux avec intercalations d'argiles grises, noirâtres, indurées, feuilletées, rarement silteuses et pyriteuses (Fatah samoun, 2021).

II – 3.3 Albien inférieur :

Cet étage se présente à Dj Bouroumane sous forme de bancs calcaires bruns, épais, très durs à Ostrea Lattissima, et de bancs de calcaires à rudistes. Au Sud de la zone d'étude le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2) donne de bas en haut la succession suivante :

- Des calcaires oolithiques gris-clairs, blanchâtres, brunâtres, compacts souvent crayeux bioclastiques ou graveleux, avec traces de foraminifères et intercalations d'argiles grises :85m d'épaisseur.
- Alternance de calcaires, gris clairs, blanchâtres, souvent bioclastiques et rarement graveleux, argileux et d'argiles grises à gris foncées, noirâtres feuilletées : 87m.
- Dolomies blanches à grises brunâtres, microcristallines compactes : 40m.

II – 3.4 Albien supérieur :

L'Albien supérieur est présent en petits affleurement au contact du Trias de Draa M'taa El Malabiod (Dj Dalaâ Er Rouail), Il comprend des calcaires et des marno-calcaires en plaquettes. A Adelia, où fut réalisé le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2), la succession de bas en haut est la suivante :

- Alternance de calcaires gris-clairs, beiges, argileux, et d'argile grise à grise foncée, feuilletée plus ou moins dolomitique : 116m d'épaisseur.
- Alternance de calcaires gris, gris-foncé, argileux et de marnes grises noirâtres, compactes, dures, silteuses : 129m d'épaisseur.

Dans la partie Nord, à Dj Bouroumane, les assises qui datent de cet étage forment la base de ses pentes. Elles sont constituées d'un ensemble de calcaires et marno-calcaires gris en plaquettes et en petits bancs. On note la présence de nombreuses empreintes d'Ammonites et de Bélemnites, l'épaisseur est de 150m.

II –3.5 Cénomanién :

À la partie Sud-Est et à l'Est de Dj Djebissa, en contact tectonique avec le Trias, il apparaît en affleurement assez large. Á Adeïla, où la série du Cénomanién est la plus complète selon le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2), on observe de haut en bas :

- Argile grise à grise foncée, carbonatée : 238m d'épaisseur.
- Alternances de calcaires gris-clairs et d'argile grise à gris, verdâtre, feuilletée : 130m.
- Calcaires gris à gris- clair cryptocristallins avec intercalation d'argile grise à grise verdâtre feuilletée : 76m.
- Alternance d'argiles gris foncé et de calcaire gris foncé à gris clair lumachellique : 73m d'épaisseur.
- Argile grise, gris verdâtre avec intercalations de calcaires blancs, crayeux : 209.5m.
- Alternance de calcaire blanc lithographique et d'argiles grises à gris verdâtres, feuilletées :204m d'épaisseur.
- Calcaire blanc à crème parfois gris cryptocristallin à crayeux : 39m d'épaisseur.
- Argile grise verdâtre calcareuse, fossilifère devenant marneuse dans les 16 derniers mètres avec de fines passées de calcaire gris blanchâtre, lumachellique : 72m d'épaisseur (Djebari Hacene, 2011).

II – 3.6 Turonien :

Au Nord cet étage affleure largement (Dj Bouroumane, Dj El-Koreiz, Tnoukla). A sa base, on rencontre une série constante de calcaire marneux gris en petits bancs. L'épaisseur ne dépasse pas les 60 à 70m. Au-dessous, c'est une assise massive de calcaires beiges et de dolomies ou de calcaires dolomitiques. Des rognons de silex apparaissent dans la partie supérieure. A proximité de Tnoukla, le Turonien supérieur, épais de 150m, donne de haut en bas la succession suivante :

- Des marnes noires gypsifères.
- Des marno-calcaires gris en plaquettes.
- Des marnes noires souvent lumachelliques et rogneuses. Au sud à Dj Ed-Dalaâ, on remarque l'existence de calcaires, marnes et bancs calcaires. A 8 Km à l'Ouest de ces affleurements, le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2) donne de bas en haut la succession suivante :

- Des calcaires bruns, crayeux, légèrement dolomitiques, partiellement lumachelliques : 109,5m d'épaisseur.
- Des calcaires gris clair, compacts, avec intercalation d'argile marneuse grise à gris foncée : 131.5m d'épaisseur.

II – 3.7 Campanien inférieur – Emscherien :

L'ensemble comprend des marnes avec intercalations des bancs de calcaires lumachelliques. Ces faciès affleurent largement à Dj Doukkane au nord-ouest et à Dj Ed-Dalaa. Des affleurements de dimensions assez réduites sont à signaler à proximité de Tnoukla, M'Taguinaro et à Adelia au sud-sud-ouest de la ville d'El Malabiod. D'après le forage pétrolier Boudjella2 (BDJ-2) où la série est la plus complète, on constate de bas en 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.

II –3.8 Campanien supérieur – Maastrichtien :

Cette formation est située au Nord-Ouest à Dj koreiz et au centre de la plaine (M'taguiNaro) et aux environs de la ville d'El Malabiod, il est caractérisé par des calcaires et marno-calcaires blancs à calcaires blanc à incérâmes.

II-4 Le Miocène

Le bassin d'El Malabiod est à dominance de formations d'âge Miocène (in Roubhia A 2006 et Djebbari H.2011). Les fiches de forages et les logs des puits assez profonds donnent une large variété de produits sableux à graveleux avec une composante argilo-marneuse variable : Sables fins et marne, grès grossiers à matrice argileuse, sables moyens et fins avec gravier et marnes ou encore une intercalation d'argile et sables et bien d'autres combinaisons. La profondeur moyenne atteinte par les dépôts du Miocène est de 150 à 200m, mais, par endroits, ils dépassent les 200m. Selon la distribution des faciès sur la carte géologique provisoire d'El Malabiod (figure1) le Miocène affleure d'Est vers l'Ouest :

2.3.2 Le Burdigalien :

Un premier faciès [m1] de sables et de grès avec une composante argileuse réduit à négligeable, affleure largement au Nord et Nord-Ouest de la ville d'El Houidjbet englobant les sables et grès de El Hadjra Essafra et longe la bordure Nord Est jusqu'à dépasser Tenoukla en une bande hectométrique. Il est retrouvé en de superficie moindre au niveau de la carrière de sable au Sud- Est de Tenoukla et au Nord-Est de M'teguiNaro. Un deuxième faciès [m2 q2], plus marneux, évolue au Sud, en contact avec le premier, et couvre une superficie aussi importante, arrivant à l'Ouest jusqu'à la RN 16 et au Sud jusqu'à hauteur du forage M9. En contact avec la base marneuse du campanien - Maastrichtien de la bordure Sud Est. Si à l'Est l'amplitude de cet âge arrive à 200 m, au niveau du M9 elle ne dépasse pas les 30 – 40 m. (forage et puits locaux).

2.3.3 Le Vindobonien : (Helvetien et tortonien)

A faciès argileux [m2q2] s'étend sur la partie Ouest de la plaine (à l'Ouest de la route nationale 16) en affleurement discontinu recouvert par endroit par le Quaternaire et les alluvions récentes. Ces affleurements sont mitoyens à ceux du Burdigalien. Le Vindobonien est absent à l'Est de la route Tenoukla–El MaLabiod. Les forages à l'Ouest de la RN16

montrent que le Burdigalien est continu en profondeur quoi que la composante argileuse soit relativement plus importante avec parfois présence des passages graveleux.

II - 5 Le Quaternaire :

L'activité dans la plaine surtout les labours successifs, les aménagements des terrains rendent difficile la distinction des alluvions des dépôts précédents. L'étendue de la couverture alluvionnaire indique l'énergie des écoulements et confirme l'ampleur des remaniements cités par (Roubhia A., 2006 et J. M. Vila, 1993).

Des alluvions anciennes « Cailloutis gréseux peu cimentés » s'observent dans le lit de l'oued près de Henchir El-Goussa et au sud de Bordj El-MaLabioud. (Rouabhia,2006)

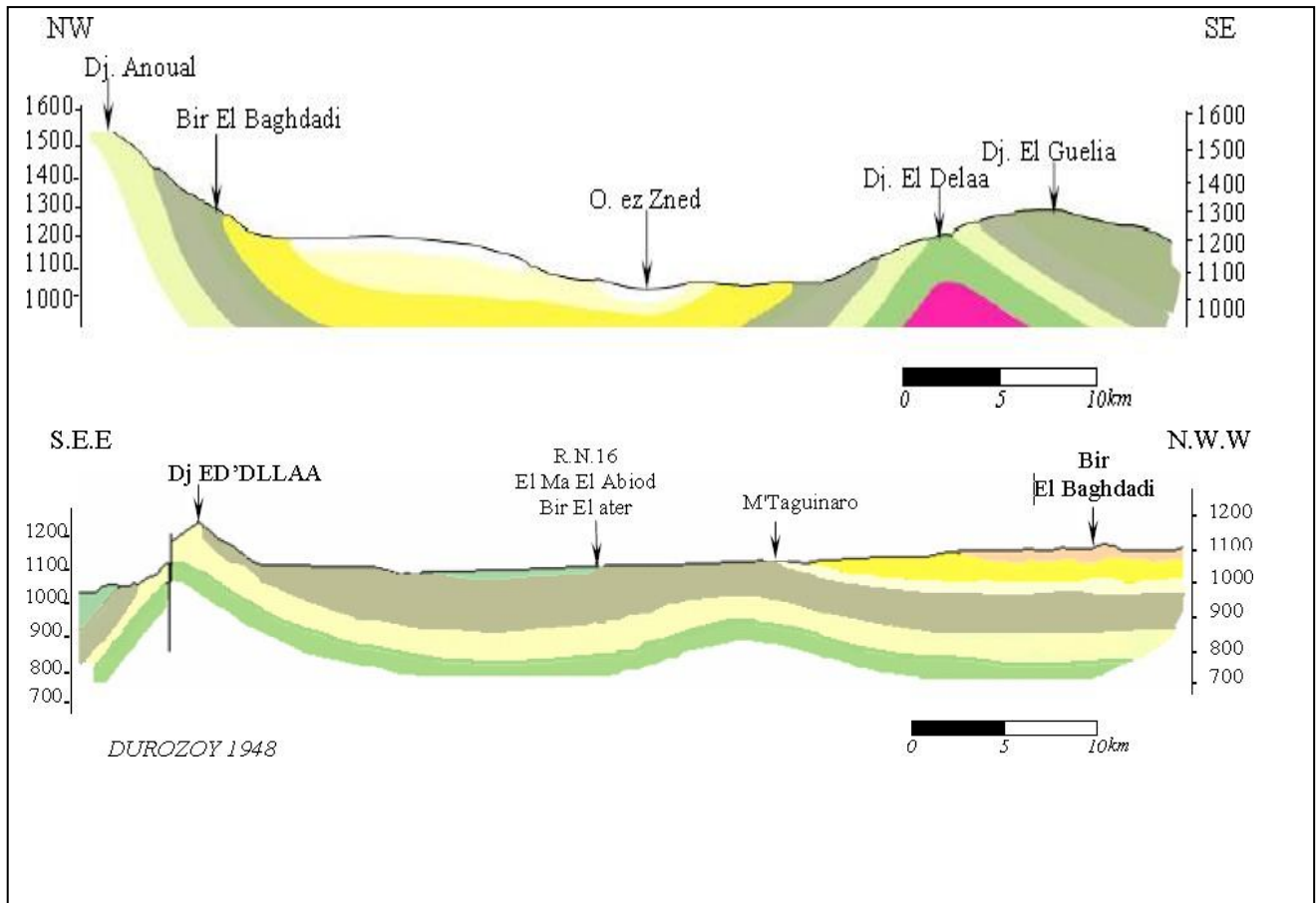


Fig.1 : coupes géologiques Dj. Anoual au Nord à Dj Guelia au Sud par Durozoy 1948,in Rouabhia.A, 2006.

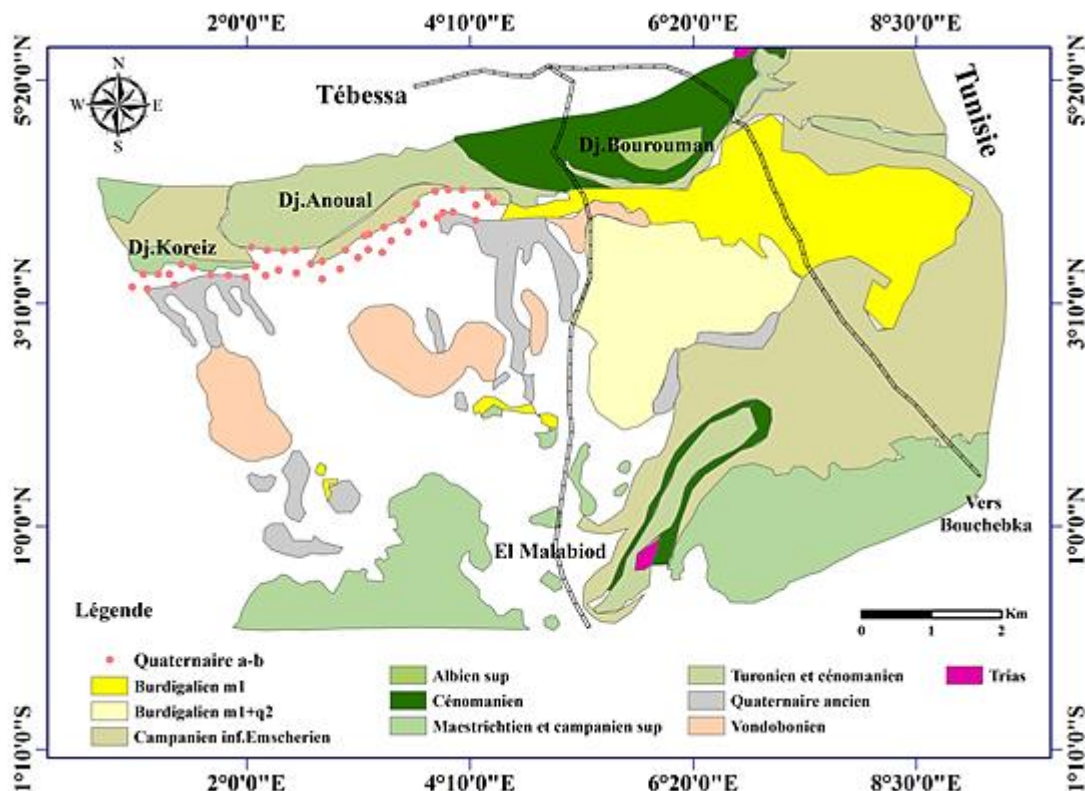


Fig.2 Esquisse géologique de la région d'étude, par Durozoy 1948,(modifiée par Rouabhia.A., 2006, Ramdani et Tatar 2024).

3 - Tectonique

3.1 Les Phases de l'orogénèse

Les études sur la tectonique de la région ont mis en évidence la chronologie de la sédimentation, du plissement, du diapirisme et de la fracturation ainsi que, localement, les stades successifs d'effondrement du fossé de Morsott-Tébessa. Cette région a subi les cinq phases de l'orogénèse alpine (Kowalski et al., 2000) :

A- La phase compressive fini-lutétienne

Elle est caractérisée par une contrainte maximale d'orientation N 320-330°E. Elle se manifeste par des plis d'orientation atlasique N 50°-60°E bien visibles sur les cartes géologiques d'El-Aouinet de Meskiana (Kuscer et al., 1985) et de Morsott (Blés, Fleury., 1970), mais moins nettes sur la carte géologique de Tébessa (Durozoy, 1956) à cause de la superposition des phases ultérieures. Elle se manifeste clairement au SW de Tébessa (carte géologique d'Ain

Thélidjène, Vila., 1995).

A- La phase distensive du Miocène Inférieur

Elle est responsable de la formation et développement du bassin d'El malabiod au cours du Langhien-Serravallien et Tortonien, ainsi que celui des Oulad Soukies et du graben de Foussana et Kasserine en Tunisie. La distension miocène a facilité le diapirisme dans le fossé des Oulad Soukies, à Djebel Ouenza, Djebel Boukhadra et dans la zone entre Djebel Belkfif et Hameimat.

B- La phase compressive du Miocène Supérieur

Elle ne se manifeste que dans la zone de Sebkhia Sellaoua et plus au Nord. Dans la zone d'étude, ces manifestations sont amorties, en accord avec Vila, 1980. Les dernières manifestations de la compression miocène vers le sud, ont été observées dans les monts de la Haute Medjerda.

C- La phase compressive du Pliocène Inférieur

Elle a une contrainte maximale N0°-20°E responsable de la formation des plis orientés N90°-110°S (l'anticlinal de Bled Tebaga, le synclinal de Draa Es Snouber, l'anticlinal de Bir-salem et les remplissements de l'anticlinal fini-Lutétien de Bouroumane. Avec la formation de l'anticlinal de Bouroumane-Tella-Djebel Anoual) sur la carte de Tébessa. On observe aussi la formation du synclinal de Draa Snouber sur la carte de Meskiana. L'effondrement du fossé de Morsott provoquée par la composante senestre de la contrainte N0°-20°E au cours du stade distensif, était accompagné par le percement du diapir de Belkl'if-Hameimat (diapirisme mio-pliocène), qui s'effondrait partiellement dans le fossé. La composante dextre facilitait la réactivation du diapirisme du Djebel Djebissa, qui se manifestait comme un diapirisme sous-marin à l'Aptien-Albien, provoquant la réduction drastique du profil Aptien-albien de ce Djebel (Vila,1994).

E- La phase compressive du Pliocène Supérieur

Elle est responsable de la formation des structures plissées plus Jeunes que le fossé de Morsott qui lui sont parallèles. A cette phase appartient l'anticlinal de Djebel Belkfif, le synclinal Faid Al Obbiz et l'anticlinal d'Oued Annba-Djebel Stah. Ces plis, orientés N 160-

170 E sont formés par la contrainte maximale N 80 E et détectés par (Blés, 1969) à El Kouif. La composante dextre de cette contrainte est responsable de l'effondrement du fossé de Tébessa lié avec l'effondrement et basculement d'une partie des structures plicatives du Pliocène inférieur (comme une partie de l'anticlinal du Bled Tebaga, et du synclinal Draa Snouber). La composante senestre de cette contrainte aréactive la montée du diapir de Djebel Belkif avec sa couverture turonienne et de la zone de Sidi Bouhalala. Ce soulèvement diapirique a déformé le fossé du Morsott et parallèlement se produisait la réactivation du diapir du Djebel Djebissa. Qui monte Jusqu'à maintenant. La zone de jonction des fossés de Morsott (orienté NNW-SSE) et de Tébessa (orienté WNW-ESE) constitue une sorte de décrochement. La prolongation septentrionale du fossé de Tébessa déborde cette zone de jonction en modifiant partiellement le synclinal de Draa Snouber (Pliocène inférieur) à l'Ouest du Djebel Belkif. Par contre les plis de Villafranchien inférieur, parallèles au fossé du Morsott sont conservés. La composante senestre de la contrainte maximale du Plio-Villafranchien est responsable de la formation du fossé de Hammamet. Le substratum de ce fossé basculé, est constitué d'un système de horsts et grabens orientés SW-NE.

II – 7 Les fossés d'effondrements

Dans les confins algéro-tunisiens, les fossés d'effondrement sont orientés NW-SE à E-W, ils sont bordés par des accidents majeurs à valeurs de failles normales ayant un rejet différent d'un fossé à un autre, de 100 à 400m dans le fossé de Tébessa–Morsott, de 1700m dans celui de Ouled Ghanem. Ces fossés sont comblés par des dépôts miocènes à Plio-Quaternaires. L'âge de ces fossés d'effondrement est très discuté. Ces fossés résultent d'une intense activité tectonique distensive post Miocène inférieur pour certains auteurs (Durozoy, Castany, Dubourdiou, KaziTani, Othmanine) alors que pour d'autres les premières manifestations sont enregistrées au Crétacé et l'effondrement majeur s'est réalisé au Pliocène. L'individualisation de ces fossés est le résultat de phases tectoniques successives. La phase distensive du Miocène se manifeste par la création des fossés des Ouled Soukies, foussana, Kasserine et le bassin d'El malabiod. Il existe deux phases de plissement du Pliocène inférieur, dont la phase distensive à causer l'effondrement du fossé de morsot et le plissement et le plissement du pliocène supérieur, dont la phase distensive a provoqué l'effondrement du fossé de Tébessa (Fatah samoun, 2021).

3. Conclusion générale

La région d'El Malabiod, située dans l'Atlas Saharien, présente un relief contrasté avec des plis d'axes Sud-Ouest – Nord-Est. La couverture sédimentaire comprend des formations du Trias, du Crétacé et du Miocène, avec des variations de faciès et d'épaisseur orientées selon une direction Sud-Ouest – Nord-Est. La région a subi cinq phases de l'orogénèse alpine, comprenant des périodes compressives et distensives, qui ont façonné son paysage géologique actuel. Les fossés d'effondrements, bordés par des accidents majeurs à valeurs de failles normales, sont comblés par des dépôts miocènes à Plio-Quaternaires. Ces caractéristiques témoignent de l'activité tectonique intense et complexe ayant affecté cette région au cours de son histoire géologique.

Chapitre III :

Climatologie

1- Introduction

La climatologie est un facteur très important pour comprendre les écoulements de l'eau. Elle Permet de distinguer les différents paramètres du bilan hydrique tels que les précipitations, température et évapotranspiration réelle et potentielle par des formules empiriques. Pour élaborer cette partie nous avons travaillé avec les données climatiques de la station d'El Malbiod. Cette dernière présente les coordonnées suivantes :

Tab.1 Coordonnées de la station d'El Malabiod (ANRH).

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

2- Type de climat de la région d'étude

2-1 Indice d'aridité de DE. Martonne

Pour déterminer le type de climat de la région d'étude, nous avons fait appel à la formule de DE. Martonne :

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

Avec

I : indice d'aridité de DE. Martonne

P : précipitation annuelle moyenne en mm

T : température mensuelle annuelle en °C

Dans ce cas $I = 10.68$ avec $P = 267.60\text{mm}$ et $T = 15.04^{\circ}\text{C}$; ce que veut dire que la région est caractérisée par un climat semi-aride selon 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.

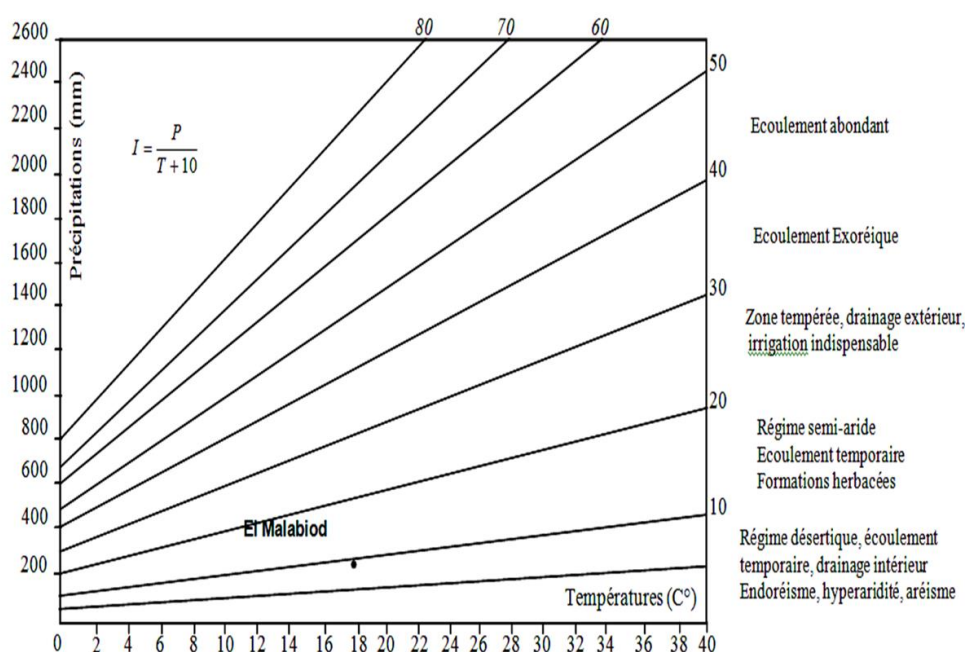


Fig.1 abaque d'aridité de DE. Martonne pour la région de EL Malabioud

3- Température

C'est le moteur de l'ascension de la vapeur d'eau. Elle joue un rôle crucial dans l'établissement du bilan hydrique en affectant l'évapotranspiration au niveau du bassin hydrologique et hydrogéologique. Les températures prélevées de la région d'étude sont contrôlées par la station de Tébessa ; nous avons utilisé le site web OGIMET climat pour compléter les lacunes signalées une étude récente.

Station : TEBESSA aéroport

Latitude (°déc) : 35.48

Longitude (°déc) : 8.13

Altitude approximative (m) 813

3-1 Variations de la température moyenne mensuelle

Le tableau ci-après montre Les changements de température moyenne mensuelle à la station de Tébessa pour une période de 12 ans (2005 à 2017/2018) :

Tab.2 Variations de la température moyenne mensuelle à la station de Tébessa

Mois	Jan	Fév	Mars	Av	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



Fig.2 variation de température moyenne mensuelle (2005-2018)

4- Précipitation

C'est la quantité d'eau météorique totale liquide ou solide qui tombe à la surface du sol sous forme pluies, neiges, grêles, grésilles, ...L'étude des mesures de précipitations revêt une importance considérable en hydroclimatologie car elle permet de connaître le régime d'écoulement.

4-1 Variations interannuelles des précipitations

Station d'El Malabiod

La figure ci-dessous représente l'évolution des précipitations moyennes annuelles pour une période de 12 ans à la station de Tébessa. L'histogramme montre que 2005 est l'année la plus pluvieuse tandis que 2008 est l'année la plus sèche.

Tab. 3 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. Ann(m m)	476	268	391	242	462.7	364	425	386	403.6	314	474	294.9	287	405.3

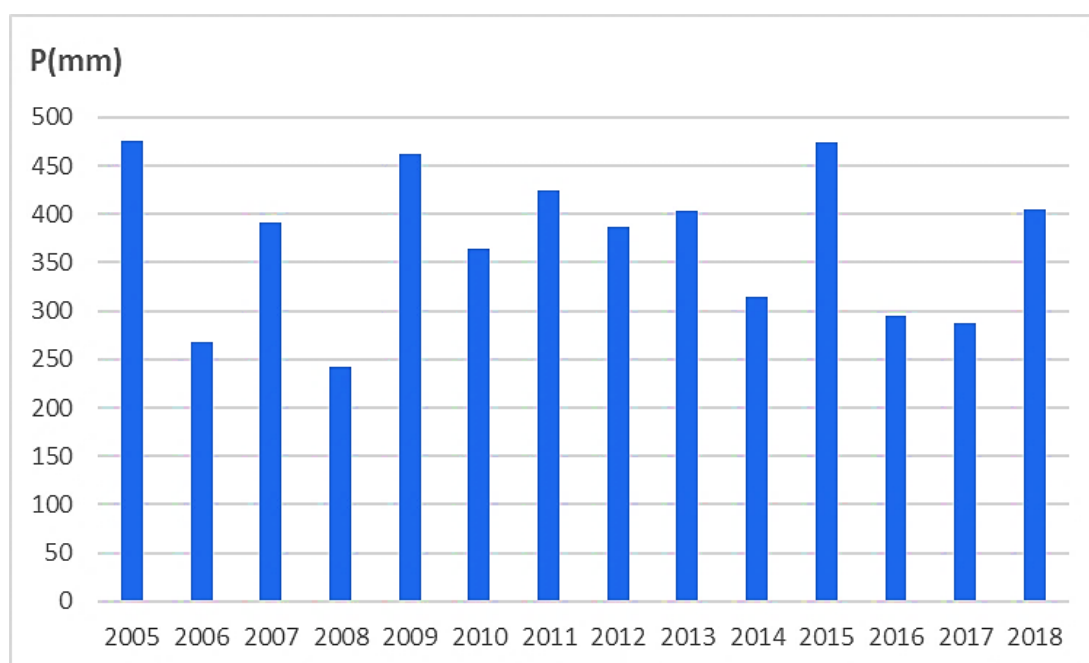


Fig. 3 Evolution des précipitations moyennes annuelles pour la période de (2005-2018)

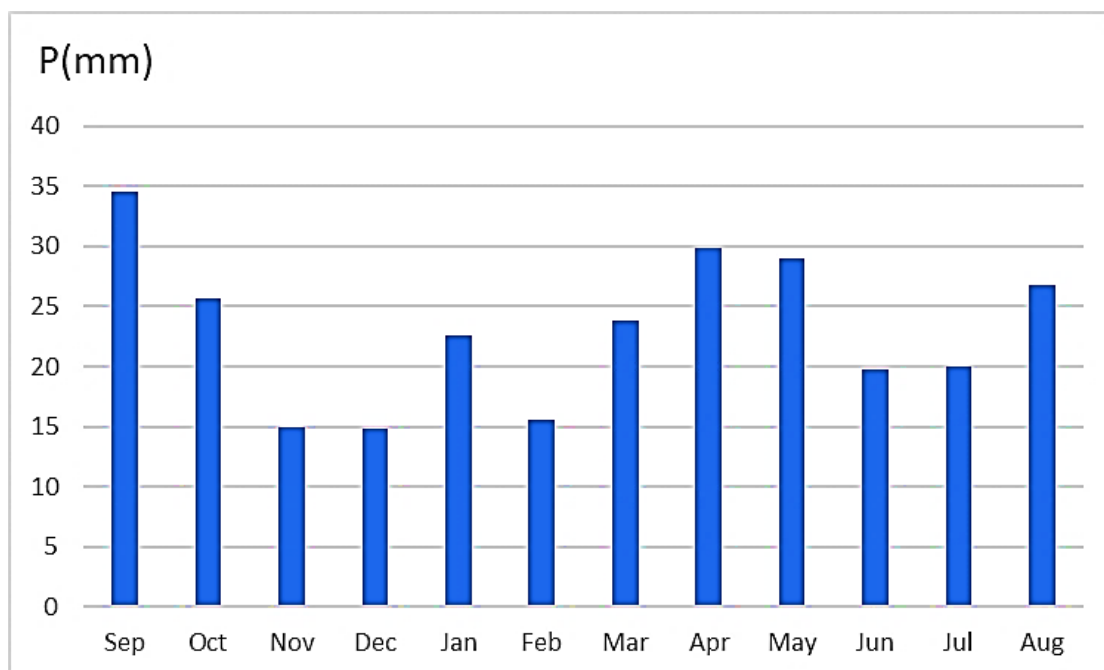


Fig. 4 Variation des précipitations moyennes mensuelles interannuelles pour la période de (2005-2018)

5- Vent

C'est le mouvement d'air extérieur et nettement perceptible suivant une direction déterminée. Le tableau ci-après montre que les vents soufflants dans la région sont modérés à forts. La moyenne annuelle est de l'ordre de **78.65 km/h** avec un maximum observé en mois de **Mars** avec une vitesse de **104.4 km/h**.

Tab.4 vitesses du vent enregistrées par la station de Tébessa 2013

Mois	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Vmax (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 désigne le mécanisme par lequel une quantité spécifique d'eau pénètre dans le sol via les précipitations ou la neige, puis retourne dans l'atmosphère. Le bilan hydrique naturel peut être calculé comme suit

$$P = ETR + R + I + (\pm \Delta W)$$

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 est la quantité d'eau qui s'évapore au niveau d'une masse d'eau qui serait suffisamment alimentée pour évaporer la quantité maximale d'eau autorisée par les circonstances météorologiques. Le calcul de l'évapotranspiration est influencé par la température et l'altitude du lieu concerné. Différentes formules sont utilisées pour ce calcul, Thornthwaite (1948) étant la plus souvent utilisée.

$$ETP = 16 \left[10 \frac{t}{I} \right]^a$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle en (mm) ;

t : température moyenne mensuelle en (°C) ;

I : Indice thermique annuel ;

Avec $I = \sum i$

Où :

i : indice thermique mensuel

$$i = \left[\frac{t}{5} \right]^{1.514}$$

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 tendent à être trop élevées dans les régions tropicales humides et équatoriales, tandis qu'elles sont souvent sous-évaluées dans les régions arides et semi-arides. Pour corriger ces écarts, plusieurs chercheurs recommandent l'application d'un facteur de correction, noté K, qui dépend du moment de l'année, de la durée d'observation et de la latitude géographique de la zone étudiée.

$$ETP_c = K \times ETP$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm),

ETP_c : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm),

K : facteur de correction dans les climats semi arides

6-1.2 Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à la région d'El Malabiod

Tab.5 Calcul de l'ETP selon la formule de Thornthwaite à 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
ETP _c (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

6-1.3 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Lorsque la perte d'humidité du sol dépasse ou égale la capacité de rétention d'eau facilement accessible (RFU) de la plante, cette perte d'humidité atteint le niveau d'évapotranspiration potentielle (ETP). En cas de déficit hydrique, les pertes sont restreintes à des niveaux inférieurs, ce qui constitue ce que l'on appelle l'évapotranspiration réelle. Pour estimer cette dernière, diverses formules et méthodes basées sur la température et les précipitations ont été développées.

6-1.4 Formule de Turc pour le calcul de l'ETR

Cette formule est universelle et peut être utilisée dans tous les types de climats à travers le monde. Elle prend en compte à la fois les précipitations et la température moyenne annuelle.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left[\frac{P}{L}\right]^2}}$$

Où :

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

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

T : température moyenne annuelle (°C).

6-2 Les différentes composantes du bilan

6-2.1 Le ruissellement

Le ruissellement représente la portion des précipitations qui s'écoule directement dans le sol lors des événements pluvieux. Son estimation peut être réalisée en observant le niveau d'eau des rivières ou en utilisant diverses méthodes empiriques. Parmi ces méthodes, la méthode développée par Tixeront et Berkaloff est souvent utilisée pour étudier le ruissellement annuel moyen. Toutefois, cette équation est sujette à controverse car elle ne prend pas en compte les variations de la perméabilité du sol en fonction de la topographie et des propriétés lithologiques (Ramdani et Touahria, 2022).

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

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

L'infiltration se réfère au processus par lequel l'eau pénètre dans le sol et le sous-sol sous l'effet combiné de la gravité et de la pression.

$$I = P - (ETR + R)$$

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)

La quantité d'eau stockée dans le sol, qui détermine son niveau de saturation, est influencée par divers facteurs, notamment :

- Les caractéristiques et la composition du sol, sa lithologie et son épaisseur superficielle.
- La profondeur de la nappe phréatique dans l'aquifère.
- Les conditions climatiques de la zone.
- Le type de végétation présente sur le sol.

La RFU Donnée 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 :

Les calculs du bilan hydrique permettent d'analyser le transfert d'eau résultant des précipitations et visent à évaluer l'état d'humidité du sol. Cette approche, effectuée mois par mois, repose sur le concept de la Réserve Facilement Utilisable (RFU). Elle considère que le sol peut retenir une certaine quantité d'eau, disponible pour les plantes par évaporation.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée entre 0 (RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU, variant généralement de 0 à 200 mm selon les types de sols et de sous-sols considérés, avec une moyenne de 26 mm).

Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de Thornthwaite présente l'avantage d'estimer, pour chaque mois, l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), le déficit agricole (Da) et l'excédent (Ex) en eau.

Tab.7 Bilan d'eau selon Thornthwaite pour une période de 12ans.

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	26.75	277.1
ETPc (mm)	105.64	75.94	35.93	16.75	17.06	17.90	36.36	62.02	96.24	140.26	173.02	150.63	927.75
RFU (mm)	0	0	0	0	5.47	3.09	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	26.75	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 vérifications du bilan hydrique révèlent que l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépasse de manière significative les précipitations. A partir de l'évaluation effectuée, les conclusions suivantes ont été déduites :

- Les précipitations atteignent un maximum en septembre (**34.55mm**) et l'ETP atteint un minimum en décembre (**16.75mm**).
- Le déficit agricole se répartit entre mars et décembre avec un maximum de **153.07mm** en juillet.
- La RFU n'atteint pas sa capacité maximale.
- Le pic de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est observé en juillet, atteignant 173.02mm, alors que les précipitations n'atteignent que **19.95mm** à ce moment-là.

Vérification du bilan : $\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma Da \rightarrow 277.1 + 650.66 = \mathbf{927.75}$

$$\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EX \rightarrow 277.1 + 0 = \mathbf{277.1}$$

Tab.8 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	17.06	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 : $\Sigma \text{ETP} = \Sigma \text{ETR} + \Sigma \text{Da} \rightarrow 300.18 + 627.57 = 927.75$

$$\Sigma P = \Sigma \text{ETR} + \Sigma \text{EX} \rightarrow 300.18 + 0 = 300.18$$

Tab.9 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	127.76	173.02	109.43	574.84
EX (mm)	0	0	0	0	18.49	0	0	0	0	0	0	0	18.49

Vérification du bilan : $P = \text{ETR} + \text{Ex}$

$$370.4 \text{ mm} = 351.91 \text{ mm} + 18.49 \text{ mm}$$

9- Conclusion

À partir des bilans hydrologiques calculés pour la région d'El Malabiod, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

1. **Climat Semi-Aride** : Selon l'indice d'aridité de De Martonne, la région est caractérisée par un climat semi-aride, ce qui signifie qu'elle reçoit des précipitations relativement limitées par rapport à l'évapotranspiration potentielle.

2. **Précipitations et Température** : Les précipitations annuelles varient considérablement d'une année à l'autre, avec des années plus sèches et d'autres plus humides. Les températures moyennes mensuelles présentent également une variation saisonnière typique.

3. **Bilan Hydrologique** : Le bilan hydrique mensuel montre que l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépasse souvent les précipitations, ce qui indique des conditions de sécheresse potentielle. Cependant, les variations dans les années montrent des périodes de déficit hydrique et d'autres avec un excès d'eau.

4. **Ruissellement et Infiltration** : Le ruissellement est généralement faible, ce qui suggère que la majeure partie des précipitations est absorbée par le sol. L'infiltration varie en fonction des précipitations et de l'ETR, avec des années présentant des infiltrations plus importantes que d'autres.

5. **Capacité de Réserve d'Eau** : La réserve facilement utilisable (RFU) du sol n'atteint pas sa capacité maximale, ce qui peut indiquer une capacité limitée du sol à retenir l'eau.

En conclusion, la région d'El Malabiod est soumise à des conditions climatiques semi-arides avec des variations significatives dans les précipitations et les températures. Les bilans hydrologiques soulignent la nécessité de gérer efficacement les ressources en eau pour faire face aux périodes de sécheresse et d'excès d'eau, ce qui peut avoir un impact sur l'agriculture et l'écosystème local.

Chapitre IV :

Hydrologie

1- Introduction

De manière générale, l'hydrologie est définie comme la discipline scientifique qui étudie le cycle de l'eau dans la nature ; d'un point de vue plus spécifique, elle se concentre cependant sur la quantification des débits de surface. L'étude hydrologique est essentielle pour comprendre le fonctionnement d'un bassin versant, car elle permet d'évaluer sa capacité à recevoir les précipitations, d'analyser les réseaux de collecte et de mesurer l'intensité et la force de l'écoulement de l'eau.

2- Caractérisation du bassin versant d'El Malabiod :

Le bassin versant hydrologique d'El Malabiod est délimité au nord et au sud par des crêtes calcaires, à l'est par une chaîne montagneuse comprenant le Djebel Essif du côté tunisien, et à l'ouest par une colline turonienne recouverte de légères alluvions. Au nord, la ligne de partage des eaux marque également la séparation entre les grands bassins versants de Mèllegue, englobant le versant nord, et Melguigh, auquel la zone d'étude appartient. Les caractéristiques topographiques, lithologiques des affleurements rocheux et la géométrie du sous-bassin déterminent le comportement hydrologique de cette région.

2-1 Les caractéristiques morphométriques :

2-1.1 Le périmètre, la Surface et l'indice de compacité

La précision de la délimitation du bassin versant est tributaire à la fois de l'échelle de la carte utilisée et de la densité du réseau fluvial. Ces informations sont obtenues à partir des cartes topographiques, où les surfaces sont mesurées planimétriquement et les longueurs sont évaluées en prenant en compte la courbure de la terre. La superficie du bassin versant d'El Malabiod est de l'ordre de 600 km² alors que le périmètre est de 119 Km.

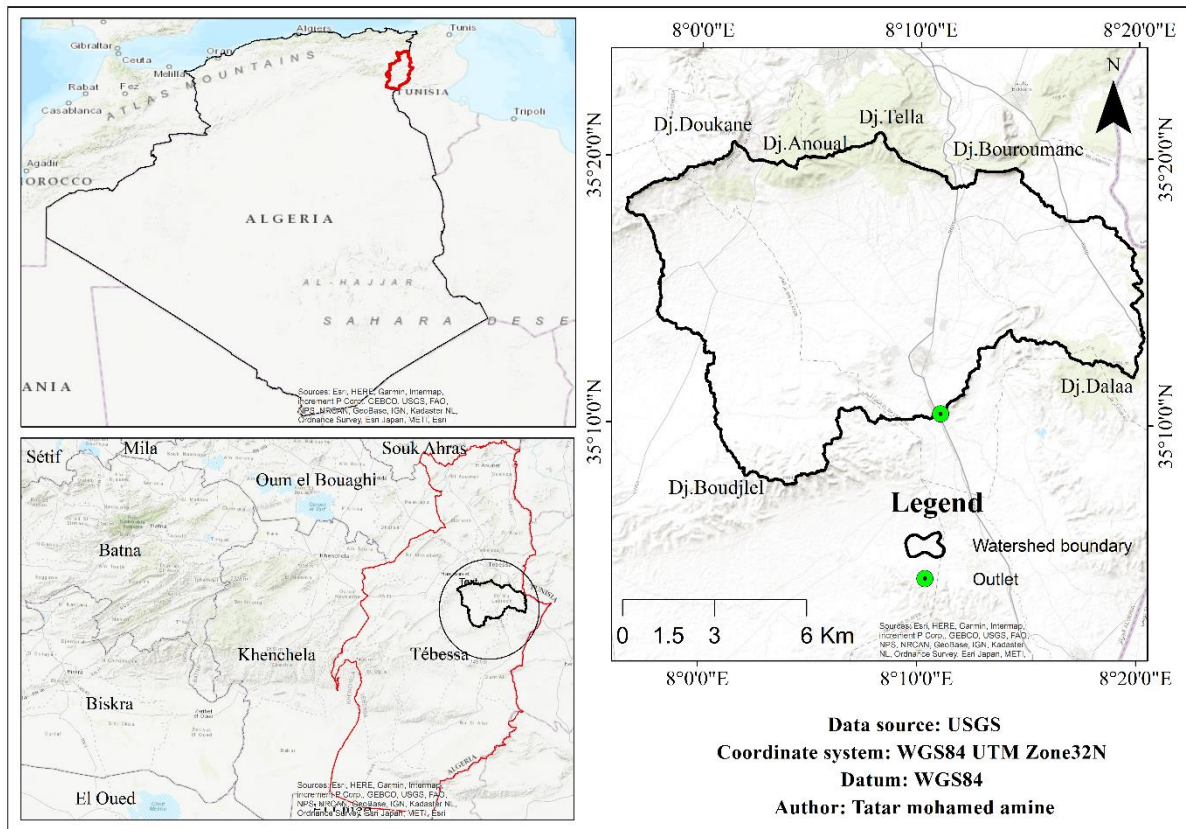


Fig.1 Position du bassin versant de la zone d'étude.

2-1.2 L'indice de forme

La configuration du bassin versant exerce une influence significative sur le débit global, notamment sur la forme de l'hydrogramme résultant d'une précipitation donnée. Cette caractéristique peut être évaluée de deux manières principales : par l'indice de Gravelius, également connu sous le nom de coefficient de compacité, introduit en 1914, qui représente le rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de même superficie ; ou par l'indice de forme de Horton, proposé en 1932, qui exprime le rapport entre la largeur moyenne du bassin versant et la longueur du cours d'eau principal. (Fatah Samoun, 2016).

L'indice de compacité de "Gravelius (Kc)" :

Donné par la formule suivante

$$Kc = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

Kc : indice de compacité du BV.

P : périmètre du BV en (Km).

A : surface du BV en (Km²).

Application numérique :

$$Kc = \frac{0.28 \times 119}{600} = 1.36$$

D'où le bassin versant est caractérisé par une forme allongée.

2-1.3 Le rectangle équivalent

C'est un concept qui permet de comparer les bassins entre eux en termes d'effet de forme sur le débit. En supposant que le débit sur un bassin donné est équivalent à celui sur un rectangle de même surface, même indice de compacité, même répartition en hauteur, etc.... (Ramdani et Touahria, 2022).

Les dimensions du rectangle équivalent ont été déterminées comme suit :

- Longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{Kc \times \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right) ; Km$$

$$L = 46.61 Km$$

- Largeur du rectangle équivalent

$$l = \frac{Kc \sqrt{S}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right) ; Km$$

$$l = 12.87 Km$$

Soit :

l : largeur du rectangle équivalent (km);

L : longueur du rectangle équivalent (km) ;

A : surface du bassin versant (km²) ;

P : périmètre du bassin versant (km) ;

3- Les paramètres du relief

Le relief joue un rôle crucial dans le comportement hydrologique et hydrogéologique d'un bassin. Le relief détermine les caractéristiques de l'écoulement, ce qui influence le temps de concentration, le processus d'infiltration et l'évaporation. Il est un élément capital qui conditionne le fonctionnement global d'un bassin en termes d'hydrologie et d'hydrogéologie.

3-1 La courbe hypsométrique

Une représentation graphique qui synthétise le relief d'un bassin versant ou d'une sous-section en fonction de l'altitude. Cette courbe illustre l'évolution des surfaces par tranche d'altitude, permettant ainsi d'estimer les différentes pentes présentes dans la région.

A partir de la courbe hypsométrique on détermine

- L'Altitude H à 95%.
- L'Altitude H à 5%.
- L'Altitude moyenne H50%

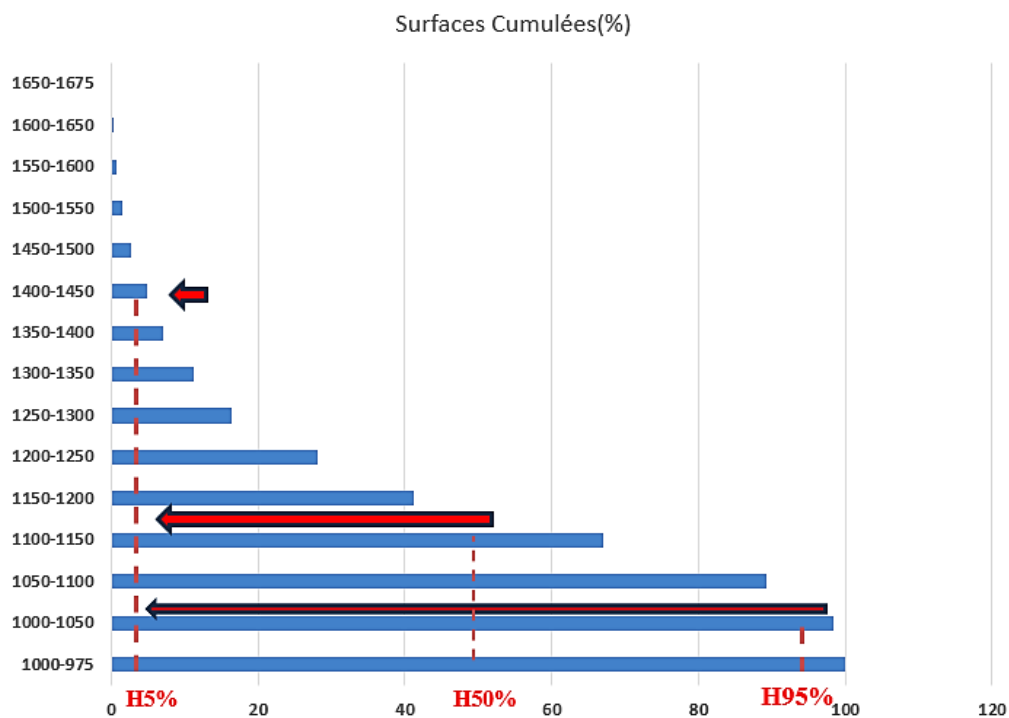


Fig.2 la courbe hypsométrique

D'après la courbe hypsométrique on détermine

- L'altitude H à 95% : H95% = 1025m.
- L'altitude H à 5% : H5% = 1385m.
- L'altitude moyenne $\bar{H} = \frac{\sum H_i \times S_i}{S_t} = 1159.53m$

Avec :

S_i : superficie comprise entre deux courbes de niveau (Km²)

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m),

S_t : Surface totale du bassin versant (Km²)

3-2 Les indices de pente

Les indices de pente sont utilisés pour évaluer et différencier les bassins versants. L'indice topographique est crucial car il influence fortement la capacité de la surface terrestre à gérer le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. En conséquence, il est un élément fondamental dans la compréhension du comportement hydrologique des bassins versants.

3-3 La pente moyenne

La pente moyenne (I_p moyenne) du sous-bassin versant est un paramètre qui permet d'évaluer l'énergie de l'écoulement, la vitesse moyenne, le temps de concentration, etc. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$I_{pmoy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \%$$

Où :

H_{max} : l'altitude maximale (m).

H_{min} : l'altitude minimale (m).

L : la longueur de rectangle équivalent (m)

$$I_{pmoy} = 16.82\%$$

3-4 L'indice de pente global (I_g)

Permet d'inférer la nature du relief en se basant sur la classification de l'O.R.S.T.O.M (Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer). Il est déterminé par la formule suivante :

$$I_g = D/L = H_{5\%} - H_{95\%}/L$$

Avec :

I_g : indice de pente globale.

D : dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ en (m) sont respectivement les altitudes Correspondante à $A_{5\%}$ et $A_{95\%}$.

L : longueur de rectangle équivalent en (Km).

$$I_g = 7.51$$

3-5 Dénivelée spécifique (Ds)

Elle est utilisée pour classer le bassin versant et est calculée selon la formule :

$$Ds = I_g \times \sqrt{A} ; (m)$$

$$Ds = 183.935 \text{ m}$$

Avec :

I_g : Indice de pente globale ;

A : superficie du bassin versant ;(km²)

D_s : Dénivelée spécifique

Selon la classification de O.R.S.T.O.M et la valeur de D_s on peut classer le relief on :

Tab.1 Classification de l'O.R.O.S.T.O.M pour la dénivelée spécifique D_s .

$D_s < 10 \text{ m}$ Relief très faible	$s < 10 \text{ m}$ Relief très faible
$10 < D_s < 25 \text{ m}$ Relief faible	$10 < D_s < 25 \text{ m}$ Relief faible
$25 < D_s < 50 \text{ m}$ Relief assez faible	$25 < D_s < 50 \text{ m}$ Relief assez faible
$50 < D_s < 100 \text{ m}$ Relief modéré	$50 < D_s < 100 \text{ m}$ Relief modéré
$100 < D_s < 250 \text{ m}$ Relief assez fort	$100 < D_s < 250 \text{ m}$ Relief assez fort
$250 < D_s < 500 \text{ m}$ Relief fort	$250 < D_s < 500 \text{ m}$ Relief fort
$D_s < 500 \text{ m}$ Relief très modéré	$D_s < 500 \text{ m}$ Relief très modéré

D'après les données fournies dans le tableau, le bassin versant d'El Malabiod présente un relief qui est caractérisé comme étant "assez fort".

4- Le réseau hydrographique

La plaine alluviale d'El Malabiod est drainée en surface par l'oued du même nom. Ce dernier est formé par la confluence en amont de la ville de trois oueds secondaires, à savoir :

Oued El Ma Lassoued : draine la partie Est de la plaine ainsi que le massif calcaire du Sud.

Oued Zenad : prend sa source au niveau du Kef Tnoukla, puis traverse la plaine avant de se rejoindre à l'ouest de l'oued El Ma Lassoued. Cet oued participe à l'alimentation de la nappe aquifère.

Oued EL GOUSSA : le plus important, avec une longueur de 28,2 km. Il draine toute la partie ouest du bassin versant. (Rouabhia, 2006).

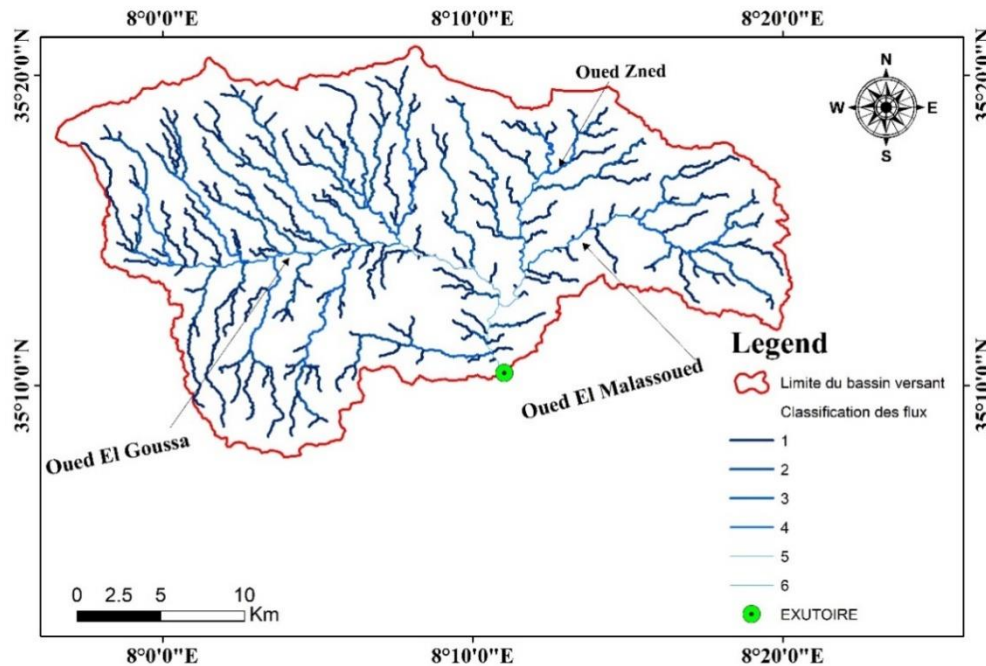


Fig.3 Le système de drainage de la région d'El Malabiod

4-1 Caractéristiques hydrographiques

4-1.1 La densité de drainage

Exprimé en kilomètres par kilomètre carré, ce terme désigne le ratio entre la longueur totale des cours d'eau dans un bassin versant et la superficie de ce même bassin.

$$Dd = \frac{L}{A} = \frac{\sum Li}{A} ; Km/Km^2$$

Avec :

Dd : densité de drainage [km/km^2] ;

Li : Somme des longueurs de tous les thalwegs y compris le thalweg principal [km] ;

S : superficie du bassin versant [km^2].

$$\sum Li = 1237.5 \text{ Km, donc } Dd = 2.062 \text{ km/km}^2$$

Cette densité indique que l'écoulement de l'eau est uniforme.

4-1.2 Le temps de concentration

Le temps de concentration correspond à la durée requise par la pluie pour atteindre le point où le cours d'eau le plus long se forme jusqu'à l'exutoire.

Il est donné par la formule suivante :

$$T_c = \frac{(4\sqrt{A+1.5 \times L})}{0.8\sqrt{H}} ; \text{ heures}$$

Où :

T_c : temps de concentration en (heures)

A : Surface du bassin versant = km²

L : Longueur du talweg principal = km

H = Hmoy – Hmin = m

$$\text{Donc : } T_c = 0.956h$$

Ce qui indique que l'eau se déplace rapidement à travers le bassin versant.

4-1.3 Vitesse de l'écoulement de l'eau

La vitesse de l'écoulement de l'eau est la mesure de la rapidité à laquelle l'eau se déplace dans un cours d'eau, un canal ou tout autre milieu aquatique. Elle peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la pente du terrain, la largeur et la profondeur du cours d'eau, la rugosité du lit, ainsi que les conditions météorologiques. Elle est exprimée en mètres par seconde (m/s) ou en kilomètres par heure (km/h).

$$V_e = \frac{L_p}{T_c} ; m/s$$

Avec :

V_e : vitesse d'écoulement en (m/s). ; (m/s)

L_p : longueur principale de talweg en (m).

T_c : temps de concentration en (s).

Application numérique :

$$V_e = \frac{37 \times 10^3}{0.956 \times 3600} = 1.075 \text{ m/s}$$

Une vitesse de 1.075 m/s est relativement rapide pour l'écoulement de l'eau dans un bassin versant. Cela indique un écoulement efficace et rapide à travers le réseau hydrographique.

Tab.2 tableau récapitulatif des différents paramètres du bassin versant d'El Malabiod.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Superficie	<i>A</i>	600	<i>Km²</i>
Périmètre	<i>P</i>	119	<i>Km</i>
Altitude maximale	<i>Hmax</i>	1675	<i>m</i>
Altitude minimale	<i>Hmin</i>	975	<i>m</i>
Altitude moyenne	<i>Hmoy</i>	1159.53	<i>m</i>
Longueur du thalweg principal	<i>Lp</i>	37	<i>Km</i>
Longueur du rectangle équivalent	<i>L</i>	46.61	<i>Km</i>
Largeur du rectangle équivalent	<i>L</i>	12.87	<i>Km</i>
Indice de compacité	<i>Kc</i>	1.36	/
Densité de drainage	<i>Dd</i>	2.062	<i>Km/Km²</i>
Temps de concentration	<i>Tc</i>	0.956	<i>h</i>
Vitesse d'écoulement	<i>Ve</i>	1.075	<i>m/s</i>
Dénivelée spécifique	<i>Ds</i>	183.935	<i>m</i>
Indice de pente globale	<i>Ig</i>	7.51	
Pente moyenne du bassin versant	<i>Imoy</i>	16.82	<i>%</i>

5- Conclusion

Le bassin versant de 600 km² présente des caractéristiques hydrologiques indiquant un écoulement rapide et efficace de l'eau. Avec une densité de drainage de 2.062 km/km², un temps de concentration de 0.956 heures, une vitesse d'écoulement de 1.075 m/s et un indice de forme de 1.36, le bassin versant a un réseau hydrographique bien développé et légèrement allongé. Ces données suggèrent une capacité de drainage efficace mais aussi des risques accrus d'érosion et de crues soudaines. Pour une gestion efficace, il est crucial de mettre en place des infrastructures de gestion des crues, des mesures de contrôle de l'érosion, des systèmes d'alerte rapide, et des pratiques de gestion des terres pour assurer la durabilité et la résilience du bassin versant.

Chapitre V :

Hydrogéologie

I- Introduction

L'aquifère de la plaine d'El Malabiod est situé dans un bassin qui s'est formé à la suite d'un effondrement géologique survenu au Mio-Pliocène. La structure de ce bassin est très homogène et se compose de nombreuses couches superposées. Ces couches comprennent des marnes, des calcaires localisés, des grès et des sables, qui sont surtout visibles à l'est, en particulier le long de la frontière entre le nord et l'est. Dans d'autres régions, les couches supérieures sont caractérisées par une formation essentiellement argilo-limoneuse au milieu de la plaine. Ces couches sont composées de galets et de graviers calcaires le long des frontières des régions occidentales et méridionales. Les formations calcaires qui affleurent au nord et au sud s'enfoncent en direction de la plaine sous les dépôts quaternaires qui la recouvrent.

1- Structure géologique et hydrogéologique du système

La plaine d'El Malabiod présente une structure générale qui se distingue par la présence de deux types principaux d'aquifères situés à des profondeurs différentes.

Le premier type d'aquifère, peu profond mais très répandu, se trouve dans les dépôts alluviaux de formation récente. Les argiles remaniées, les sables et les graviers sont les composants de ces formations.

Le deuxième type d'aquifère se trouve à des profondeurs plus importantes, dans des formations composées de grès, de sables et de graviers. Il est situé dans des roches datant de plusieurs millions d'années. On estime qu'une dizaine de forages et une centaine de puits sont utilisés pour exploiter cet aquifère.

1-1 Nappe alluviale

Il est important de noter que l'aquifère qui se développe dans les formations récentes et actuelles de la plaine d'El Malabiod a une superficie importante. La majeure partie de son emplacement est concentrée à proximité des bords de la plaine, et il englobe une vaste superficie. Plusieurs puits ont été creusés (depuis longtemps) leurs profondeurs n'excèdent pas en générale quelques mètres, avec un débit moyen de l'ordre de 2 l/s. Ils sont à sec à l'exception de quelque puits au Nord dans lesquels la nappe affleure à la suite des précipitations hivernales (surtout la neige) (Rouabhia, 2006). L'épaisseur des alluvions varie dans la plaine d'El Malabiod, avec une tendance à augmenter du nord vers le sud, atteignant

un maximum au sud, comme observé dans le forage M6 avec une profondeur de 15 mètres (Rouabhia, 2006). Ces alluvions disparaissent progressivement dans les horizons miocènes et généralement sur une grande partie de l'étendue de la nappe miocène. Elles contribuent alors à l'alimentation de cette nappe par infiltration en profondeur (Rouabhia, 2006).

1-2 Nappe miocène

Une étude géophysique de 1971 a confirmé l'existence d'une nappe miocène dans la plaine d'El Malabiod, exploitée par des forages situés entre les failles F1 et F2. Les formations miocènes sont principalement alimentées par les calcaires aptiens du Djebel Bouroumane, contribuant significativement à la nappe. La nappe miocène affleure au nord-est du village d'El Haoudjbet, fournissant une importante source d'eau pour la région (Rouabhia, 2006).

2- Géométrie des horizons de grès

Les analyses des forages révèlent que la nappe miocène est composée de niveaux de grès et de sable, séparés par des lentilles d'argile dont l'épaisseur varie d'un forage à l'autre. Malgré cette variation, cette séquence sédimentaire n'interrompt pas la continuité hydraulique de la nappe miocène, qui reste un seul horizon aquifère. Les couches d'argile ont une épaisseur maximale de 15 mètres dans le forage le plus profond (M5), tandis qu'elles sont de quelques mètres dans les autres forages (M1, M2 et M4), et absentes dans certains (M3 et M8), montrant ainsi la variabilité spatiale et la discontinuité de cette séquence argileuse au sein de l'aquifère miocène.

2-1 Epaisseur du niveau miocène

La distribution spatiale de l'épaisseur de la nappe miocène est déterminée par les forages traversant la couche gréseuse de l'aquifère jusqu'au substratum imperméable composé de marnes émschériennes. Cette épaisseur varie, atteignant un maximum à l'ouest avec 178 mètres (forage M7) et un minimum de 110 mètres. À l'est, près du col de Tnoukla, la couche aquifère mesure 90 mètres (forage M10), mais diminue progressivement en se déplaçant du nord au sud, atteignant 31 mètres (forage M9) à M'Taguinaro, en raison d'un soulèvement tectonique progressif des marnes émschériennes le long de la faille F2.

En se dirigeant vers le sud, les niveaux gréseux disparaissent progressivement, ne laissant que les formations quaternaires en discordance directe avec les formations émschériennes ou calcaires (forage M6). Le forage M12, situé au nord-est du forage M9, montre une nappe à un niveau statique ne dépassant pas les 6 mètres de profondeur. Cette diminution significative de

la profondeur de la nappe miocène se poursuit jusqu'à sa disparition à Bir El Ma El Lassoued, près de la faille. Les puits n° 10 et n° 11, avec une profondeur de 5 mètres dans les alluvions, reposent sur les marnes émschériennes comme substratum. En résumé, la distribution de l'épaisseur de la nappe miocène varie selon les régions, influencée par des facteurs tels que les soulèvements tectoniques le long des failles.

Tab1. Le tableau montre les épaisseurs des forages (d'après Rouabhia, 2006).

Forage	Profondeur (m)	Épaisseur des calcaires (m)	Épaisseur des formations miocènes (m)	Épaisseur des formations quaternaires (m)	Hauteur saturée (m)	Débit (l/s)
M1	125	86	33	Abs	30	91
M2	110	122	30	2.5	30	33
M3	200	155	40	11	40	75
M4	179	143	40	9	40	111
M5	213	A (Absence)	40	13	40	136
M6	100	212	06	30	06	135
M7	212	203	09	Abs	09	14
M8	218	Abs (Absence)	Abs	12	09	172
M9	150	Abs (Absence)	Abs	7.3	31	166
M10	152	Abs (Absence)	Abs	10	37	31
M12	45.7	164	Abs	Abs	38	38
AT1	Abs (Absence)	Abs (Absence)	Abs	Abs	100	100

2-1.1 Discussion :

- Profondeur des forages : Les forages varient en profondeur, allant de 45.7 mètres à 218 mètres.
- Épaisseur des calcaires : Les calcaires sont présents dans la plupart des forages, avec des épaisseurs variant de 86 mètres à 212 mètres. Cependant, dans certains forages (M5, M8, M9, et M10), les calcaires sont absents.

- Épaisseur des formations miocènes : Les formations miocènes sont également variables, allant de 6 mètres à 40 mètres. Dans certains forages (M5, M8, M9, et M10), les données sur l'épaisseur des formations miocènes sont absentes.
- Épaisseur des formations quaternaires : Les formations quaternaires présentent des épaisseurs diverses, de 2.5 mètres à 30 mètres. Dans certains forages (AT1), les données sur l'épaisseur des formations quaternaires sont absentes.
- Hauteur saturée : La hauteur saturée de la nappe miocène varie considérablement, allant de 6 mètres à 100 mètres.
- Débit : Les débits des forages sont également variables, allant de 4 l/s à 40 l/s, les forages M2 bis, M4 bis, M5 bis, M8 bis, M10 bis, M13 bis, M16 et M17 présentent le débit le plus élevé de 40 l/s.

2-1.2 Interprétation

- Variabilité des formations : La variabilité des épaisseurs des calcaires, des formations miocènes et des formations quaternaires indique une hétérogénéité dans la composition géologique de la région.
- Influence de la géologie sur la nappe : La présence ou l'absence des calcaires et des formations miocènes dans les forages suggère une influence significative de la géologie locale sur la recharge et le comportement hydraulique de la nappe miocène.
- Corrélation entre la hauteur saturée et le débit : On observe une tendance où les forages avec une hauteur saturée plus importante ont tendance à avoir des débits plus élevés, bien que cela puisse varier en fonction de divers facteurs hydrogéologiques.
- Impact des conditions locales : La différence de profondeur, d'épaisseur des formations et de débit entre les forages souligne l'impact des conditions locales sur la disponibilité et la qualité de l'eau souterraine dans la région.

En résumé, l'analyse des données des forages fournit des informations précieuses sur la géologie et l'hydrologie de la région, permettant une meilleure compréhension de la distribution et de l'utilisation de la nappe miocène.

3-Les calcaires de la plaine d'El Malabiod

Dans la région située à l'ouest de la route Tébessa-El Malabiod, les coupes hydrogéologiques des forages d'eau révèlent la présence de formations calcaires sous le remplissage miocène. Ces calcaires s'arrêtent à l'est, où les formations miocènes reposent sur des marnes emscheriennes. Les forages montrent que les calcaires sont fissurés, avec des fractures

conchoïdales colmatées par de la calcite recristallisée dans certains cas, et des calcaires blancs ou gris durs dans d'autres. Cependant, ces calcaires présentent une très faible perméabilité et aucun intérêt hydraulique, comme le montrent les puits creusés dans la région (D'après les travaux de Rouabhia en 2006).

4-CONDITIONS AUX LIMITES DU SYSTEME AQUIFERE

Nous allons étudier le fonctionnement hydraulique en examinant les conditions aux limites de l'aquifère et les relations entre les deux nappes (Fig.1).

4-1 Nappe alluviale

Au nord, la nappe alluviale entre en contact avec les calcaires du secondaire, formant une limite perméable en raison de la nature des calcaires et de l'inclinaison de leurs couches vers la plaine. Au sud, les eaux de précipitations atmosphériques ruissellent en surface sur les formations calcaires, contribuant partiellement à l'alimentation de la nappe alluviale, en plus des pluies directes sur son bassin versant. Les argiles et les marnes agissent comme un substratum imperméable en profondeur, dirigeant les eaux d'infiltration vers la nappe miocène en aval. En aval de la plaine, la nappe alluviale présente une fuite vers l'oued El Ma El Abiod, situé près du village d'El Malabiod.

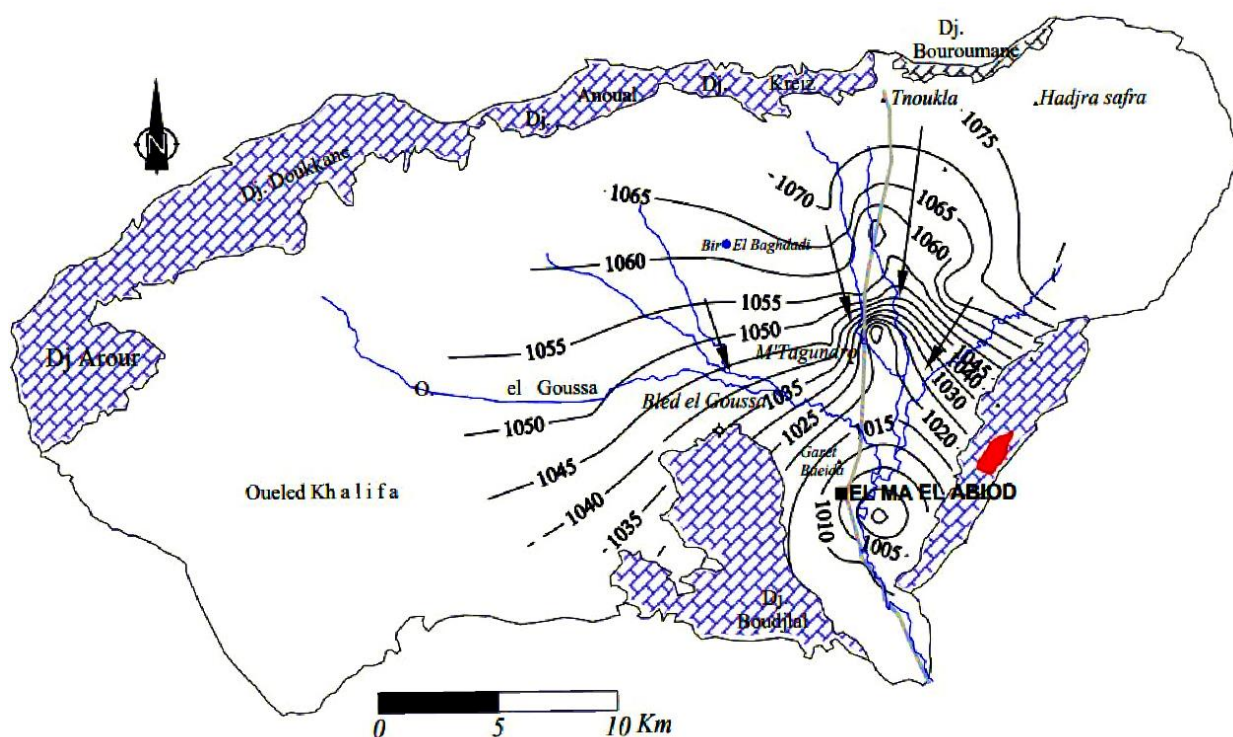


Fig.1 : Carte piézométrique mars 2001 (D'après Rouabhia. A, 2006)

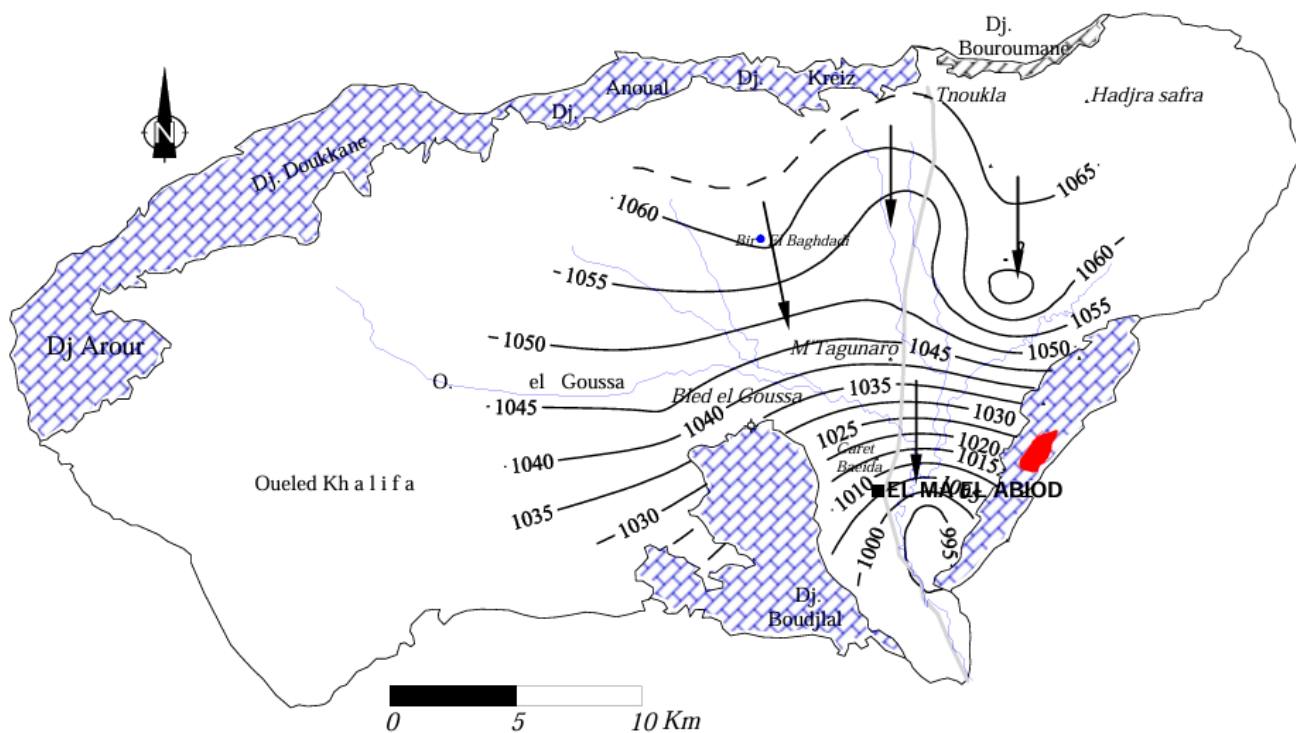


Fig.2 : Carte piézométrique mars 2004 (D'après Rouabhia, A, 2006)

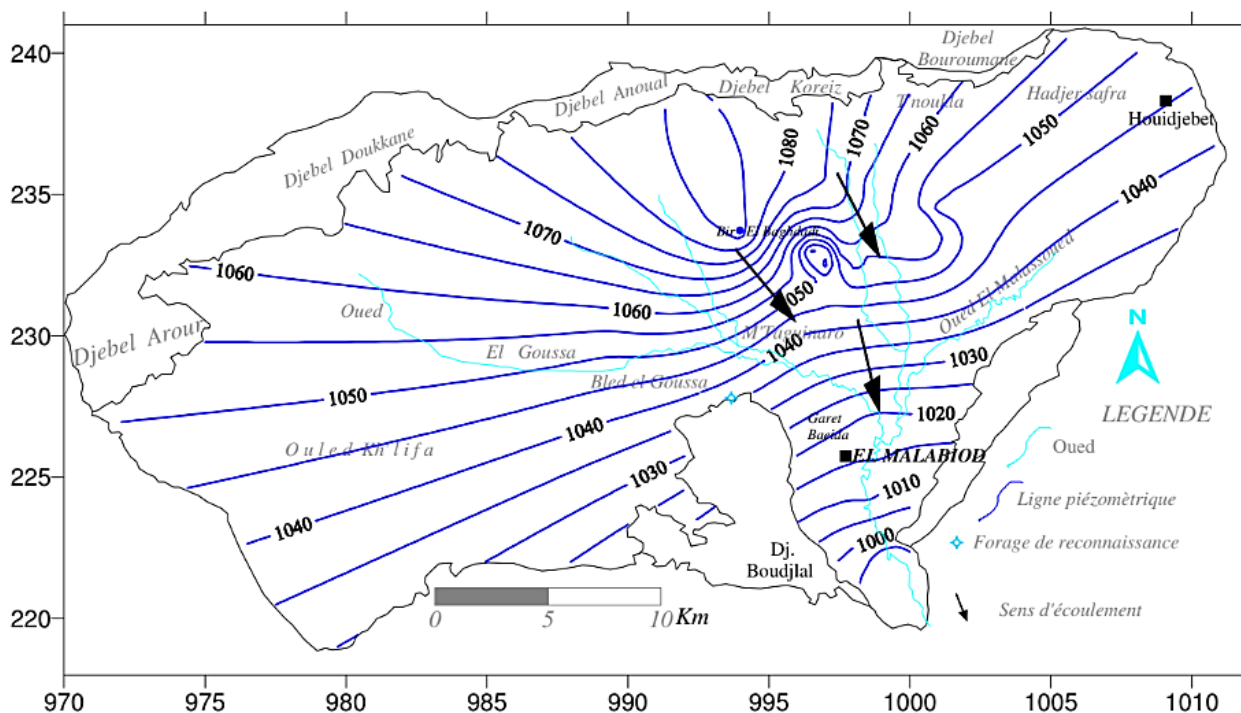


Fig.3 : Carte piézométrique septembre 2009 (D'après Djabari, 2009)

L'interprétation des cartes piézométriques de la plaine d'El Malabiod permet de visualiser la distribution spatiale du niveau de la nappe phréatique. Les lignes piézométriques indiquent les niveaux de la nappe et leurs variations, révélant les directions d'écoulement de l'eau souterraine.

En 2004, les niveaux piézométriques étaient globalement plus élevés, avec des valeurs atteignant jusqu'à 1065 m au nord-est de la plaine.

La carte piézométrique de 2009 montre une baisse généralisée du niveau piézométrique, avec les valeurs maximales ne dépassant pas 1080 m. La baisse la plus marquée est observée au centre-nord et dans la région d'El Malabiod, indiquant une surexploitation accrue.

En 2004, les lignes piézométriques étaient plus espacées, particulièrement au centre et au sud de la plaine, indiquant une recharge plus efficace et une exploitation moins intense.

En 2009, les lignes piézométriques sont plus serrées autour de Bleid El Goussa et El Malabiod, signifiant une dépression piézométrique plus prononcée et un gradient hydraulique plus élevé dans ces zones. Cela révèle une intensification des prélèvements d'eau souterraine.

En 2004, le gradient hydraulique était moins prononcé, notamment au sud de la plaine, où les lignes étaient plus espacées.

En 2009, le gradient est plus accentué, surtout autour des zones de dépression, indiquant une modification du flux hydrodynamique et une réduction de la recharge naturelle.

La comparaison des deux cartes (Rouabhia 2004 et Djabari 2009) piézométriques met en évidence une dégradation significative du niveau piézométrique dans la plaine d'El Malabiod, principalement due à la surexploitation des ressources en eau souterraine. Cette évolution souligne l'importance d'adopter des stratégies de gestion durable pour préserver la nappe phréatique. L'utilisation de logiciels de modélisation comme MODFLOW sera essentielle pour reconstituer la piézométrie, analyser les impacts de l'exploitation actuelle et développer des solutions visant à stabiliser et restaurer les niveaux piézométriques.

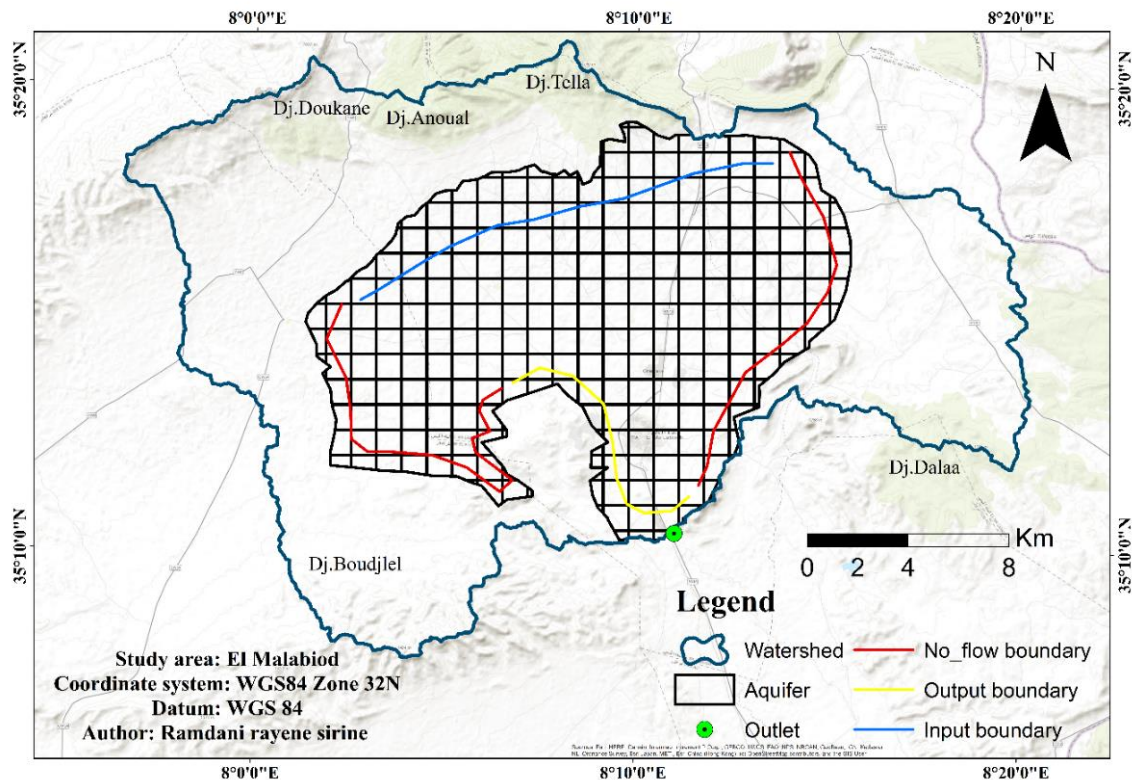


Fig.4 Carte des conditions aux limites du système aquifère d’El Malabiod

5-Interprétation de la carte des conditions aux limites du système aquifère :

- Zone Nord : La nappe alluviale entre en contact avec les calcaires d’âge secondaire, qui forment une limite perméable en raison de leur nature et du pendage plongeant de leurs couches vers la plaine.
- Zone Sud : Les eaux de précipitations atmosphériques ruissellent en surface et alimentent la nappe alluviale. Cette alimentation est complétée par les pluies efficaces tombant directement sur la zone de captage.
- Substratum : Les argiles et les marnes imperméables constituent le substratum en profondeur, orientant les eaux d’infiltration vers la nappe miocène.
- Limite de Fuite : En aval de la plaine, la nappe alluviale a une limite de fuite vers l’oued El Malabiod, près du village d’El Malabiod.

6-Estimation des réserves de la nappe

Selon les données disponibles, la réserve hydrique sous la plaine d'El Malabiod pourrait être évaluée en utilisant la formule suivante :

$$R_{ht0} = \text{Volume moyen de la nappe} \times \text{la porosité efficace}$$

Dans cette formulation, **R_{ht0}** représente la réserve hydrique instantanée, étant donné que la nappe est constamment sujette à des flux entrants et sortants, ce qui entraîne une évolution continue de son volume.

Nous allons donc évaluer le volume moyen de la nappe ainsi que la porosité efficace.

6-1 Volume moyen de la nappe

Étant donné les fluctuations complexes des dimensions de l'aquifère (en longueur, largeur et profondeur), les variations différentielles du niveau de la nappe et la composition hétérogène des matériaux de remplissage, l'approche suggérée serait de calculer la section transversale moyenne de l'aquifère sous chaque profil géoélectrique, puis d'obtenir la moyenne de ces sections pour estimer la section moyenne de l'aquifère (Fatah samoun, 2021).

$$V_{moy n a p} = \sum_{i=1}^{42} [(H_{p i} - h_{p i}) * l_{p i}] * L_{a q} / 35$$

Où :

V_{moy n a p} est Le Volume moyen de la nappe

H_{p i}, **l_{p i}** et **h_{p i}** Sont respectivement la hauteur et largeur moyennes de la section aquifère et, la hauteur moyenne mesurée jusqu'à la nappe.

6-2 Porosité efficace

La composition de l'aquifère, telle qu'indiquée par les enregistrements des forages et les matériaux extraits des puits, comprend une fraction de particules fines. La porosité efficace sera donc estimée en tenant compte des proportions des différents éléments présents à proximité de chaque profil.

Pour obtenir une estimation de la porosité efficace moyenne à l'échelle de la zone aquifère, on peut procéder comme suit :

$$Poreffmoyaq = \sum_7 pore f s_{pi} / 35$$

Où :

$pore f s_{pi}$ est la porosité efficace à proximité de la section du profile « i »

La quantité d'eau disponible peut également être estimée en utilisant une relation qui intègre la porosité efficace près de la section du profil "i" à l'unité élémentaire du profil, afin de calculer la quantité élémentaire d'eau. Cette quantité est ensuite multipliée par la longueur de l'aquifère.

$$R h_{t0} = [(p_i - h_{pi}) * l_{pi} * p e s_{pi}] * L a q / 35$$

Où :

$p e s_{pi}$ est la porosité efficace à proximité de la section du profile « i »

Vu la composition de l'aquifère (sables argileux et grès à patine argileuse) ;

- La porosité efficace est estimée à : $p e s_{p m o y} = 12 \%$

- La moyenne des profondeurs à la nappe mesurées aux points d'eau est évaluée à :

$$h_{m o y} = 49.5 m$$

- La hauteur totale moyenne de l'aquifère est estimée à : $H_{p i} = 75 m$

- La largeur moyenne et la longueur de l'aquifère mesurées sur la carte au 1/50000e (feuille 235) sont de : $l_{p m o y} = 3 km$ et $L a q = 14 km$.

Par conséquent :

$$R h_{t0} = l_{p m o y} * L a q * (H_{p m o y} - h_{p m o y}) * p e s_{p m o y} / 100$$

Donc, la réserve en eau de la nappe d'El Malabiod est estimée, sans considérer les éventuelles discontinuités de l'aquifère à : $R h_{t0} = 128.5210^6 M m^3$.

7-Conclusion

La plaine d'El Malabiod présente une géologie complexe, avec des formations alluviales récentes et des formations miocènes plus anciennes. L'aquifère alluvial, alimenté par les précipitations et les infiltrations, joue un rôle crucial dans la recharge de la nappe miocène sous-jacente. La nappe miocène, composée de grès et de sable, montre une variation significative en épaisseur et en hauteur saturée selon les régions, influencée par les conditions géologiques locales. Les calcaires, bien que présents dans la région, présentent une faible

perméabilité et n'ont pas d'intérêt hydraulique. Les conditions aux limites du système aquifère montrent des interactions complexes entre les nappes alluviale et miocène, influencées par les formations géologiques environnantes.

Cependant, le niveau piézométrique de la nappe a été dégradé en raison de la surexploitation des ressources en eau souterraine. Pour faire face à cette problématique, nous avons utilisé le logiciel MODFLOW pour reconstituer la piézométrie de la nappe et identifier des solutions permettant de maintenir son niveau. Les résultats obtenus à l'aide de MODFLOW ont permis de proposer des stratégies de gestion durable visant à équilibrer les prélèvements et la recharge de la nappe.

L'estimation des réserves de la nappe montre une réserve hydrique importante, soulignant l'importance de la gestion durable des ressources en eau souterraine dans la région. En conclusion, l'hydrogéologie de la plaine d'El Malabiod est caractérisée par une diversité géologique qui influence la distribution et l'utilisation des eaux souterraines, nécessitant une approche intégrée pour une gestion efficace de ces ressources.

Chapitre VI :

Matériels et méthodes

I- Introduction

Les régions semi-arides sont souvent caractérisées par une disponibilité en eau limitée, exacerbée par des précipitations imprévisibles et des taux d'évapotranspiration élevés. Face à ces défis, les communautés et les gestionnaires des ressources en eau recherchent des solutions innovantes et durables pour assurer la sécurité hydrique à long terme. Dans ce contexte, les barrages d'écrêtement émergent comme une solution prometteuse, offrant la possibilité de réguler les flux d'eau, de stocker les précipitations excédentaires et de favoriser la recharge artificielle des nappes phréatiques. Ce chapitre examine de manière approfondie la faisabilité et les implications de l'utilisation des barrages d'écrêtement dans les régions semi-arides, en se basant sur des exemples concrets de telles structures à travers le monde. En analysant les réussites et les défis rencontrés dans ces cas d'étude, il vise à fournir des éclairages précieux pour orienter la prise de décision et la mise en œuvre de projets de barrages d'écrêtement dans des contextes similaires.

I- Les barrages écrêteurs de crues

Les barrages écrêteurs de crues sont souvent l'un des éléments d'une stratégie de ralentissement dynamique des crues à l'échelle d'un bassin versant. Les barrages écrêteurs de crues sont implantés en travers du thalweg et ont pour objet de stocker, temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau, de façon à diminuer le débit de pointe de la crue aval. On en distingue 2 types : les barrages à pertuis ouvert et les barrages à pertuis vanné (wikhydro.developpement-durable).

I-1 Barrage à pertuis ouvert

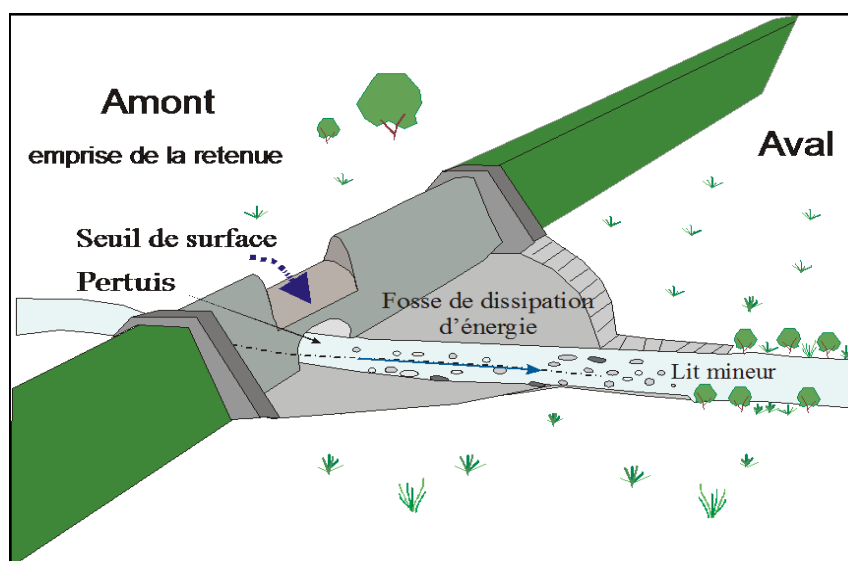


Fig.1 schéma de fonctionnement d'un barrage à pertuis ouvert (wikhydro.developpement-durable).

I-1.1 Principes de fonctionnement

- Un pertuis de fond correctement dimensionné et protégé de l'obstruction par des flottants, permet de limiter le débit en aval, à une valeur compatible avec les enjeux à protéger contre l'inondation ; l'ouvrage est donc transparent pour les débits courants et pour les crues fréquentes ;
- Lorsque la capacité du pertuis est saturée, la retenue se remplit progressivement, ce qui permet de stocker temporairement une partie du volume de la crue ; le débit en aval augmente peu en fonction de la montée du niveau dans le réservoir (écoulement en charge) ; en fin de crue, le volume temporairement stocké dans la retenue se vide naturellement par le pertuis ; L'ouvrage écrête fortement les crues moyennes à rares ;
- En cas de très forte crue, lorsque la retenue est pleine, le déversoir de sécurité entre en fonction pour évacuer la différence entre le débit entrant dans la retenue et le débit transitant dans le pertuis ; l'ouvrage perd de son efficacité pour les crues rares à exceptionnelles (wikydro. Développement-durable).

I-1.2 Impacts

Un barrage écrêteur de crues a pour objectif de diminuer la valeur des débits de pointe en aval. Cela peut avoir des conséquences préjudiciables sur la géomorphologie du lit en aval :

- La stabilisation des chenaux d'écoulement en lit mineur ;
- Le développement de la végétation ;
- La fixation des sédiments ;

Il est donc possible d'observer une diminution du transit des sédiments par charriage et une diminution de la débitance du lit pour les crues rares (diminution du Strickel du fait de la végétation).

Un barrage écrêteur de crues a pour effet de diminuer les vitesses d'écoulement au passage dans la retenue, il y a donc, rétention d'une partie des sédiments transportés par charriage et des sédiments transportés par suspension. Les matériaux transportés par suspension seront remis en suspension lors des crues suivantes. Les matériaux plus grossiers peuvent provoquer des petites accumulations durables. Un entretien périodique de la végétation sera nécessaire pour que le contrôle hydraulique reste bien au niveau du pertuis. La conséquence de ces dépôts est un déficit de matériaux solides à l'aval de l'ouvrage qui va

déclencher un mécanisme classique d'érosion progressive. Toutefois, cet effet reste modéré (wikydro. Développement-durable).

Un barrage à vocation unique d'écrêtement des crues et non vanné ne constitue pas une barrière à la mobilité des populations piscicoles.

Les conséquences d'une rupture éventuelle de l'ouvrage devront, dans tous les cas, être étudiées.

I-2 Barrage à pertuis vanné



Fig.2 Barrage à pertuis vanné (wikhydro.developpement-durable).

I-2.1 Fonctionnement

Il s'agit, par exemple, d'un ouvrage ayant également une vocation touristique, paysagère, écologique ou de soutien des étiages. Cependant, sauf pour les retenues de très grand volume, la vocation principale d'écroulement des crues est en général assez peu compatible avec d'autres usages du barrage.

Le pertuis peut être placé au point bas de la retenue et équipé d'une vanne, ou bien il peut être calé à une cote plus haute. Le principe général de fonctionnement est plus sophistiqué lorsque le pertuis est équipé de vannes que lorsque le passage de l'eau est libre. Cela exige alors une présence humaine pendant la crue, même en cas de dispositifs automatiques. La gestion est très délicate en cas de crue survenant alors que la retenue est partiellement pleine, ou en cas de crue à double pointe (wikhydro. Développement-durable).

I-2.2 Impacts

- Si le barrage écrêteur de crues est situé sur un cours d'eau à fort transport sédimentaire, le plan d'eau permanent en fond de retenue va rapidement se combler par piégeage du

transport solide de charriage et d'une partie du transport de suspension. Le stockage des matériaux charriés entraîne un déficit en matériaux solides dans le cours d'eau aval et génère donc une érosion progressive dont les conséquences peuvent être dommageables en particulier sur le niveau de la nappe.

- Les effets d'une retenue à niveau constant sur la qualité de l'eau seront liés essentiellement à l'eutrophisation. Si l'eau alimentant la retenue est riche en nitrates et/ou phosphates, le plan d'eau devient alors un milieu propice à l'accélération du processus d'eutrophisation, qui se manifeste par le développement estival d'algues, avec un impact visuel et, le cas échéant, olfactif. Ce développement est d'autant plus fort que la retenue à niveau constant est en général de faible profondeur, ce qui favorise l'élévation de température.
- Un plan d'eau à niveau constant, de faible profondeur et à très faible marnage, est très propice au développement des plantes aquatiques. Ce développement se produit quelques années après la mise en service, par apport de graines par voie naturelle ou anthropique. Le principal facteur de répartition des espèces est la profondeur de l'eau. La composition physico-chimique de l'eau et des sédiments influence également les espèces, qui sont donc un indicateur du niveau trophique de l'écosystème aquatique.
- Toujours dans le cas d'un plan d'eau à niveau constant en fond de retenue, l'élévation de température et l'eutrophisation vont entraîner une diminution de la teneur en oxygène avec un risque de mortalité piscicole. Ces phénomènes seront d'autant plus marqués que le débit naturel du cours d'eau est faible en été et, donc, que l'eau se renouvelle peu dans la retenue.
- Un barrage comportant un plan d'eau à niveau constant en fond de retenue constitue une barrière à la mobilité des populations piscicoles.

L'optimisation des diverses fonctions, parfois antagonistes de certains aménagements, passe, le plus souvent, par une gestion saisonnalisée des cotes des plans d'eau et des positions des vannes (plan d'eau abaissé aux périodes de risques d'inondation).

En amont d'un tel choix de gestion, il convient d'avoir réalisé une étude saisonnalisée de l'aléa de crue et de modélisation du fonctionnement hydraulique. La consigne de gestion, qui devra expressément figurer dans l'arrêté d'autorisation ou dans le règlement d'eau de l'aménagement, fixera précisément les cotes des plans d'eau et positions des vannes en fonction des dates dans l'année. Cette consigne devra rester simple (si possible deux

périodes seulement, quatre au maximum) et son application devra être facilement vérifiable (échelles limnimétriques).

I-3 Gestion en crue

La gestion en période de crues se fait à l'échelle de temps journalière, voire horaire sur certains bassins versants. Si la présence de vannes permet, dans certaines situations, une meilleure efficacité hydraulique, elle exige une présence humaine pour leur manœuvre ou leur contrôle, avec toutes les contraintes d'astreinte des personnels que cela induit et avec tous les risques d'erreur humaine liés à une mauvaise appréciation de la situation.

L'option pour des ouvrages vannés n'est envisageable que dans des situations de crues lentes et prévisibles et à condition que le gestionnaire des aménagements dispose de personnels techniques compétents, habitués à fonctionner sous régime d'astreintes. Cela vaut y compris en cas de vannes à fonctionnement automatique, car ces dispositifs sont susceptibles d'être pris en défaut (évidemment au plus mauvais moment) et une surveillance avec possibilité de reprise en commande manuelle est donc indispensable pendant toute la durée de fonctionnement. Des consignes de gestion très précises doivent être établies, anticipant toute la gamme des scénarios possibles. Comme dans le domaine des barrages, on établira deux documents :

La consigne de crue, document public, constituant par exemple un article de l'arrêté d'autorisation ou de règlement d'eau. Elle définit les contraintes et classe les objectifs à respecter vis-à-vis de la sécurité propre des ouvrages et vis-à-vis de son environnement aval et amont. Elle décrit le principe général de fonctionnement de l'aménagement et les cotes de manœuvre des vannes. Elle indique les circuits et le contenu des informations que le gestionnaire doit fournir aux autorités pendant un événement.

- La consigne d'exploitation en crue, document interne au gestionnaire de l'aménagement, mais soumis à l'approbation du service de contrôle. Elle définit les conditions de mobilisation des moyens du gestionnaire, avec le cas échéant plusieurs niveaux en fonction de l'importance de la crue. Elle décrit très précisément les tâches à accomplir par les agents, présentées sous forme claire.

Réglementation

Ces ouvrages écrêteurs de crues sont soumis à la même réglementation que les autres barrages de même classe.

Leur conception et leur réalisation doivent répondre aux mêmes exigences (respect de la réglementation, de l'application des règles de l'art...) que pour les autres types de barrages.

I-4 Surveillance

La surveillance du barrage vise principalement à suivre les évolutions du comportement du barrage et permet au propriétaire, assisté autant que nécessaire de son ingénieur-conseil, de décider de la nature et de l'urgence des interventions de maintenance ou de réparation. La réglementation générale sur la surveillance des barrages s'applique aux barrages écrêteurs de crues. Toutefois il est nécessaire d'être très rigoureux sur la surveillance visuelle.

La surveillance visuelle est une méthode qualitative qui intègre de très nombreux paramètres et qui permet de détecter la grande majorité des désordres et anomalies susceptibles d'affecter le barrage. On peut distinguer deux modes ou circonstances de visite du barrage écrêteur de crues et de ses abords : (1) la surveillance visuelle de routine ; (2) la surveillance à l'occasion des crues (en crue ou après les crues), particulièrement cruciale pour les barrages écrêteurs de crues ;

I-4.1 Surveillance visuelle de routine

En phase d'exploitation normale et en l'absence de tout indice inquiétant quant au comportement de l'ouvrage, la périodicité recommandée est mensuelle (voire bimestrielle pour les plus petits barrages). Il ne paraît pas raisonnable d'espacer plus ces visites. En tout état de cause et en application de la réglementation la périodicité des visites de routine est à indiquer dans les consignes écrites de surveillance établies sous la responsabilité du propriétaire, et soumises à l'approbation du Préfet.

Les visites doivent être plus rapprochées dès que l'on constate un phénomène nouveau.

I-4.2 Surveillance visuelle pendant la crue

C'est lors des crues que les barrages écrêteurs sont, par définition, soumis aux sollicitations les plus sévères : cote du plan d'eau élevée, débits importants dans le pertuis, voire sur le déversoir de sécurité, ruissellement de la pluie sur les parements, etc. Une observation renforcée s'impose donc dans ces occasions.

L'observation pendant la crue est riche d'informations mais elle n'est pas toujours possible car la crue peut survenir de nuit. Si cela s'avère possible (crue de jour) et si les instruments existent, on procède impérativement à une mesure sur les appareils d'auscultation (piézomètres, débits de drainage, ...).

L'objectif général de la surveillance en crue est de répertorier, repérer et évaluer les désordres ou présomptions de désordre liés plus ou moins directement à l'état "en charge" du barrage, révélant les zones de faiblesse de l'ouvrage (en complément de celles décelées lors des visites de surveillance à sec). Ces désordres peuvent résulter des contraintes hydrauliques ou mécaniques externes subies par le remblai (charge hydraulique, surverse, courant, vagues, ressauts et turbulences) ou des mécanismes internes déclenchés par la mise en eau (circulations d'eau à travers ou sous le corps de remblai, état de saturation, pressions interstitielles). Le talus amont peut être plus ou moins noyé, mais une attention toute particulière doit être portée au talus aval, à la recherche de fuites éventuelles : notamment en pied aval, dans les fossés de collecte ou au débouché des ouvrages de drainage.

I-4.3 Surveillance post crue

L'examen visuel d'un barrage écrêteur après la crue doit être systématique et réalisée le plus près possible après la fin de l'événement afin de bénéficier de toute la fraîcheur des indices (zones humides, laisses de crue, érosions, mouvements de terrain, etc.) et avant que ceux-ci ne s'estompent ou ne s'effacent : niveau maximum atteint par les eaux, état du pertuis et de l'évacuateur de crues, état des parements, indices d'érosion, de fuite non encore épuisée, etc. C'est, en effet, une occasion à ne pas manquer d'évaluer le comportement des ouvrages sous la charge hydraulique et de repérer d'éventuels travaux de réparation. Il convient aussi de faire une mesure des appareils d'auscultation s'ils existent, au cas où des évolutions liées à la crue y subsistent (niveau piézométrique, débit de fuite, etc.). L'efficacité tout comme le rendement de l'examen visuel post-crue dépend de l'état d'entretien des remblais : la présence d'une végétation indésirable et envahissante peut gravement la compromettre.

Toutes les observations, en crue et/ou post-crue, sont consignées dans le registre du barrage et font, le cas échéant, l'objet d'un dossier photographique. Elles conduisent, si nécessaire, à des travaux d'entretien d'urgence ou à des travaux plus importants de réfection.

Les barrages d'écrêtement, également connus sous le nom de barrages de retenue, sont des structures conçues pour retenir temporairement l'eau de pluie et les crues, permettant ainsi de réguler les débits dans les cours d'eau et de stocker l'eau pour divers usages. Contrairement aux grands barrages de retenue, les barrages d'écrêtement sont généralement de petite taille et peuvent être construits plus rapidement et à moindre coût.

Leur fonctionnement repose sur la capacité à intercepter et à retenir les eaux de ruissellement lors de pluies, puis à les libérer progressivement dans le sol, favorisant ainsi l'infiltration et la recharge des nappes phréatiques. Cette approche contribue à atténuer les effets des sécheresses et à améliorer la disponibilité en eau pour les populations et les écosystèmes locaux.

Voici quelques-uns des concepts et du fonctionnement des barrages d'écrêtement :

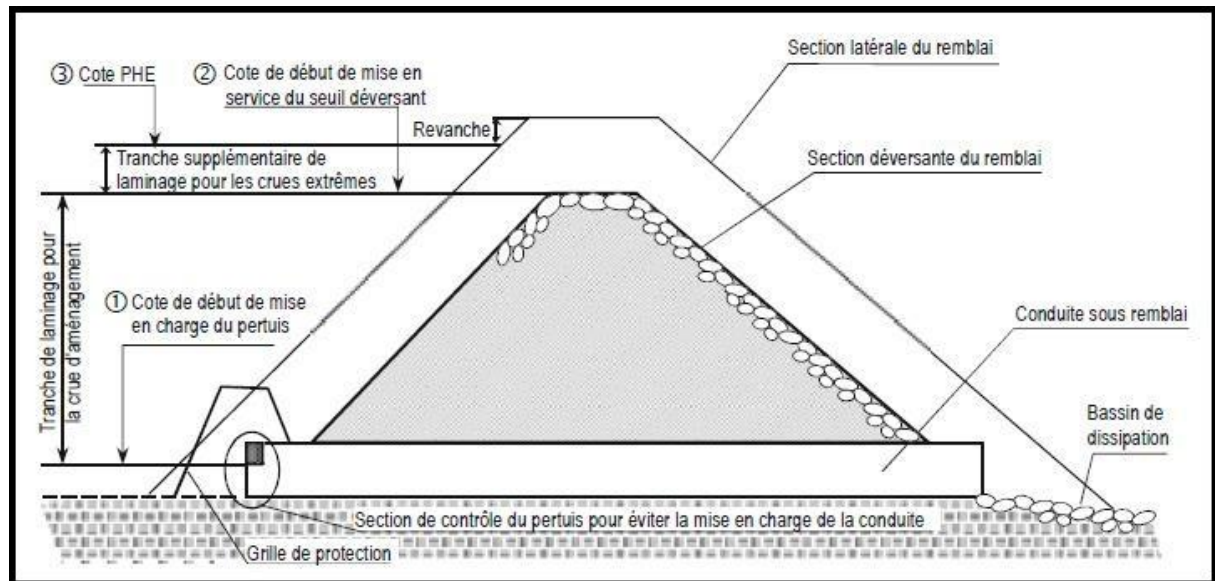


Fig.3 Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues (wikydro. developpement-durable).

I-5 Exemples de Barrages d'écrêtement dans le Monde

I-5.1 Barrage Hoover (États-Unis) : Construit sur le fleuve Colorado, le barrage Hoover est un exemple emblématique de barrage d'écrêtement. Il a été achevé en 1936 et sert à la fois à la régulation des crues, à la production d'énergie hydroélectrique et à l'approvisionnement en eau potable et irrigation (wikydro.developpement-durable).



1. **Fig.4** Barrage Hoover (États-Unis) (wikydro. developpement-durable).

I-5.2 Barrage d'Assouan (Égypte) : Situé sur le Nil, le barrage d'Assouan est un exemple important de barrage d'écrêtement en Afrique. Construit dans les années 1960, il a permis de réguler les crues du Nil, de produire de l'électricité et de créer un lac de retenue, le lac Nasser, qui sert à l'irrigation et à la pêche (wikydro.developpement-durable).



Fig.5 Barrage d'Assouan (Égypte) (wikydro. Developpement-durable).

L'intégration des logiciels PHREEQC et MODFLOW ; DSS dans l'évaluation des barrages d'écrêtement pour la recharge artificielle des nappes phréatiques en régions semi-arides offre une approche holistique pour comprendre à la fois les quantités et la qualité des eaux impliquées. Alors que MODFLOW permet de modéliser les flux d'eau souterraine et de prédire les variations de niveau des nappes en réponse à la recharge induite par les barrages, PHREEQC complète cette analyse en évaluant la qualité chimique des eaux souterraines résultantes.

I-6 Conclusion

Les barrages d'écrêtement offrent une approche innovante et durable pour la gestion de l'eau dans les régions semi-arides, en particulier en ce qui concerne la recharge artificielle des nappes phréatiques. En tirant parti de ces structures, les communautés peuvent atténuer les effets des sécheresses, améliorer la sécurité hydrique et soutenir le développement socio-économique à long terme. Toutefois, des études approfondies sur les aspects environnementaux, sociaux et économiques sont nécessaires pour garantir une mise en œuvre efficace et équitable de ces solutions. En plus de leur impact positif sur la recharge des nappes phréatiques, les barrages d'écrêtement peuvent également jouer un rôle crucial dans la préservation des écosystèmes locaux en régulant les flux d'eau, en créant des habitats aquatiques et en contribuant à la conservation de la biodiversité. De plus, ces structures peuvent offrir des opportunités pour le développement d'activités économiques telles que le tourisme, la pêche et l'agriculture, tout en renforçant la résilience des communautés face aux défis climatiques.

Cependant, pour garantir que ces bénéfices potentiels se concrétisent et que les impacts négatifs sont atténués, il est crucial de mener des études approfondies et participatives qui prennent en compte les préoccupations environnementales, sociales et économiques. Cela nécessite une collaboration étroite entre les décideurs, les experts techniques, les parties prenantes locales et les communautés affectées pour élaborer des stratégies de gestion intégrées et durables.

En résumé, les barrages d'écrêtement offrent un potentiel considérable pour la gestion de l'eau dans les régions semi-arides, mais leur mise en œuvre efficace nécessite une approche holistique et une planification minutieuse basée sur des données scientifiques solides et une participation active des parties prenantes.

1- MODELISATION MATHÉMATIQUE EN HYDROGÉOLOGIE

2-1 Définition d'un modèle

Un modèle est un outil physique ou mathématique conçu par l'homme afin de représenter le comportement d'un phénomène physique (Bonnet, 1987). Un modèle peut être mis en œuvre grâce au concours :

- des sciences physiques qui fournissent les lois élémentaires constituant le modèle ;
- des sciences naturelles qui permettent la description du système réel.

Pour un système aquifère, un modèle peut être :

- physique, comme c'est le cas du modèle réduit formé par des billes en verre.
- analogique, dans ce cas l'aquifère est représenté par des matériaux conducteurs. Ce type de modèle repose sur le fait que les transferts électriques et les transferts de fluides en milieux poreux sont décrits par une représentation mathématique analogue.

- mathématique, dans ce cas l'écoulement est représenté par des équations mathématiques dont la résolution constitue un modèle. Si le modèle est homogène et présente des limites simples, la résolution est analytique (cas du modèle de Theis). Dans le cas contraire, on fait recours aux techniques numériques et aux calculateurs.

A la base de ces modèles, il existe un grand nombre de méthodes numériques, on peut classer la majorité d'entre elles en deux catégories principales :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.

3- Modèle mathématique

3-1 Equation de la diffusivité

La forme générale de la loi qui décrit l'écoulement des eaux souterraines se traduit par l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\operatorname{div}(\overline{\mathbf{K}}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \omega \quad (2.1-1)$$

Où :

$\overline{\overline{K}}$ est le tenseur de perméabilité du milieu

h est la cote piézométrique

S_s est le coefficient d'emménagement spécifique

ω est un terme source qui traduit un prélèvement ou un apport.

Notons que K est un tenseur symétrique d'ordre 3 qui, si l'on exprime dans la base d'isotropie, s'écrit :

$$\overline{\overline{K}} = \begin{pmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \end{pmatrix}$$

Dans le cas d'une nappe captive et si on tient compte des hypothèses de Dupuit, l'équation s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial y} - \omega \quad (2.1-2)$$

Puisque h ne dépend pas de z, on peut intégrer sur l'épaisseur de la nappe, on obtient finalement :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (2.1-3)$$

Où T_x et T_y sont les composantes du tenseur de transmissivité.

$$\text{On a : } \overline{\overline{T}} = \int \overline{\overline{K}} dz$$

S est le coefficient d'emménagement

$$S = \int_e S_s dz$$

e est l'épaisseur de la nappe

W est le débit de source.

Pour les nappes libres, si on adopte, de même les hypothèses de Dupuit on peut établir facilement :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2\varepsilon \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - W^* \quad (2.1-4)$$

Où :

ε est la porosité

W^* représente le terme source et la percolation verticale [LT^{-1}]

3-2 Les conditions aux limites

On distingue trois types de conditions aux limites, pour un milieu aquifère :

- Limite à potentiel imposé, pour laquelle la cote piézométrique h est connue sur les frontières.
- Limite à flux imposé où la dérivée normale du potentiel est connue sur les frontières. Notons que ce flux peut être nul.
- Limite mixte qui se traduit par :

$$Q = K(h - h_0)$$

Où :

Q est le flux échangé entre le système aquifère et son voisinage à travers la limite.

K est un coefficient qui caractérise la perméabilité de la limite.

h et h_0 sont respectivement le potentiel dans le domaine d'étude et son voisinage à proximité de la limite.

II - Modèle MODFLOW

II -1 Introduction

Ce chapitre présente le logiciel MODFLOW, un outil de modélisation numérique largement utilisé pour simuler les écoulements souterrains. Nous décrivons ici une vue d'ensemble du logiciel, de son fonctionnement et de son utilisation dans le contexte de notre étude sur la recharge artificielle des barrages.

II-2 Description du logiciel MODFLOW

MODFLOW est un logiciel de modélisation numérique développé par l'US Geological Survey (USGS). Il est conçu pour résoudre les équations de l'écoulement souterrain en trois dimensions en prenant en compte les propriétés hydrogéologiques du sous-sol, telles que la conductivité hydraulique, la capacité de stockage et les conditions aux limites.

II-3 Fonctionnalités principales

MODFLOW offre plusieurs fonctionnalités clés pour la modélisation des écoulements souterrains, notamment :

- Modélisation en trois dimensions : MODFLOW permet de représenter les aquifères en trois dimensions, ce qui permet une modélisation plus réaliste des écoulements.
- Gestion des propriétés hydrogéologiques : Le logiciel permet de définir les propriétés hydrogéologiques du sous-sol, telles que la conductivité hydraulique et la capacité de stockage.
- Simulation des conditions aux limites : MODFLOW permet de simuler différentes conditions aux limites, telles que les écoulements entrants et sortants, les pompes et les barrages.

II-4 Utilisation dans notre étude

Dans le cadre de notre étude sur la recharge artificielle des barrages, nous avons utilisé MODFLOW pour modéliser les écoulements souterrains dans le bassin versant de l'Oued El kebir. Nous avons utilisé les données hydrogéologiques et les propriétés du sous-sol pour définir le modèle et simuler les différents scénarios de recharge artificielle.

II-5 Méthodologie d'utilisation

Pour utiliser MODFLOW dans notre étude, nous avons suivi les étapes suivantes :

- 1. Collecte des données hydrogéologiques** : Nous avons collecté les données sur la géologie, l'hydrologie et les propriétés du sous-sol du bassin versant de l'Oued El kebir.

2. Préparation du modèle : Nous avons préparé un modèle en trois dimensions en définissant les propriétés hydrogéologiques du sous-sol et en délimitant les limites du modèle.

3. Simulation des écoulements : Nous avons utilisé MODFLOW pour simuler les écoulements souterrains dans le bassin versant en fonction des conditions météorologiques et des scénarios de recharge artificielle.

II-6 Limitations et considérations

Bien que MODFLOW soit un outil puissant, il présente certaines limitations et considérations, notamment :

- Simplifications du modèle : Les modèles utilisés dans MODFLOW sont simplifiés et peuvent ne pas refléter tous les processus réels se produisant dans un aquifère.
- Sensibilité aux paramètres : Les résultats de MODFLOW peuvent être sensibles aux paramètres de modèle, tels que la conductivité hydraulique et la capacité de stockage.

II- 7 Autres outils et méthodes utilisés

Outre MODFLOW, nous avons utilisé d'autres outils et méthodes pour notre étude, notamment :

- PhreeqC : Pour la modélisation des réactions chimiques entre l'eau de forage et l'eau brute.
- SIG (Système d'Information Géographique) : Pour la cartographie et l'analyse spatiale des données géologiques et hydrologiques.
- Statistiques descriptives : Pour l'analyse des données hydrogéologiques et la caractérisation du sous-sol.

III- Modélisation hydrogéochimique et spéciation par PhreeqC

Le logiciel PhreeqC, est un outil puissant utilisé pour modéliser les réactions chimiques et les équilibres thermodynamiques dans les systèmes aquifères. Nous présentons ici une vue d'ensemble du logiciel, de son fonctionnement et de son utilisation dans le contexte de notre étude sur la recharge artificielle des barrages.

PHREEQC version 2 est un programme écrit en C par Parkhurst et Apello (1999) et diffusé par l'US Geological Survey. PHREEQC réalise la spéciation des espèces chimiques dans une solution aqueuse ainsi que les indices de saturation des minéraux. Il simule pour les gaz, les phases solides et aqueuses, à différentes températures des réactions chimiques (précipitation, dissolution...) en batch ou avec du transport en 1D (convection, dispersion). Il tient compte de lois cinétiques dans certaines réactions mais simule aussi des réactions

surface (adsorption et complexation). La base de données thermodynamique utilisée est minteq. V4. dat prenant en compte la spéciation de l'arsenic et du manganèse et l'adsorption sur les Ox hydroxydes de l'arsenic et du manganèse mais aussi d'éléments majeurs (calcium, magnésium, phosphate...) et d'éléments traces.

Dans un premier temps, les analyses des eaux superficielles et des eaux souterraines sont rentrées dans le modèle et les spéciations de ces eaux calculées par le modèle.

Le modèle réécrit toutes les équations chimiques pour les espèces rentrées. La spéciation des espèces et l'équilibre de la solution sont obtenus quand toutes les équations d'action de masse sont résolues.

L'objectif suivant est de simuler selon des scénarios simplifiés le fonctionnement du site concernant les interactions possibles entre les eaux superficielles et les sols présents dans la zone cible. On tiendra compte de la précipitation d'Ox hydroxydes de fer, de l'adsorption de l'arsenic et du manganèse sur ces phases. Puis, le pH et le Eh des eaux seront modifiés pour estimer s'il y a une sorption ou une désorption de ces éléments.

La complexation de surface est traitée avec le modèle de surface à Double Couche Diffuse décrit par Dzombak et al (1990) qui fait intervenir deux types de sites de surface à adsorption faible

III-1 Description du logiciel PhreeqC

PhreeqC est un logiciel de chimie des eaux souterraines développé par l'US Geological Survey (USGS). Il est conçu pour résoudre des problèmes liés à l'équilibre chimique des eaux souterraines en prenant en compte les réactions chimiques, les équilibres d'espèces, et les processus de transport. Le logiciel utilise une approche basée sur les équilibres thermodynamiques pour prédire la distribution des espèces chimiques dans un système aquifère.

III-2 Fonctionnalités principales

PhreeqC offre plusieurs fonctionnalités clés pour l'analyse des eaux souterraines, notamment

- Calcul des équilibres chimiques : PhreeqC utilise les données thermodynamiques pour calculer les concentrations des différentes espèces chimiques en équilibre dans un système aquifère.

- Modélisation des réactions chimiques : Le logiciel permet de modéliser les réactions de précipitation, de dissolution, de complexation et d'oxydation-réduction qui peuvent se produire dans un aquifère.

- Simulation des échanges d'ions : PhreeqC peut simuler les échanges d'ions entre les phases solides, liquides et gazeuses d'un système aquifère.

III-3 Utilisation dans notre étude

Dans le cadre de notre étude sur la recharge artificielle des barrages, nous avons utilisé PhreeqC pour modéliser les réactions chimiques entre l'eau de forage et l'eau brute. Nous avons utilisé les données chimiques des deux types d'eau pour simuler les changements de composition chimique résultant du mélange.

III -4 Méthodologie d'utilisation

Pour utiliser PhreeqC dans notre étude, nous avons suivi les étapes suivantes :

Collecte des données chimiques : Nous avons collecté les données chimiques de l'eau de forage et de l'eau brute, y compris les concentrations en calcium, chlorure, sodium, sulfates, etc.

Préparation du modèle : Nous avons préparé un modèle chimique en spécifiant les espèces chimiques présentes dans les deux types d'eau et en définissant les réactions possibles.

Simulation du mélange : Nous avons utilisé PhreeqC pour simuler le mélange des deux eaux en spécifiant les proportions de chaque type d'eau.

Analyse des résultats : Nous avons analysé les résultats de la simulation pour comprendre les changements de composition chimique et les implications pour la gestion de l'eau.

III-5. Limitations et considérations

Bien que PhreeqC soit un outil puissant, il présente certaines limitations et considérations, notamment :

- Simplifications des modèles : Les modèles utilisés dans PhreeqC sont simplifiés et peuvent ne pas prendre en compte tous les processus réels se produisant dans un aquifère : Les résultats de PhreeqC peuvent être sensibles aux données d'entrée, notamment aux concentrations initiales des espèces chimiques.
- Besoin d'expertise : L'utilisation efficace de PhreeqC nécessite une certaine expertise en chimie des eaux souterraines et en modélisation

Chapitre VII :

Résultats et discussion

1- Introduction

Dans les régions arides et semi-arides, où l'évaporation est intense et les précipitations limitées, les eaux souterraines jouent un rôle crucial en fournissant un espace de stockage naturel. Cela permet une gestion rationnelle de l'eau pour prévenir l'évaporation excessive et augmenter son utilisation (Zamani et al., 2022). Face à ces défis, les scientifiques ont cherché des outils de gestion appropriés, et la modélisation hydrologique et hydrogéologique est devenue une solution reconnue pour soutenir les processus décisionnels en matière de gestion durable des ressources en eau (Enemark et al., 2019). Cette modélisation vise à simplifier la représentation des systèmes hydrologiques et hydrogéologiques, permettant de mieux comprendre leur fonctionnement et leurs interactions avec l'environnement, ainsi que de prédire leur comportement futur. L'étude de ces environnements conduit à la compréhension des processus actifs et à leur formalisation mathématique, aboutissant à la création de modèles conceptuels, des outils puissants pour aborder les défis à différentes échelles spatiales et temporelles (Peng, 2002).

En parallèle, dans le domaine de l'hydrochimie, plusieurs modèles sont utilisés pour résoudre des systèmes d'équilibre complexes, calibrer des données expérimentales et évaluer différents scénarios. Parmi ces outils, Phreeqc se démarque comme une référence, permettant la modélisation de réactions et d'équilibres chimiques variés. Développé par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo, ce logiciel, diffusé par l'US Geological Survey, offre la possibilité de simuler les réactions chimiques et les processus de transport dans différents contextes, qu'il s'agisse d'eaux naturelles, polluées, d'expériences en laboratoire ou de processus industriels. Son large éventail de fonctionnalités inclut la modélisation de réactions cinétiques, le transport unidimensionnel et la modélisation inverse, permettant ainsi d'identifier les réactions responsables des compositions observées dans l'eau. Avec ses bases de données chimiques étendues, Phreeqc s'impose comme un outil indispensable pour analyser et prédire la qualité des eaux de pluie, des eaux du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface

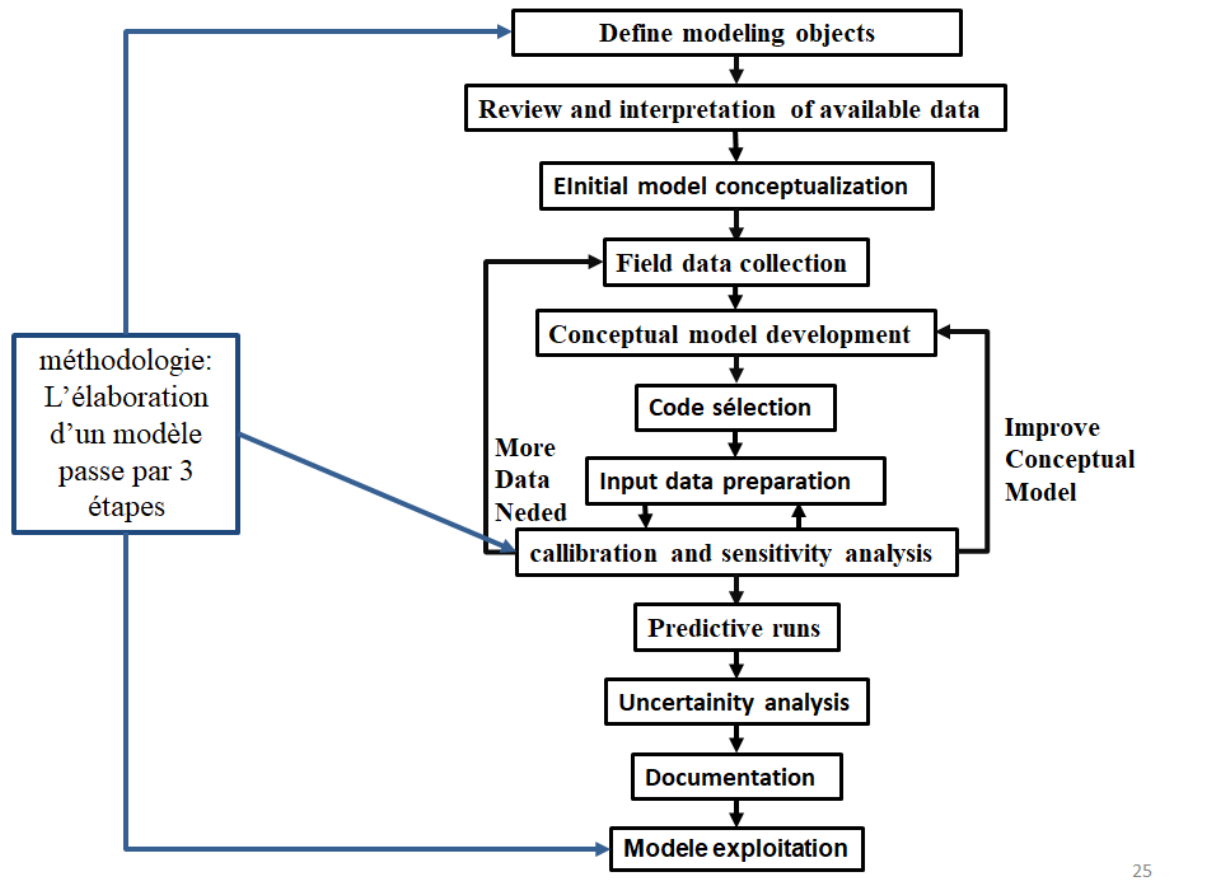
2- Logiciel de modélisation

La géométrie de l'aquifère étudiée et les données disponibles sont permis d'exploiter le programme de simulation Visual MODFLOW Flex 6.1 mis au point par Waterloo hydrogeology logiciels.

Visual MODFLOW(VMOD) Flex est un logiciel de modélisation tridimensionnelle des eaux souterraines pour l'écoulement des eaux souterraines et de transport des contaminants. Il utilise des données SIG brutes pour construire des modèles conceptuels et numériques, génère et simule des modèles à l'échelle régionale et locale avec un support pour MODFLOW-LGR (Local Grid Refinement). L'environnement du modèle offre des vues 2D et 3D simultanées (Waterloo Hydrogeologic,2019).

Le logiciel MODFLOW permet de simuler les écoulements souterrains et estimer la recharge de la nappe. C'est un modèle à bases physiques, déterministe, capable de représenter des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies.

Le modèle permet d'estimer les ressources en eau à l'état actuel et de prévoir leur changement dans la future par proposition des scénarios, qui peuvent être choisis comme une stratégie de gestion de la ressource en eau sans trop de risque de défaillance.



25

Fig1. Diagramme processus de fonctionnement du modèle MODFLOW.

2-1 Entrée de données (data input)

Après avoir défini les conditions initiales et les conditions limites, et discrédité le domaine à modéliser dans un certain nombre de mailles, nous introduisons pour chaque maille les données physiques du système comme le gradient piézométrique de la carte de référence, géométrie aquifère paramètres hydrodynamiques T, K, S., paramètres climatiques (effective recharge)

Avant de démarrer les opérations de modélisation en régime permanent, il est nécessaire que les questions liées au fonctionnement du système aquifère soient clarifiées comme données d'entrée.

Les entrées	DESCRIPTION	SOURCE
Géométrie DU MODÈLE		
Top de couche	DEM	Investigation topographique
Sol	Carte Piézométrique	Etude hydrogéologique du bassin de El Malabiod,
Bottom	Iso- profondeur carte	Prospection électrique
Puit	Puits de pompage et d'observation	Rouabhia 2006 ; ABH Tébessa
PROPRIÉTÉS		
Conductivité (Kx, Ky, Kz)	Essais de pompage (données hydrogéologiques)	Fiche descriptive du puits
Initiale Head		
Stockage		
CONDITIONS AUX LIMITES		
Piézométrie constante	Espace alimentation partie crépinée	Carte Topographique
Évapotranspiration	Evapotranspiration (mm/an), profondeur d'extraction (mm)	Données climatiques ; station météorologique de Tébessa ; Ogimet site web
Flux spécifié	Taux de recharge par zone	Étude Géologique
Rivière	Etages, lit, profondeur, épaisseur et conductivité	Investigation par satellite et sur le terrain

Tab.1 différentes données utilisées pour l'élaboration du modèle

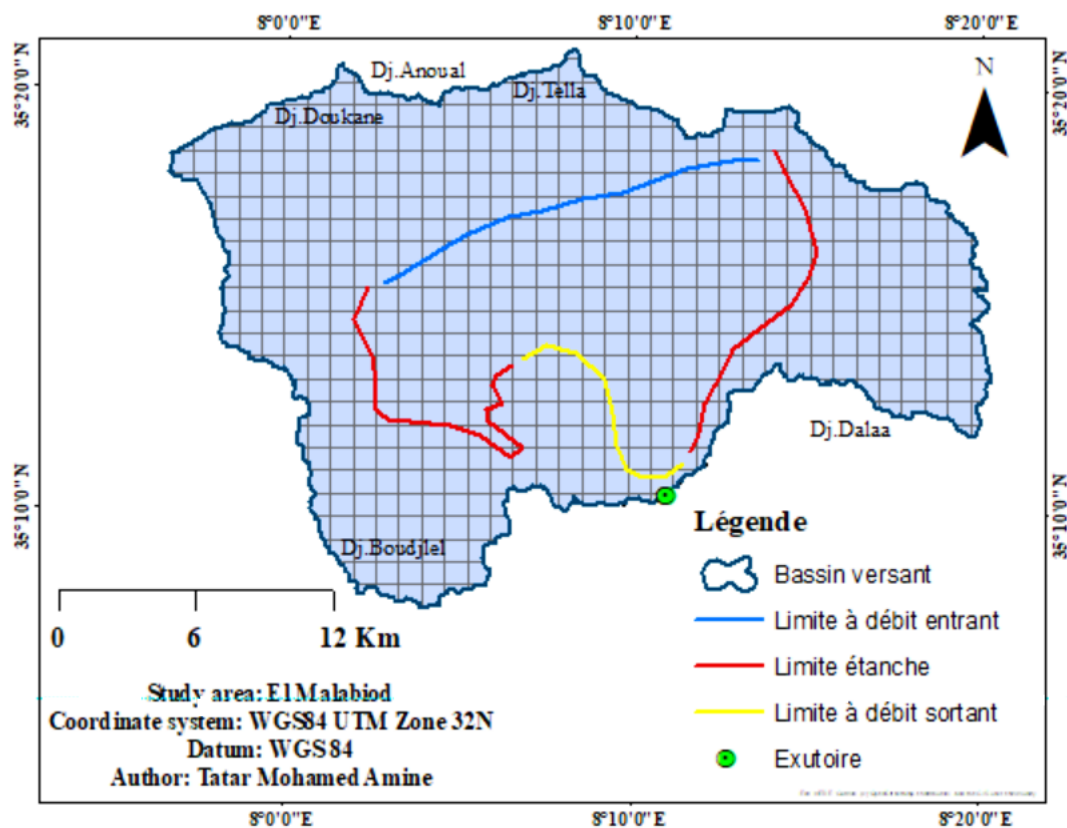


Fig.1 les conditions aux limites de la zone d'étude.

2-2 Calibration du modèle

L'objectif de cette phase est de minimiser les écarts entre les réponses du modèle (calculées) et celles du système (observées). Cette calibration est importante, car elle nous permettra d'effectuer des simulations sur le terrain étudié (Mouna Djellali, 2024).

2-3 Exploitation du modèle

C'est la dernière étape où le modèle révèle son utilité. Son but principal est de prévoir la réponse hydrodynamique future du système aquifère aux scénarios de développement possibles. (Exploitation, sécheresse, recharge, etc.).

3- Etapes de modélisation conceptuelle

3-1 Zone de propriété

Afin de créer les couches de zones appropriées, les niveaux supérieur et inférieur sont désormais ajoutés au modèle. Les valeurs de chute initiales, les propriétés de stockage et la

conductivité hydraulique (k_x , k_y et k_z) sont ajoutées aux couches spécifiques de chaque couche.

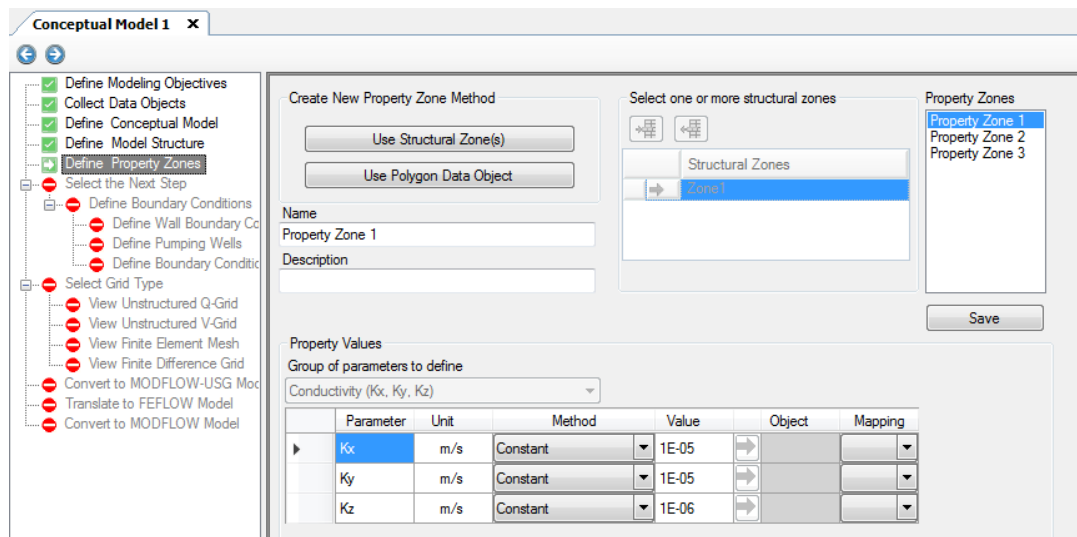


Fig.2 Introduction des paramètres hydrodynamiques de la nappe aquifère.

3-2 Conditions aux limites

Certaines des conditions limites du modèle les plus susceptibles d'exister comprennent la recharge, les cours d'eau, les réservoirs, l'évapotranspiration, les puits de pompage, etc. (Fig. 3-a, b).

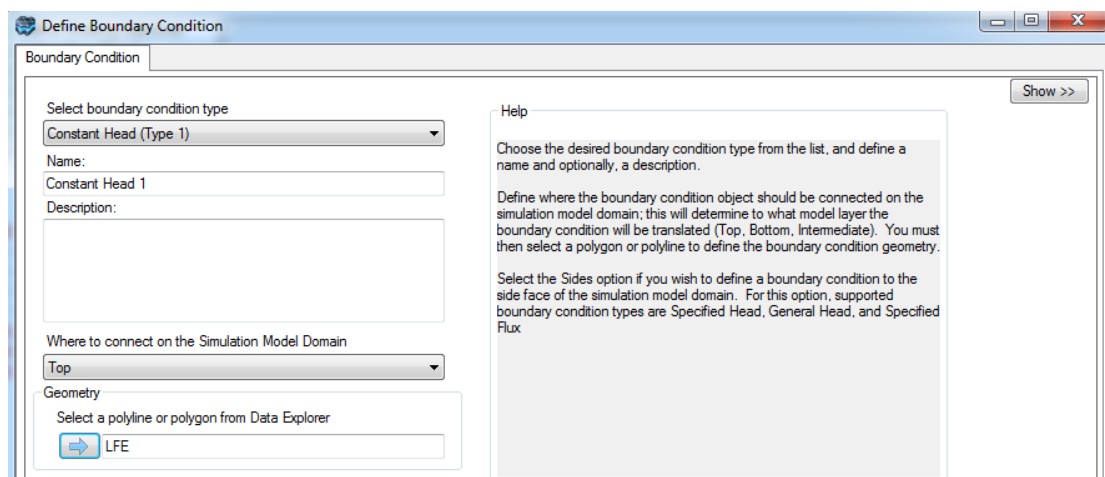


Fig.3-a définition des conditions aux limites du modèle.

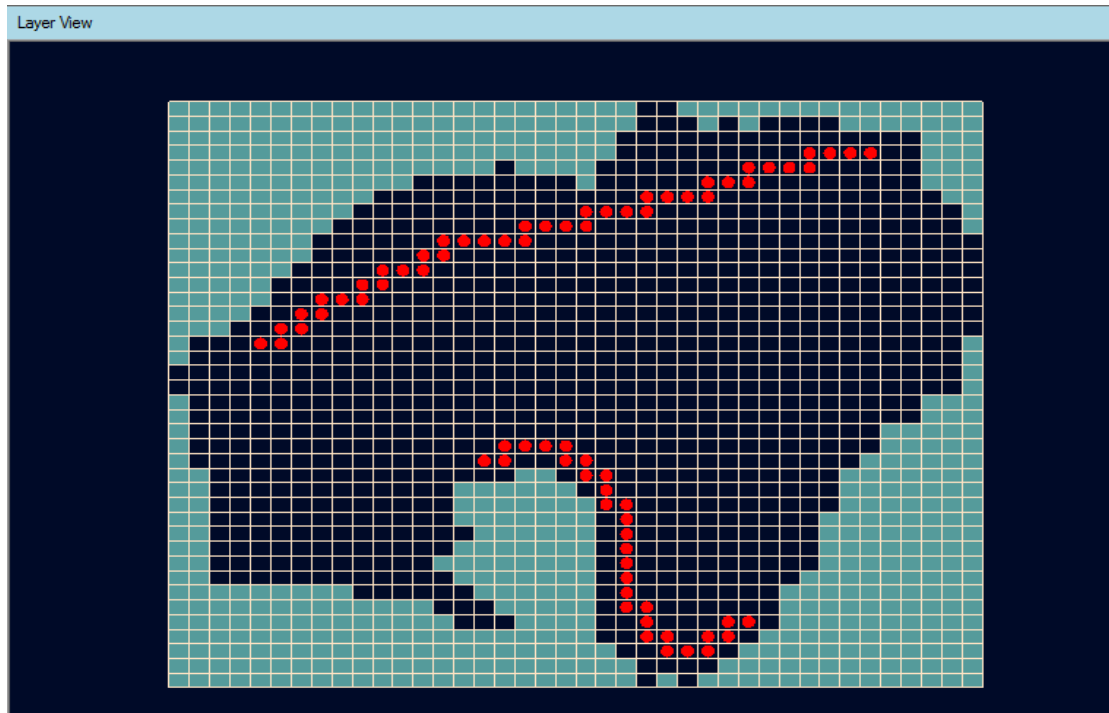


Fig.3-b définition des conditions aux limites du modèle.

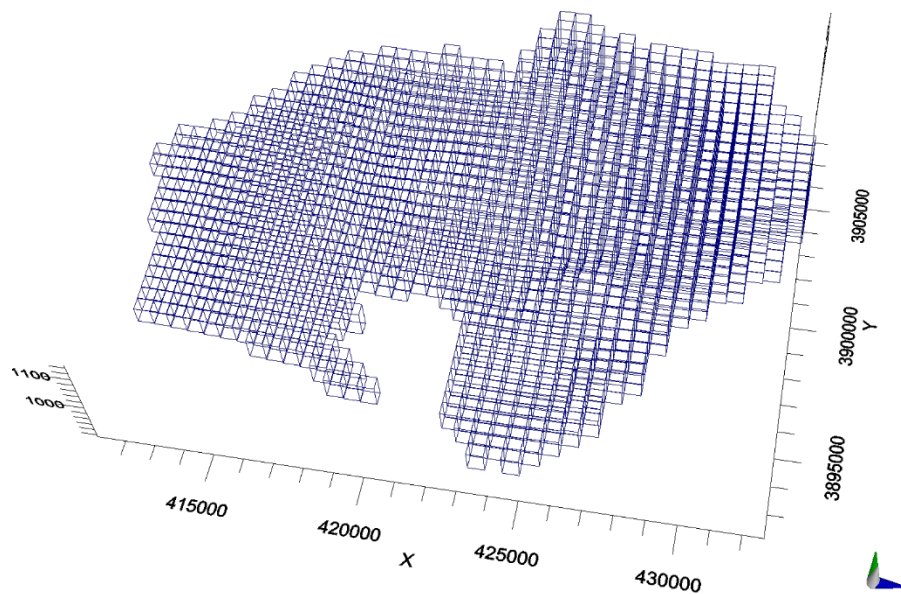


Fig.4 Grille numérique 3D créée pour le modèle d'eau souterraine du Miocène

4- Exécution du Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel, qui définit la portée réelle de la question et l'objectif du modèle, constitue la première étape du développement du modèle. Le développement d'un modèle conceptuel a lieu après les données pertinentes.

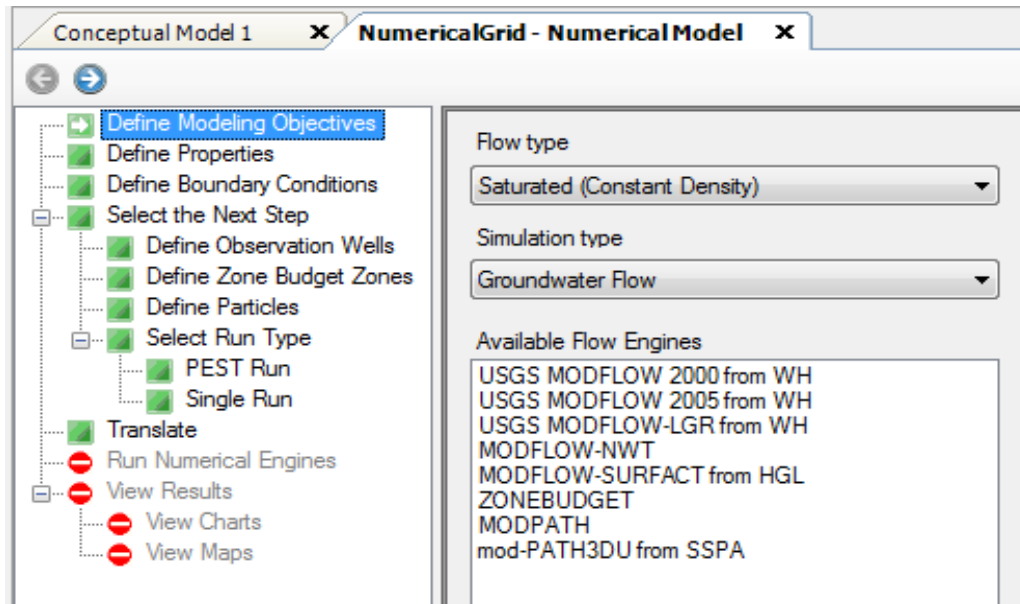


Fig.5 conversion du modèle conceptuel en modèle numérique.

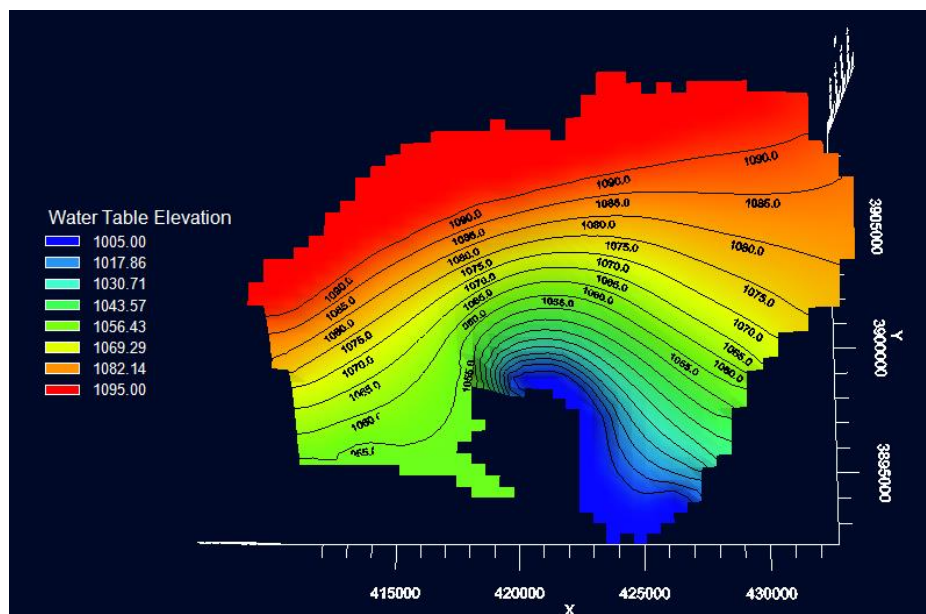


Fig.6 Variation de la piézométrie en régime permanent de l'année 2001, avant l'introduction des puits de pompage (Ramdani et Tatar, 2024).

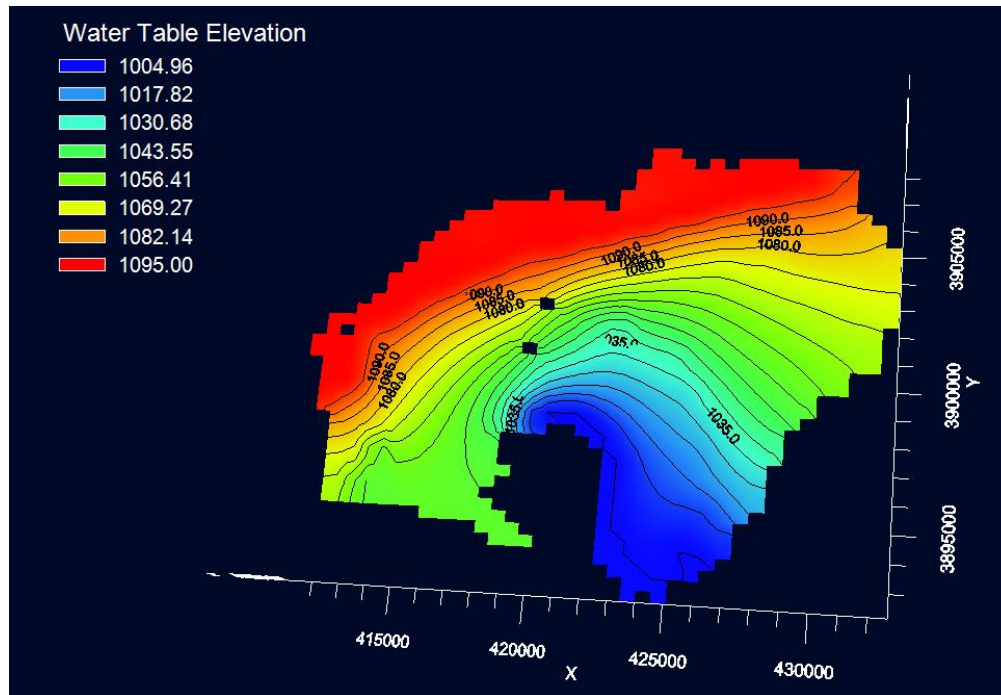


Fig.7 Variation de la piézométrie en régime permanent de l'année 2001, avec introduction des puits de pompage (Ramdani et Tatar, 2024).

La carte simulée (figure 7) montre une relative distribution de la piézométrie identique dans sa morphologie à celle observée. L'écoulement s'effectue naturellement du nord au sud, le drainage de la nappe s'effectue par l'oued El Malabiod, avec ses principaux affluents qui constituent un exutoire du système aquifère. A cet effet le modèle reste valable et le décalage entre les niveaux piézométriques calculés et mesurés dans certaines zones sont probablement dues à l'imprécision des mesures, et aux conditions hydrogéologiques spécifiques.

5- Calibration du model

Malgré quelques écarts entre les niveaux piézométriques calculés et mesurés dans certaines zones, le modèle reste valide, probablement en raison d'erreurs de mesure et de conditions hydrogéologiques spécifiques.

La corrélation linéaire entre les charges hydrauliques acceptables observées et calculées donne une erreur RMSE de l'ordre de 19,47 % avec un coefficient de corrélation de 0,82

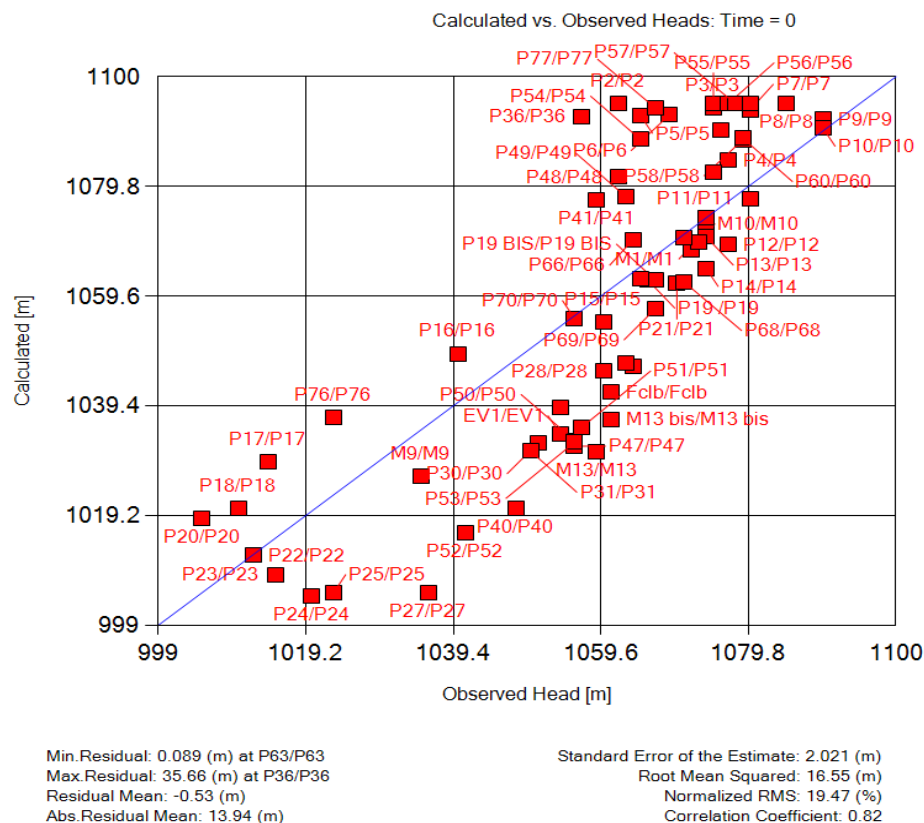


Fig.8 calage du modèle.

6- Perspectives

Concernant la deuxième étape de cette étude, un modèle numérique transitoire 3D, basé sur la méthode des différences finies, sera utilisé pour simuler l'écoulement des eaux souterraines de 2023 à 2033 à l'aide du même logiciel (Visual MODFLOW Flex). Au cours du processus de modélisation, trois scénarios seront être proposé :

- (1) Maintenir le même débit de pompage du puits sans aucune recharge,
- (2) Recharge de toute la zone d'étude par infiltration efficace, sans pompage.
- (3) Introduire une recharge artificielle par des bassins d'infiltration des eaux de surface.

7- Conclusion

L'application du logiciel MODFLOW Flex dans le contexte de l'approvisionnement en eau et de la gestion des ressources, notamment en matière de recharge artificielle, offre une approche sophistiquée et efficace. Cette technologie permet une modélisation précise des débits d'eau, facilitant une prise de décision éclairée pour une utilisation durable et équilibrée des ressources en eau. La recharge artificielle apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer la disponibilité des ressources en eau, contribuant ainsi à une gestion plus résiliente et durable des aquifères.

PHREEQC est un logiciel de simulation développé par David L. Parkhurst et C.A.J. Appelo et distribué par l'US Geological Survey. Il permet de modéliser les réactions chimiques et les processus de transport dans divers environnements aquatiques, qu'ils soient naturels, pollués, en laboratoire ou industriels. Le programme se base sur la chimie d'équilibre des solutions aqueuses avec des interactions avec les minéraux, gaz, solutions solides, échangeurs et surfaces de sorption. Il offre également la capacité de modéliser les réactions cinétiques et le transport unidimensionnel, incluant la dispersion, la diffusion et le mouvement des solutés dans des milieux à double porosité, ainsi que la diffusion multi composante. PHREEQC intègre une fonctionnalité de modélisation inverse puissante pour identifier les réactions responsables des compositions d'eau observées le long d'une ligne d'écoulement ou lors d'expériences. Il dispose de bases de données chimiques extensibles pour appliquer ses capacités à une grande variété de réactions chimiques influençant la qualité des eaux de pluie, du sol, souterraines et de surface.

1. Capacités de PHREEQC

PHREEQC capable de simuler une variété de réactions géochimiques pour un système, y compris :

- Le mélange des eaux,
- L'ajout de réactions irréversibles nettes à la solution,
- Dissolution et précipitation des phases pour atteindre l'équilibre avec la phase aqueuse,
- Les effets du changement de température.

- Les équilibres d'échange d'ions,
- Équilibres de complexation de surface,
- les équilibres de la phase gazeuse à pression fixe
- La modélisation géochimique inverse.
- Les réactions à contrôle cinétique,
- Variation du nombre de sites d'échange ou de surface en fonction d'un minéral ou d'un réactif cinétique,

PHREEQC calcule les concentrations d'éléments, les molalités et les activités des espèces aqueuses, le pH, le pe (log négatif de l'activité conventionnelle de l'électron), les indices de saturation et les transferts molaires des phases pour atteindre l'équilibre en fonction de réactions géochimiques réversibles et irréversibles spécifiées...et

1. Traitement de données et interprétation des résultats

Tab.1 Les concentrations en éléments physico-chimiques des eaux de surface (brute) et eau de forage.

Solution 1	Eau de forage
Temp	19.3
Ph	7.48
Pe	4
Redox	Pe
Units	Mg/l
Density	1
Cl	144.84
Mg	2 mmol/l
Ca	102
Na	57
K	2.5
S (6)	132
Alkalinity	244
Water	1
Ratio 0.1	Eau brute
Ratio 0.9	Eau de forage

Solution 2	Eau Brute
Temp	20.5
Ph	8.16
Pe	4
Redox	Pe
Units	Mol/l
Density	1
Cl	195.96
Mg	6.08 mmol/l
Ca	220
Na	130
K	17.5
S(6)	232
Alkalinity	310
Water	1
Ratio 0.3	Eau brute
Ratio 0.7	Eau de forage

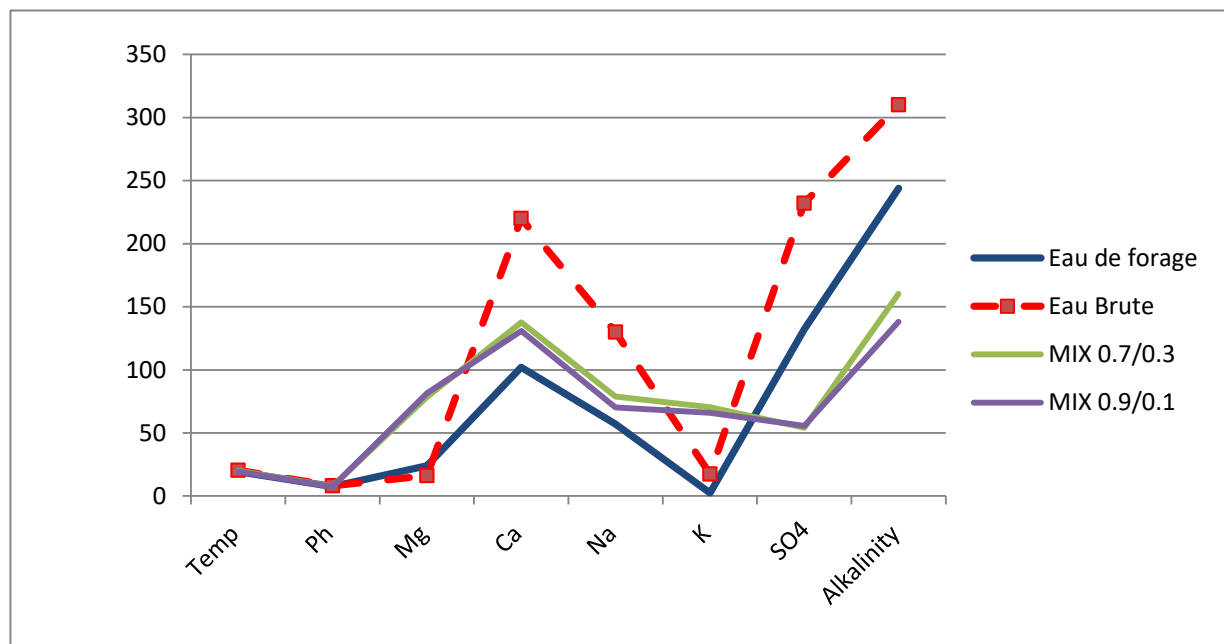


Fig.1 : linéaire concentration d'éléments chimique des eaux de surface, aux souterraines et eaux mélangées.

1-Intéropération pour le ratio 90% eau de forage 10% eau brute

- **Composition chimique** : Le mélange montre une augmentation significative des concentrations en calcium (Ca), en chlorure (Cl), en sodium (Na) et en sulfates (S (6)). Cela suggère que l'eau de forage, qui est plus riche en ces éléments que l'eau brute, a influencé la composition du mélange final, même avec un ratio de 90% d'eau de forage et 10% d'eau brute.
- **PH et alcalinité** : Le pH du mélange est devenu légèrement plus bas (passant de 8,16 pour l'eau brute à 7,48 pour l'eau de forage). Cela est probablement dû à l'augmentation de la concentration en H⁺ provenant de l'eau de forage, même avec un faible pourcentage dans le mélange final.
- **Indices de saturation** : Les indices de saturation indiquent que le mélange est légèrement sursaturé en aragonite et calcite, ce qui signifie que ces minéraux pourraient précipiter s'il y avait des conditions favorables. Cela peut être important pour la gestion de l'eau afin d'éviter le colmatage des canalisations ou des équipements, même avec une petite proportion d'eau brute.
- **Autres observations** : Le mélange est sous-saturé en halite (Na Cl) et en sylvite (KCl), ce qui suggère que ces minéraux ne précipiteront pas dans le mélange, même avec un faible pourcentage d'eau brute.

En conclusion, le mélange des deux eaux, même avec un **ratio** de **90%** d'eau de forage et **10%** d'eau brute, a entraîné des changements significatifs dans la composition chimique et

les propriétés physico-chimiques de l'eau. Il est important de surveiller ces changements pour éviter les problèmes potentiels liés à la précipitation de minéraux ou à d'autres réactions indésirables.

2-Intéprétation pour le ratio 70% eau de forage 30% eau brute

- **Composition chimique** : La nouvelle composition chimique montre une augmentation significative des concentrations en calcium (Ca), en chlorure (Cl), en sodium (Na) et en sulfates (S(6)). Cela suggère que l'eau de forage, qui est plus riche en ces éléments que l'eau brute, a influencé la composition du mélange final, même avec un nouveau **ratio** de **70%** d'eau de forage et **30%** d'eau brute.
- **PH et alcalinité** : Le pH du mélange est devenu légèrement plus bas (passant de 8,16 pour l'eau brute à 7,80 pour l'eau de forage). Cela est probablement dû à l'augmentation de la concentration en H⁺ provenant de l'eau de forage, même avec un pourcentage plus élevé dans le mélange final.
- **Indices de saturation** : Les indices de saturation indiquent que le mélange est légèrement sursaturé en aragonite et calcite, ce qui signifie que ces minéraux pourraient précipiter s'il y avait des conditions favorables. Cela peut être important pour la gestion de l'eau afin d'éviter le colmatage des canalisations ou des équipements, même avec une plus grande proportion d'eau brute.
- **Autres observations** : Le mélange est sous-saturé en halite (Na Cl) et en sylvite (KCl), ce qui suggère que ces minéraux ne précipiteront pas dans le mélange, même avec une plus grande proportion d'eau brute.

En conclusion, le nouveau mélange des deux eaux, avec un ratio de **70%** d'eau de forage et **30%** d'eau brute, a entraîné des changements significatifs dans la composition chimique et les propriétés physico-chimiques de l'eau. Il est important de surveiller ces changements pour éviter les problèmes potentiels liés à la précipitation de minéraux ou à d'autres réactions indésirables.

3-Recommandation

Pour compléter cette étude, nous devons passer à un autre outil de gestion nommé : Le DSS qui est un système assisté par ordinateur interactif conçu pour aider les décideurs dans l'utilisation des données, documents et/ou des modèles pour identifier et résoudre des problèmes (Power, 2004). Cependant, le DSS, doit être compris non seulement en tant qu'acquisition de l'information, mais également en tant que procédures en vue de l'exploitation efficace de cette information par l'utilisateur tout en assurant la durabilité des systèmes et leur viabilité.

Il combine la représentation spatiale, la simulation de scénarios, évaluations multicritères et interface conviviale. Pour cela il sera nécessaire de mettre en place en premier lieu un modèle conceptuel descriptif du système hydrique ainsi que toutes les interactions entre les éléments du bilan, ce modèle servira en second lieu à élaborer un modèle intégré pour les simulations du comportement de l'hydrosystème. Ce modèle tient compte de l'ensemble du cycle hydrique qui intègre les paramètres environnementaux, sociaux et économiques.

Pour des raisons techniques liées au temps, qui nous ont empêché pour faire tourner le DSS, en espérant le faire au cours d'une étude ultérieure plus poussée.

Conclusion générale

Conclusion

La région d'El Malabiod, située dans l'Atlas Saharien, présente une géologie et une hydrologie complexes façonnées par des facteurs géologiques, climatiques et anthropiques. Le relief contrasté et les formations sédimentaires variées, allant du Trias au Miocène, témoignent de l'intense activité tectonique de la région, marquée par cinq phases de l'orogénèse alpine. Les fossés d'effondrements comblés par des dépôts miocènes à Plio-Quaternaires illustrent la dynamique tectonique ayant influencé le paysage actuel.

Le climat semi-aride de la région, caractérisé par des précipitations limitées et une évapotranspiration élevée, exacerbe les défis hydrologiques. Les bilans hydrologiques indiquent des variations significatives des précipitations et des températures, conduisant à des périodes de déficit hydrique et des années plus humides. L'infiltration et la capacité de réserve d'eau du sol sont limitées, mettant en évidence la nécessité d'une gestion efficace des ressources en eau pour atténuer les effets de la sécheresse et optimiser les périodes d'excès d'eau.

Le bassin versant de 600 km² d'El Malabiod, avec un réseau hydrographique bien développé, présente un écoulement rapide et efficace mais aussi un risque accru d'érosion et de crues soudaines. Une gestion intégrée du bassin versant, incluant des infrastructures de gestion des crues et des mesures de contrôle de l'érosion, est cruciale pour assurer la durabilité et la résilience hydrologique.

L'hydrogéologie de la plaine d'El Malabiod révèle une interaction complexe entre les nappes alluviale et miocène. La nappe alluviale, alimentée par les précipitations et les infiltrations, recharge l'aquifère miocène sous-jacent. Cependant, la surexploitation des ressources en eau souterraine a dégradé le niveau piézométrique, nécessitant l'utilisation du logiciel MODFLOW pour modéliser et proposer des stratégies de gestion durable des nappes phréatiques. Les résultats montrent l'importance d'un équilibre entre prélèvements et recharge pour préserver les réserves hydriques souterraines.

Les barrages d'écrêtement offrent une solution innovante pour la gestion de l'eau dans cette région semi-aride. En régulant les flux d'eau, ces structures peuvent améliorer la recharge des nappes phréatiques, atténuer les effets des sécheresses, et soutenir le développement socio-économique local. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite des études

Conclusion

approfondies sur les impacts environnementaux, sociaux et économiques, et une collaboration étroite entre les parties prenantes.

L'application de technologies avancées comme le logiciel MODFLOW Flex pour modéliser les débits d'eau et planifier la recharge artificielle des aquifères s'avère prometteuse. Elle permet une prise de décision éclairée et favorise une gestion résiliente et durable des ressources en eau, essentielle pour faire face aux défis climatiques et assurer la sécurité hydrique de la région.

En somme, la gestion de l'eau dans la région d'El Malabiod doit s'appuyer sur une compréhension approfondie des interactions géologiques et hydrologiques, une utilisation prudente des ressources disponibles, et l'intégration de technologies avancées et de solutions innovantes pour assurer une utilisation durable et équilibrée des ressources en eau.

La bibliographie

Références

2. Abdelkader Rouabhia, Fethi Baali, Nacer Kherici et Larbi Djabri. 2004. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie).
3. A. Rouabhia, F. Baali, Ch. Fehdi, N. Kherici et L. Djabri. Hydrochemical and isotopic investigation of a sandstone aquifer groundwater in a semi-arid region, El Ma El Abiod, Algeria. *Environ Geol* (2009) 57 :1699–1705 DOI 10.1007/s00254-008-1451-5.
4. AOUACHRIA Nabil, BEKKAI Islem. 2020. Contexte hydrogéologique, hydrochimique et géophysique de trois sous bassins contigus : cas d'El Ma El Abiod-Brisgane et Doukara.
5. Bai L, Jiang LM, Zhao Y, et al. 2022. Quantifying the influence of long-term overexploitation on deep groundwater resources across Cangzhou in the North China Plain using InSAR measurements. *Journal of hydrology*, 605: 127368 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127368>
6. Djebari Hacene. 2013. RESSOURCES ET ESSAI DE GESTION INTÉGRÉES DES EAUX DU BASSIN D'EL MALABIOD, W. DE TÉBESSA, NORD-EST ALGERIEN, Proceeding du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement SIHE 2013 Ouargla.
7. Djebari Hacene, 2011. Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin d'el Malabiody W. de Tébessa, Nord- Est Algérien
8. Fatah Samoun, 2021. Etats hydrogéologique et hydrochimique et cartographie de la vulnérabilité et du risque à la pollution des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire d'El Ma Labiod. NE Algérie.
9. Fouad, M., & Hussein, E. E. "Assessment of Numerical Groundwater Models". *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 9, Issue 6, ISSN 2229-5518. Pp. 951-974, 1998.
10. Haque, M Al; Mamunul; Jahan, C S; Mazumder, Q H; Nawaz, S M; S; Mirdha, G C; et al. Hydrogeological condition and assessment of groundwater resource using visual modflow modeling, Rajshahi city aquifer, Bangladesh. *Journal of the Geological Society of India* **Bangalore** [Vol. 79, Iss. 1](#), (Jan 2012): 77-84. DOI : 10.1007/s12594-012-0001-7.

La bibliographie

11. Jay Krishna Thakur. 2017. Hydrogeological modeling for improving groundwater monitoring network and strategies. *Appl Water Sci* 7, 3223–3240. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0469-1>
12. Khadri, S.F.R., Pande, C. Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 39 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0049-7> .
13. Latifa Bouragba, 2011. Etude de la recharge artificielle des nappes en zone semi-aride : application au bassin du Souss-Maroc.
14. Mouna Djellali, 2024. Application des techniques de la recharge artificielle des niveaux aquifères dans la région de Chéria (N.E. Algérien).
15. Mouna Djellali, Omar Guefaïfia, Chemsedinne Fehdi, Adel Djellali, Amor Hamad 2023. Assessing the impact of artificial recharge on groundwater in an over-exploited aquifer: A case study in the Cheria Basin, North-East of Algeria. *Journal of groundwater science and engineering* 11 (3) DOI: <https://doi.org/10.26599/JGSE.2023.9280022>.
16. Rouabhia Abdelkader. 2006. Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d’El Ma El Abiod Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat es-sciences. Université Badji Mokhtar -Annaba.
17. Salhi somaya, 2021. Actualisation des données hydrogéologiques et hydrochimique de la nappe des sables du miocène d’EL MALBIOD, Tébessa NE Algérien.
18. Varghese, A. A., Raikar, R. V., & Purandara, B. K “Simulation of Groundwater Levels in Malaprabha Command Area using Visual MODFLOW FLEX”. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(8), 434-440, 2007.
19. Y. Nazoumou et M. Besbes, 2017. Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs.
20. Waterloo. 2019. Visual MODFLOW Flex 6.1 user's manual: Integrated Conceptual and Numerical Groundwater Modeling Software: Waterloo Hydrogeologic, Print.
21. http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Les_barrages_%C3%A9cr%C3%AAteurs_de_crues.

Les annexes

Les annexes

Ratio 90% eau de forage ; 10% eau brute

SOLUTION 1 eau de forage

temp 19.3
pH 7.48
pe 4
redox pe
units mg/l
density 1
Cl 144.84
Mg 2 mmol/L
Ca 102
Na 57
K 2.5
S(6) 132
Alkalinity 244
-water 1 # kg

SOLUTION 2 eau brute

temp 20.5
pH 8.16
pe 4
redox pe
units mol/l
density 1
Cl 195.96 mg/L
Mg 6.08 mmol/L
Ca 220 mg/L
Na 130 mg/L
K 17.5 mg/L
S(6) 232 mg/L
Alkalinity 310 mg/L
-water 1 # kg

MIX 1

1 0.9
2 0.1

Ratio 70% eau de forage ; 30% eau brute

pH 7.48
pe 4
redox pe
units mg/l
density 1
Cl 144.84
Mg 2 mmol/L
Ca 102
Na 57
K 2.5
S(6) 132
Alkalinity 244
water 1 # kg
SOLUTION 2 eau brute
temp 20.5
pH 8.16
pe 4
redox pe

Les annexes

units	mol/l
density	1
Cl	195.96 mg/L
Mg	6.08 mmol/L
Ca	220 mg/L
Na	130 mg/L
K	17.5 mg/L
S(6)	232 mg/L
Alkalinity	310 mg/L
water	1 # kg
MIX 1	
1	0.7
2	0.3