

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En : HYDRAULIQUE**

**Spécialité : Hydraulique urbaine**

**Présenté par : BEN-YELLES Mohammed Alaa Eddine**

**Sujet**

**Caractérisation hydrogéologique et modélisation de l'aquifère  
alluvionnaire de la plaine de Maghnia (NW Algérien)**

Soutenu publiquement, le 08 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

Mme **LALLAM Faiza**

Mme **FANDI Ouassila**

Mme. **BABA HAMED Kamila**

M. **BOUANANI Abderrazak**

M.C.B.

M.A.A.

Professeur

Professeur

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examinatrice

Encadreur

Co-Encadreur

**Année universitaire : 2022/2023**



## *Dédicaces*



*Tout d'abord je suis entièrement reconnaissant  
que si ce travail a été mené avec succès c'est grâce à  
ALLAH.*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à...*

*La lumière de ma vie : mes chers parents **Fethi et  
Ilhem** Pour leur amour, soutien, et leurs aides  
pendant mes années d'études. Que Dieu les garde  
pour moi.*

*Mes chers frères **Salim et Anes** et toute ma famille,  
oncles, tantes, cousins, cousines paternels et  
maternels pour leurs amour et encouragement.*

*Mes grands-parents que dieu les protège.*

*Une personne chère à mon cœur **Wisseem** pour  
m'avoir épaulé depuis toujours.*

*Mes chers amis **Anes et Yasmine** que dieu leurs  
offre le bonheur.*

*Mes frères de cœur **Islem, Sohaïb, Riad, Khalil,  
Boumediene et Ghouti**.*

*Ainsi qu'à toute la promotion hydraulique 2022 /  
2023 et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation  
de ce mémoire.*

*Enfin, à tous ceux qui m'aiment.*

**BEN-YELLES Mohammed Alaa Eddine**



# Remerciements



Tout d'abord, je remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Ce modeste travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir lieu sans l'aide et l'encadrement de mon professeur **BABA-HAMED KAMILA** que je remercie vivement pour tout le temps qu'elle m'a accordé et tous les précieux conseils et orientations qu'elle m'a donnés et pour sa précision dans le travail.

Je remercie aussi mon Professeur **BOUANANI ABDERRAZAK**, pour m'avoir accordé sa confiance en acceptant de co-encadrer ce travail, pour son encouragement, son soutien et pour sa générosité.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury Madame **LALLAM Faiza** et Madame **FANDI Ouassila** pour m'avoir fait l'honneur de faire partie de mon jury et accepter de juger mon modeste travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants du département d'Hydraulique pour leurs conseils et leurs qualités d'enseignement.

Je ne saurai oublier de remercier le Directeur de laboratoire de recherche n°25 Professeur **BENSALAH Mustapha**, pour m'avoir autorisé à travailler dans le laboratoire durant les heures de consultation avec mes encadreurs.

Je remercie vivement Monsieur **NEBIA Riad** de la direction d'hydraulique de Tlemcen de m'avoir aidé dans l'acquisition des données climatiques et hydrogéologiques.

Mes profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenue de près ou de loin.

---

## Résumé

La plaine alluviale de Maghnia située dans le Nord-ouest de l'Algérie, couvre une superficie de 351 km<sup>2</sup>, présente un potentiel agricole riche confrontée actuellement à des défis majeurs liés à la disponibilité en eau. La plaine est caractérisée par un climat semi aride et enregistre en moyenne 280mm/an de précipitations et une température de 18°C observées durant la période (1977/1978– 2020/2021). La piézométrie réalisée au niveau de la nappe alluviale montre un écoulement souterrain général du Sud vers le Nord et des conditions aux limites diverses. L'alimentation de la nappe se fait directement sur son impluvium ou latéralement par la frontière algéro-marocaine à l'Ouest et par trop plein des monts de Tlemcen au Sud Est. Cette nappe est très sollicitée par les pompages pour des fins d'irrigation.

Un programme de gestion durable et efficace de la nappe s'impose. Pour ce faire, le modèle hydrogéologique PMWIN5 (Processing Modflow for Windows), a été utilisé pour simuler le comportement de la nappe phréatique en régime permanent et transitoire. La distribution spatiale de la conductivité hydraulique et du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère issue du calage a mis en évidence diverses zones de perméabilité et de stockage et l'importance du chenal constituant la zone la plus productive au niveau de la plaine de Maghnia.

L'exploitation du modèle ainsi réalisé a permis de simuler des scénarii optimistes et pessimistes permettant de suivre l'impact d'une variabilité climatique et/ou activité humaine (pompage intensif) sur le comportement de la nappe.

**Mots clés:** Plaine de Maghnia - Modélisation hydrogéologique - PMWIN5 - Gestion des ressources - Simulation - Exploitation.

---

## Abstract

The alluvial plain of Maghnia, located in the northwest of Algeria, covers an area of 351 km<sup>2</sup>, and has a rich agricultural potential currently facing major challenges related to water availability. The plain is characterized by a semi-arid climate and records an average of 280mm/year of precipitation and a temperature of 18°C observed during the period (1977/1978 – 2020/2021).

The piezometry carried out at the alluvial table shows a general underground flow from the South to the North and various boundaries fluxes at limits. The supply of the water table is done directly on its impluvium or laterally by the Algerian-Moroccan border in the West and the Tlemcen mountains in the South East. This water table is heavily used by pumping for irrigation purposes. A sustainable and effective management program for this aquifer is required. To do this, the hydrogeological model PMWIN5 (Processing Modflow for Windows) was used to simulate the behaviour of the water table in steady state and transient conditions. The spatial distribution of the hydraulic conductivity and storage coefficient of the aquifer resulting from the calibration revealed various areas of permeability and storage and the importance of the channel as the most productive area in Maghnia plain.

The exploitation of the model thus carried out has made it possible to simulate optimistic and pessimist scenarios allowing the impact of climate variability and/or human activity (intensive pumping) on the behaviour of the groundwater.

**Keywords:** Maghnia Plain – Hydrogeological modelling - PMWIN5 – Resource Management – Simulation - Exploitation.

---

## ملخص

يغطي سهل مغنية، الواقع في شمال غرب الجزائر، مساحة تقدر بـ 351 كيلومتر مربع، ولديه إمكانات زراعية غنية تواجه حاليًا تحديات كبيرة تتعلق بتوافر المياه. يتميز السهل بمناخ شبه قاحل ويسجل متوسط هطول الأمطار 280 ملم/سنة ودرجة حرارة 18 درجة مئوية لوحظت خلال الفترة (1977/1978 - 2020/2021). وبينت دراسة المياه الباطنية تدفقًا عامًا تحت الأرض من الجنوب إلى الشمال وظروفًا مختلفة لتعبئة الخزان عند الحدود حيث يتم توريد الخزان مباشرة على انحداره أو جانبيًا من جهة الحدود الجزائرية المغربية في غرب المنطقة أو عن طريق مرتفعات تلمسان في الجنوب الشرقي.

يستخدم منسوب المياه الجوفية هذا بشكل كبير في الري عن طريق ضخ الآبار. ولهذا استوجب إعداد برنامج فعال قصد إدارة هذه الموارد. للقيام بذلك، تم استخدام النموذج الهيدرولوجي PMWIN5 لمحاكاة منسوب المياه الجوفية عبر نظام مستقر وغير مستقر. كشف التوزيع المكاني لمعالم النفذية والتخزين لطبقة المياه الجوفية الناتج عن المعايرة عن وجود مناطق مختلفة من النفذية والتخزين كما كشف عن أهمية المنطقة الموجودة بوسط السهل باعتبارها المنطقة الأكثر إنتاجية على مستوى سهل مغنية.

وقد أتاح استغلال النموذج الذي نفذ على هذا النحو، محاكاة السيناريوهات المتفائلة والمتشائمة (الشحيحة) التي تسمح بتأثير تقلب المناخ و/أو النشاط البشري (الضخ المكثف) على جريان المياه الجوفية.

**الكلمات المفتاحية:** سهل مغنية - النمذجة الهيدرولوجية - PMWIN5 - إدارة الموارد - المحاكاة - الاستغلال.

---

## TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

### **Chapitre I : Etat de l'art de la modélisation Hydrogéologique**

I. Introduction	3
I.1. Modélisation hydrogéologique	3
I.1.1. Définition du modèle mathématique en hydrogéologie	3
I.1.2. Modèles mathématiques appliqués en hydrogéologie	4
I.1.2.1. Modèle conceptuel	4
I.1.2.2. Modèle mathématique	5
I.1.2.3. Modèle numérique	5
I.1.2.4. Modèles numériques déterministes	5
I.2. Etapes de la modélisation	6
I.2.1. Conception et construction du modèle (Caractérisation)	6
I.2.2. Analyse de données naturelles (Structure de la nappe)	6
I.2.3. Typologie de l'écoulement et du système	6
I.2.4. Paramètres structuraux	6
I.2.4.1. Conductivité hydraulique	6
I.2.4.2. Transmissivité	6
I.2.4.3. Coefficient d'emmagasinement	7
I.2.5. Conditions aux limites des systèmes	7
I.2.5.1. Limites à niveau imposé	7
I.2.5.2. Limites étanches	7
I.2.5.3. Limites à flux imposé	7
I.2.5.4. Conditions internes-singularités	7
a. Les conditions de débit imposable par zones	8
b. Les conditions d'émergence liées à la piézométrie	8
c. Les conditions de niveau liées à la piézométrie	8
d- Les conditions ponctuelles de prélèvement ou d'injection	8
I.2.6. Choix de comportement de référence	8
I.3. Choix d'une stratégie de modélisation	8
I.3.1. Forme générale du modèle	8
I.3.2. Maillage et précision	8
I.3.3. Conditions imposées	9
I.3.4. Paramètres	9
I.3.5. Régime transitoire (conditions initiales)	9
I.4. Identification (calage) et vérification	9
I.4.1. Considérations théoriques	9
I.4.1.1. Problème inverse selon la théorie des équations aux dérivées partielles	9
I.4.1.2. Problème inverse par les théories d'optimisation	10

I.4.2. Règles pratiques d'identification	10
I.4.2.1. Tests de cohérence	10
I.4.2.2. Identification des paramètres	10
I.4.2.3. Vérification	10
I.5. Exploitation des modèles calés	11
I.6. Erreurs liées à l'utilisation des modèles	11
I.6.1. Erreurs conceptuelles	11
I.6.2. Erreurs de données	11
I.6.3. Erreurs de troncature	11
I.6.4. Erreurs d'arrondis	11
I.7. Limites de la modélisation	11
I.7.1. Incertitudes conceptuelles	11
I.7.2. Disponibilité des données et incertitudes	12
I.7.3. Calage	12
I.7.4. Discrétisation et prédiction	12
I.8. Formulation mathématique	13
I.8.1. Méthodologie de résolution des équations	14
I.8.1.1. Méthode des différences finies	14
I.8.1.2. Méthode des éléments finis	15
I.8.2. Conditions initiales et conditions aux limites	16
I.8.2.1. Condition initiale	16
I.8.2.2. Conditions aux limites	16
I.8.2.2.1. Conditions de pression ou potentiel imposé	16
I.8.2.2.2. Conditions de flux ou de débit imposé	17
I.8.2.2.3. Condition de Fourier	18
I.8.2.2.4. Condition de surface libre	18
a. Condition de potentiel	18
b. Condition de flux	19
I.9. Typologie des modèles en hydrogéologie	19
I.10. Conclusion	20

## **Chapitre II : Présentation de la zone d'étude**

II. Introduction1	21
II.1. Situation géographique	21
II.2. Hydrographie	21
II.3. Cadre structural et aperçu morphologique de la plaine de Maghnia	22
II.3.1. Unités structurales	23
II.3.2. Principaux types d'accidents	24
II.4. Cadre géologique	24
II.4.1. Paléozoïque	25
a- Le Silurien	25
b- Le Dévonien	25
c- Le Carbonifère	25
d- Permo-Trias	26
II.4.2. Mésozoïque	26
a- Jurassique	26
II.4.3. Cénozoïque	27
II.4.4. Plio-Quaternaire	27
II.5. Géologie de la plaine	28

II.6. Conclusion	29
------------------	----

### **Chapitre III : Etude climatique**

III. Introduction	30
III.1. Etudes précipitations	31
III.1.1. Précipitations annuelles	31
III.1.2. Précipitations mensuelles	32
III.1.3. Précipitations saisonnières	33
III.2. Etude des températures	34
III.2.1. Variation des températures moyennes annuelles	34
III.2.2. Températures moyennes mensuelles	35
III.3. Etude du climat	35
III.3.1. Méthode de visualisation de Bagnouls et Gausson	35
III.3.2. Indices climatiques (Indice d'aridité de De. Matonne)	36
III.4. Evapotranspiration potentielle et déficit d'écoulement	37
III.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	37
III.4.1.1. Méthode de Thornthwaite	37
III.4.1.2. Méthode de Turc	38
III.4.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle	39
III.4.2.1. Méthode de Turc	39
III.4.2.2. Méthode de Coutagne	40
III.4.2.3. Méthode de Wundt	40
III.4.2.4. Méthode de P. Verdeil	41
III.5. Calcul de la réserve facilement utilisable (R.F.U)	42
III.6. Bilan hydrologique	43
III.7. Calcul du ruissellement	43
III.8. Détermination de l'infiltration et calcul des bilans	43
III.9. Conclusion	44

### **Chapitre IV : Etude hydrogéologique**

IV. Introduction	45
IV.1. Propriétés hydrauliques des différentes formations	45
IV.2. Géométrie de l'aquifère	46
IV.2.1. Description de l'aquifère	46
IV.3. Etude hydrodynamique	49
IV.3.1. Limites de l'aquifère	50
IV.3.2. Analyse piézométrique	51
IV.3.2.1. Carte piézométrique (Septembre, 1950)	51
IV.3.2.2. Carte piézométrique (Février, 1989)	52
IV.3.2.3. Carte piézométrique (Mai 1995)	53
IV.3.2.4. Carte piézométrique (Mai 2010)	54
IV.3.3. Etude spatio-temporelle des fluctuations de la nappe	55
IV.4. Caractéristiques hydrodynamiques	57
IV.4.1. Répartition de la perméabilité	58

IV.4.2. Répartition du coefficient d’emmagasinement	59
IV.4.3. Répartition du la transmissivité	60
IV.5. Conclusion	61

## **Chapitre V : Modélisation hydrogéologique**

V. Introduction	62
V.1. Généralités sur le code de calcul PMWIN5	63
V.1.1. Définition	63
V.1.2. Mode de fonctionnement du modèle	63
V.2. Modélisation de la plaine alluviale de Maghnia	65
V.2.1. Présentation du domaine à modéliser	65
V.2.2. Discrétisation du domaine à modéliser et construction de la grille du modèle (maillage)	65
V.2.3. Conditions aux limites	66
V.2.3.1 Limite à flux imposé nul	66
V.2.3.2 Limite à potentiel imposé non nul (positif)	66
V.2.3.3. Limite à potentiel imposé non nul (négatif)	67
V.3. Calage en régime permanent	67
V.3.1. Potentiels mesurés et calculés	67
V.3.2. Répartition des valeurs des conductivités hydrauliques (perméabilité)	69
V.3.3. Bilan de la nappe	70
V.3.3.1. Bilan de la nappe pour l’ensemble du domaine modélisé	70
V.3.3.2. Bilan de la nappe au niveau du chenal	71
V.4. Calage en régime transitoire	72
V.4.1. Potentiels mesurés et calculés	72
V.4.2. Répartition des valeurs du coefficient d’emmagasinement	74
V.4.3. Bilan de la nappe	75
V.4.3.1. Bilan de la nappe pour l’ensemble du domaine modélisé	75
V.4.3.2. Bilan de la nappe au niveau du chenal	76
V.5. Exploitation du modèle	76
V.5.1. Scénarii pessimistes	76
V.5.1.1. Surexploitation de la nappe	76
V.5.1.2. Bilan de la nappe	78
Première simulation (addition de cinq puits de pompage)	78
Deuxième simulation (addition de dix puits de pompage)	78
V.5.1.3. Sécheresse	79
V.5.1.4. Synthèse des résultats des scénarii pessimistes	80
V.5.2. Scénarii optimistes	81
V.5.2.1. Recharge artificielle à partir des lâchers du barrage de Boughrara	81
V.5.2.2. Recharge Importante (augmentation de l’infiltration)	83
V.5.2.3. Recharge latérale	84
V.5.2.4. Synthèse des résultats des scénarii optimistes	86
V.7. Conclusion	86

<b>Conclusion générale</b>	89
<b>Références bibliographiques</b>	92

## *Liste des abréviations*

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques  
DSA : Direction des services agricoles  
GPI : Grand périmètre d'irrigation  
ONM : Office National de Météorologie  
BRGM : Bureau de recherche géologique et minière  
FEFLOW: Finite Element subsurface Flow system  
MODFLOW : Modeling Flow  
NEWSAM : Simulation des Aquifères Multicouches pour les écoulements souterrains  
PMWIN: Processing Modflow for Windows  
WINASM: Aquifer Simulation Model for Windows  
AEP : Alimentation en eau potable  
MDF : Méthode des différences finies  
MED : Méthodes des éléments finis  
2D : Deux dimensions  
D : Déficit d'écoulement  
E : Ecoulement  
Ep : Epaisseur de la zone saturée (m)  
ETP : Evapotranspiration potentielle  
ETR : Evapotranspiration réelle  
F1 : Forage 1  
H : Charge hydraulique  
I : Infiltration  
i : Gradient hydraulique  
I<sub>g</sub> : Radiation globale  
K : Tenseur de perméabilité  
Moy : Moyenne  
NP : Niveau piézométrique  
P (mm) : Précipitations en millimètres  
P1 : Puits 1  
R : Ruissellement  
RFU : Réserve facilement utilisable  
RU : Réserve utile  
Q : Débit  
S : Coefficient d'emmagasinement  
T : Transmissivité  
T (°C) : Température en degré Celsius  
Z : Altitude (m)  
Z<sub>s</sub> : Altitude du mur de l'aquifère (m)

# *Liste des figures*

## **Chapitre I :Etat de l'art de la modélisation hydrogéologique**

Fig. I.1	Schéma de fonctionnement d'un modèle Hydrogéologique	4
Fig. I.2	Étapes de la modélisation hydrogéologique	13
Fig. I.3	Méthodes de résolution numérique et approches de discrétisation	15
Fig. I.4	Méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles	16
Fig. I.5	Limites à flux nul	18
Fig. I.6	Condition de Fourier.	18
Fig. I.7	Condition de surface libre (condition de potentiel)	19

## **Chapitre II :Présentation de la zone d'étude**

Fig. II.1	Carte de situation de la plaine de Maghnia	21
Fig. II.2	Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mouilah	22
Fig. II.3	Carte structurale de la plaine de Maghnia	23
Fig. II.4	Carte géologique de la plaine de Maghnia	25
Fig. II.5	Série stratigraphique synthétique de la plaine de Maghnia	28
Fig. II.6	Coupe N-S illustrant la structure en horsts et grabens	29

## **Chapitre III :Etude climatique**

Fig. III.1	Présentation de la station de mesure de Maghnia	30
Fig. III.2	Variations interannuelles des précipitations à la station de Maghnia	32
Fig. III.3	Répartition des précipitations mensuelles à la station de Maghnia	33
Fig. III.4	Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia	33
Fig. III.5	Variation des températures moyennes annuelles à la station de Maghnia	34
Fig. III.6	Variations des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia	35
Fig. III.7	Courbe pluviothermique	36
Fig. III.8	Représentation de la station de Maghnia sur l'abaque de De Martone	37
Fig. III.9	Abaque de Wundt	41
Fig. III.10	Abaque de Verdeil pour l'estimation du déficit d'écoulement	42

## **Chapitre IV:Etude hydrogéologique**

Fig. IV.1	Coupe des forages réalisés dans la plaine de Maghnia avant 1965	46
Fig. IV.2	Coupes schématiques des forages réalisés après 1990 dans la plaine de Maghnia	47
Fig. IV.3	Localisation des traits de coupes interprétatives à travers la plaine de Maghnia	48
Fig. IV.4	Coupes géologiques interprétatives à travers la plaine de Maghnia	49
Fig. IV.5	Carte du toit de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia	50
Fig. IV.6	Carte du mur de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia	51
Fig. IV.7	Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Maghnia (1950)	52
Fig. IV.8	Carte piézométrique de la nappe de Maghnia (1989)	53
Fig. IV.9	Carte piézométrique de la plaine alluviale de Maghnia (Mai 1995)	54
Fig. V.10	Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Maghnia (Mai 2010)	55
Fig. IV.11	Localisation des puits d'observation	56
Fig. IV.12	Fluctuation de la nappe de Maghnia au cours des campagnes piézométriques	57
Fig. IV.13	Répartition de la perméabilité de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia	59

Fig.IV.14	Répartition du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia	60
Fig.IV.15	Répartition de la transmissivité de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia	61

### **Chapitre V: Modélisation hydrogéologique**

Fig.V.1	Elaboration du modèle conceptuel	63
Fig.V.2	Fonctionnement du modèle PMWIN5	64
Fig.V.3	Maillage et les conditions aux limites du domaine à modéliser	66
Fig.V.4	Comparaison entre la piézométrie calculée et mesurée en régime permanent	68
Fig.V.5	Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent	69
Fig.V.6	Carte de la perméabilité (m/s) issue pour le calage en régime permanent	70
Fig.V.7	Localisation du chenal dans la plaine alluviale de Maghnia	71
Fig.V.8	Comparaison entre la piézométrie calculée et mesurée en régime transitoire	73
Fig.V.9	Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire	74
Fig.V.10	Carte du coefficient d'emmagasinement issue du calage en régime transitoire	75
Fig.V.11	Simulation hydrodynamique (surexploitation) en rajoutant 5 puits	77
Fig.V.12	Simulation hydrodynamique (surexploitation) en rajoutant 10 puits	77
Fig.V.13	Simulation hydrodynamique (sécheresse)	79
Fig.V.14	Évolution des niveaux piézométriques lors des scénarii pessimistes	81
Fig.V.15	Simulation optimiste (Recharge artificielle)	82
Fig.V.16	Simulation optimiste (Recharge efficace)	83
Fig.V.17	Simulation optimiste (Recharge latérale)	85
Fig.V.18	Évolution des niveaux piézométriques lors des scénarii optimistes	86
Fig.V.19	Schéma 3D de l'aquifère alluvial de Maghnia	88

## *Liste des tableaux*

Tabl. III.1	Caractéristiques de la station climatique de Maghnia	30
Tabl. III.2	Précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia	31
Tabl. III.3	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia	32
Tabl. III.4	Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia	33
Tabl. III.5	Températures moyennes annuelles à la station de Maghnia	34
Tabl. III.6	Valeurs des températures moyennes mensuelles (°C) à la station de Maghnia	35
Tabl. III.7	Moyennes des précipitations et des températures à la station de Maghnia	36
Tabl. III.8	Classification du climat suivant l'indice d'aridité de Martonne	37
Tabl. III.9	Valeurs de l'ETP à la station de Maghnia avec la méthode de Thornthwaite	38
Tabl. III.10	Valeurs de l'ETP à la station de Maghnia avec la méthode de Turc	39
Tabl. III.11	Valeur de l'ETR (Turc)	40
Tabl. III.12	Valeurs du déficit et du quotient d'écoulement (Wundt)	41
Tabl. III.13	Valeur du déficit d'écoulement (Verdeil)	41
Tabl. III.14	Valeurs de C-F (%) en fonction de la nature du sol	42
Tabl. III.15	Éléments du bilan hydrologique calculés (mm) pour la station de Maghnia	43
Tabl. III.16	Valeur du ruissellement (Tixeront Berkloff)	43
Tabl. III.17	Valeur de l'infiltration selon les différentes méthodes	44
Tabl. IV.1	Inventaire des réservoirs aquifères de la région	45
Tabl. IV.2	Niveaux piézométriques des puits au cours des différentes campagnes	55
Tabl. IV.3	Caractéristiques hydrodynamiques à l'endroit des forages	58
Tabl. V.1	Écarts entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent	68
Tabl. V.2	Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime permanent (exprimés en m <sup>3</sup> /s)	71
Tabl. V.3	Bilan de la nappe calculé par le modèle (au niveau du chenal) en régime permanent	72
Tabl. V.4	Écarts entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire	73
Tabl. V.5	Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire (Mai 1995) (exprimé en m <sup>3</sup> /s)	75
Tabl. V.6	Bilan de la nappe calculé par le modèle (au niveau du chenal) en régime transitoire	76
Tabl. V.7	Bilan global de la nappe en surexploitation (addition de cinq puits)	78
Tabl. V.8	Bilan du chenal en surexploitation (addition de cinq puits)	78
Tabl. V.9	Bilan global de la nappe en surexploitation (addition de dix puits)	78
Tabl. V.10	Bilan du chenal en surexploitation (addition de dix puits)	79
Tabl. V.11	Bilan global de la nappe en situation de stress (sécheresse)	80
Tabl. V.12	Bilan du chenal en situation de stress (sécheresse)	80
Tabl. V.13	Bilan global de la nappe en cas de recharge à partir du barrage	82
Tabl. V.14	Bilan du chenal en cas de recharge à partir du barrage	82
Tabl. V.15	Bilan global de la nappe en cas de recharge efficace par les précipitations	84
Tabl. V.16	Bilan du chenal en cas de recharge efficace par les précipitations	84
Tabl. V.17	Bilan global de la nappe en cas de recharge latérale	85
Tabl. V.18	Bilan global du chenal en cas de recharge latérale	86

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRALE***

## Introduction générale

L'eau est une ressource vitale pour la survie de l'humanité et pour le développement socio-économique. Cependant, la disponibilité en eau douce est de plus en plus limitée en raison de nombreux facteurs tels que la croissance démographique, l'urbanisation rapide, l'industrialisation et les changements climatiques. Ces pressions exercées sur les ressources en eau ont conduit à une augmentation de la demande en eau, ce qui a exacerbé les problèmes liés à la gestion de l'eau dans de nombreuses régions du monde.

La plaine alluviale de Maghnia se situe au Nord-Ouest de l'Algérie, c'est l'une des plus riches potentiels agricoles. En effet, la plaine de Maghnia et son périmètre irrigué ont cette réputation de terres fertiles ayant obtenu, dans les années 1990, le titre de premier producteur de la pomme de terre à l'échelle nationale. Actuellement, elle est confrontée à des défis majeurs liés à la disponibilité en eau. La baisse pluviométrique, le niveau bas des barrages et celui des puits constituent un risque majeur pour la région et les agriculteurs assujettis aux forces de la nature. La distribution de l'eau par les services concernés est hasardeuse, son usage est peu rationnel et quelque fois anarchique. A la rareté de l'eau s'ajoute l'envahissement du béton exprimé par la reconversion des terres fertiles en zones urbanisables, souvent d'une manière illégale. La remise en état du périmètre irrigué et sa gestion rigoureuse pourront sauver la plaine en traçant un programme de gestion durable de l'eau.

Dans ce contexte, la modélisation hydrogéologique joue un rôle crucial dans la compréhension et la gestion des systèmes aquifères. Elle permet de simuler le comportement de l'eau souterraine, de prévoir les variations de la nappe phréatique, d'identifier les zones de recharge et de décharge, ainsi que d'évaluer l'impact de l'intervention anthropique sur les ressources en eau souterraine disponibles.

Le premier chapitre de ce mémoire concerne une synthèse bibliographique de l'état de l'art de la modélisation hydrogéologique. Il décrit les principes fondamentaux de cette discipline, les différentes approches utilisées et les codes de calcul couramment utilisés dans ce domaine. Cette étape est plus que nécessaire pour appréhender les chapitres suivants et comprendre le fonctionnement de notre système aquifère.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. Il porte sur la géométrie du sous sol, sur la caractérisation géographique, géomorphologique et géologique de la région constituant une base de connaissance importante pour le modèle.

Le troisième chapitre sert à mettre le point sur la climatologie de la zone d'étude. Il traitera certains facteurs telles que les précipitations, les températures...etc et les variations qui en découlent à partir de l'étude d'une série de données et qui serviront dans la construction du modèle.

Dans le quatrième chapitre nous passerons en revue les caractéristiques hydrogéologiques de la région, les propriétés hydrodynamiques des formations aquifères et les flux d'eau souterraine pour l'identification des régimes d'écoulement. Cette analyse servira de base elle aussi pour la conceptualisation du modèle numérique.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous essayerons d'intégrer l'ensemble des informations acquises dans les précédents chapitres pour tenter d'élaborer un modèle permettant de simuler le comportement hydrogéologique de l'aquifère alluvionnaire de la plaine de Maghnia.

En guise de conclusion, une synthèse des résultats trouvés dans cette étude sera établie avec quelques recommandations.

***CHAPITRE I :***  
***ETAT DE L'ART DE LA***  
***MODELISATION***  
***HYDROGEOLOGIQUE***

## I. Introduction

Au cours de ces dernières années, l'un des problèmes inquiétants à résoudre dans le domaine de l'hydrogéologie est la gestion des aquifères, en raison de la surexploitation et la contamination des eaux souterraines qui nécessitent un contrôle permanent.

En hydrogéologie, les modèles mathématiques, hydrodynamiques et hydrodispersifs sont devenus un outil essentiel pour simuler la circulation des eaux souterraines dans une nappe aquifère ainsi que la propagation de polluants. En effet ces modèles servent à :

- Comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles et prévoir l'influence de l'intervention anthropique sur la quantité et la qualité de l'eau souterraine disponible,
- Gérer de façon durable les ressources en eau,
- Prévenir toute dégradation des écosystèmes aquatiques, assurer un approvisionnement suffisant en eau potable de bonne qualité,
- Déterminer l'évolution d'un panache de pollution au fil du temps,
- Dimensionner un système de récupération d'une pollution de l'eau souterraine.

L'objectif principal d'une étude de modélisation est de comprendre le comportement d'un système hydrogéologique pour aider les parties prenantes à prendre des décisions. Par conséquent, la présentation des résultats joue un rôle crucial dans la transmission des connaissances, la démonstration de la fiabilité du modèle et la mise en contexte des incertitudes et des limitations applicables (Dribat, 2015).

### I.1. Modélisation hydrogéologique

#### I.1.1. Définition du modèle mathématique en hydrogéologie

Un modèle est par définition une représentation simplifiée d'un système complexe. Cette représentation doit être la plus conforme possible à la réalité du point de vue des mécanismes et processus simulés, elle repose cependant sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Son degré de conformité à la réalité peut aussi dépendre des objectifs assignés à la modélisation.

En hydrogéologie, les principaux objectifs visés par la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive sont d'après Dassargues (1991):

- des calculs de charge hydraulique et de flux de manière spatiale et/ou temporelle,
- des calculs de transferts de solutés.

En effet un modèle mathématique n'est qu'une représentation schématique et symbolique du système réel. La relation entre la réalité (système réel), schéma abstrait (systèmes d'équations) et modèle est représentée dans la figure I.1:

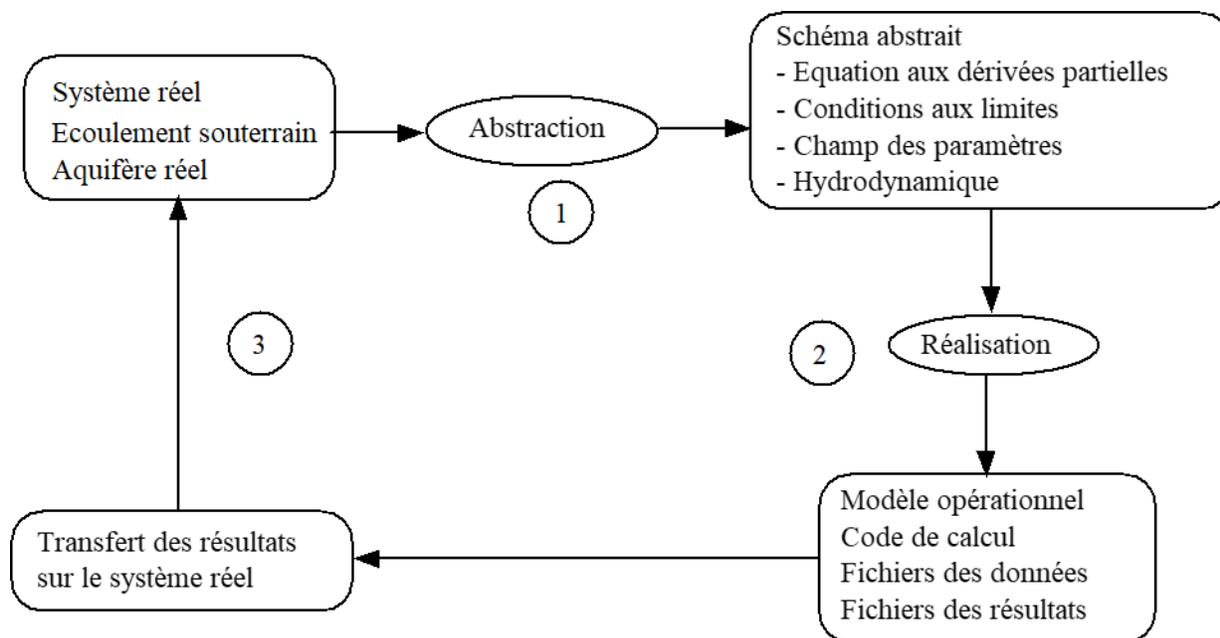


Figure I.1 : Schéma de fonctionnement d'un modèle hydrogéologique  
(Baba- Hamed, 2007)

### I.1.2. Modèles mathématiques appliqués en hydrogéologie

Nous pouvons distinguer d'après Carbonnel et Drobot (1995) :

#### I.1.2.1. Modèle conceptuel

En réalité, le système réel à modéliser est très complexe et compliqué. La conceptualisation ou la construction d'un modèle conceptuel du problème étudié consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Ces hypothèses réduisent le problème réel en un problème simplifié qui doit être acceptable au vu des objectifs de la modélisation et des questions spécifiques auxquelles il faut répondre.

Les hypothèses fondamentales peuvent être relatives aux aspects suivants :

- Analyse en régime permanent ou transitoire,
- Dimensionnement du modèle : 1D, 2D vertical, 2D horizontal, quasi-3D, 3D,
- Géométrie des frontières,
- Types de matériaux géologiques dont est composé le domaine,
- Homogénéité/hétérogénéité, isotropie/anisotropie, déformabilité des matériaux,
- Nombre et type de phases fluides,
- Propriétés des différentes phases fluides (densité, viscosité, présence de soluté, compressibilité),
- Mécanismes de transport à l'intérieur du domaine,
- Régimes d'écoulement des fluides impliqués (laminaire, turbulent),
- Présence/absence d'une surface libre ou, de façon plus générale, d'une interface fluide-fluide macroscopiquement abrupt,

- Conditions aux frontières du domaine pour l'écoulement et le transport,
- Condition initiales à l'intérieur du domaine.

La bonne sélection des hypothèses acceptables pour chaque cas spécifique est importante à plus d'un titre. Elle permet, bien sûr, de simplifier le problème mais il est très important de s'en souvenir lors de l'interprétation des résultats donnés par le modèle.

### **I.1.2.2. Modèle mathématique**

Il y'a lieu de transcrire le modèle conceptuel en un modèle mathématique, en équations mathématiques. Le modèle mathématique existera à partir de la définition de la géométrie, des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées (masse des fluides, des composés), des équations de flux (flux exprimés en fonction des variable d'état), des équations constitutives décrivant les propriétés des différents fluides (dépendance de la densité et de la viscosité en fonction de la température, de la pression, de la concentration, etc), des termes de sources et disparition, des conditions initiales et des conditions aux frontières décrivant les interactions du domaine étudié avec son environnement.

### **I.1.2.3. Modèle numérique**

Le modèle mathématique doit être résolu en fonction des variables d'état pour le cas d'étude. Les modèles numériques permettant la résolution de problèmes d'écoulement et de transport en milieu poreux saturé et non saturé sont habituellement les suivants :

- La solution est trouvée en des points discrets du domaine spatio-temporel,
- Les équations aux dérivées partielles sont remplacées par un système d'équations algébriques, écrites en fonction des variables d'état comme inconnues,
- La solution du problème est obtenue pour le set spécifié de valeurs des paramètres.
- Le nombre d'équations à résoudre simultanément dans le système est souvent très important : il faut donc avoir à sa disposition un programme informatique (code) qui soit efficient à cette fin.

### **I.1.2.4. Modèles numériques déterministes**

Ce type de modèle mathématique est basé sur un ensemble d'équations qui, moyennant certaines hypothèses et certaines approximations, décrivent le phénomène physique étudié. L'approche déterministe se base sur le principe de causalité liant par une relation unique la cause et les résultats (Dassargues, 1991).

En appliquant ce principe aux écoulements souterrains, on obtient : une nappe aquifère caractérisée par ses paramètres (porosité, perméabilité...), soumise à une sollicitation extérieure représentée par exemple par les variables de surface (infiltration, flux et charge imposés aux limites, pompages...), régie d'une manière définie par l'équation de diffusivité, cette réaction étant mesurée par les variables dépendantes (niveaux piézométriques).

La résolution de modèles déterministes peut s'opérer par une approche stochastique (ou probabiliste). L'approche stochastique postule que les paramètres représentant la nappe et les variables indépendantes

sont des variables aléatoires possédant des fonctions de probabilité déterminées (De Marsily, 1982 *in* Dassargues A., 1991). En utilisant les mêmes équations différentielles que les modèles déterministes, les modèles stochastiques déterminent la loi de distribution de probabilité de la variable dépendante, en quantifiant de surcroît une certaine variabilité qui s'apparente à l'erreur.

Dans cet état des lieux, le calcul est réalisé en résolvant l'équation aux dérivées partielles avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées. La solution proposée par le modèle consiste en un calcul de la piézométrie (ou du champ de pression), et des flux aux limites du modèle.

## **I.2. Etapes de la modélisation**

La mise en œuvre du modèle nécessite le déroulement des étapes suivantes :

### **I.2.1. Conception et construction du modèle (Caractérisation)**

La caractérisation est la phase de reconnaissance détaillée de l'objet en vue d'aboutir à un modèle adéquat. Elle consiste à rassembler le maximum de données sur l'objet.

### **I.2.2. Analyse de données naturelles (Structure de la nappe)**

Elle s'appuie principalement sur les données géologiques, la cartographie de la surface, les coupes lithologiques, la géophysique, etc. Cette structure doit être résumée par des cartes qui comporteront tous les renseignements possibles (courbes isopaches, isobathes...).

### **I.2.3. Typologie de l'écoulement et du système**

C'est une étape très importante ayant pour objectif de définir l'écoulement qui se produit dans le système.

### **I.2.4. Paramètres structuraux**

Ce sont deux paramètres fondamentaux :

#### **I.2.4.1. Conductivité hydraulique**

C'est la perméabilité de Darcy qui exprime la perte d'énergie de l'écoulement à la traversée du matériau. Quand l'hypothèse bidimensionnelle est assurée, on peut substituer à la notion de perméabilité, celle de la transmissivité.

#### **I.2.4.2. Transmissivité**

Dans la pratique des modèles, il y a deux modes d'introduction des valeurs de transmissivité selon le type d'écoulement et les propriétés du milieu :

- ❖ Si les limites inférieures et supérieures entre lesquelles se produit l'écoulement sont invariables, la transmissivité est introduite directement comme un paramètre fixe :

$$T = K \cdot e \text{ (aquifère homogène)}$$

$$T = \sum K_i \cdot e_i \text{ (Aquifère stratifié)}$$

- ❖ Si la limite supérieure de l'écoulement en l'occurrence de la surface libre varie par rapport à la hauteur mouillée  $e_m$ , on définit la loi de variation de la perméabilité selon la verticale :

$$T = K \cdot e_m = K (Z - Z_s)$$

Z: Altitude du toit de l'aquifère

Zs : Altitude du mur de l'aquifère

### I.2.4.3. Coefficient d'emménagement

C'est un terme sans dimension qui exprime la capacité du milieu à stocker et restituer l'eau.

## I.2.5. Conditions aux limites des systèmes

### I.2.5.1. Limites à niveau imposé

Elles correspondent à des plans d'eaux libres (rivières, lacs ou étangs) qui sont indépendants du fonctionnement du système qu'ils limitent.

Les sources peuvent être considérées comme des limites à niveau imposé, mais il faut s'assurer de leur pérennité au moins durant la période à représenter.

### I.2.5.2. Limites étanches

Ce sont les contacts entre les formations perméables et imperméables, elles sont définies par l'analyse géologique et dérivent directement de l'étude de la structure du système.

### I.2.5.3. Limites à flux imposé

Nous avons principalement :

- Des lignes de contact entre domaines aquifères de perméabilité différentes, d'emménagement et d'extensions différentes. Par exemple, une nappe alluviale très transmissive mais de capacité limitée et un coteau moins perméable mais qui présente une forte réserve soutenue par une alimentation permanente.
- Des zones de pertes à partir de cours d'eau éloigné du plan de saturation afin qu'il n'y ait pas de relation directe entre l'eau libre et le niveau piézométrique.

### I.2.5.4. Conditions internes-singularités

Après avoir analysé les données qui ont conduit à définir un domaine fermé par des limites externes linéaires, il faut se préoccuper de rechercher les conditions à afficher à l'intérieur du système.

- a- **Les conditions de débit imposable par zones:** elles correspondent à des aires d'échange de la nappe avec l'hydrosphère, comme il peut s'agir de prélèvement ou d'apports. A ce type de condition appartiennent :
- Les aires d'alimentation des nappes à surface libre telles que les pluies, l'épandage de crue en piémonts, les pertes des eaux d'irrigation, etc...
  - Les aires d'émergence de ces mêmes nappes (par action de l'évaporation),
  - Les aires drainant des nappes captives, c'est à dire, les zones où se produisent des transferts à travers une éponte.
- b- **Les conditions d'émergence liées à la piézométrie:** elles correspondent aux notions de sources de débordement ou de cours d'eau indigènes dont l'existence n'est garantie que pour autant que la piézométrie de la nappe se maintient alentour à un niveau supérieur à leurs côtes d'émergence.
- c- **Les conditions de niveau liées à la piézométrie:** Il s'agit de fenêtres dans la nappe qui peuvent être d'origine naturelle ou artificielle, mais ne sont pas reliées à un écoulement superficiel.
- d- **Les conditions ponctuelles de prélèvement ou d'injection:** Il faut bien connaître le comportement du système à représenter avant la mise en œuvre du modèle.

Dans la phase d'analyse des données, il faut d'abord se poser la question du type de régime qui sera à représenter et choisir le comportement dont on visera la reproduction sur modèle (comportement de référence).

### I.2.6. Choix de comportement de référence

Il faut pour chaque état piézométrique connu avec une bonne précision, indiquer les conditions jugées explicatives en les exprimant en termes numériques.

### I.3. Choix d'une stratégie de modélisation

La méthode du modèle a pour objectif d'aboutir à des prévisions de comportements nouveaux liés à des conditions particulières de fonctionnement du système. On doit donc définir le modèle qui permettra le mieux de faire ces prévisions.

#### I.3.1. Forme générale du modèle

Elle découle de l'analyse des comportements observés et de la nature des prévisions à faire. Elle se résume par la forme de l'équation d'écoulement.

#### I.3.2. Maillage et précision

Le maillage doit être assez fin pour que l'erreur de discrétisation due à la méthode des différences finies soit largement inférieure à l'incertitude.

### I.3.3. Conditions imposées

Les modèles aux différences finies permettent d'imposer directement pour chaque maille 3 types de conditions :

- **Limite étanche** : Pour imposer une telle condition sur le côté d'une maille, il suffit d'afficher un débit nul en provenance de la maille adjacente, ce qui avec le mode d'imposition des conductivités que nous préconisons revient à afficher une transmissivité nulle dans la maille adjacente.
- **Niveau imposé** : Il ne peut être imposé, que par maille et sur l'ensemble de la maille.
- **Débit imposé** : Il est de même affiché pour l'ensemble de la maille et présente un débit réparti de manière homogène sur toute la surface.

### I.3.4. Paramètres

Ils sont affichés par maille. Certaines valeurs sont valables pour le centre de la maille, tandis que d'autres sont valables pour toute la maille. Il faut obligatoirement afficher une valeur par maille, même dans les zones où les paramètres sont mal connus.

### I.3.5. Régime transitoire (conditions initiales)

Selon le théorème de superposition, tout régime transitoire est décomposable à partir d'un instant donné en deux termes :

- La suite de la variation en cours avant cet instant sous l'influence des conditions qui l'ont engendrée.
- La variation engendrée par les nouvelles conditions.

## I.4. Identification (calage) et vérification

### I.4.1. Considérations théoriques

Identifier, c'est valider la forme du modèle choisi et d'autre part, rechercher les meilleurs paramètres. Le principal problème à résoudre, une fois la caractérisation achevée est l'identification des paramètres du système qui ne sont connus par mesure qu'en quelques points.

La résolution du problème d'identification se fait dans un domaine d'espace étendu que l'on désigne du nom : « problème inverse ».

#### I.4.1.1. Problème inverse selon la théorie des équations aux dérivées partielles

Les principales conclusions qui ont un intérêt pratique pour l'identification des paramètres sont:

- **La démarche directe** : l'équation fondamentale du mouvement admet une solution unique dès que sont fixées à la fois la forme du domaine, conditions aux limites et répartitions des paramètres. Pour un système déterminé, la répartition des paramètres, conditions aux limites et réponses du système sont tenus à être cohérentes entre elles.
- **La démarche inverse** : selon la théorie des équations aux dérivées partielles, cette démarche consiste à expliquer les relations entre ces divers éléments.

#### I.4.1.2. Problème inverse par les théories d'optimisation

Dans cette approche, on cherche la répartition des termes à identifier qui satisfasse au mieux l'équation du mouvement sous un certain nombre de contraintes :

- D'abord, on doit formuler l'écart entre la piézométrie donnée par le modèle  $H_p$  et celle observée  $H_r$

$$P = \|H_p - H_r\|$$

$P_i$  : Paramètre

- Proposer une méthode d'optimisation afin de trouver la répartition du paramètre qui minimise  $\sum(P_i)$

#### I.4.2. Règles pratiques d'identification

##### I.4.2.1. Tests de cohérence

Ce test a pour objectif de vérifier s'il y a une cohérence entre l'ensemble des données et l'hypothèse formulée.

A la suite des tests de cohérence, la forme du modèle doit pouvoir être considérée comme définitivement fixée ainsi que la position et la nature des conditions aux limites. Ce n'est qu'à cette condition que peut être valablement entreprise l'étape d'identification des paramètres.

##### I.4.2.2. Identification des paramètres

C'est l'étape fondamentale du calage. Elle consiste à rechercher les meilleures répartitions des paramètres. Cette opération suppose une bonne détermination de la forme du modèle et des conditions aux limites.

Trois paramètres sont à identifier :

- Transmissivité (T), en prenant comme référence le régime permanent,
- Coefficient d'emmagasinement (S), lorsque T est fixée,
- Infiltration (I), lorsque T et S sont fixés.

##### I.4.2.3. Vérification

Pour les nappes qui ont subi de fortes perturbations, soumises à des états piézométriques très différents, il faut vérifier la répartition des paramètres.

### **I.5. Exploitation des modèles calés**

La phase d'exploitation des modèles constitue l'apport le plus original et le plus important pour les utilisateurs d'eau, puisqu'elle permet d'apporter des réponses précises à leurs questions et de trouver une stratégie de gestion des ressources en eau souterraines.

### **I.6. Erreurs liées à l'utilisation des modèles**

Différentes erreurs peuvent fausser l'utilisation des modèles. Le dimensionnement des mailles est important, il est conditionné par les connaissances initiales du milieu physique. A titre d'exemple, il est inutile d'utiliser un maillage trop petit si l'on ne se dispose pas de données suffisantes. Il en découle une dépense de calculs superflus. En général, on distingue quatre types d'erreurs :

#### **I.6.1. Erreurs conceptuelles**

L'utilisation d'un modèle non approprié au problème, ou la mauvaise formulation du modèle lui-même entraîne des erreurs incontournables.

#### **I.6.2. Erreurs de données**

Elles sont issues de la mauvaise connaissance des conditions hydrodynamiques qui régissent les écoulements souterrains (conditions initiales et conditions aux limites).

#### **I.6.3. Erreurs de troncature**

Elles sont liées à la mauvaise discrétisation du domaine (mailles trop grandes) ainsi qu'à la méthode de résolution des équations différentielles qui régissent les écoulements (méthodes des différences finies ou des éléments finis).

#### **I.6.4. Erreurs d'arrondis**

Ces dernières sont généralement négligeables par rapport aux autres types d'erreurs.

### **I.7.Limites de la modélisation**

La modélisation n'étant qu'une représentation schématique de la réalité, elle ne va pas sans poser quelques problèmes qu'il faut constamment garder en mémoire afin de pouvoir interpréter des résultats de simulations.

#### **I.7.1. Incertitudes conceptuelles**

Dans le domaine des sciences de la terre, on se place toujours dans un système à au plus quatre dimensions (les trois dimensions de l'espace et celle du temps) ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  et  $t$ ). Ces discrétisations ont pour conséquence directe de ne connaître les valeurs des variables calculées qu'en quelques points de l'espace et du temps. Se pose alors le problème de l'interpolation de la valeur de la variable en tout point de l'espace et du temps. Plus les discrétisations de l'espace et du temps sont grossières et plus les erreurs de calcul risquent d'être importantes.

### **I.7.2. Disponibilité des données et incertitudes**

En supposant acceptables les approximations liées à la structure des modèles, la modélisation se heurte à un problème de disponibilité des données et aux incertitudes sur ces données. Les méthodes de mesures ponctuelles à des échelles spatiales beaucoup plus fines que la discrétisation choisie posent le problème de la comparaison entre les résultats simulés sur une maille et ceux observés en un point. Ainsi, le passage de l'échelle locale à l'échelle régionale apporte une certaine incertitude sur les paramètres.

### **I.7.3. Calage**

Évaluer, fait l'objet d'une estimation par calage. Il s'agit de rechercher la valeur optimale de ces paramètres en fonction des critères choisis.

La qualité de la simulation sur une période est évaluée en mesurant les écarts entre les séries simulées et observées, l'ajustement des paramètres consiste à rechercher l'écart minimum.

### **I.7.4. Discrétisation et prédiction**

Caler un modèle n'assure pas qu'on peut réaliser des simulations, il faut s'assurer que la représentation faite par le modèle est conforme à la réalité. En effet un essai de validation ne permet pas de conclure qu'un modèle est une représentation exacte de la réalité dans la mesure où un nouveau jeu de données peut invalider la théorie en vigueur (fig.I.2).

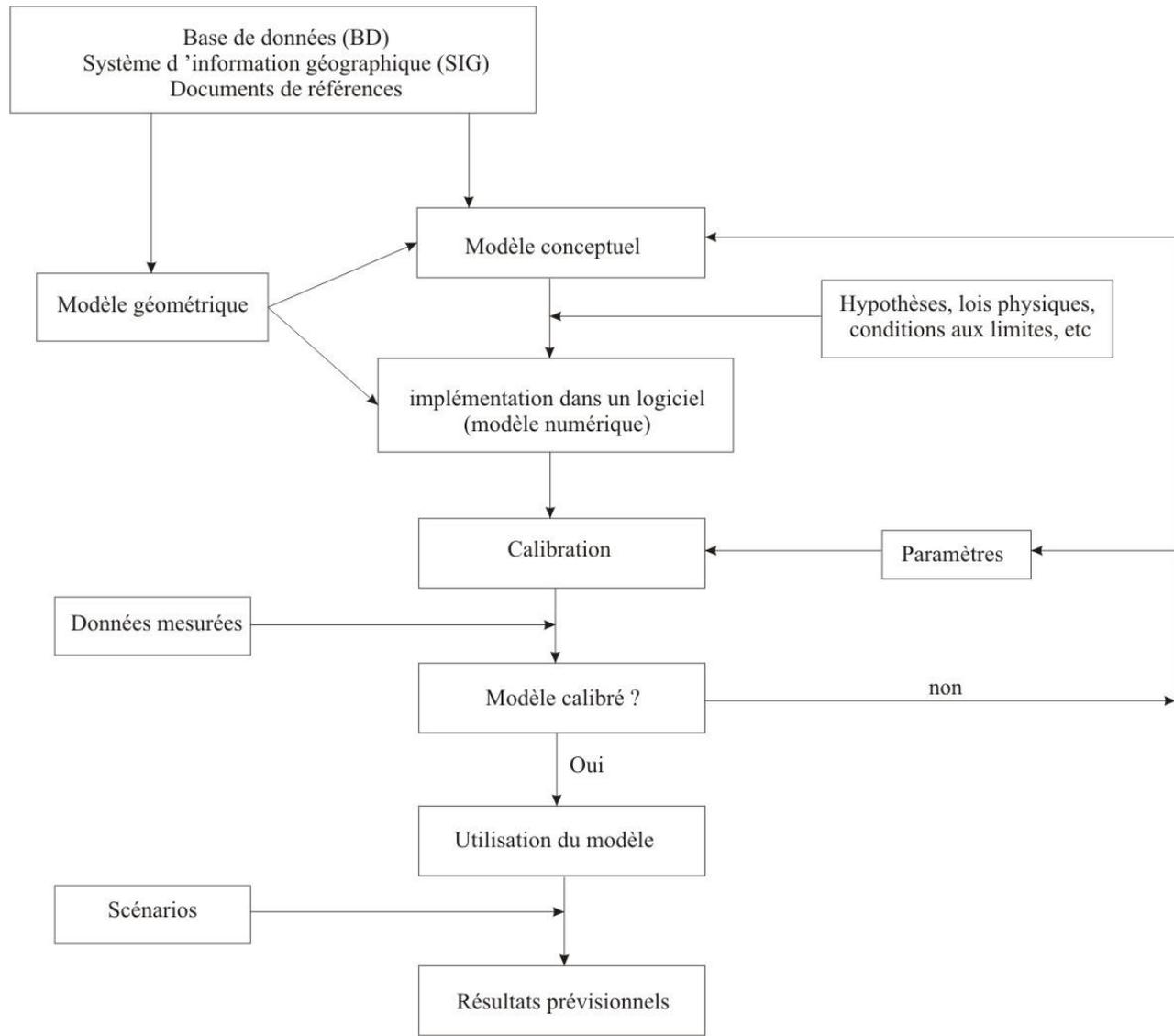


Figure I.2 : Étapes de la modélisation hydrogéologique

### I.8. Formulation mathématique

Ce bref aperçu est tiré de la thèse de doctorat de Baba-Hamed, 2007.

L'écoulement en nappe est décrit par l'équation de la diffusivité qui découle de la combinaison de trois relations.

- L'équation de la continuité,
- La loi de DARCY,
- et la loi de conservation de masse.

Nous obtenons l'équation de diffusivité :

$$\operatorname{div}(\overline{\overline{\mathbf{K} \operatorname{grad} h}}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (1)$$

avec :

$\mathbf{K}$  : Tenseur de perméabilité [ $L \cdot T^{-1}$ ].

$h$  : Charge hydraulique [ $L$ ].

$S_s$  : Coefficient d'emmagasinement spécifique.

$q$  : Débit d'eau prélevé ou injecté par unité de surface.

L'expression de cette équation de la diffusivité dans un repère à trois dimensions pour un volume élémentaire représentatif, donne :

$$\text{avec :} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q + S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

$T_x$  et  $T_y$  : Transmissivités de l'aquifère selon les directions respectives  $O_x$  et  $O_y$  [ $L^2 \cdot T^{-1}$ ].

$S$  : Coefficient d'emmagasinement (nappe captive), porosité efficace (nappe libre) (sans dimension).

$q$  : Débits entrants ou sortants par unité de surface [ $L^3 \cdot T^{-1} / L^2$ ].

$h$  : Charge hydraulique [ $L$ ].

### I.8.1. Méthodologie de résolution des équations

Les solutions les plus opérationnelles de l'équation de diffusivité sont obtenues à l'aide de méthodes numériques telles que les différences finies, les éléments finis et les éléments frontières. Ces méthodes sont définies ci-dessous (définitions proposées par De. Marsily, 2004).

#### I.8.1.1. Méthode des différences finies

Appelée aussi " approximation des équations ", facile à comprendre et à programmer. Elle convient très bien à la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes, en une ou deux dimensions, dans des systèmes multicouches ou à trois dimensions. Bien qu'elle soit, en principe, capable de traiter des mailles de n'importe quelle forme et taille, elle est, en pratique, limitée à des mailles simples : des carrés réguliers, des carrés gigognes, ou des parallélépipèdes rectangulaires à trois dimensions (fig.I.3), Elle peut très bien représenter les hétérogénéités du milieu, pourvu que la forme de ces hétérogénéités puisse être décrite de façon adéquate par la forme des mailles. Dans la pratique, l'anisotropie doit être limitée aux directions parallèles aux côtés des mailles. Elle convient moins bien à la résolution de l'équation de transfert d'un élément en solution sauf dans les cas où les méthodes des caractéristiques et du calcul des trajectoires des particules sont utilisées.

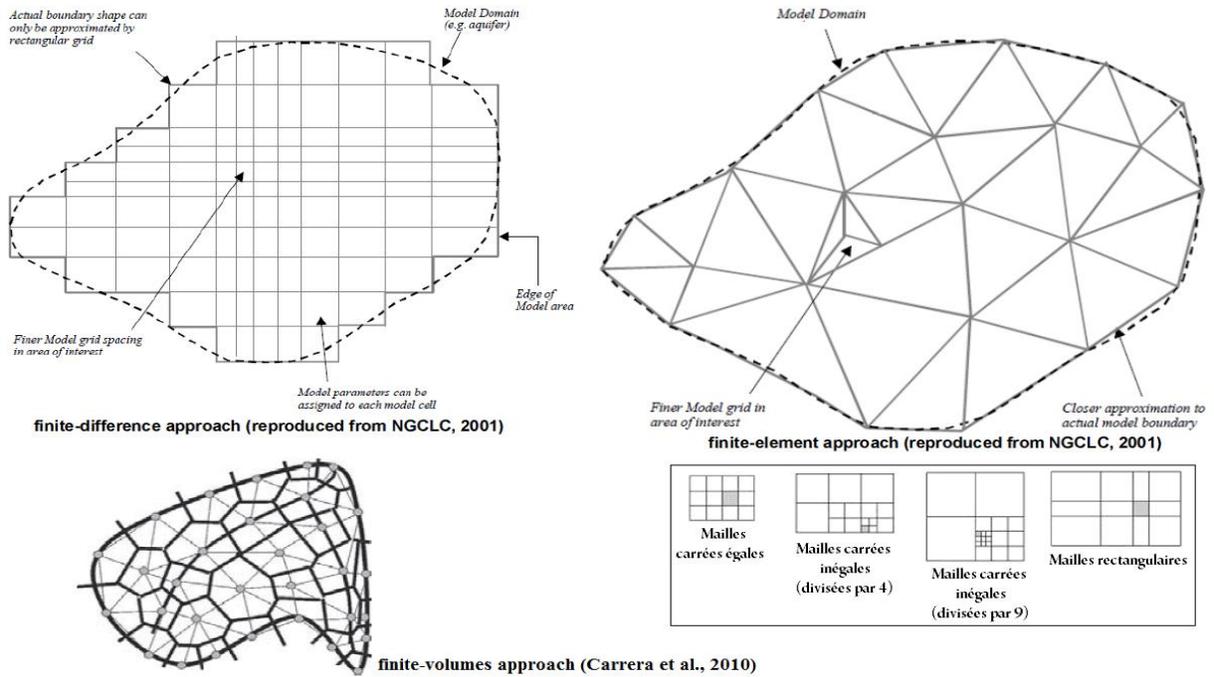


Figure I.3 : Méthodes de résolution numérique et approches de discrétisation (Ledoux, 2003)

### I.8.1.2. Méthode des éléments finis

Elle s'appelle aussi "approximation des solutions", est moins facile à expliquer et beaucoup moins facile à programmer que la précédente. Comme cette approche est plus flexible que celle des différences finies, un programme d'éléments finis peut être plus compliqué à utiliser. Cependant la forme des mailles est beaucoup moins limitée : en pratique, on prend des triangles (fig.I.3) et des quadrilatères en 2D et en trois dimensions, des tétraèdres et des parallélépipèdes de n'importe quel angle. Ceci permet de décrire d'une manière beaucoup plus satisfaisante la forme des limites du milieu ainsi que celle des hétérogénéités ou les fonctions sources, ce qui rend également la méthode des éléments finis idéale pour résoudre les problèmes à limite mobile, par exemple ceux ayant une surface libre et une interface abrupte entre eau douce et eau salée ou entre deux fluides immiscibles. Elle est capable de traiter toutes les directions d'anisotropie et ces directions peuvent changer d'un élément à l'autre et avec le temps. En pratique, dans les problèmes d'écoulement, la méthode des éléments finis peut être employée pour des études régionales, mais elle est particulièrement efficace dans les problèmes locaux de génie civil tels que l'exhaure de l'eau d'une excavation, le drainage d'une mine où les formes des limites et des hétérogénéités doivent être représentées avec précision. Pour résoudre l'équation de transfert d'un élément en solution, la méthode des éléments finis est bien supérieure à celle des différences finies, puisqu'elle peut traiter l'anisotropie du tenseur de dispersion, et que la taille des mailles peut être adaptée à la grandeur de la vitesse, on peut ainsi rechercher un compromis entre la stabilité et la dispersion numérique.

La figure. I.4, ci-dessous montre les démarches de résolution des équations aux dérivées partielles.

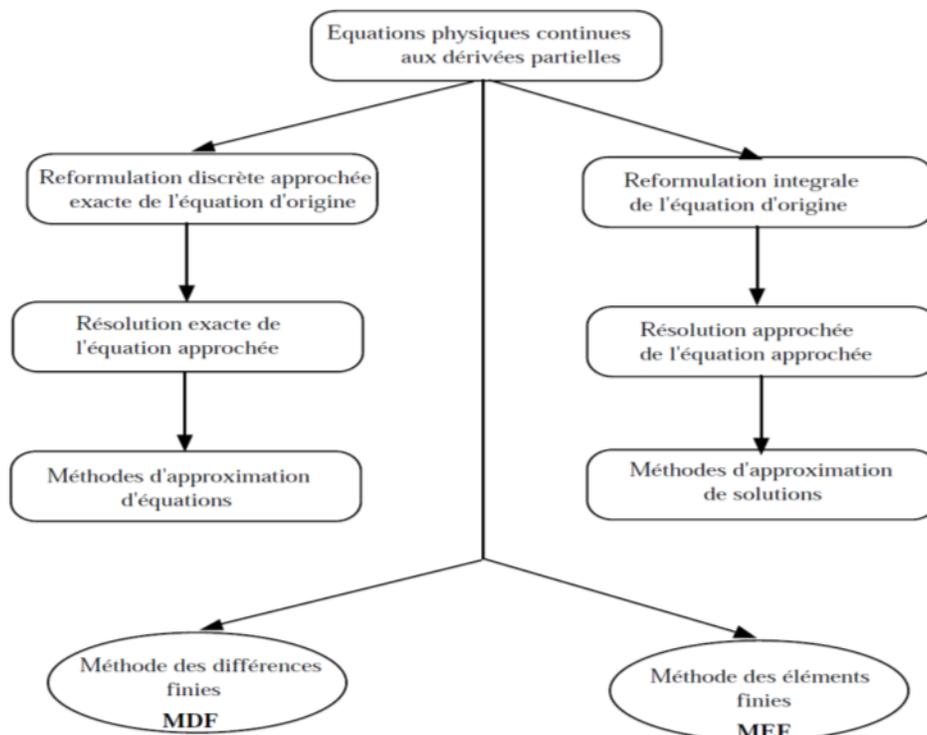


Figure I.4: Méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles(Baba-Hamed,2007)

## I.8.2. Conditions initiales et conditions aux limites

### I.8.2.1. Condition initiales

Les conditions initiales sont données par la variable H (charge hydraulique) qui est supposée être connue en tout point du domaine modélisé à un temps référence t = 0.

### I.8.2.2. Conditions aux limites

Nous pouvons distinguer d’après, Carbonnel & Drobot, 1995) :

#### I.8.2.2.1. Conditions de pression ou potentiel imposé

Connues sous le nom de conditions de Dirichlet, elles reviennent à spécifier le potentiel (ou pression) sur les limites où celui-ci est indépendant des flux échangés. En termes de hauteur piézométrique, ce type de condition s’exprime par :

$$H=f(x,y,z,t) \tag{3}$$

où : f est une fonction connue.

Selon l’expression (3), cette hauteur piézométrique imposée peut varier dans l’espace et dans le temps. La spécification de ces éventuelles variations est soumise aux discrétisations spatiale et temporelle.

En pratique, ces conditions aux limites peuvent être choisies dans les cas suivants :

- Au contact entre un aquifère et des eaux libres de surface (rivière, lac),
- Lorsque des lignes équipotentielles peuvent être distinguées (barrages, assèchements de fouille),
- Lorsqu'une zone restreinte comprise dans un aquifère très vaste doit être modélisée et que les flux aux limites de cette zone sont inconnus, elles doivent alors être reportées assez loin de la zone de sollicitation afin de ne pas trop influencer la solution.

Remarquons que, via ce type de limites, des flux énormes (et peut-être disproportionnés) peuvent entrer ou sortir du modèle.

#### I.8.2.2.2. Conditions de flux ou de débit imposé

Connues sous le nom condition de Neumann, elles reviennent à spécifier le débit sur les limites du modèle, indépendamment des hauteurs piézométriques (ou pressions) trouvées sur celles-ci. En utilisant la loi de Darcy, c'est donc le gradient normal à la frontière qui est imposé :

$$K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \quad (4)$$

$n$ : représente la direction perpendiculaire à la surface ou à la frontière étudiée.

Si une limite correspond à une ligne de courant, aucun flux n'est toléré perpendiculairement, le flux spécifié est nul (condition à flux nul ou condition à frontière perméable) :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

Si un flux non nul, est à spécifier, la condition sur le débit peut s'écrire :

$$S \int K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} ds = q(x, y, z, t) \quad (6)$$

Les frontières imperméables peuvent souvent être utilisées lorsque des contrastes supérieurs à  $10^{-5}$  sont constatés dans les valeurs de perméabilité et que la propagation des variations de pressions interstitielles dans les couches peu perméables n'est pas l'objet de la simulation. Un milieu poreux naturel n'est jamais totalement imperméable au sens strict du terme.

Une frontière imperméable peut également être utilisée à la limite du bassin hydrogéologique de la nappe étudiée, puisque aucun écoulement n'a lieu perpendiculairement à cette limite, même caractéristique que dans l'aquifère (fig.I.5).

Des frontières à débit imposé sont généralement distinguées au sommet du modèle pour tenir compte d'une réalimentation efficace (sauf si la réalimentation est stoppée par le trop-plein de l'aquifère provoquant le ruissellement en surface et des conditions de potentiel imposé), il s'agit alors de conditions de débit répartie uniformément sur la surface du toit de l'aquifère.

$$-K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{e'} \cdot h = \frac{K'}{e'} \cdot h_r \quad (7)$$

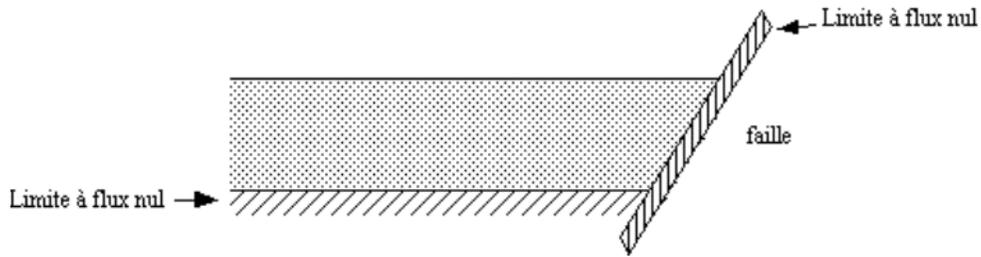


Figure I.5: Limites à flux nul.

Les principales sollicitations des aquifères, imposées par les puits et galeries de pompage (et/ou de réinjection), les tranchées dont les débits sont connus, sont généralement introduites par des conditions aux débits imposés.

**I.8.2.2.3. Condition de Fourier**

Cette condition se présente lorsqu'une rivière dont le fond est colmatée et est en communication (drainage ou alimentation) avec une nappe libre (fig.I.6).

La condition de Fourier est alors définie par la conservation du flux à la traversée de l'interface AB et s'écrit :

$$-K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} + \frac{K'}{e'} \cdot h = \frac{K'}{e'} \cdot h_r \quad (8)$$

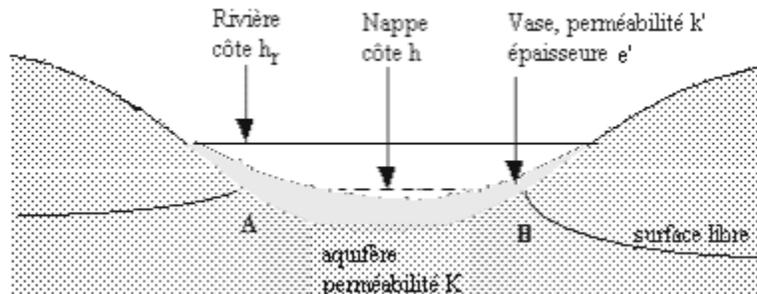


Figure I.6: Condition de Fourier (De. Marsily, 1981).

**I.8.2.2.4. Condition de surface libre**

La condition de surface libre est une double condition imposée sur une surface.

**a- Condition de potentiel**

La pression atmosphérique s'exerce sur tous les points M de la surface libre considérée (fig.I.7). Exprimée en charge, elle est prise par convention égale à 0 :  $h = z$ .

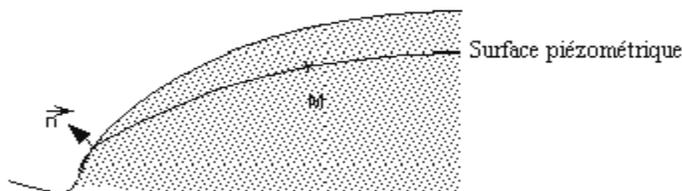


Figure I.7: Condition de surface libre (condition de potentiel)  
(De Marsily, 1981)

### b- Condition de flux

Si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, nous avons :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

Si la surface libre de la nappe est traversée par un flux (alimentation ou évaporation), ce flux est donné par :

$$\frac{\partial h}{\partial n} = a \quad (10)$$

Où

$n$  : Vecteur normal orienté vers l'extérieur.

$a$  : Flux, positif ou négatif selon qu'il y ait alimentation ou évaporation

### I.9. Typologie des modèles en hydrogéologie

Il existe plusieurs codes de calcul et programmes en modélisation hydrogéologique :

- FEFLOW (Finite Element subsurface Flow system) : programme de simulation des écoulements en milieu poreux et fracturés, qui se montre performant dans les simulations du transport des contaminants et du transport de chaleur sous des conditions de saturation variables, allant de l'échelle locale à une échelle plus régionale.
- NEWSAM (Simulation des Aquifères Multicouches pour les écoulements souterrains), développé par l'école des mines de Paris, son principe repose sur l'association de plusieurs modèles : le modèle hydrologique MODCOU (Ledoux 1980) et le modèle hydrogéologique NEWSAM (Levassor et Ledoux 1996).
- WINASM (Aquifer Simulation Model for Windows) : est une implémentation complète d'un modèle d'eau souterraine 2D. C'est un modèle de flux et de transport des eaux souterraines à différences finies, développé par Kinzelbach et Rausch en 1995.

- MODFLOW (Modeling Flow) : est le modèle d'écoulement modulaire à différences finies de l'U.S. Geological Survey, qui est un code informatique qui résout l'équation d'écoulement des eaux souterraines à travers les aquifères.
- PMWIN (Processing Modflow for Windows) : est un système de simulation complet pour modéliser les processus d'écoulement et de transport des eaux souterraines avec le modèle d'eau souterraine à différences finies 3D MODFLOW, les modèles de suivi des particules PMPATH pour Windows ou MODPATH, le modèle de transport de soluté MT3D et l'estimation des paramètres programme PEST.

### **I.10. Conclusion**

La modélisation hydrogéologique est un outil puissant qui permet de mieux comprendre et de prédire le comportement des systèmes aquifères. Cependant, cette approche comporte des incertitudes et des limites inhérentes à la complexité des processus hydrologiques et des paramètres impliqués. Il est donc essentiel d'adopter une approche prudente en évaluant les hypothèses et les données d'entrée, en effectuant des analyses de sensibilité et en estimant l'incertitude associée aux prévisions. En outre, une communication claire et transparente des résultats et des limites de la modélisation est importante pour une utilisation efficace de cette méthode dans la gestion et la protection des ressources en eau souterraine.

Dans le but de la compréhension de l'aquifère alluvial de Maghnia compte tenu de la structure souterraine ainsi que son hydrodynamique souterrain, nous avons fait appel aux approches mathématiques inscrites dans ce chapitre pour pouvoir simuler la situation le plus proche possible de la réalité.

***CHAPITRE II :***  
***PRESENTATION DE LA***  
***ZONE D'ETUDE***

## II. Introduction

La plaine de Maghnia s'étend sur environ 351 km<sup>2</sup> et se situe à l'extrême nord ouest de la wilaya de Tlemcen. Elle est bordée sur sa rive gauche par l'oued Sebdou et sur sa rive droite par l'oued Mouilah. Elle est riche en sols rouges et en marnes salifères du Miocène et est utilisée pour l'agriculture.

### II.1. Situation géographique

La plaine de Maghnia se situe au Nord Ouest de l'Algérie entre les Monts de Tlemcen au Sud (Rhar-Roubane) et les Traras au Nord (Djebel Fillaoucène). Elle est bordée à l'Est par le Djebel Tefatisselle se prolonge par la plaine des Angads au Maroc à l'Ouest.

La plaine est traversée par l'Oued Ouarefou et ses affluents (Oued Aouina, Oued Mehaguène et Oued Abbès).

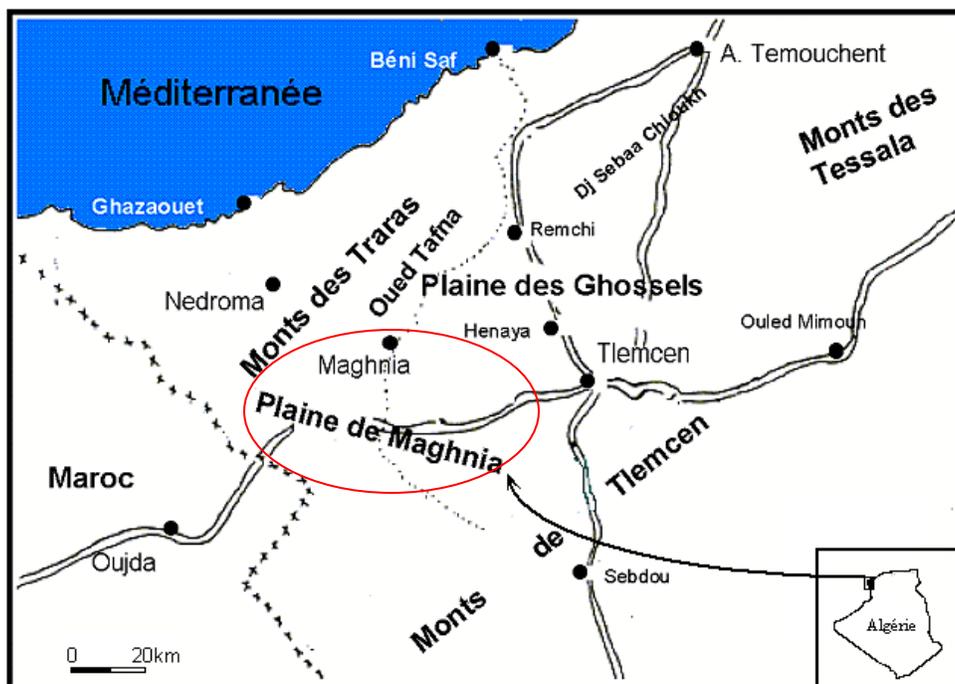


Figure II.1: Carte de situation de la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007)

### II.2. Hydrographie

Deux oueds principaux traversent la plaine de Maghnia (fig. II.2) :

- L'oued Mouilah, important affluent rive gauche de la Tafna qui prend naissance dans la région d'El Abed, en Algérie, à 1250m d'altitude, puis pénètre au Maroc sous le nom d'oued Isly qui suit un cours intermittent. Il redevient permanent en aval de la ville d'Oujda (Maroc) à 490m d'altitude, sous l'appellation d'oued Bou Naïm, et enfin pénètre en Algérie, aux environs de Maghnia, et prend le nom d'oued Mouilah. Son bassin s'étend sur une superficie de 1827 km<sup>2</sup> et présente une altitude moyenne de 854m.

- L'oued ouardefou avec une superficie de 612 km<sup>2</sup> draine les oueds El Abbès, Aouina et Mehaguène. L'altitude moyenne y est de 676m.

Ces deux oueds définissent deux zones de drainage :

- la première (oued Mouilah) s'étend au Nord de la ville de Maghnia et comprend la plaine des Angads au sens large,
- la seconde (ouardefou) correspond à la plaine de Maghnia proprement dite.

L'oued Mouilah et l'oued Ouardefou confluent en aval de Maghnia et constituent l'exutoire superficiel du bassin fermé, de la plaine d'effondrement de Maghnia.

Entre les deux, le bombement des Béni-Ouassine constitue un seuil peu élevé qui interdit toute communication naturelle.

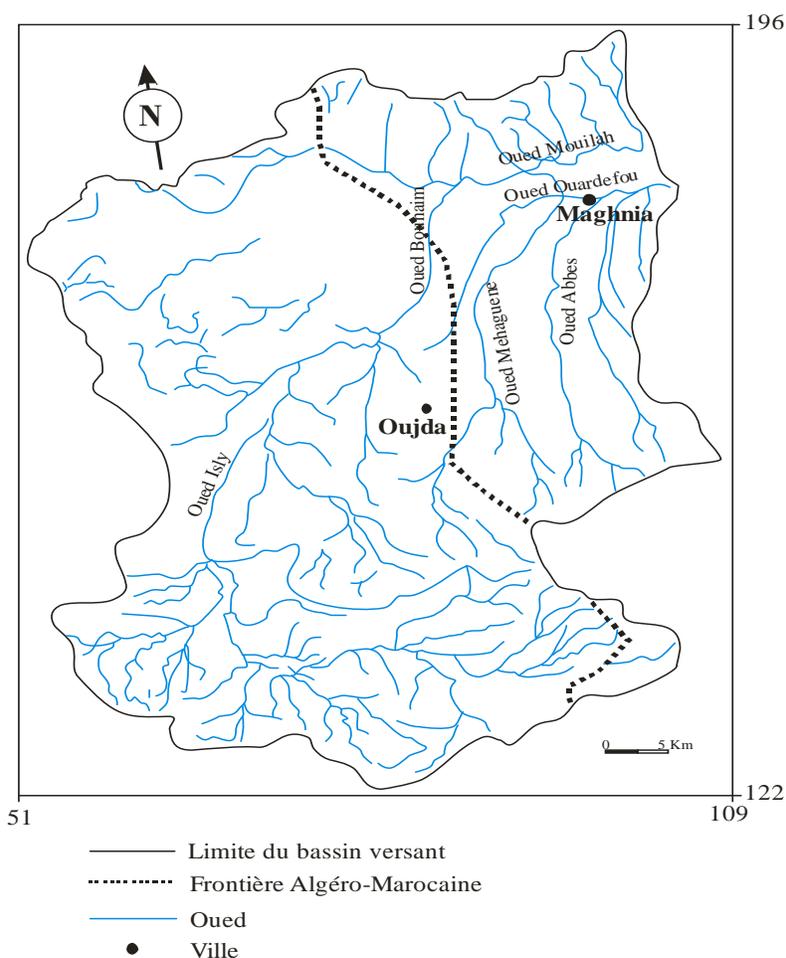


Figure II.2: Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mouilah (Baba Hamed, 2007)

### II.3. Cadre structural et aperçu morphologique de la plaine de Maghnia

Les grands traits structuraux de la région sont hérités de l'orogénèse Hercynienne (Guardia, 1975).

Le secteur étudié peut être considéré comme un graben à remplissage de sédiments récents, limité au Nord par les Monts des Traras qui se prolongent au Maroc par les Monts de Béni Snassen et

au Sud par le Horst de Rhar Rouban. Entre ces deux chaînes, s'installe le bombement des Béni-Ouassine qui recoupe la plaine de Maghnia (fig. II.3).

L'ensemble du substratum jurassique s'abaisse progressivement d'Ouest en Est. Le style tectonique est de type cassant.

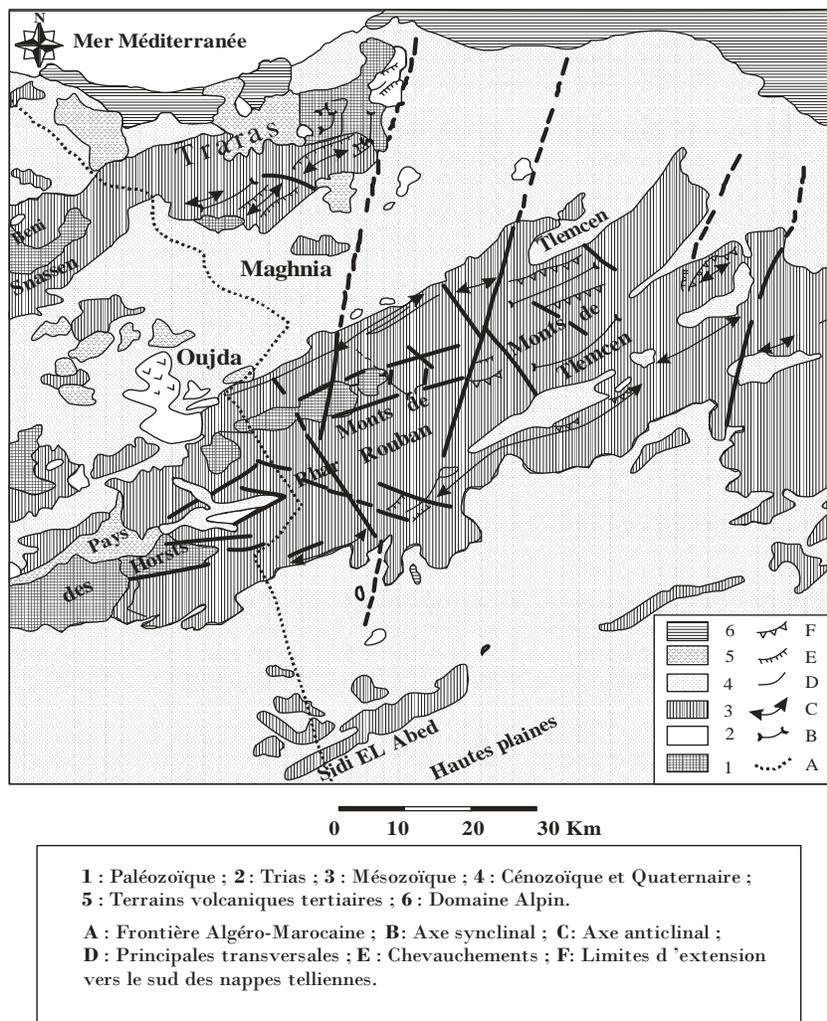


Figure II.3: Carte structurale de la plaine de Maghnia (Mekahli, 1988)

### II.3.1. Unités structurales

La zone étudiée se compose de plusieurs unités structurales. D'après Lucas (1942), on y distingue successivement du Sud vers le Nord :

- une zone synclinale : Ras-Asfour.
- une zone anticlinale au Nord de Rhar-Roubane et au Nord de Béni-Bahdel.
- une zone synclinale: Monts de Kef.
- une zone anticlinale du Djebel Hamra.
- Une zone abaissée de la plaine de Maghnia.

### **II.3.2. Principaux types d'accidents**

Quatre types d'accidents principaux se distinguent dans la région étudiée :

- Accidents WSW-ENE (Nord 70°E) : cette direction correspond à des zones hautes ou effondrées, ils déterminent des mouvements verticaux de grande amplitude (au moins 200m) avec un rejet total supérieur à 1000m pour l'ensemble des failles.
- Accidents SSW-NNE (Nord 20°E) : dont la plupart ont fonctionné en décrochements sénestres, ils correspondent aux transversales de Glangeaud, 1951 (Elmi, 1970).
- Accidents SSW-NNW (Nord 140°E) : ce sont des failles ayant joué en décrochements dextres, comme ceux des Béni- Boussaïd.
- Accidents E-W (Nord 90°E) : ces failles ont aussi joué en décrochements dextres.

### **II.4. Cadre géologique**

La plaine de Maghnia est composée d'une série de dépôts sédimentaires déposés par les cours d'eau qui la traversent. Ces dépôts sont principalement des calcaires, des argiles, des sables et des graviers. Les calcaires sont les plus courants et comprennent des roches calcaire-dolomitiques et des calcaires silicifiés.

La plaine de Maghnia (fig.II.4) est une cuvette allongée selon une direction ENE / WSW, comblée par des dépôts d'érosion des montagnes bordières (Rhar-Roubane et Djebel Fillaoucène). Les reliefs de bordure sont géologiquement très diversifiés.

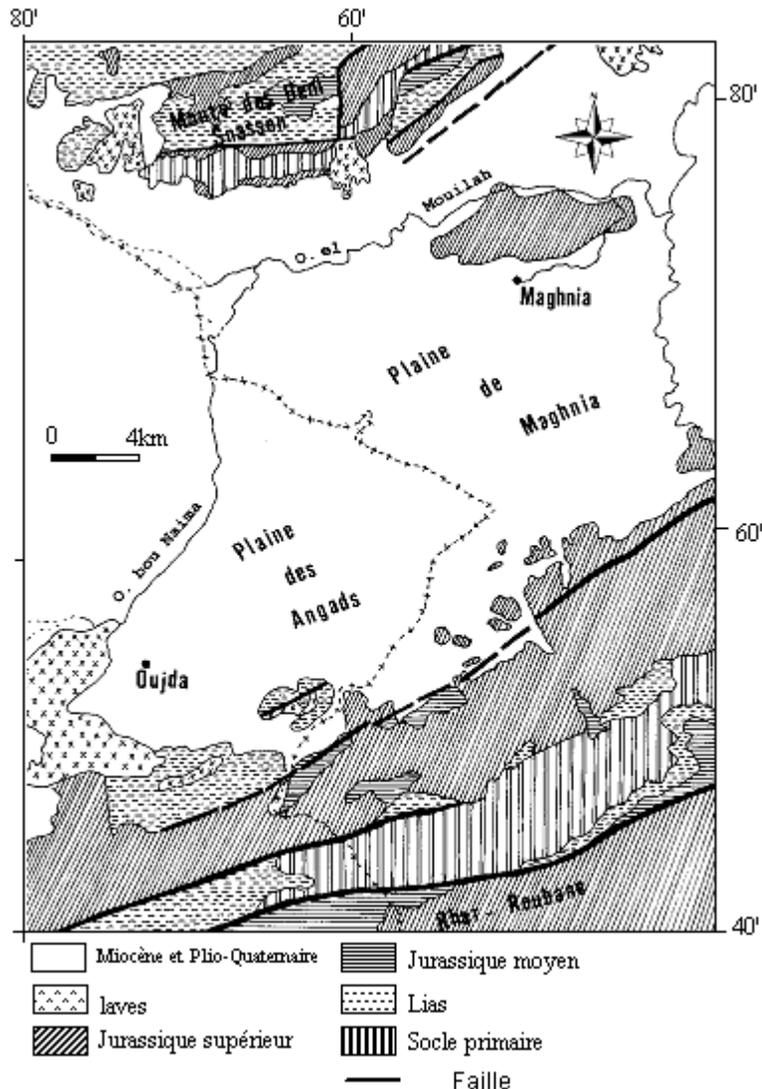


Figure II.4: Carte géologique de la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007)

Les descriptions des formations géologiques sont extraites en grande partie des travaux de Bonnet, (1965), de Benest (1981, 1982, 1985, 1999) et de la thèse de Baba Hamed (2007). Elles sont décrites de bas en haut (fig. II.5):

### II.4.1. Paléozoïque

Formant l'ossature de la région, il correspond à une bande grossièrement orientée SW-NE formée essentiellement de schistes et de quartzites. Cette bande est limitée au Nord et au Sud par des terrains du Secondaire. Dans ce socle primaire, on y distingue :

- a- **Le Silurien** : plissé et métamorphisé, il est représenté par des schistes.
- b- **Le Dévonien** : formé essentiellement des schistes et de quartzites, avec des inclusions de microbrèches, probablement carbonifères. On y trouve parfois des granites à tourmaline.
- c- **Le Carbonifère** : représenté également par des schistes rubéfiés.

**d- Permo-Trias** : formation détritique à galets hétérogènes et hétérométriques cimentés par des argiles rougeâtres

#### II.4.2. Mésozoïque

Reposant en discordance et en transgression sur le primaire, il est formé principalement, par des carbonates renfermant parfois des éléments détritiques provenant des reliefs primaires préexistants :

**a- Jurassique** : c'est une série épaisse dont la puissance est supérieure à 1000m, nous distinguons :

**-Jurassique inférieur et moyen :**

- Lias inférieur : affleurant principalement dans la zone de Sidi-El-Abed au Sud de Rhar-Roubane (Lucas, 1942), représenté par des calcaires bleuâtres avec quelques passées dolomitiques.

- Lias moyen : correspond à des calcaires homogènes charmouthiens (Lucas, 1942) affleurant au Djebel Zeraïg et dans les Béni- Snassen. Ces calcaires présentent des indices d'émersion et comportant des stylolithes durs dues, aux phénomènes de compaction : Ce faciès passe à des calcaires spathiques à brachiopodes rapportés au Domérien avec des éléments de bioturbation.

- Lias supérieur : très bien représenté dans le Horst de Rhar- Roubane à Djebel Belaïch d'où le nom de calcaires à encolithes de Belaïch (Elmi, 1978, 1983).

- Aaléno-Bajocien: représenté par des calcaires à oolithes ferrugineuses.

- Bathonien inférieur et moyen : représenté par des oolithes ferrugineux de Deglen. Il est représenté aussi par des calcaires gris qui passent aux calcaires micro-gréseux, affleurant également au niveau du Djebel Tazmouret.

**- Jurassique supérieur :**

- Callovo-Oxfordien (Argiles de Saïda): c'est un ensemble grésopélitique avec notamment des alternances de marnes et de bancs épais de grés très riches en ammonites de grande taille (macrocéphalites) et des figures sédimentaires liés aux agents hydrodynamiques, à l'activité organique et aux conditions diagénitiques. Cet ensemble affleure aux Djebel Tizinbine et Djebel Boukhellal.

- Oxfordien supérieur-Kimméridgien supérieur

\* Grés de Boumédiène : représenté essentiellement par des sédiments terrigènes à caractère molassique avec des bioturbations affectant souvent les faciès supérieurs des bancs gréseux. Il s'agit d'un ensemble monotone, massif avec des figures sédimentaires (stratifications obliques). Ces grés sont de couleur jaune à brun ferrugineux, à éléments fins à moyens à ciment calcaire.

\* Calcaire de Zarifet: calcaires à laminites stromatolitiques pouvant atteindre une épaisseur de 25m au col de Zarifet (région de Tlemcen). Ces calcaires affleurent dans le Djorf de Deglen.

\* Dolomies de Tlemcen : comprenant à la base des passées calcaires (calcaires bleus à géodes) (Doumergue, 1910), puis au-dessus, un ensemble de dolomies grises macrocristallines, gréseuses, noirâtres à veinules de calcite et constituent l'ensemble des reliefs des Monts de Tlemcen, leur épaisseur varie entre 150-200m, affleurant en bancs massifs au Djebel Tazmouret et au Djorf Deglen. (Mekahli, 1988), attribue les dolomies de Tlemcen au Kimméridgien inférieur, (Benest, 1982), donne à l'ensemble des calcaires de Zarifet et des dolomies de Tlemcen, un âge Kimméridgien supérieur p.p,

\* Marno-calcaires de Raouraï : ayant une épaisseur d'environ 400m, ce sont des marnes grises blanchâtres, en surface, à intercalations de calcaires en bancs épais alternés par des plaquettes de

calcaires riches en petites huîtres. Cette formation correspond aux marno-calcaires intermédiaires définies par (Auclair et Biehler, 1967).

(Doumergue, 1910) attribuait cet ensemble au Kimméridgien moyen. (Benest, 1982) lui donne un âge Tithonique inférieur.

\* Calcaires de Lato : ce sont des calcaires massifs passant vers le haut à des calcaires argileux.

\* Dolomies de Terni : correspondant à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et entrecroisées, elles ont un aspect massif, cristallin à cryptocristallin, affleurant dans le Djorf Deglen. (Doumergue, 1910) les a rangées dans le Kimméridgien supérieur, (Benest, 1982), leur donne un âge Tithonique inférieur p.p.

\* Marno-calcaires de Hariga: il s'agit d'alternance de marnes, de micrites bioturbées et de laminites.

\* Marno-calcaires d'Ouled Mimoun : représenté par une alternance de marnes et de calcaires avec notamment des niveaux plus calcaires dans l'ensemble de la série.

### **II.4.3. Cénozoïque**

Représenté par le Miocène transgressif, formé à la lisière du bassin par une bande plus ou moins large de grès calcaires (d'âge tortonien) qui s'appuie directement sur le Jurassique au Nord et au Sud de la plaine de Maghnia. Plus on s'éloigne de ce contact vers le centre du bassin, plus le pourcentage de particules fines augmente et les grès sont progressivement remplacés par des horizons argileux ou marneux (d'âge Serravalien) gris plus épais environ 500m d'épaisseur.

Au-delà de la périphérie des affleurements jurassiques il n'y a que des cailloutis récents avec une croûte calcaire à la surface du Plio-Quaternaire, on note que les marnes serravaliennes affleurent au niveau de Ragubet Bou Arich.

### **II.4.4. Plio-Quaternaire**

Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérogènes. Selon la lithologie stratigraphique des différents puits et forages on y rencontre les faciès suivants :

- des marnes rouges avec peu ou pas de galets, plus ou moins tufeuses, parfois très épaisses surtout dans le sous bassin de l'Oued Abbès
- des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.
- les limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre Oued Mehaguène et Chabet El Arneb au NE de la frontière algéro-marocaine. Les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres, les galets se trouvent surtout en lits à la base des limons.
- quelques lambeaux de basaltes interstratifiés qui sont témoins d'une activité volcanique. Ils sont situés au NW de la plaine et coïncident avec la période instable de la région.

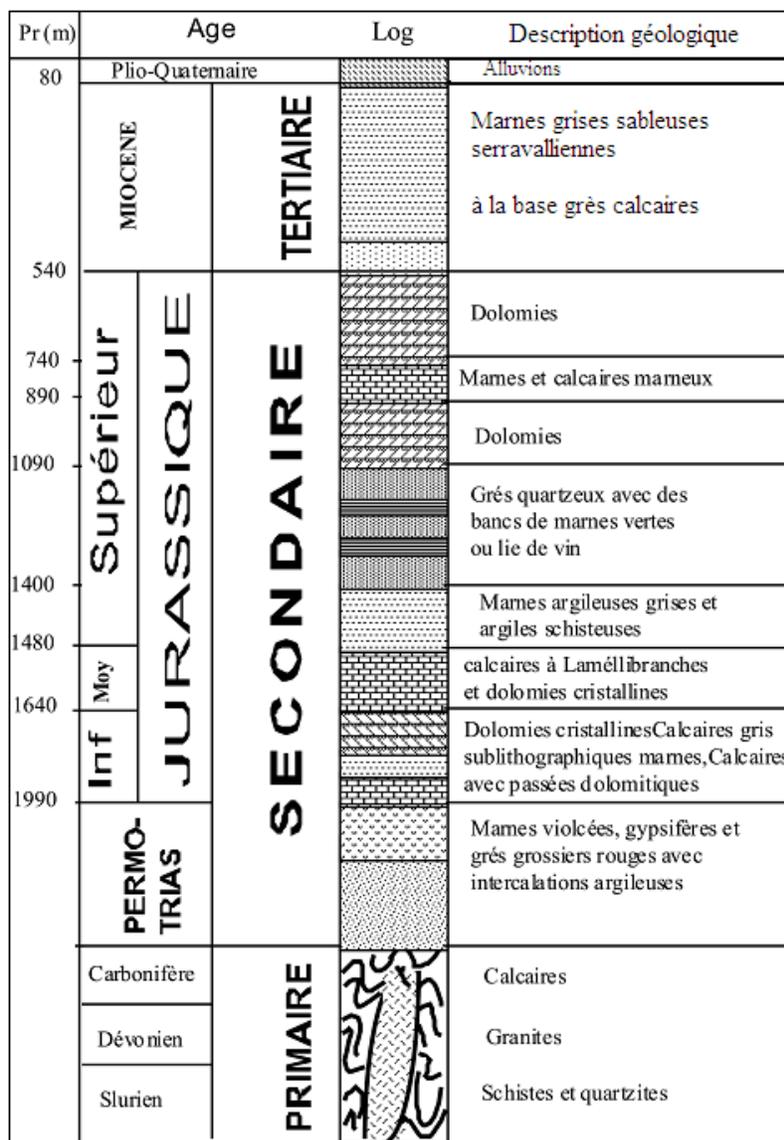


Figure II.5: Série stratigraphique synthétique de la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007)

### II.5. Géologie de la plaine (fig.II.6)

La plaine de Maghnia est une cuvette allongée selon une direction ENE-WSW remplie des dépôts provenant de l'érosion des montagnes bordières (Rhar-Roubane et Djebel Fillaoucène).

D'un point de vue tectonique, la plaine correspond à une fosse entourée de reliefs jurassiques émergés et délimitée par des failles. Des sédiments se sont accumulés dans cette fosse du Miocène au Quaternaire.

Au Nord de la plaine, on trouve le synclinal perché jurassique du Djebel Fillaoucène et au Sud le grand anticlinal de Rhar-Roubane. Entre eux, le bombement anticlinal des Béni-Ouassine recoupe la plaine de Maghnia.

La cassure nord se situe au pied des Béni-Ouassine et de la ville de Maghnia, tandis que la faille d'effondrement sud est visible à la limite nord des terrains jurassiques de Rhar-Rouban.

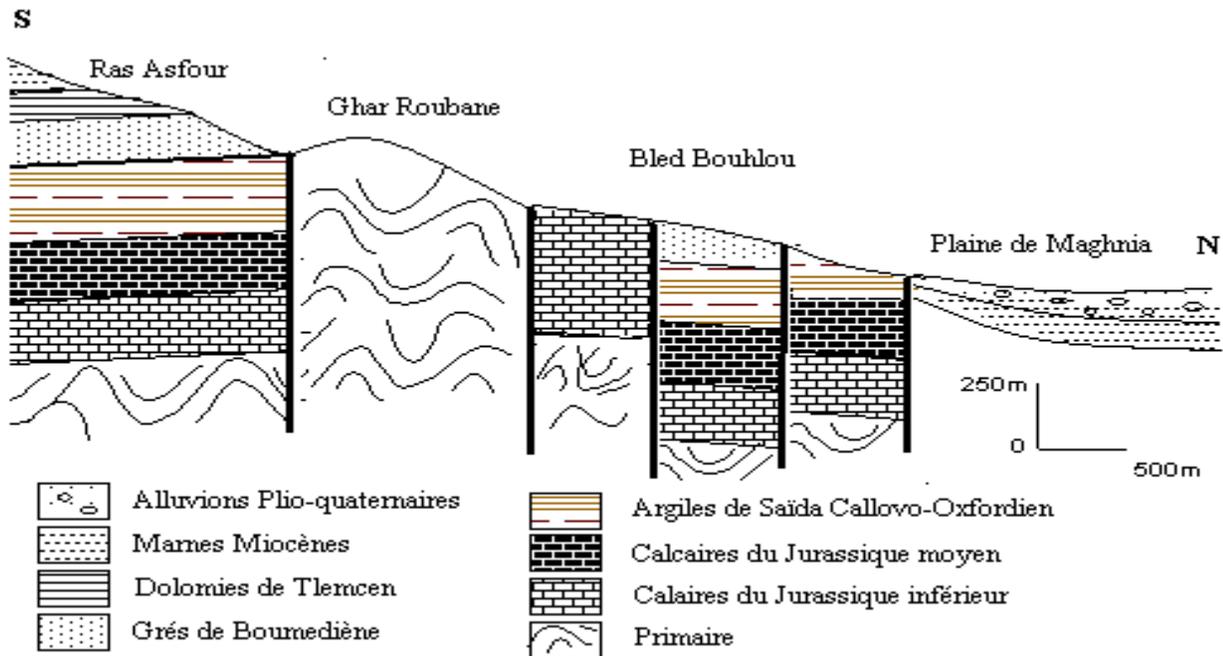


Figure II.6: Coupe N-S illustrant la structure en horsts et grabens (Bonnet, 1965)

## II.6. Conclusion

La nappe de Maghnia est constituée par des formations fluvio-lacustres qui se présentent dans un ordre variable : des argiles, des sables fins et grossiers, graviers, galets et des calcaires lacustres. Elle s'étend sous toute la surface de la plaine avec un niveau de base hydrogéologique de marnes miocènes et un recouvrement alluvial de nature variable. Son réservoir se trouve surtout dans les lentilles de galets plus ou moins cimentées à l'intérieur des formations plio-quaternaires (Baba Hamed, 2007).

En plus des alluvions qui font l'objet de notre étude, la plaine de Maghnia se distingue par quatre horizons pouvant contenir des nappes.

- les grès du Miocène,
- les dolomies de Terny,
- les dolomies de Tlemcen,
- les calcaires du Lias.

Tout le reste de la série, joue le rôle d'imperméable.

***CHAPITRE III :***  
***ETUDE CLIMATIQUE***

III. Introduction

L'étude climatique permet une caractérisation des phénomènes climatiques, qu'ils soient connus ou non, par leur localisation, leurs amplitudes, leur durée ou leur fréquence. Elle permet de mieux comprendre le fonctionnement du système climatique, clé pour anticiper ses évolutions futures. Pour cela, nous devons disposer de séries d'observations sur la période la plus longue possible afin de pouvoir mesurer l'évolution des paramètres (température, précipitations...) et dessiner les tendances de leur variabilité.

Pour cette étude nous nous sommes basés sur les données enregistrées à la station de Maghnia recueillies auprès de l'Office National de Météorologie (O.N.M. Oran) relative à la période (1977/1978 – 2013/2014) et avons actualisé la série (2014/2015 – 2020/2021) auprès de l'ANRH.

Les caractéristiques de la station prise pour cette étude (fig.III.1), sont représentées dans le tableau III.1

Tableau III.1:Caractéristiques de la station climatique de Maghnia.

Station	Code	Coordonnées			Période	Paramètres
		Longitude	Latitude	Altitude (m)		
Maghnia	160311	01°47 W	34°49 N	426,5	1977/1978 - 2020/2021	P (mm) T (°C)

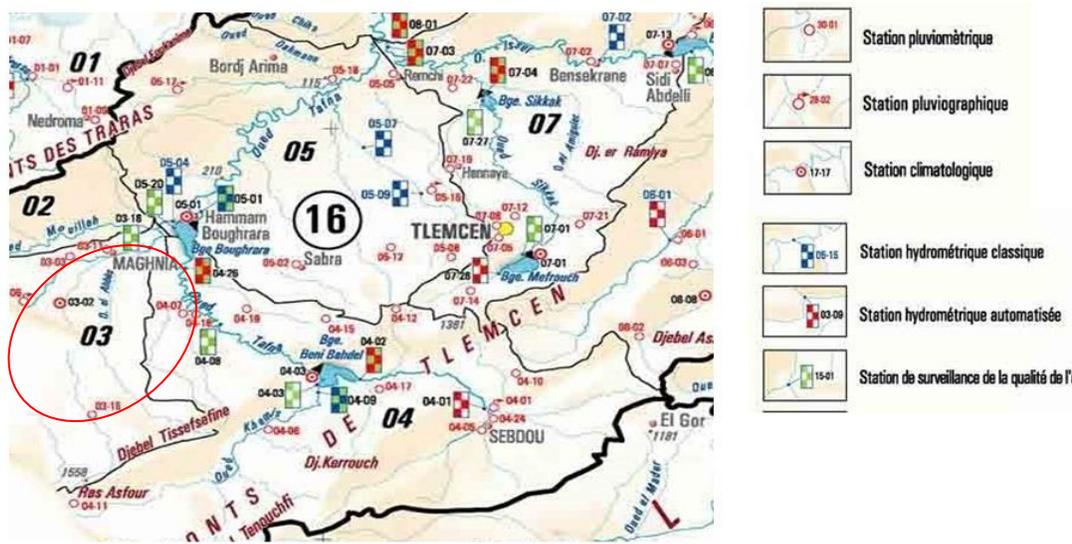


Figure III.1: Présentation de la station de mesure de Maghnia (tiré de la carte du réseau hydro-climatologique et la surveillance de la qualité des eaux ANRH, 2005).

### III.1. Etudes précipitations

#### III.1.1. Précipitations annuelles

Nous avons reporté sur le tableau III.2 les précipitations moyennes annuelles au niveau de la station de Maghnia enregistrées durant la période 1977/1978- 2020/2021.

Le régime pluviométrique interannuel est très discontinu d'une année à une autre, sur une période d'étude de 44 ans (tabl.III.2 & fig.III.2), 15 années ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne qui est de l'ordre du 280,1mm. L'année 1979/1980 est la plus humide avec 467,1 mm et l'année 2020/2021 est la plus sèche avec un minimum de 114,4 mm. Deux années de bonne pluviométrie (>440mm) se distinguent 1980/1981 et 1991/1992.

Tableau III.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Maghnia  
(1977/1978- 2020/2021)

Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)
1977/1978	298,2	1988/1989	274,8	1999/2000	168,7	2010/2011	264,8
1978/1979	242,3	1989/1990	290,9	2000/2001	262,9	2011/2012	275,1
1979/1980	467,1	1990/1991	260,4	2001/2002	310,8	2012/2013	403,9
1980/1981	452,7	1991/1992	442,1	2002/2003	331,1	2013/2014	271,5
1981/1982	197,2	1992/1993	248,7	2003/2004	358,5	2014/2015	308,7
1982/1983	172,9	1993/1994	270,7	2004/2005	184,1	2015/2016	217,3
1983/1984	261,2	1994/1995	248,0	2005/2006	227,4	2016/2017	256,8
1984/1985	247,2	1995/1996	317,8	2006/2007	220,0	2017/2018	326,3
1985/1986	290,7	1996/1997	208,0	2007/2008	216,6	2018/2019	221,1
1986/1987	393,3	1997/1998	318,0	2008/2009	405,4	2019/2020	249,0
1987/1988	189,2	1998/1999	219,4	2009/2010	417,8	2020/2021	116,5
<b>P<sub>moyenne</sub> = 280,1mm</b>							

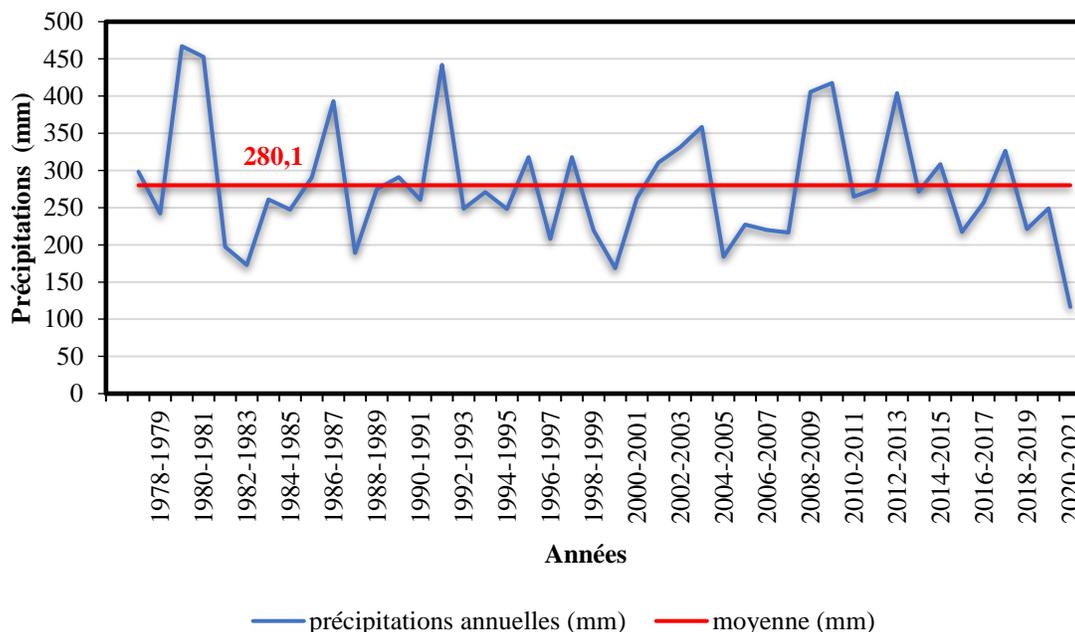


Figure III.2: Variations interannuelles des précipitations à la station de Maghnia (1977/1978- 2020/2021)

### III.1.2. Précipitations mensuelles

Les données des précipitations mensuelles enregistrées à la station de Maghnia durant la période (1977/1978- 2020/2021) sont reportées sur le tableau III.3 :

Tableau III.3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1977/1978-2020/2021)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	13.6	26.6	40.3	33.8	34.6	33.9	32.4	30.7	24.3	5.2	1.5	3.2

La variation mensuelle des précipitations montre que les valeurs des précipitations maximales sont marquées aux intersaisons, principalement en Janvier, Février, Novembre et Décembre avec un maximum de 40,3 mm pour le mois de Novembre et un minimum de 1,5mm enregistré au mois de Juillet.

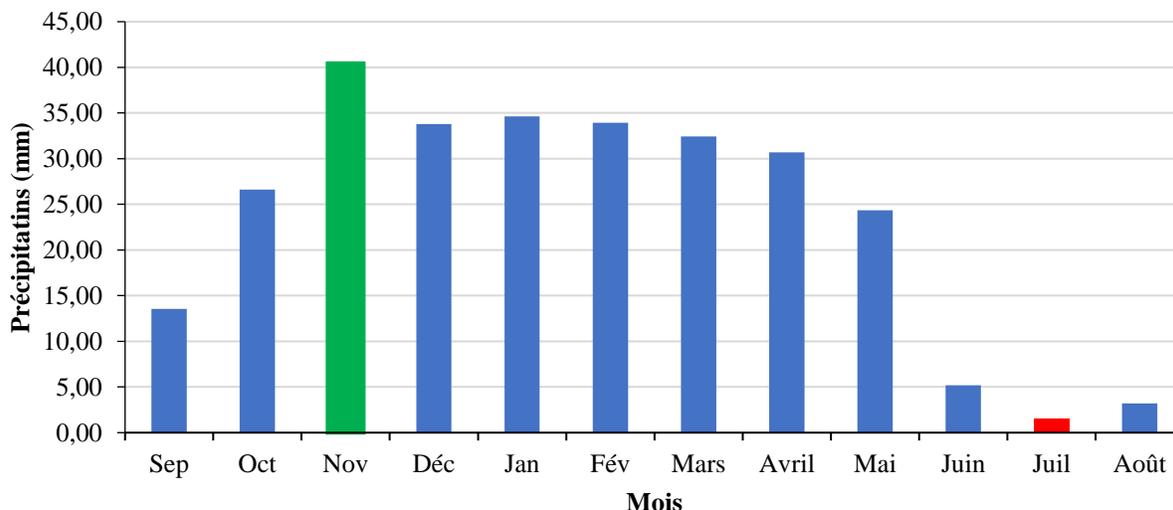


Figure III.3: Répartition des précipitations mensuelles à la station de Maghnia

### III.1.3. Précipitations saisonnières

Les quatre saisons de l’année avec leurs précipitations sont consignées au tableau III.4.

Tableau III.4: Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1977/1978-2020/2021)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
P (mm)	80.5	102.3	87.4	9.9

La figure III.4 montre la distribution saisonnière des précipitations où l’Hiver représente la saison la plus humide et l’Été la plus sèche.

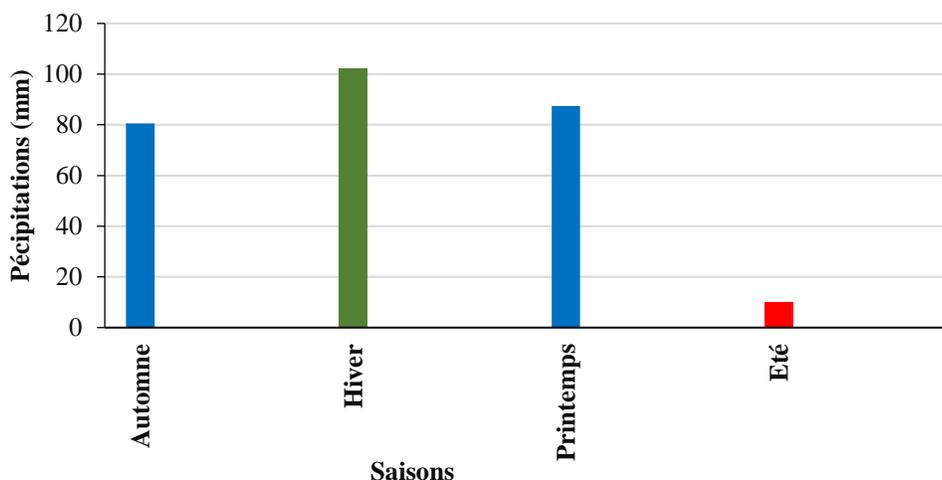


Figure III.4: Répartition des précipitations saisonnières à la station de Maghnia (1977/1978-2020/2021)

III.2. Etude des températures

Les données de température utilisées sont celles de la station de Maghnia enregistrées durant la période 1977/1978-2020/2021.

III.2.1. Variation des températures moyennes annuelles

Le tableau III.5 et la figure III.5, montrent que les températures moyennes annuelles sont irrégulières, elles ont tendance à augmenter d’une année à l’autre. En effet, on y enregistre une augmentation annuelle de 0.044 °C. La température moyenne annuelle caractérisant la région le long de cette période est de 18,05°C, le minimum est de 15,81 °C observé durant l’année 1991/1992, tandis que le maximum, il est de 19,54°C enregistré en 2020/2021.

Tableau III.5: Températures moyennes annuelles à la station de Maghnia (1977/1978- 2020/2021)

Années	T (°C)	Années	T (°C)	Années	T (°C)	Années	T (°C)
1977/1978	17.09	1988/1989	16.45	1999/2000	17.87	2010/2011	19.23
1978/1979	17.72	1989/1990	18.48	2000/2001	18.13	2011/2012	19.14
1979/1980	17.73	1990/1991	16.16	2001/2002	17.80	2012/2013	18.93
1980/1981	16.38	1991/1992	15.81	2002/2003	18.33	2013/2014	19.53
1981/1982	19.45	1992/1993	15.88	2003/2004	18.01	2014/2015	18.99
1982/1983	18.01	1993/1994	16.59	2004/2005	17.87	2015/2016	19.10
1983/1984	18.58	1994/1995	17.67	2005/2006	18.02	2016/2017	19.39
1984/1985	18.88	1995/1996	17.84	2006/2007	18.73	2017/2018	18.25
1985/1986	19.03	1996/1997	17.68	2007/2008	17.90	2018/2019	18.78
1986/1987	17.35	1997/1998	18.20	2008/2009	17.40	2019/2020	19.49
1987/1988	15.98	1998/1999	17.64	2009/2010	18.98	2020/2021	19.54
<b>T<sub>moyenne</sub> = 18, 05°C</b>							

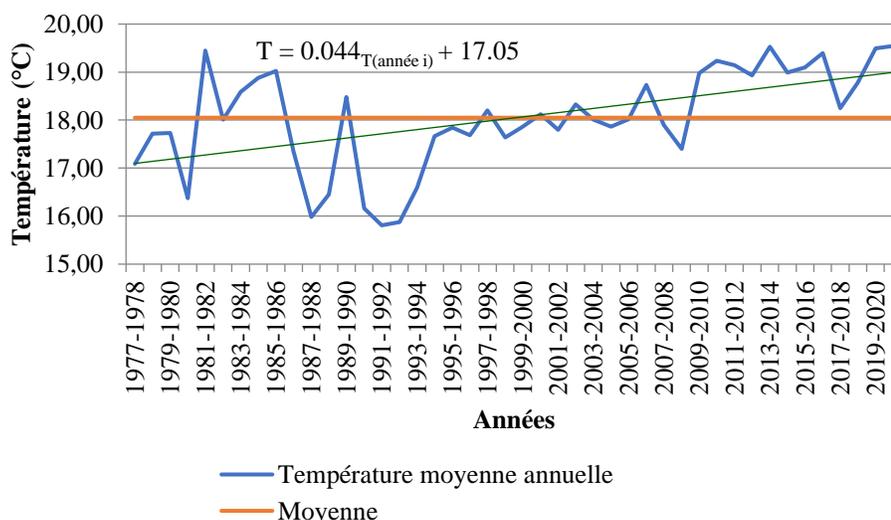


Figure III.5 : Variation des températures moyennes annuelles à la station de Maghnia (1977/1978–2020/2021).

### III.2.2. Températures moyennes mensuelles

Les valeurs de températures moyennes mensuelles sont données par le tableau suivant :

Tableau III.6: Valeurs des températures moyennes mensuelles (°C) à la station de Maghnia(1977/1978 – 2020/2021)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A	Annuel
Tmoy	23.8	19.6	14.5	11.6	10.3	11.4	13.4	15.7	18.8	23.5	26.8	27.2	18.045

La température moyenne mensuelle caractérisant la région le long de la période d'observation est de 18,05°C (fig.III.6), le maximum est de 27,2 °C observé au mois d'Août, tandis que le minimum, il est de 10,3 °C enregistré en mois de Janvier.

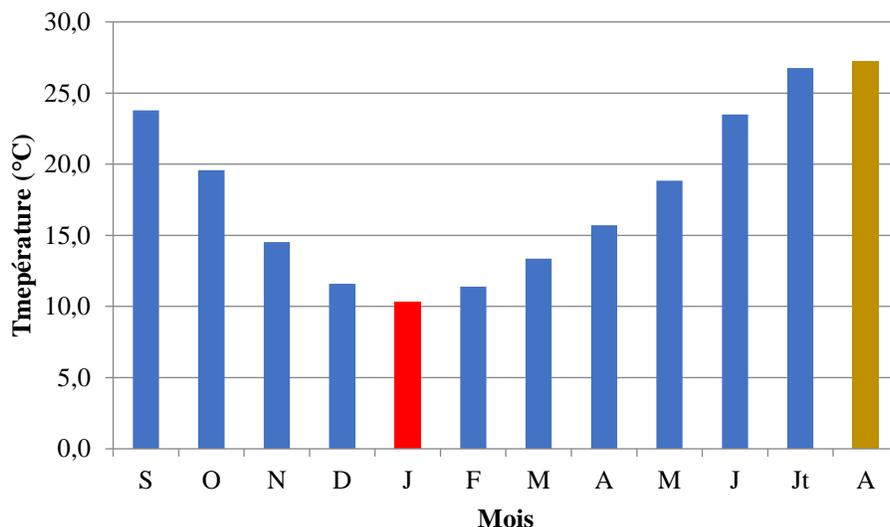


Figure III.6: Variations des températures moyennes mensuelles à la station de Maghnia (1977/1978–2020/2021).

### III.3. Etude du climat

Le climat peut être défini comme la moyenne des conditions météorologiques, telles que la température et les précipitations, observées sur une période d'au moins 30 ans, selon les normes de l'organisation météorologique mondiale. Cependant, le climat est également caractérisé par des variations et des événements extrêmes. À l'échelle mondiale, le climat est une machinerie complexe résultant de l'interaction entre les différents éléments des différents compartiments de notre planète dans l'espace et le temps.

#### III.3.1. Méthode de visualisation de Bagnouls et Gausson

Le tableau III.7, regroupe les moyennes des précipitations et des températures d'une série de 44 ans à la station de Maghnia (1977/1978-2020/2021) :

Tableau III.7 : Moyennes des précipitations et des températures à la station de Maghnia (1977/1978 à 2020/2021)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	13.6	26.6	40.3	33.8	34.6	33.9	32.4	30.7	24.3	5.2	1.5	3.2
T (°C)	23.8	19.6	14.5	11.6	10.3	11.4	13.4	15.7	18.8	23.5	26.8	27.2

D’après Bagnouls et Gaussen (1953), un mois sec est un mois où les précipitations sont inférieures à 2 fois la température moyenne mensuelles ( $P < 2T$ ). On peut aussi définir les mois à tendance sèche (Walter, 1955) comme étant ceux dont les précipitations sont comprises entre deux fois et trois fois la température moyenne mensuelle.

Le diagramme pluviothermique (fig.III.7) offre une représentation visuelle claire de deux périodes bien définies : une saison humide s’étalant de la mi-October à la mi-Avril, et une saison sèche pour le reste de l’année.

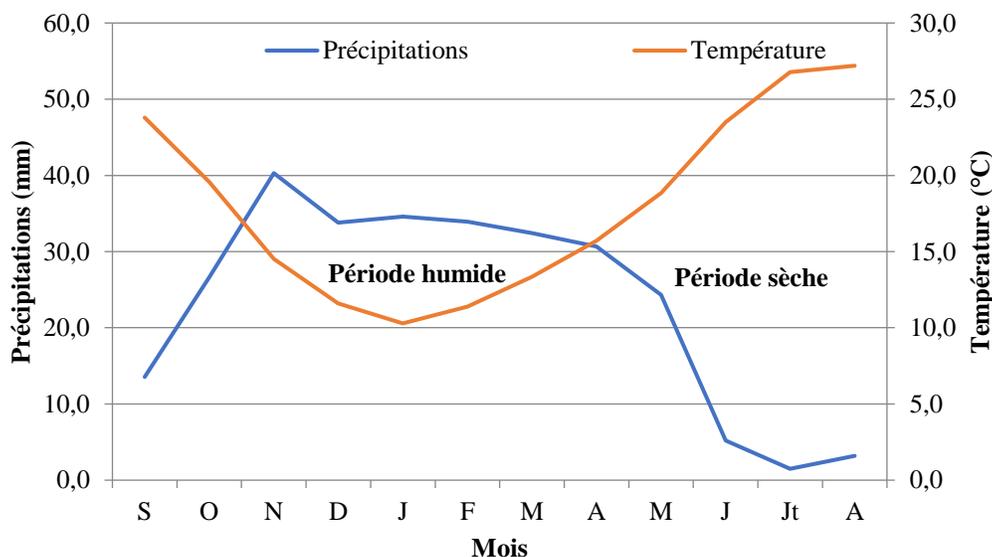


Figure III.7: Courbe pluviothermique (1977/1978-2020/2021).

### III.3.2. Indices climatiques (Indice d’aridité de De. Martonne)

L’indice annuel de De. Martonne est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (11)$$

avec :

P : Précipitations moyennes annuelles = 280,1mm.

T : Température moyenne annuelle = 18,05 °C.

I : indice d’aridité = 10

Le tableau III.8 donne une classification de De. Martonne du type de climat en fonction de son indice d’aridité :

Tableau III.8 : Classification du climat suivant l'indice d'aridité de Martonne

Valeur de I	Type de climat	Type de végétation
0à5	Hyperaride	Désert absolu
5à10	Aride	Désert
10à20	Semi-aride	Steppe
20à30	Tempéré	Prairie naturelle, forêt
>30	Humide	Forêt

L'indice d'aridité reporté sur l'abaque de De.Martonne (fig III.8) traduit un régime semi-aride à écoulement temporaire et à formations herbacées.

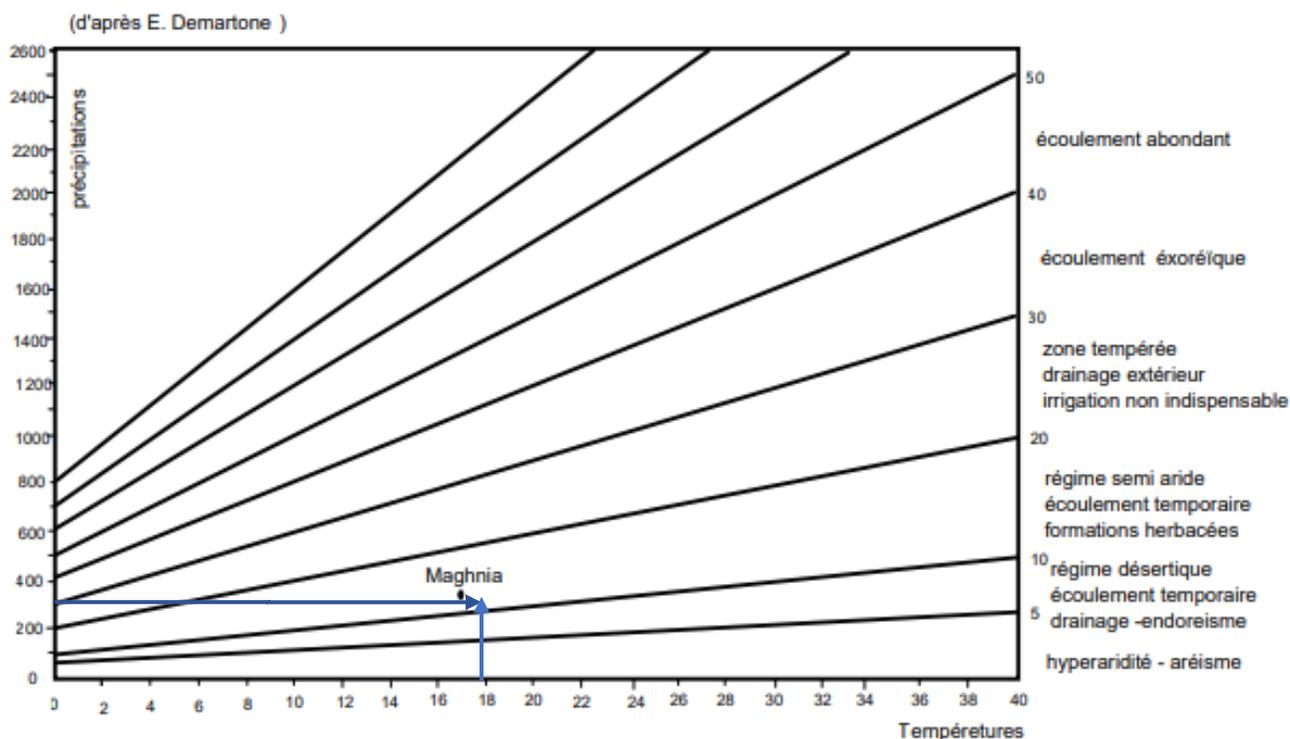


Figure III.8 : Représentation de la station de Maghnia sur l'abaque de De Martone

### III.4. Evapotranspiration potentielle et déficit d'écoulement

#### III.4.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

##### III.4.1.1. Méthode de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite permet de calculer ponctuellement (en une station) le bilan d'eau mensuel et annuel à partir des valeurs mensuelles des précipitations et des valeurs moyennes mensuelles des températures.

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle mensuelle n'est possible que si la température moyenne mensuelle est inférieure ou égale à 38°C.

L'évapotranspiration potentielle mensuelle est calculée d'après la formule suivante :

$$ETP = 16. \left(\frac{10T}{I}\right)^a . K \quad (12)$$

$$I = \sum i \quad (13)$$

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm).

T : Température moyenne mensuelle (°C).

I : Indice thermique annuel : somme des indices mensuels calculés à partir des températures moyennes mensuelles selon la formule :

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (14)$$

$$a = 6,75. 10^{-7}. I^3 - 7,71. 10^{-5}. I^2 + 1,79. 10^{-2}. I + 0,49 \quad (15)$$

K : Coefficient de correction dépendant de la latitude et donné par une table.

La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles.

Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

Tableau III.9: Valeurs de l'ETP à la station de Maghnia avec la méthode de Thornthwaite (1977/1978-2020/2021)

Mois	T (°C)	ETP (cm) non corrigée	K	ETP (mm) corrigée
Sep	23,8	10,9	1,03	112,4
Oct	19,6	7,5	0,97	73,0
Nov	14,5	4,2	0,86	36,4
Déc	11,6	2,8	0,85	23,5
Jan	10,3	2,2	0,88	19,4
Fev	11,4	2,7	0,85	22,7
Mars	13,4	3,6	1,03	37,5
Avril	15,7	4,9	1,09	53,7
Mai	18,8	7,0	1,21	84,1
Juin	23,5	10,7	1,21	128,9
Juillet	26,8	13,7	1,23	168,4
Août	27,2	14,1	1,16	163,4
Moy	18,05	84,2		923,3

L'évapotranspiration annuelle est évaluée à 923,3mm selon la méthode de Thornthwaite.

#### III.4.1.2. Méthode de Turc

$$ETP = 0,4 * (I_g + 50) * \frac{T}{T+15} \quad (16)$$

$$I_g = I_0 * (0,18 + 0,62 \cdot \frac{h}{H}) \quad (17)$$

ETP: Evapotranspiration potentielle (mm),

T : Température moyenne du mois(°C),

Ig : Radiation globale réelle en petites calories par cm<sup>2</sup> de surface horizontale par jour (Cal/cm<sup>2</sup>.jours),

I0: Radiation globale théorique (Cal/cm<sup>2</sup>.jours),

h: Durée d'insolation mesurée pendant le mois considéré (heure/mois),

H : Durée astronomique du jour pendant le mois considéré (heure/mois)

I0 et H sont fonction de la latitude et sont données par des tables.

Tableau III.10: Valeurs de l'ETP à la station de Maghnia avec la méthode de Turc (1977/1978-2020/2021)

Mois	I0 ( Cal/cm <sup>2</sup> .j)	h (heure)	H (heures)	Ig (Cal/cm <sup>2</sup> .j)	T (°C)	Etp (mm)
Sep	582,55	255	370,8	353,24	10,3	98,94
Oct.	462,66	233	343,9	277,63	11,4	74,24
Nov.	353,11	188	308,96	196,78	13,4	48,52
Déc.	299,89	197	304,06	174,44	15,7	39,15
Jan	332,78	198	303,7	194,42	18,8	39,80
Fév.	440,61	158	310,97	218,11	23,5	46,31
Mars	564,98	176	363,48	271,31	26,8	60,64
Avril	677,97	213	391,11	350,96	27,2	82,02
Mai	745,32	278	425,03	436,4	23,8	108,22
Juin	765,13	291	432,2	457,12	19,6	123,82
Juillet	741,01	335	436,45	486,02	14,5	137,47
Aout	679,87	318	409,23	449,92	11,6	128,89
					<b>Total</b>	<b>988,01</b>

L'évapotranspiration annuelle est évaluée à 988.01mm par la méthode de Turc qui surestime cette mesure par rapport à Thornthwaite.

### III.4.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle

#### III.4.2.1. Méthode de Turc

L'évapotranspiration réelle (tabl.III.10) est calculée à partir de la formule :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{T^2}}} \quad (18)$$

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

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

T : Température moyenne annuelle (°C)

Tableau III.11 : Valeur de l'ETR (Turc)

P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)	% P
280,1	18.05	1045,29	239,83	85,62

### III.4.2.2. Méthode de Coutagne

Le déficit d'écoulement (tabl.III.12) qui est l'équivalent de l'évapotranspiration réelle est donnée par :

$$D = P - \lambda \cdot P^2 \quad (19)$$

D : Déficit d'écoulement (m/an)

P : Précipitations (m/an)

T : Température moyenne annuelle (°C)

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 \cdot T} \quad (20)$$

Cette formule n'est applicable que pour

$$\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda} \quad (21)$$

Puisque :  $P < (1/8\lambda)$  donc cette méthode n'est pas applicable.

### III.4.2.3. Méthode de Wundt

Les valeurs du déficit et du quotient d'écoulement en fonction de la température moyenne annuelle et des précipitations reportées sur l'abaque de Wundt (fig. III. 9) donnent les résultats du tableau III.13.

Tableau III.12 : Valeurs du déficit et du quotient d'écoulement (Wundt)

P (mm)	T (°C)	D (mm)	E (mm)
280,1	18.05	275,6	4,52 mm soit 1,61%

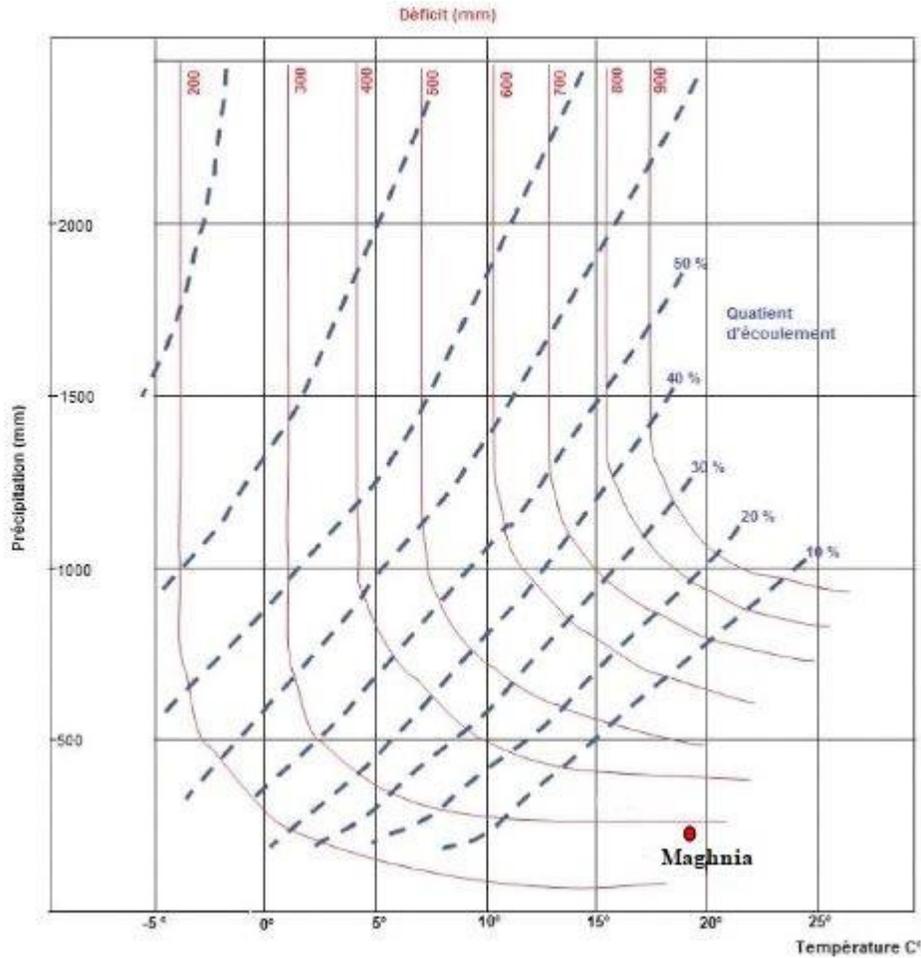


Figure III.9 : Abaque de Wundt

**III.4.2.4. Méthode de Verdeil**

Le report des précipitations annuelles sur l'abaque représentatif du phénomène en Algérie (fig.III.10) donne la valeur suivante pour le déficit d'écoulement (tabl.III.14).

Tableau III.13 : Valeur du déficit d'écoulement (Verdeil)

P (mm)	D (mm)	E (mm)
280,12	260,92	19,2 mm soit 6,85%

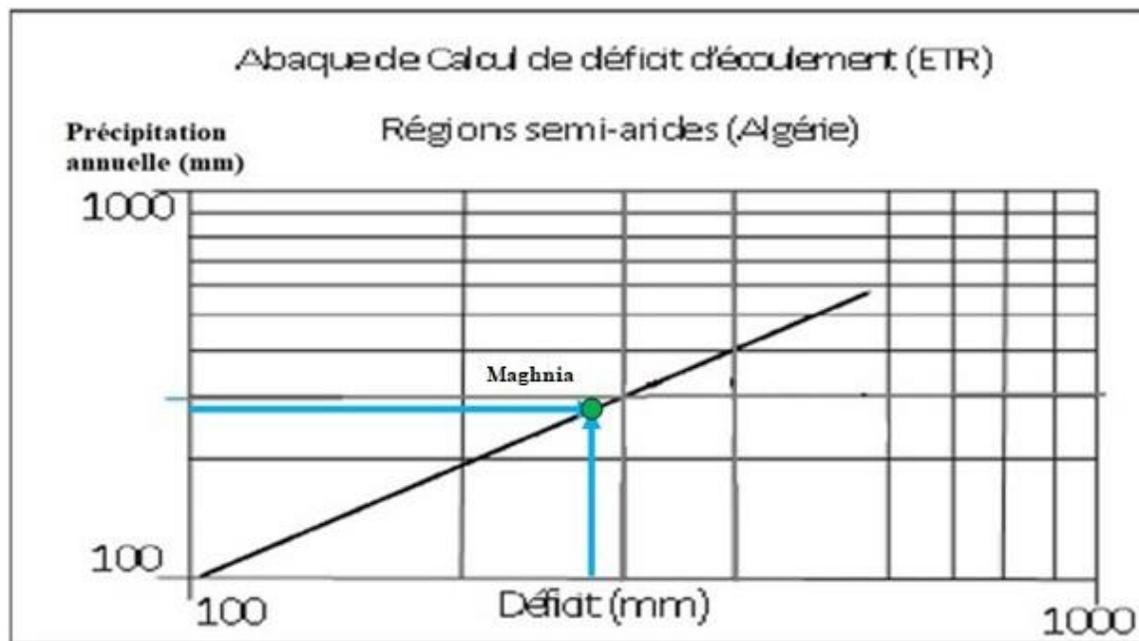


Figure III.10 : Abaque de Verdeil pour l'estimation du déficit d'écoulement

### III.5. Calcul de la réserve facilement utilisable (R.F.U)

La R.F.U est calculée par application de la formule de Hallaire (1960) qui peut s'écrire :

$$RU = \frac{C - f}{100} H.D + 30mm \quad (22)$$

- R : Réserve en eau du sol,
- C : Capacité au champ,
- F : Capacité au point de flétrissement,
- H : Profondeur du sol,
- D : Densité apparente,
- 30 mm : Enracinement capillaire.

Les valeurs de (C - f) dépendent de la nature du sol (tabl.III.15) :

Tableau III.14 : Valeurs de C-F (%) en fonction de la nature du sol

Nature du sol	C-f(%)
Sol sableux	5
Sol limoneux	10-15
Sol argilo-limoneux	20

En considérant un sol limoneux (C-f = 10%) et une profondeur du sol égale à 600 mm (D.S.A Tlemcen, 1972), on obtient une réserve utile égale à 90 mm.

L'évapotranspiration réelle est liée à la réserve en eau disponible nous considérons deux possibilités :

-Si :  $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$

-Si :  $P < ETP$  on a deux conditions :  $\begin{cases} ETP = ETR ; \text{ si la réserve existe} \\ ETR = P ; \text{ si y a pas de réserve} \end{cases}$

### III.6. Bilan hydrologique

La méthode de Thornthwaite permet d'établir le bilan hydrologique en tenant compte des éléments déjà cités. Ce bilan est donné au tableau III.16 pour la série (1977/1978-2020/2021)

Tableau III.15 : Eléments du bilan hydrologique calculés (mm) pour la station de Maghnia (1977/1978-2020/2021) (R.U = 90 mm)

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	annuel
PP (mm)	13,6	26,6	40,3	33,8	34,6	33,9	32,4	30,7	24,3	5,2	1,5	3,2	280,1
ETP (mm)	112,4	73	36,4	23,5	19,4	22,7	37,5	53,7	84,1	128,9	168	163	923,3
$\Delta U$	-98,8	-46,4	3,9	10,3	15,2	11,2	-5,1	-23	-60	-	-167	-160	-
RU	0	0	3,9	14,2	29,4	40,6	35,5	12,5	0	0	0	0	-
ETR (mm)	13,6	26,6	36,4	23,5	19,4	22,7	37,5	53,7	36,8	5,2	1,5	3,2	280,1
DA (mm)	98,8	46,4	0	0	0	0	0	0	47,3	123,7	167	160	643,2
Exc (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

P : Précipitations (mm), ETP : Evapotranspiration potentielle (mm), U: Variation de la réserve, RU: Réserve utile(mm), ETR: Evapotranspiration réelle (mm), D.A: Déficit agricole (mm), Exc : Excédent (mm)

### III.7. Calcul du ruissellement

Le ruissellement correspond à l'eau qui s'écoule directement sur le sol au cours d'une averse. Il peut être estimé (tabl.III.17) par la méthode de Tixeront-Berkaloff selon la formule :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2} \quad (23)$$

P : Précipitations (m)

ETP : Evapotranspiration potentielle (m)

Tableau III.16 : Valeur du ruissellement (Tixeront-Berkaloff)

P (m)	ETP (m)	R (m)
0,28012	0,9233	0,00859

Le ruissellement calculé à partir de la méthode de Tixeront-Berkaloff est de 8.59 mm à la station de Maghnia pour la période de mesure (1977/1978-2020/2021)

### III.8. Détermination de l'infiltration et calcul des bilans

L'équation du bilan étant :

$$P = D + R + I \quad (24)$$

$$E = R + I \quad (25)$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

D : Déficit d'écoulement (mm)

R : Ruissellement (mm)

I : Infiltration (mm)

E : Ecoulement (mm)

Tableau III.17 : Valeur de l'infiltration selon les différentes méthodes

R (mm)	Turc		Coutagne		Wundt		Verdeil		Thornthwaite	
	ETR	I	ETR	I	ETR	I	ETR	I	ETR	I
8,59	239,83	31,7	256,5	15,03	275,6	-	260,92	10,61	280,1	0

### III.9.Conclusion

L'étude climatique a mis en évidence les composantes du bilan, en effet, les calculs sur la période allant de 1977/1978-2020/2021 indiquent une très forte évapotranspiration potentielle (ETP) avec une moyenne d'environ 923,3mm. L'évapotranspiration réelle (ETR) atteint en moyenne près de 263 mm, ce qui représente environ 93 % des précipitations. Ainsi, l'écoulement ne représente qu'environ 7 % des précipitations.

L'évaluation de l'infiltration par les différentes méthodes a révélé une valeur de 31,7 mm pour la méthode de Turc, une valeur de 15,03 mm pour Coutagne, 10,61mm pour Verdeil. La connaissance de ces données est très importante pour la partie modélisation représentant ainsi les inputs dans le modèle conceptuel.

***CHAPITRE IV :***  
***ETUDE***  
***HYDROGEOLOGIQUE***

## IV. Introduction

La plaine de Maghnia est une plaine alluviale à cheval sur l'Algérie et le Maroc. C'est un système aquifère multi-couches à nappe libre. Sa ressource en eau est très fortement sollicitée par l'irrigation. De nombreux forages illégaux existent, notamment dans le grand périmètre d'irrigation (GPI) de Maghnia. Celui-ci était, autrefois, alimenté en eau à partir du barrage de Beni Bahdel, maintenant reconverti pour l'AEP.

En plus des infiltrations locales de la pluie, la partie algérienne est alimentée par un flux provenant de la partie marocaine.

La confrontation ressources / besoins en eau montre une très forte surexploitation de la nappe, qui se traduit dans la réalité par une diminution du niveau piézométrique (Sous-Mission A2 – définition de la méthodologie d'inventaire, 2007).

### IV.1. Propriétés hydrauliques des différentes formations

En plus des alluvions qui font l'objet de cette étude dans la plaine de Maghnia, quatre couches géologiques peuvent potentiellement contenir des nappes d'eau souterraine, à savoir les grès du Miocène, les dolomies de Terny, les dolomies de Tlemcen et les calcaires du Lias. En revanche, les autres couches de la série géologique agissent comme des barrières étanches, empêchant l'infiltration d'eau. Ce sont les propriétés hydrauliques de ces différentes formations géologiques qui sont étudiées dans ce contexte (tabl. IV.1).

Tableau IV.1 : Inventaire des réservoirs aquifères de la région (AZIZ Hadjira et MEGUENNI Tani Meriem 2013)

Epaisseur (m)	Etage	Lithologie	Perméabilité (nature)
25-120	Plio-Quaternaire	Alluvions	Perméables
50-800	Tortonien	Grès	Perméables
	Serravalien	Marnes	Imperméables
100	Tithonique supérieur	Dolomies de Terny	Perméables
100	Tithonique inférieur	Marno-calcaires de Raouraï	imperméables
200	Kimméridgien supérieur	Dolomies de Tlemcen	perméables
300-400	Oxfordien supérieur– Kimméridgien supérieur	Intercalations de marnes dans les grès bruns	Peu perméables
150-250	Callovo-Oxfordien	Argiles de Saïda	imperméables
300-400	Lias	Calcaires	perméables
?	Permo-Trias	Argiles et grès	imperméables
?	Primaire	Schistes et quartzites	imperméables
?	âge non déterminé ?	Granites	imperméables

IV.2. Géométrie de l'aquifère

IV.2.1. Description de l'aquifère

Les études de Bonnet (1965, 1969) ont montré que le remplissage plio-quaternaire d'épaisseur variable est très hétérogène. Le substratum de la plaine est constitué par des marnes du Miocène (Serravalien) considérées comme étanches.

Par son hétérogénéité lithologique verticale et horizontale, le remplissage interdit la construction d'une nappe homogène.

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent deux zones spécifiques d'une surface présentant un chenal orienté selon une direction SW/NE ainsi qu'un talus orienté approximativement Est-Ouest.

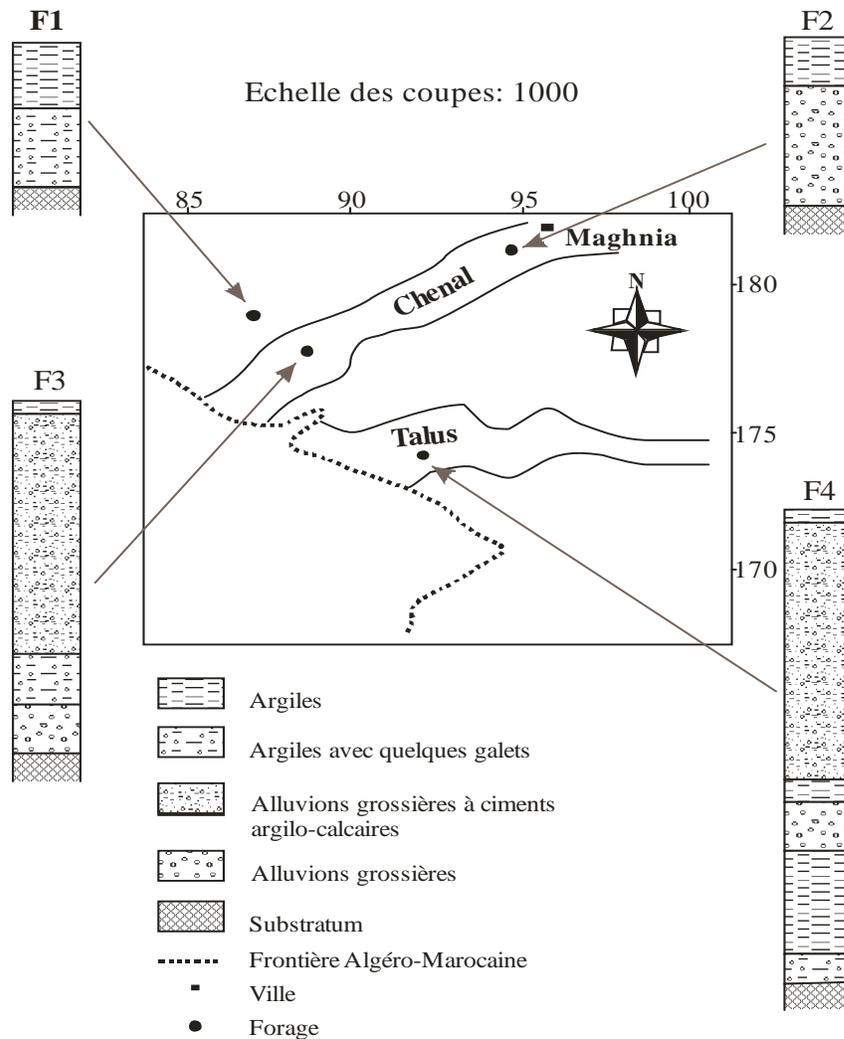


Figure IV.1 : Coupe des forages réalisés dans la plaine de Maghnia avant 1965 (Bonnet, 1969 in Baba Hamed, 2007)

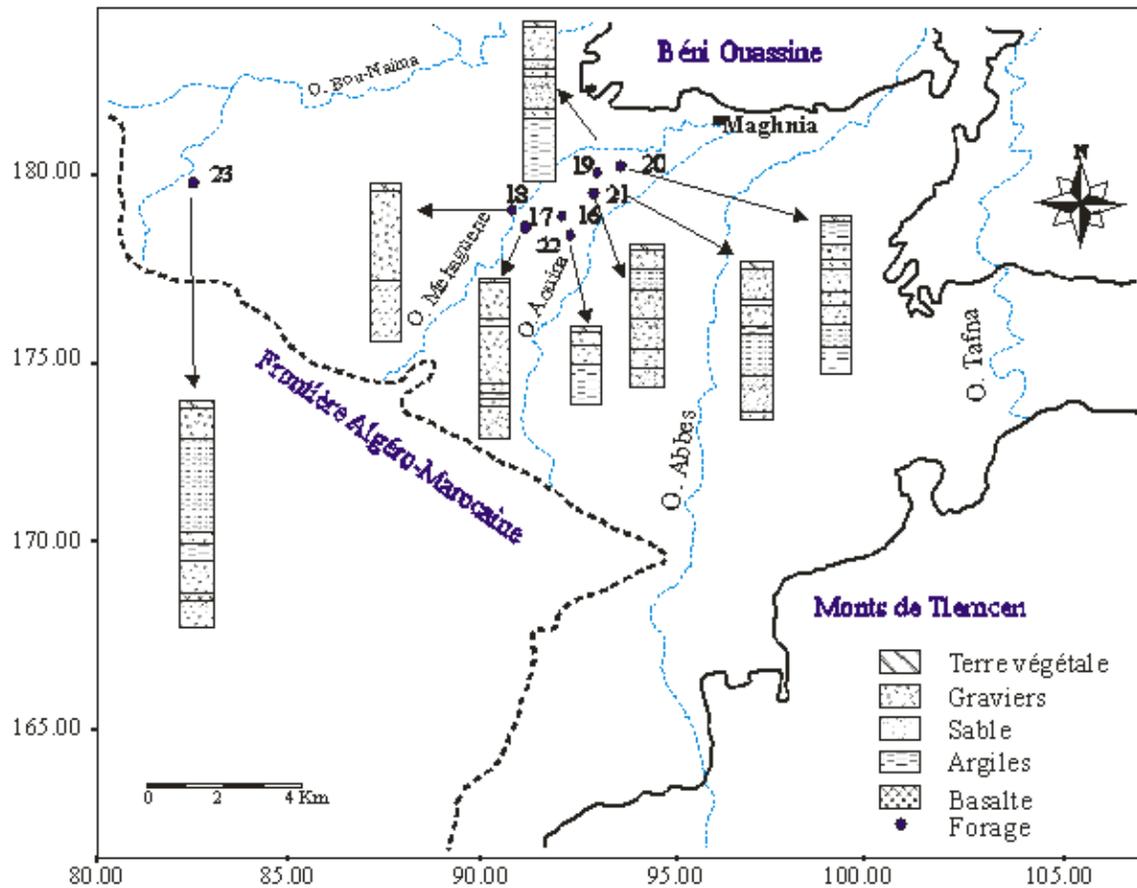


Figure IV.2: Coupes schématiques des forages réalisés après 1990 dans la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007)

En se basant sur les résultats des forages anciens et récents, des corrélations lithostratigraphiques ont été établies (fig. IV.3 et IV.4), permettant ainsi d'examiner la forme et les caractéristiques de l'extension des matériaux alluviaux.

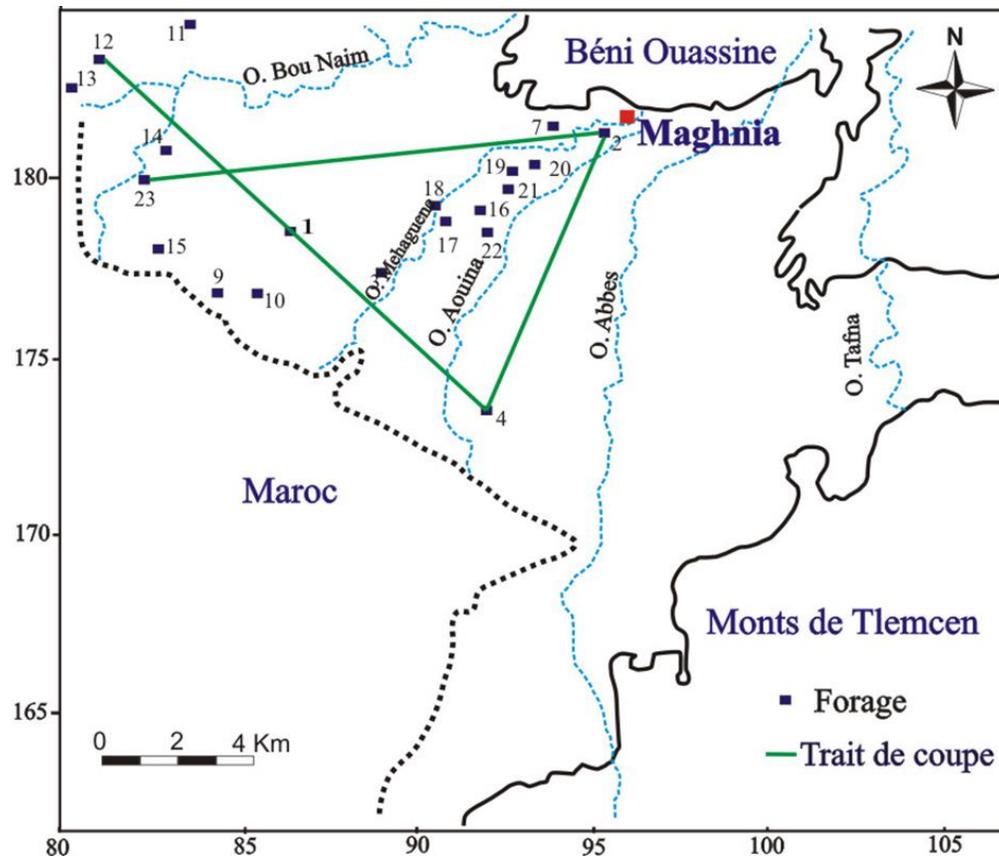


Figure IV.3: Localisation des traits de coupes interprétatives à travers la plaine de Maghnia

La coupe 1 illustre une élévation du substratum argileux vers le centre de la zone étudiée, c'est-à-dire vers la rive gauche de l'oued Mehaguène. Les couches de graviers sont parfois interrompues par des lentilles argileuses. Il est important de noter que l'aquifère est considérablement plus épais vers l'Ouest de la plaine et que les éléments grossiers y sont abondants.

Quant à la coupe 2, elle présente une structure similaire à celle de la coupe précédente, à quelques différences près. Dans ce cas, le substratum miocène s'élève vers les Beni Ouassine à l'Est.

Enfin, la coupe 3, qui traverse la plaine verticalement, révèle une augmentation de l'épaisseur des alluvions du Nord vers le Sud.

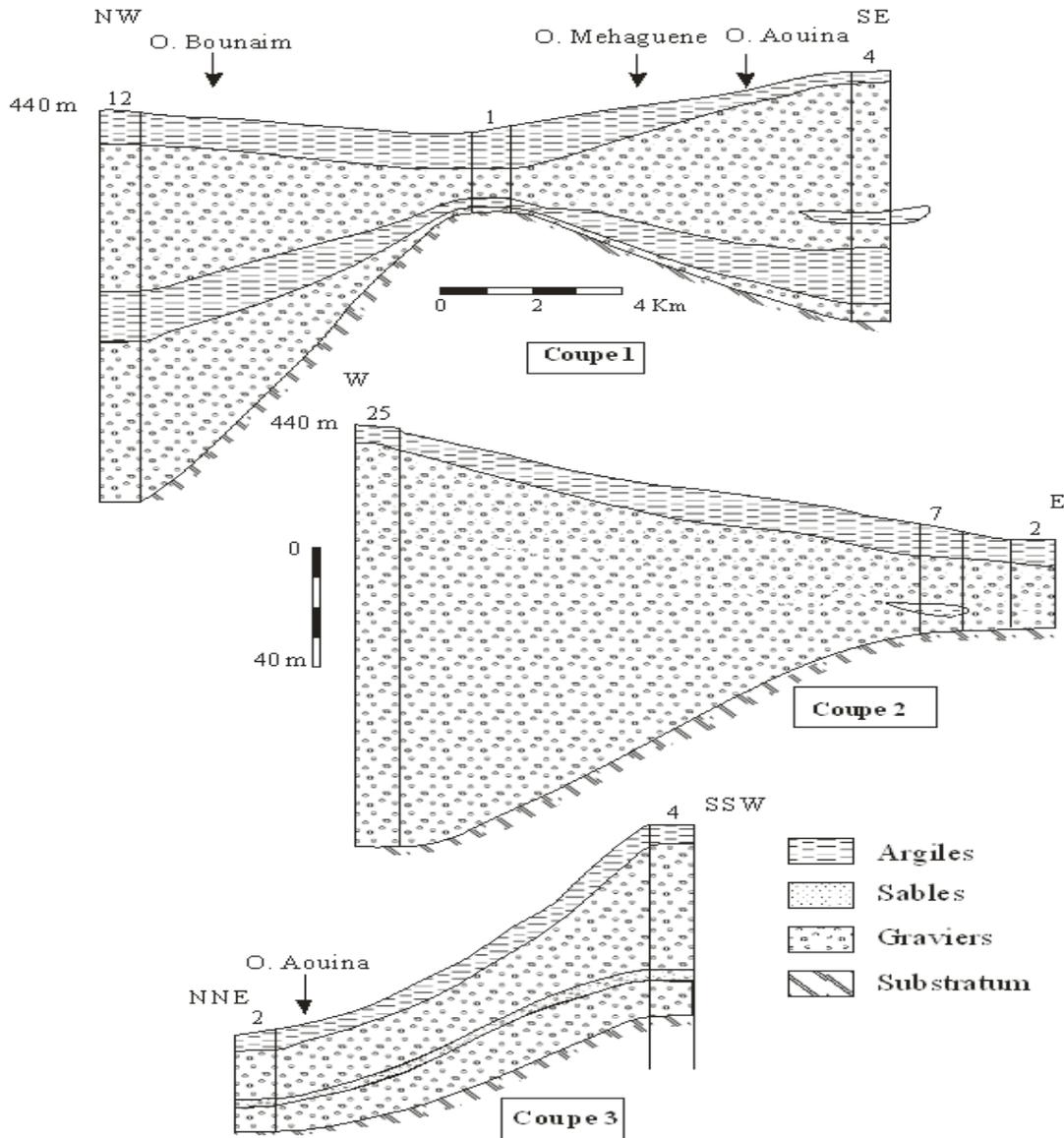


Figure IV.4: Coupes géologiques interprétatives à travers la plaine de Maghnia (Baba Hamed, 2007)

### IV.3. Etude hydrodynamique

L'analyse du comportement hydrodynamique d'un aquifère implique la réalisation d'une cartographie détaillée. Cette cartographie peut inclure des cartes structurales qui montrent les courbes d'égalité d'altitudes de la limite supérieure et inférieure de l'aquifère, des cartes piézométriques qui décrivent les courbes hydro-isohypses pour représenter les mouvements de l'eau dans l'aquifère, ainsi que des cartes qui montrent la distribution spatiale des caractéristiques physiques du terrain, y compris les paramètres hydrodynamiques.

## IV.3.1. Limites de l'aquifère

L'alimentation de la nappe plio-quaternaire de la plaine Maghnia se fait par :

- Infiltration directe des eaux de pluie sur son impluvium,
- Infiltrations des eaux des oueds traversant la plaine,
- Trop plein des nappes jurassiques des Monts de Tlemcen (côté Sud-Est),
- Alimentation latérale venant du Maroc (côté Ouest et Sud-Ouest).

A partir des 12 forages implantés dans la région d'étude (fig.IV.3 et IV.4) (qui ne couvrent pas la totalité de la plaine), deux cartes ont pu être réalisées celle du toit de l'aquifère (IV.5) et l'autre de son épaisseur, qui ont permis de tracer la carte du mur de l'aquifère (fig.IV.6).

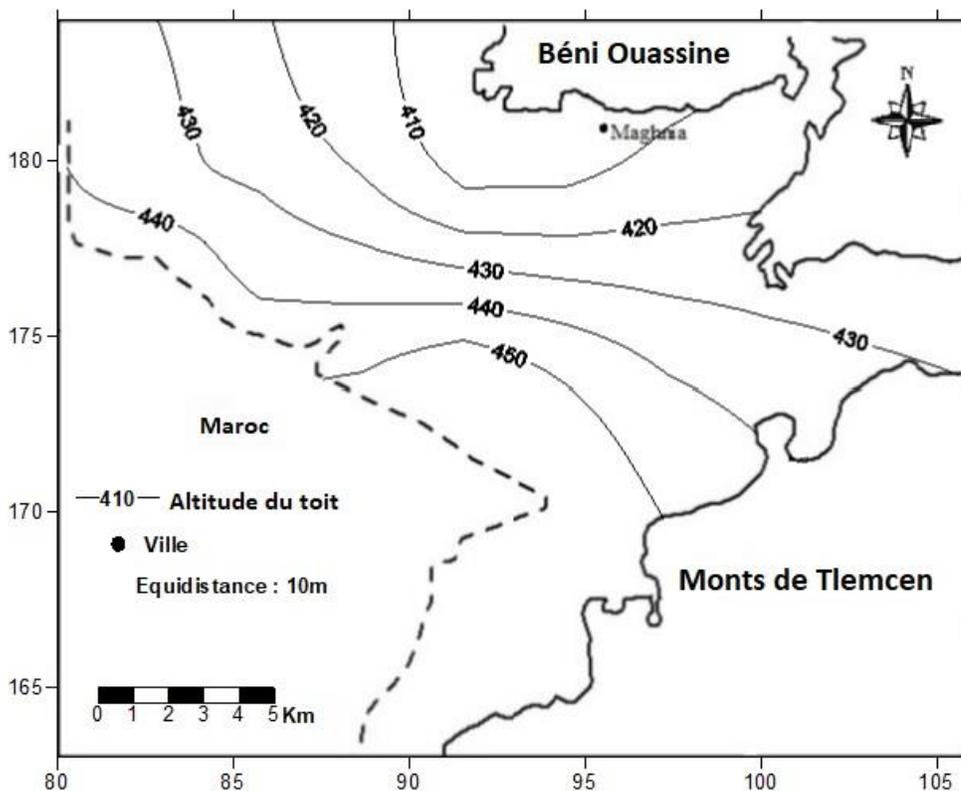


Figure IV.5: Carte du toit de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia

D'après la figure du toit de l'aquifère, les parties les plus hautes du toit se trouvent dans les zones ouest et sud de la nappe phréatique, atteignant une altitude maximale de 460 mètres. En revanche, les valeurs ont tendance à diminuer progressivement en se déplaçant vers le Nord et l'Est.

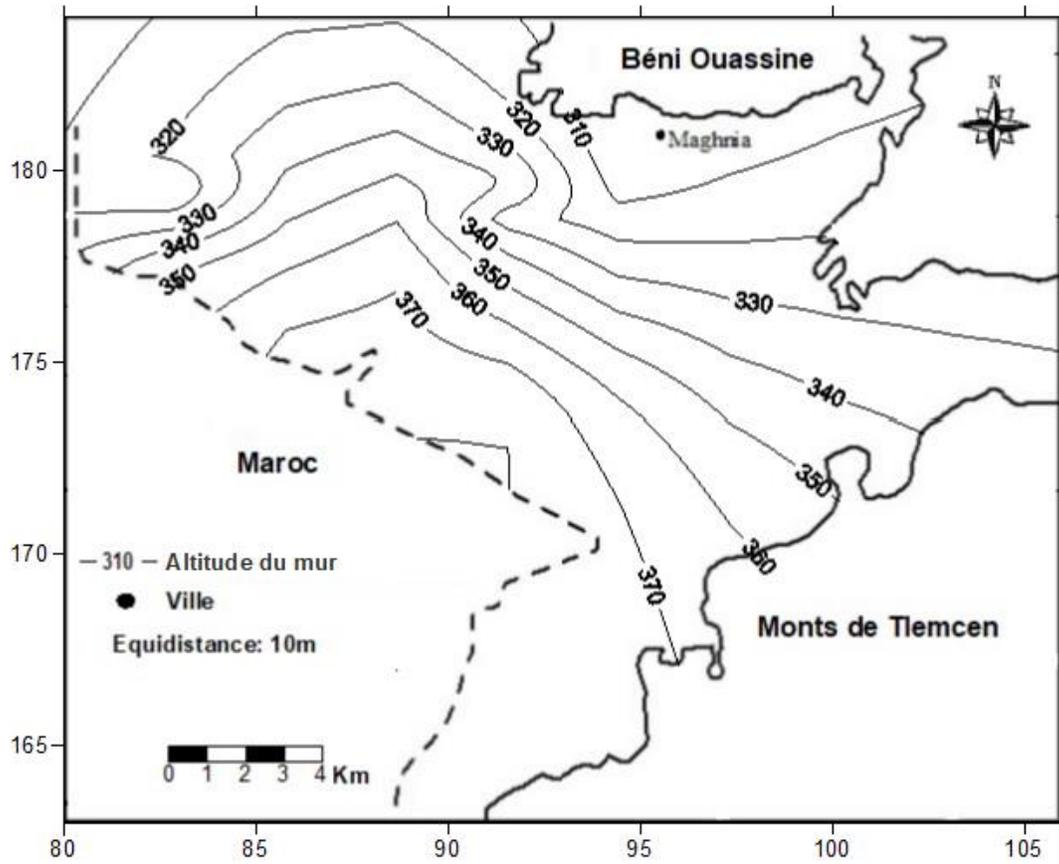


Figure IV.6: Carte du mur de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia

D'après la figure IV.6, les zones les plus élevées du mur se situent dans les régions sud et ouest de la nappe, atteignant un maximum de 380 mètres d'altitude. Toutefois, les valeurs ont tendance à diminuer progressivement en se déplaçant vers le Nord et l'Est.

### IV.3.2. Analyse piézométrique

Dans cette partie du travail, nous tenterons de suivre l'évolution de la piézométrie durant diverses périodes et d'analyser les changements de la nappe.

#### IV.3.2.1. Carte piézométrique (Septembre, 1950)

L'examen de la carte (fig.IV.7), montre une tendance générale vers le Nord en termes d'écoulement, en direction des points de sortie. Les courbes iso-pièzes tracées permettent de distinguer trois zones différentes : Une zone située à l'Ouest, où les flux de courant se divisent, entraînant une augmentation du niveau piézométrique en raison d'une forte alimentation en provenance du Maroc. Une zone centrale caractérisée par un important débit d'écoulement dans des couches perméables. Une zone à l'Est, où la surface piézométrique augmente brusquement vers le Sud, indiquant la présence d'une bande de terrain perméable bien alimentée dans cette

région, qui se transforme progressivement en horizons imperméables en se déplaçant vers le Nord.

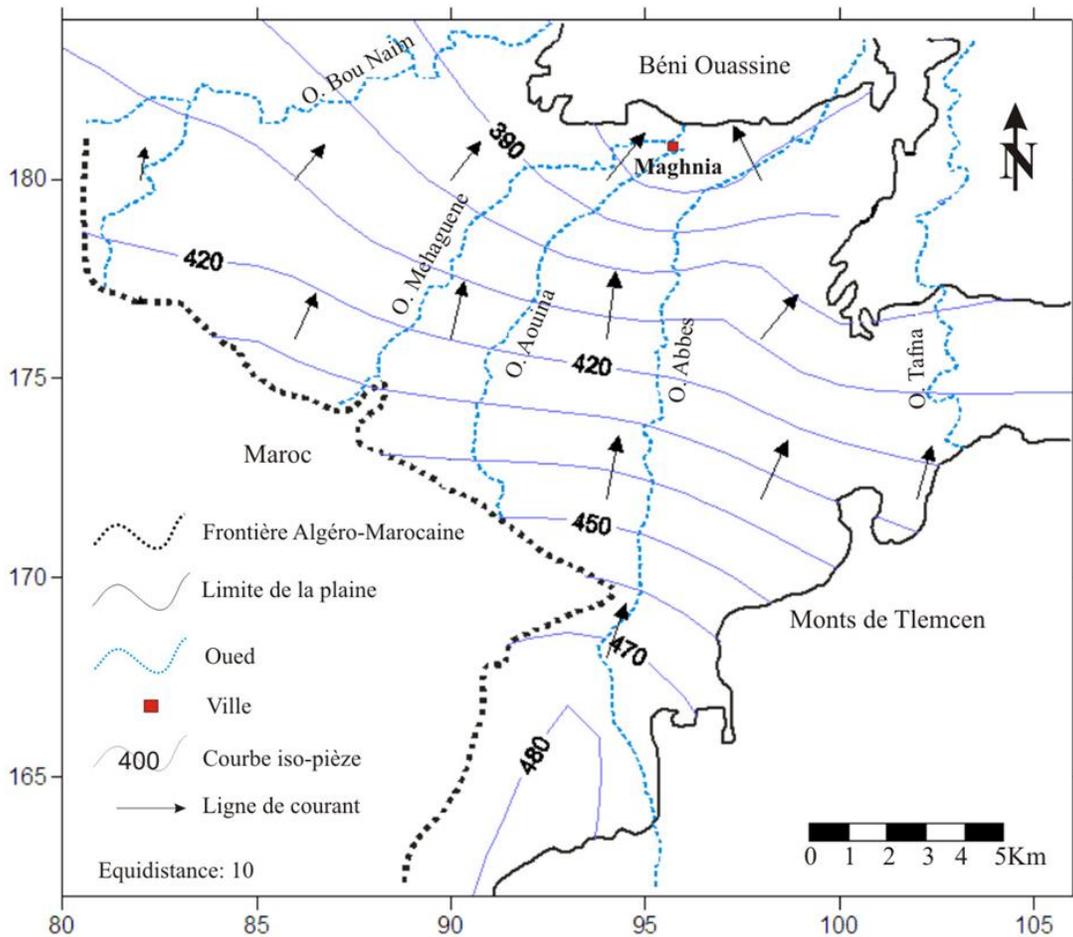


Figure IV.7: Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Maghnia (Bonnet, 1950)

#### IV.3.2.2. Carte piézométrique (Février, 1989)

La courbe isopièze, basée sur les données de Ameer & Saad de 1989 (fig. IV.8), montre que l'écoulement a généralement lieu du Sud vers le Nord, suivant deux axes de drainage principaux qui correspondent aux thalwegs de l'Ouardefou. Les courbes iso-pièzes présentent une concavité orientée vers l'aval. Toutes les eaux convergent et sont évacuées par l'Ouardefou.

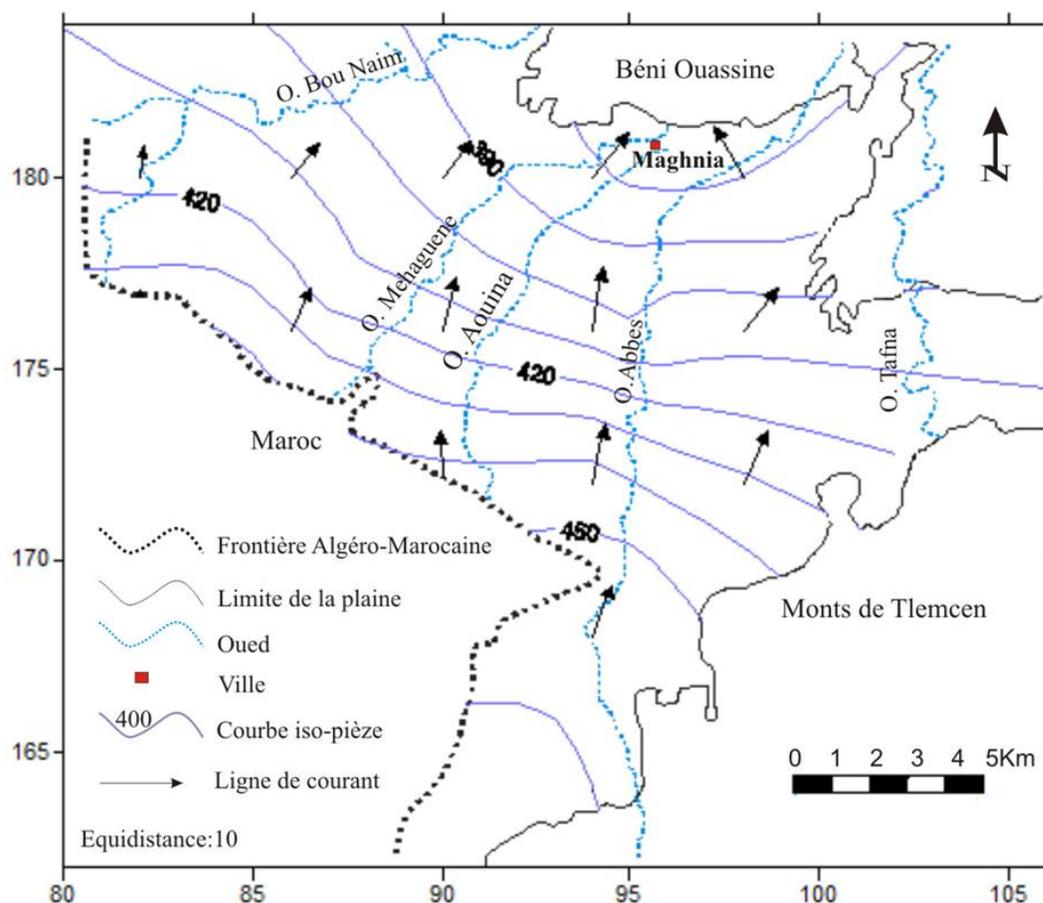


Figure IV.8 : Carte piézométrique de la nappe de Maghnia  
(Ameur & Saad, 1989)

#### IV.3.2.3. Carte piézométrique (Mai 1995)

La carte piézométrique de la région d'étude, qui repose sur un inventaire de 23 points d'eau, a une allure et des caractéristiques similaires à celles des cartes précédentes établies en 1950 par Bonnet et 1989 par Ameur et Saad en 1989. La direction générale de l'écoulement est du Sud vers le Nord (fig.IV.9).

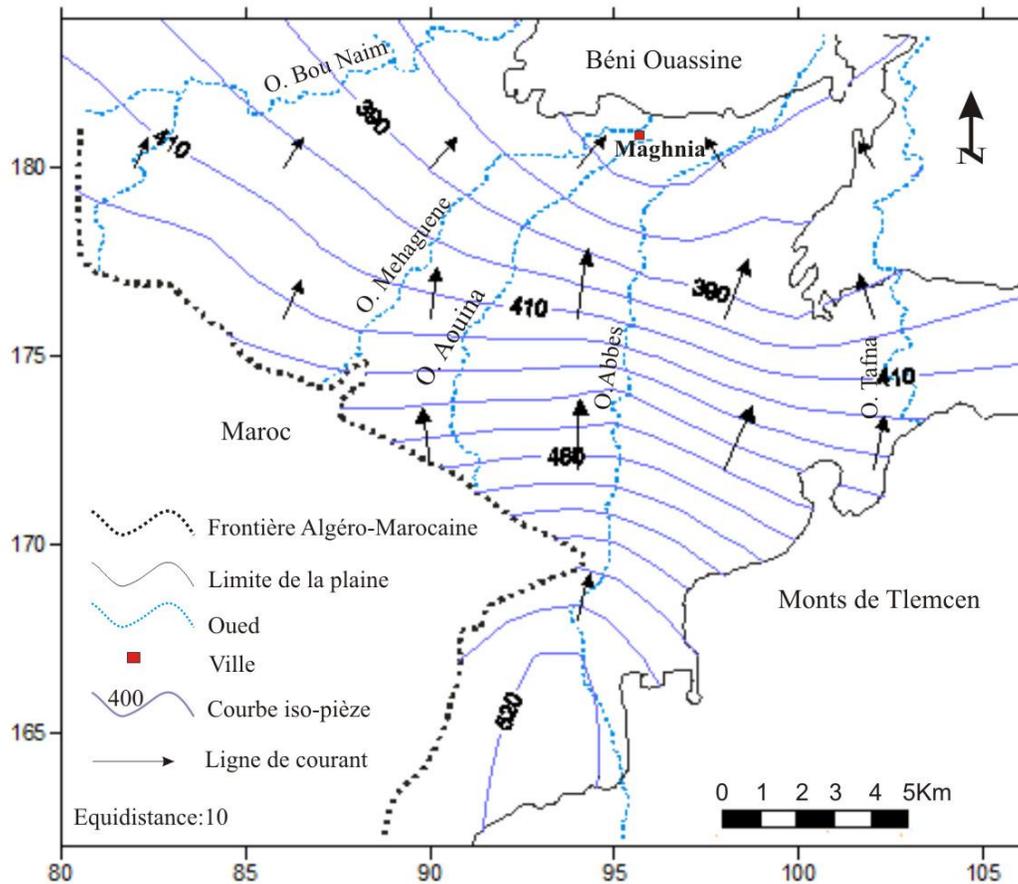


Figure IV.9: Carte piézométrique de la plaine alluviale de Maghnia (Mai 1995)

#### IV.3.2.4. Carte piézométrique (Mai 2010)

Dans l'objectif d'actualiser nos données par rapport au travail établi par Baba Hamed en 2007, nous avons tenté d'interpréter la carte réalisée à partir des données recueillies au près de l'ANRH de 2010 (fig.IV.10). L'examen de la carte fait apparaître des dépressions au centre et au sud-ouest qui témoignent d'une période de pompage intense. (Cette carte a été tracée à partir des niveaux piézométriques dynamiques où la nappe était en production donc on ne peut l'interpréter car le sens d'écoulement est totalement influencé par le pompage). Cette dernière carte ne sera pas prise en compte dans la suite des travaux.

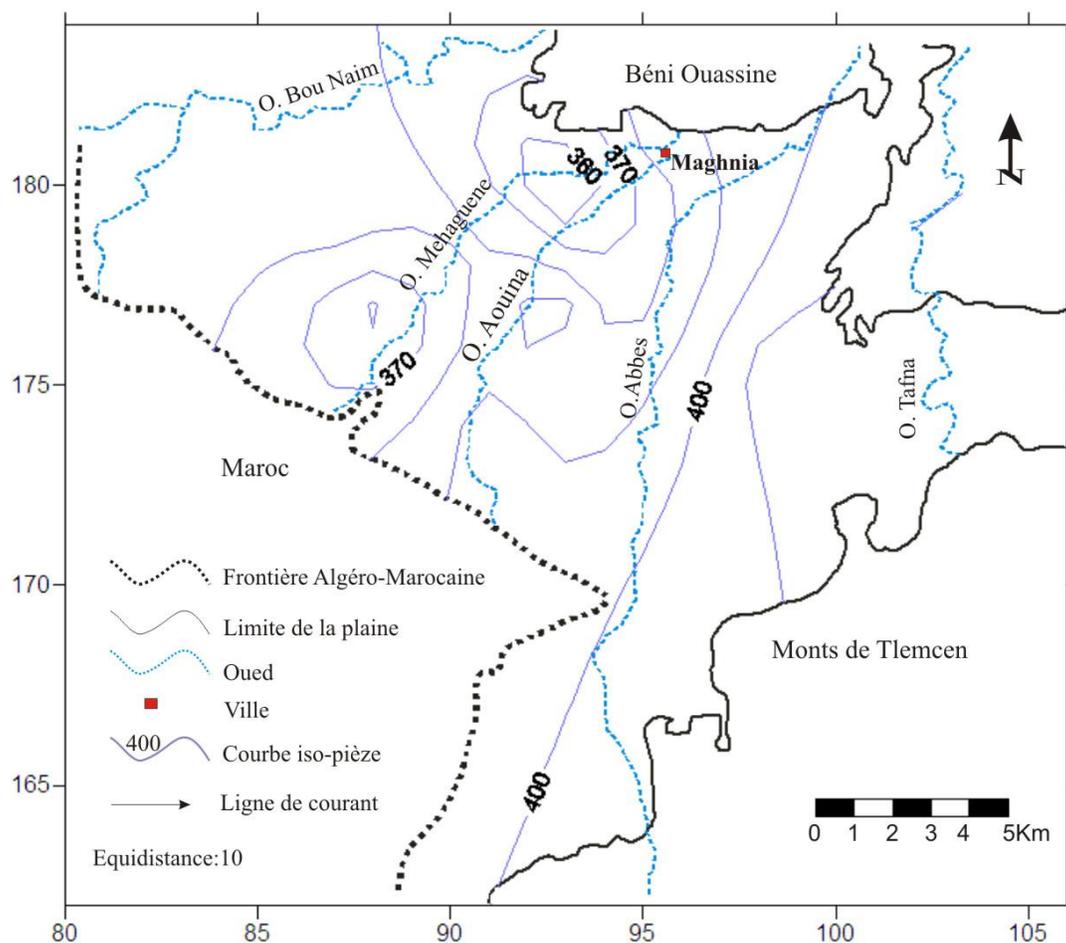


Figure IV.10: Carte piézométrique de la nappe de la plaine de Maghnia (Mai 2010)

### IV.3.3. Etude spatio-temporelle des fluctuations de la nappe

Afin de cerner l'évolution de la piézométrie durant les trois premières campagnes (1950, 1989 et 1995), nous avons pris des puits témoins répartis sur toute la plaine (fig.IV.11). Les coordonnées des puits ainsi que leurs niveaux piézométriques sont données par le tableau suivant :

Tableau IV.2: Niveaux piézométriques des puits au cours des différentes campagnes

Puits	X (km)	Y (km)	Année 1950	Année 1989	Année 1995
P1	89,9	180,15	373	378	368,6
P2	82,45	179,5	415,5	420	416
P3	87,15	177,325	418	412	411

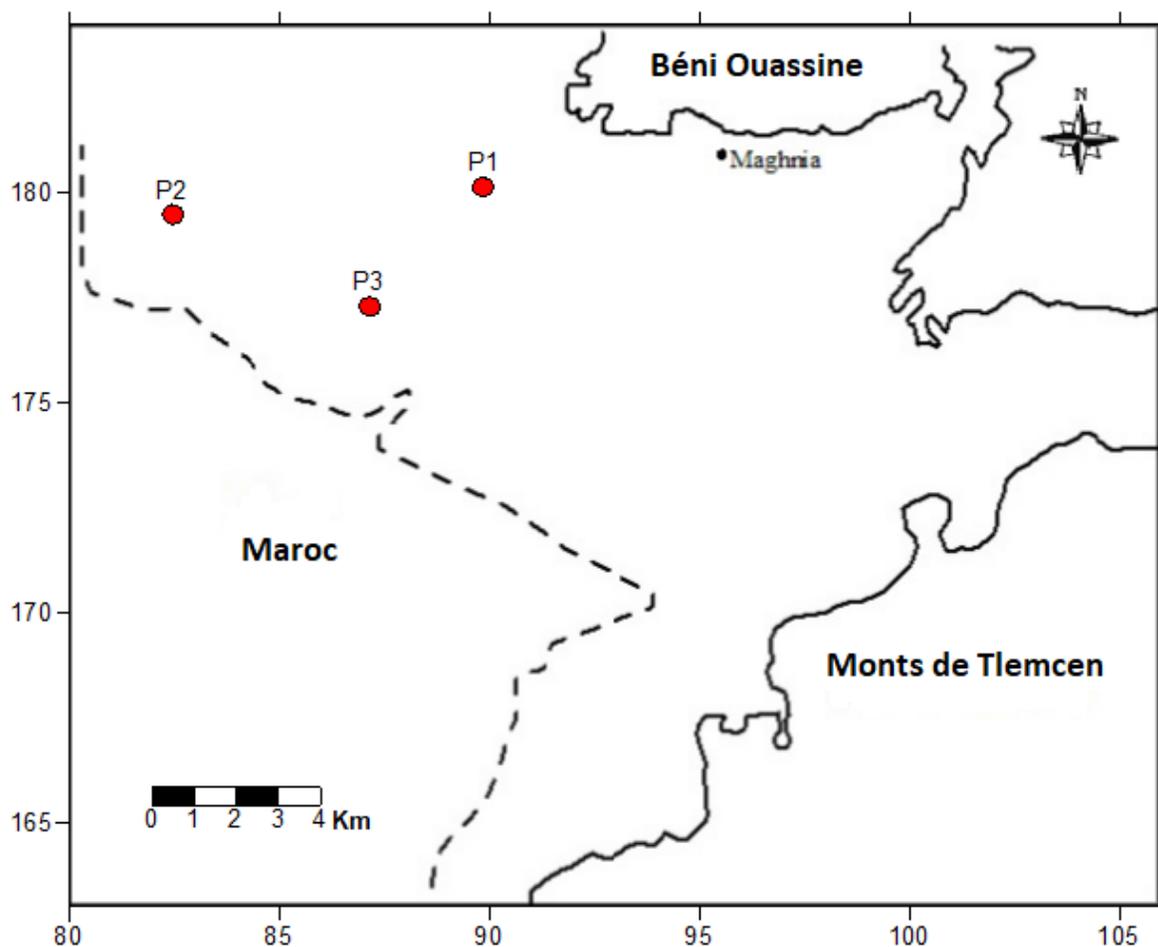


Figure IV.11: Localisation des puits d'observation

La figure IV.12 permet de mettre en évidence l'évolution des niveaux de la nappe au cours des trois campagnes piézométriques.

Pour le puits 1 situé au centre et 2 situé à l'Ouest la plaine de Maghnia, on remarque une augmentation du niveau piézométrique depuis 1950 jusqu'à 1989, et après une diminution de 10 mètres pour le puits 1, et de 4 mètres pour le puits 2. Le puits 2 a repris son niveau initial de la nappe.

On remarque pour le puits 3 situé au centre de la plaine une diminution de 7m à partir du 1950 jusqu'à 1995.

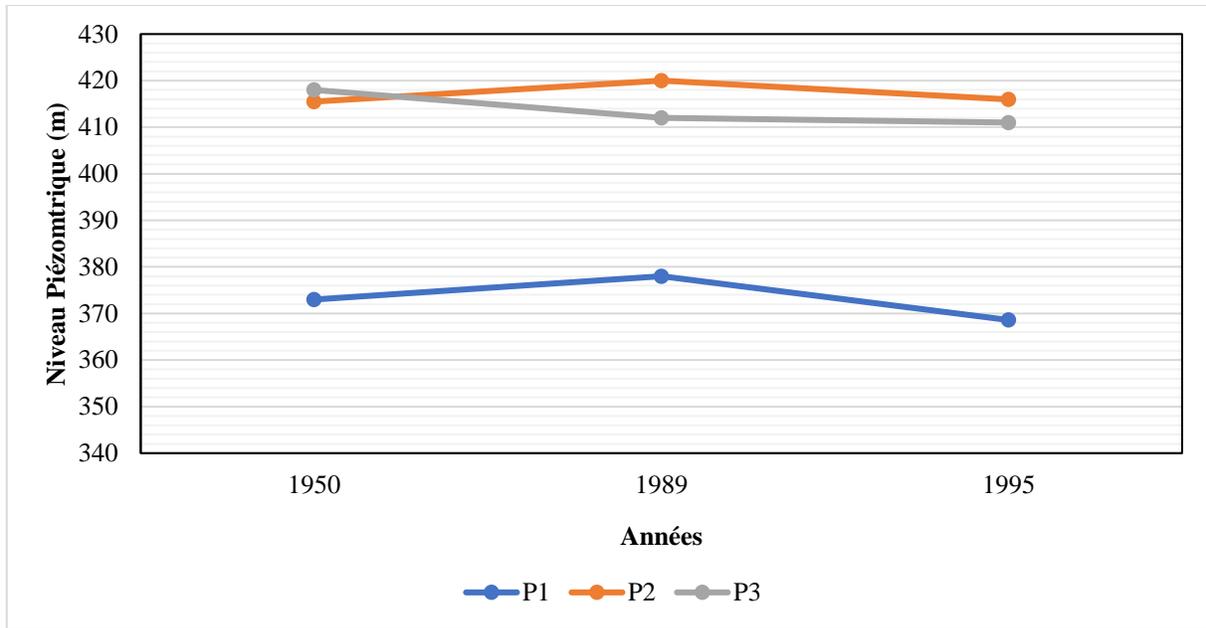


Figure IV.12: Fluctuation de la nappe de Maghnia au cours des campagnes piézométriques

#### IV.4. Caractéristiques hydrodynamiques

Les principales caractéristiques hydrodynamiques qui régissent l'écoulement souterrain et pris en compte dans notre étude sont les suivantes :

- ❖ **La conductivité hydraulique (K)**: représente l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique (Castany, 1982). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité  $K$  défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en une seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Elle est exprimée en m/s.

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = K (\text{m}/\text{s}) \cdot S (\text{m}^2) \cdot i$$

Q : Débit total ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

K: Perméabilité (m/s)

S: Section ( $\text{m}^2$ )

i: Gradient hydraulique (-)

- ❖ **La transmissivité (T)** : caractérise la productivité d'un captage. C'est le produit du coefficient de perméabilité  $K$  par l'épaisseur de la zone saturée  $H$ .

$$T(\text{m}^2/\text{s}) = K (\text{m}/\text{s}) \cdot H(\text{m})$$

- ❖ **Le coefficient d'emmagasinement (S):** est défini comme le rapport du volume d'eau libérée (ou emmagasiné) par unité de surface sur la différence de charge hydraulique.

Afin de pouvoir établir les cartes de conductivité hydraulique et de la transmissivité, nous nous sommes basés sur les données à l'endroit de certains forages (tableau. IV. 3)

Tableau IV.3 : Caractéristiques hydrodynamiques à l'endroit des forages.

Forage N°	X (Km)	Y (Km)	Altitude Z (limite sup) (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	Epaisseur (m)	K (m/s)	S	limite inférieure (m)
2	95	18,2	391	0,0087	29	0,0003	0,004	362
3	89	177,5	430	0,0372	62	0,0006	0,04	368
4	92,2	173,9	460	0,0164	82	0,0002	0,02	378
5	92,2	179,75	405	0,156	65	0,0024	0,01	340
8	90,8	178,8	415	0,036	60	0,0006	0,04	355
10	85,35	176,1	440	0,0432	72	0,0006	0,03	368
12	80,72	182,87	438,6	0,012	132	0,00009	0,02	306,6
14	82,87	180,4	432,4	0,0099	110	0,00009	0,03	322,4
15	82,5	177,7	446,1	0,0091	101	0,00009	0,03	345,1
16	91,6	178,75	412,6	0,0006	90	0,0006	0,03	322,6
20	92,75	180	400	0,24	100	0,024	0,004	300
23	82,45	179,475	431,9	0,0117	130	0,00009	0,03	301,9

$$\text{Limite inférieure} = Z - E_p \quad (26)$$

Limite inférieure : Mur de l'aquifère (m)

Z : Toit de l'aquifère et c'est l'altitude (m)

$E_p$  : Epaisseur de la zone saturée (m)

#### IV.4.1. Répartition de la perméabilité

La répartition spatiale de la perméabilité met en évidence trois zones (fig.IV.13):

- la zone avec une faible perméabilité de l'ordre de  $10^{-5}$  m/s qui se situe dans les limites de la plaine.
- la zone avec une perméabilité moyenne de  $10^{-4}$  m/s qui couvre une vaste étendue au niveau de la plaine.
- la zone avec une très bonne perméabilité de l'ordre de  $10^{-3}$  m/s répartie au Nord de la plaine.

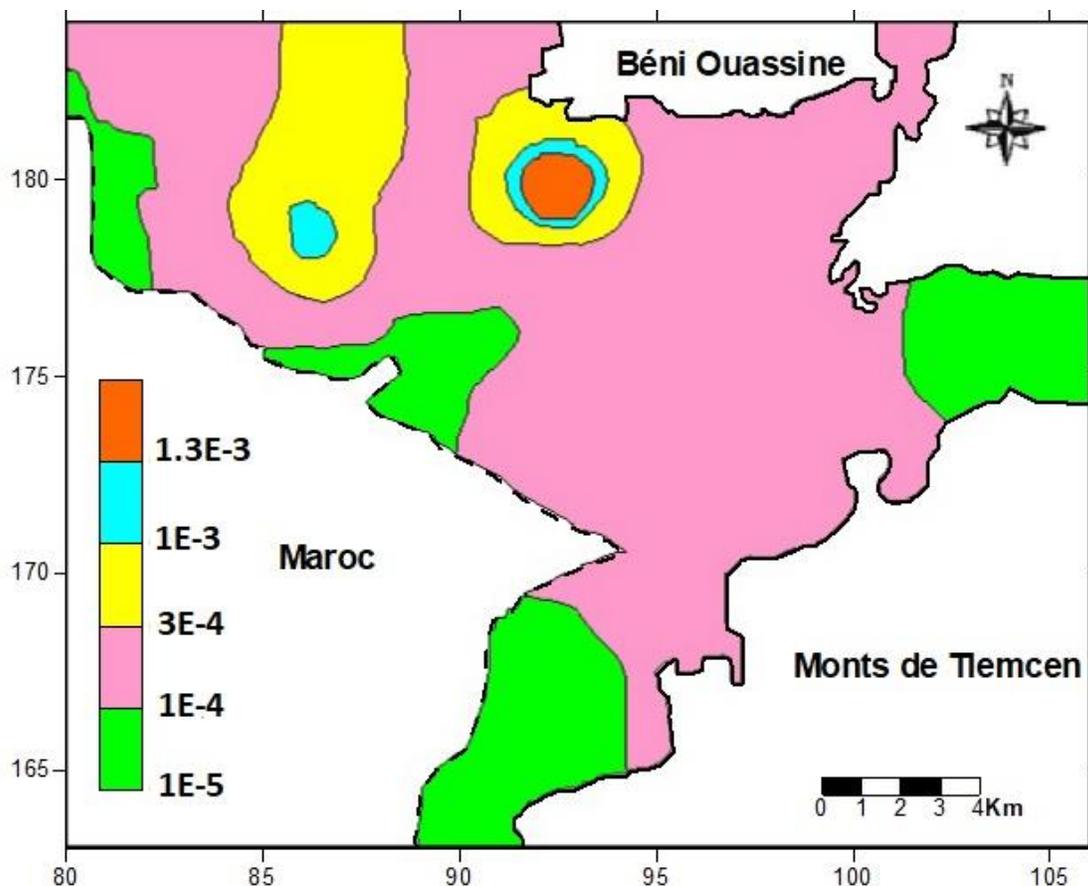


Figure IV.13: Répartition de la perméabilité de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia (BABA HAMED K. 2007)

#### IV.4.2. Répartition du coefficient d'emmagasinement

La répartition des valeurs du coefficient d'emmagasinement (fig.IV.14) révèle une hétérogénéité du terrain du fait de la présence de masses argileuses elles sont de l'ordre de  $10^{-3}$  au  $10^{-2}$ . Les grandes valeurs coïncident avec les zones où le remplissage est de granulométrie grossière.

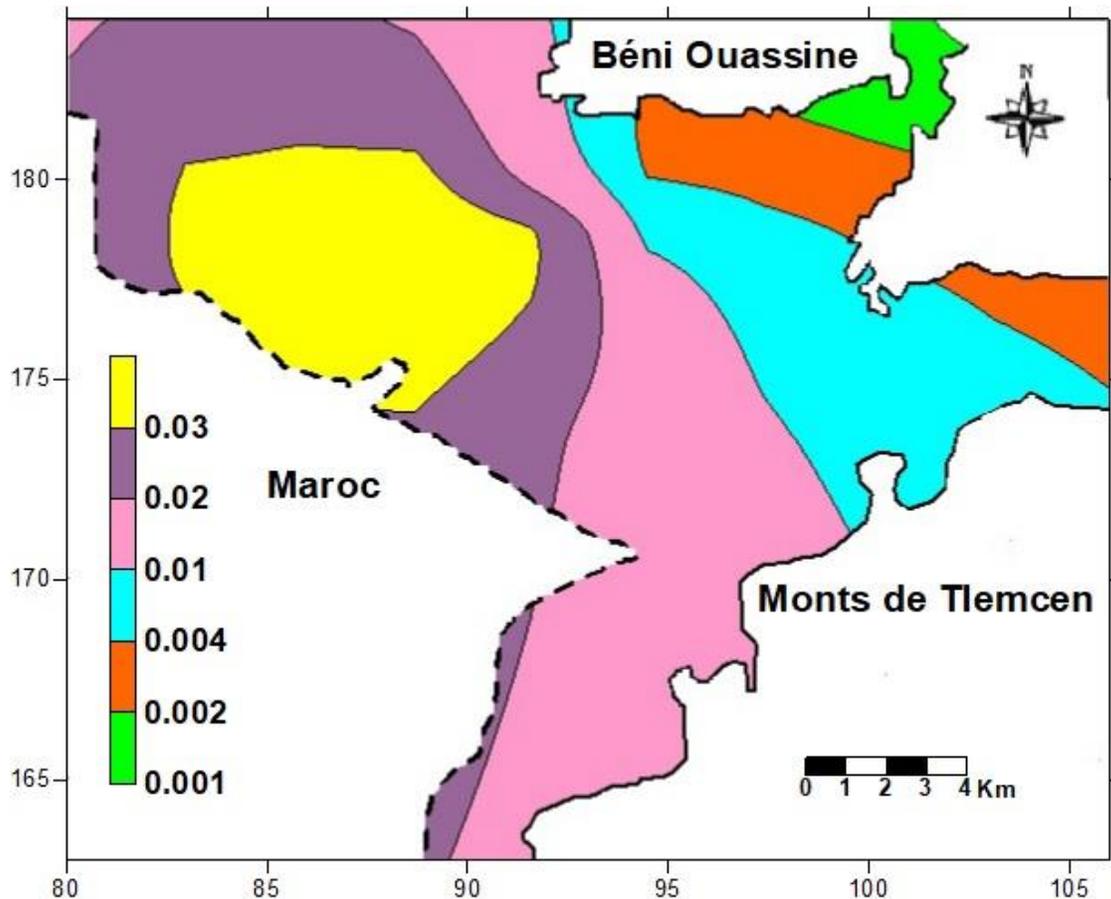


Figure IV.14: Répartition du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia

#### IV.4.3. Répartition de la transmissivité

Quatre zones de transmissivités différentes apparaissent sur la carte de la répartition de la transmissivité (fig. IV.15) :

- La zone avec une transmissivité de 0,001 m<sup>2</sup>/s est considérée relativement comme ayant une faible transmissivité. Cela dû à la faible perméabilité dans cette zone avec une épaisseur faible.
- La zone avec une transmissivité de 0,01 m<sup>2</sup>/s est considérée comme ayant une transmissivité modérée. Cette zone plus perméable que la zone précédente avec une épaisseur moyenne, mais moins perméable que les zones suivantes.
- La zone avec une transmissivité de 0,1 m<sup>2</sup>/s est considérée comme ayant une transmissivité relativement élevée. Cette zone a une perméabilité moyenne avec une épaisseur importante nous a donné une transmissivité importante.
- La zone avec une transmissivité de 0,2 m<sup>2</sup>/s est considérée comme étant la zone la plus transmissive au niveau de la plaine à cause de l'importance de son épaisseur.

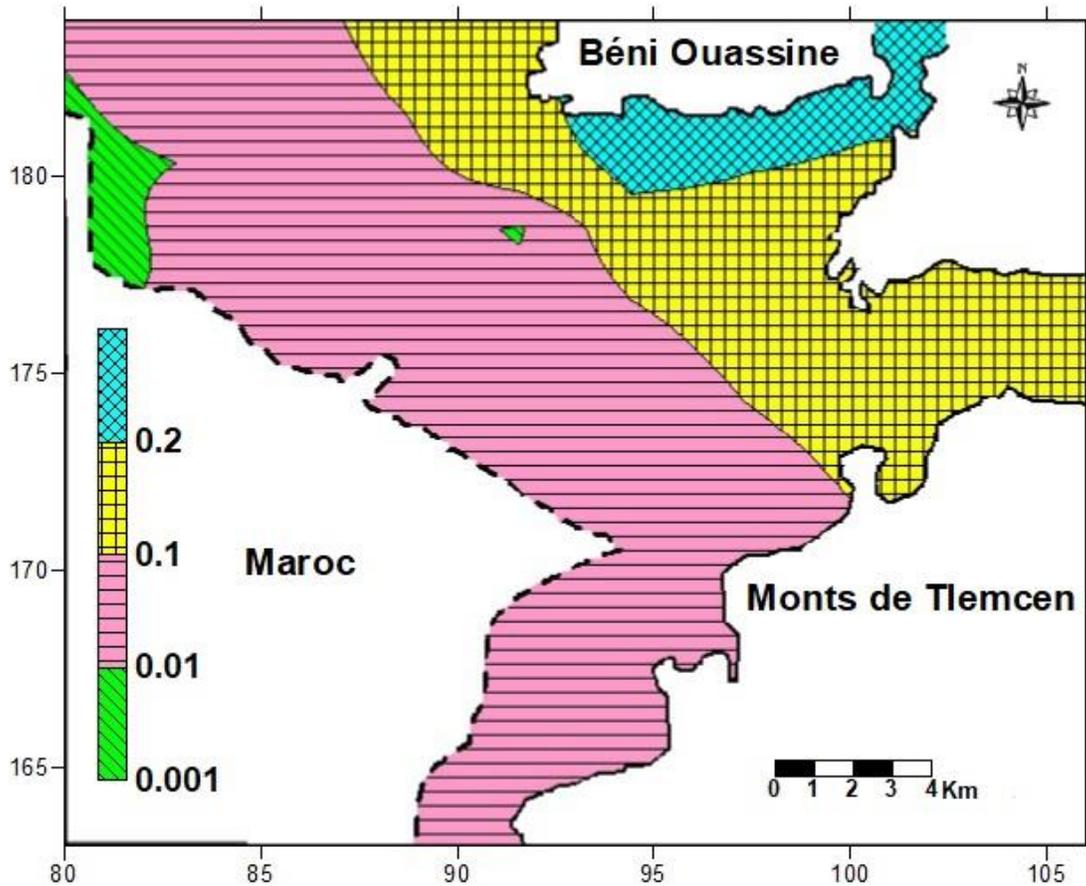


Figure IV.15: Répartition de la transmissivité de l'aquifère alluvionnaire de Maghnia

#### IV.5. Conclusion

Il a été présenté dans ce chapitre les différents paramètres pouvant être utilisés dans le processus de la modélisation. Par conséquent, les investigations menées au cours de ce chapitre ont permis d'obtenir une bonne couverture spatiale de la plaine de Maghnia. Ces résultats sont encourageants pour l'établissement d'un modèle hydrogéologique. Cependant, ils doivent être approuvés avec beaucoup plus de points d'observation pour étoffer toute la nappe.

***CHAPITRE V :***  
***MODELISATION***  
***HYDROGEOLOGIQUE***

## V. Introduction

La gestion et la protection des eaux souterraines passent aujourd'hui par la modélisation hydrogéologique. Cette approche permet de comprendre et de prévoir le comportement de systèmes hydrogéologiques complexes vis-à-vis des sollicitations anthropiques qui sont variables dans le temps et l'espace. La modélisation numérique est un moyen de répondre rigoureusement aux problèmes posés en apportant une réponse basée sur des concepts physiques.

L'objectif principal d'une étude de modélisation est de comprendre le comportement d'un système hydrogéologique pour aider les gestionnaires à prendre des décisions. Dans cette perspective, le choix du modèle, l'étendue du domaine, les choix des processus et paramètres et les scénarios simulés dépendent des objectifs.

Plusieurs objectifs généraux de modélisation peuvent être établis, notamment :

- Mieux comprendre le comportement du système hydrogéologique,
- Valider le modèle conceptuel d'un site,
- Aider à planifier les travaux de caractérisation sur le terrain basé sur les prédictions et l'importance ou la sensibilité des paramètres,
- Évaluer l'impact d'un projet sur les autres utilisateurs des ressources en eaux souterraines et sur l'environnement,
- Définir des règles ou des conditions d'exploitation sécuritaire des ressources en eaux souterraines,
- Prédire l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eaux souterraines.

En plus des objectifs généraux, des objectifs plus spécifiques peuvent être déterminés, citons :

- La description des systèmes d'écoulements locaux et régionaux, incluant les vitesses, les lignes d'écoulement et les zones de recharge et de résurgence, dans le cadre du développement durable d'une ressource en eaux souterraines,
- La détermination du rabattement ou la délimitation des aires d'alimentation d'un puits,
- L'évaluation ou la comparaison de l'efficacité d'une méthode de restauration d'un aquifère contaminé,
- La prédiction de l'impact environnemental des contaminants dissous provenant d'un déversement (ponctuel ou continu) sur la qualité des eaux souterraines,
- La réalisation de la conception d'un système de confinement hydraulique d'un terrain contaminé.

Notre étude s'intègre dans le projet de réhabilitation et d'extension du périmètre irrigué de la plaine de Maghnia qui est occupé dans sa quasi-totalité par l'aquifère alluvionnaire plio-quadernaire. Cet aquifère s'étend bien au-delà des limites du pays et représente à l'échelle nationale l'une des principales réserves d'eaux souterraines de l'Ouest algérien. Cet aquifère est touché par une surexploitation et subit les vicissitudes du climat. Il est donc nécessaire de donner aux acteurs de l'eau les outils nécessaires pour mieux comprendre les transferts d'eau au sein de cet aquifère et ainsi

apprendre à mieux le gérer. La compréhension de l'évolution quantitative de ce stock d'eau souterraine passe par une modélisation de l'ensemble de ce réservoir. C'est dans cette optique que nous avons utilisé le modèle PMWIN5 permettant de mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle de la nappe alluviale de Maghnia.

## V.1. Généralités sur le code de calcul PMWIN5

### V.1.1. Définition

PMWin5 (Processing Modflow for Windows 5) est un logiciel de modélisation et de simulation des eaux souterraines. Il est largement utilisé pour la modélisation des aquifères et des systèmes hydrogéologiques. Il permet aux utilisateurs de créer, modifier et exécuter des modèles de simulation des eaux souterraines basés sur MODFLOW, qui est l'un des codes de simulation des eaux souterraines les plus couramment utilisés.

PMWin5 offre une interface conviviale et graphique qui facilite la création et la visualisation des modèles. Il permet également d'effectuer des analyses et des simulations avancées, telles que la modélisation de la contamination des eaux souterraines, la simulation des écoulements et des transferts de masse, la gestion des ressources en eau souterraine, etc.

PMWin5 est un outil puissant et polyvalent pour la modélisation et la simulation des eaux souterraines, utilisé par les hydrogéologues, les chercheurs et les professionnels de l'eau pour étudier et gérer les systèmes aquifères.

### V.1.2. Mode de fonctionnement du modèle

Le logiciel PMWIN5 fonctionne en utilisant une approche de modélisation hydrogéologique basée sur la méthode des différences finies. Les principales étapes de son mode de fonctionnement sont :

- **Création du modèle** : L'utilisateur commence par créer un modèle numérique représentant le système aquifère qu'il souhaite étudier. Cela implique la définition des caractéristiques géologiques du site, telles que les couches de sol, les formations rocheuses, les propriétés hydrogéologiques, etc. L'utilisateur peut importer des données géologiques existantes ou les saisir manuellement dans le logiciel (fig. V 1).

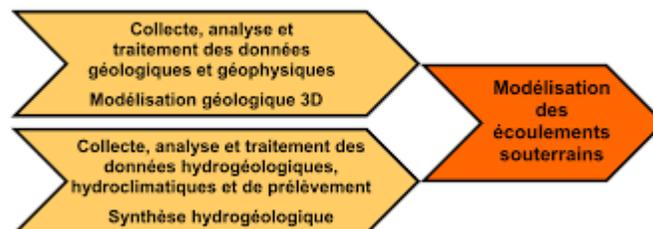


Figure V.1 : Elaboration du modèle conceptuel

-**Définition des paramètres** : Une fois le modèle créé, l'utilisateur spécifie les paramètres hydrogéologiques nécessaires à la simulation, tels que la conductivité hydraulique, la recharge, le pompage, les conditions aux limites, etc. Ces paramètres sont essentiels pour décrire le comportement hydraulique du système aquifère.

-**Discrétisation du domaine** : Le modèle est ensuite discrétisé en plusieurs éléments, c'est-à-dire en petits éléments géométriques dans lesquels les équations mathématiques seront résolues. Cette étape subdivise le domaine d'étude en une grille de mailles, ce qui permet de représenter avec précision les variations locales des propriétés hydrogéologiques.

-**Résolution des équations** : Une fois la discrétisation effectuée, le logiciel PMWIN5 résout les équations mathématiques qui décrivent le mouvement de l'eau dans le système aquifère. Ces équations comprennent généralement l'équation de conservation de la masse et l'équation de Darcy, qui sont résolues numériquement pour obtenir les distributions de pression et de flux d'eau souterraine dans le domaine.

-**Analyse et interprétation des résultats** : Une fois la simulation terminée, PMWIN5 permet à l'utilisateur d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus. Le logiciel fournit des outils de visualisation pour représenter les contours de la pression et du flux d'eau souterraine, les lignes de courant, les isochrones, les temps de transit, etc. Cela permet à l'utilisateur de comprendre le comportement hydraulique du système étudié et d'identifier les zones d'intérêt.

-**Validation et ajustement** : En fonction des résultats obtenus, l'utilisateur peut ajuster les paramètres du modèle, apporter des modifications à la géométrie ou aux conditions aux limites, et effectuer des itérations pour obtenir une meilleure adéquation entre les résultats de simulation et les observations de terrain.

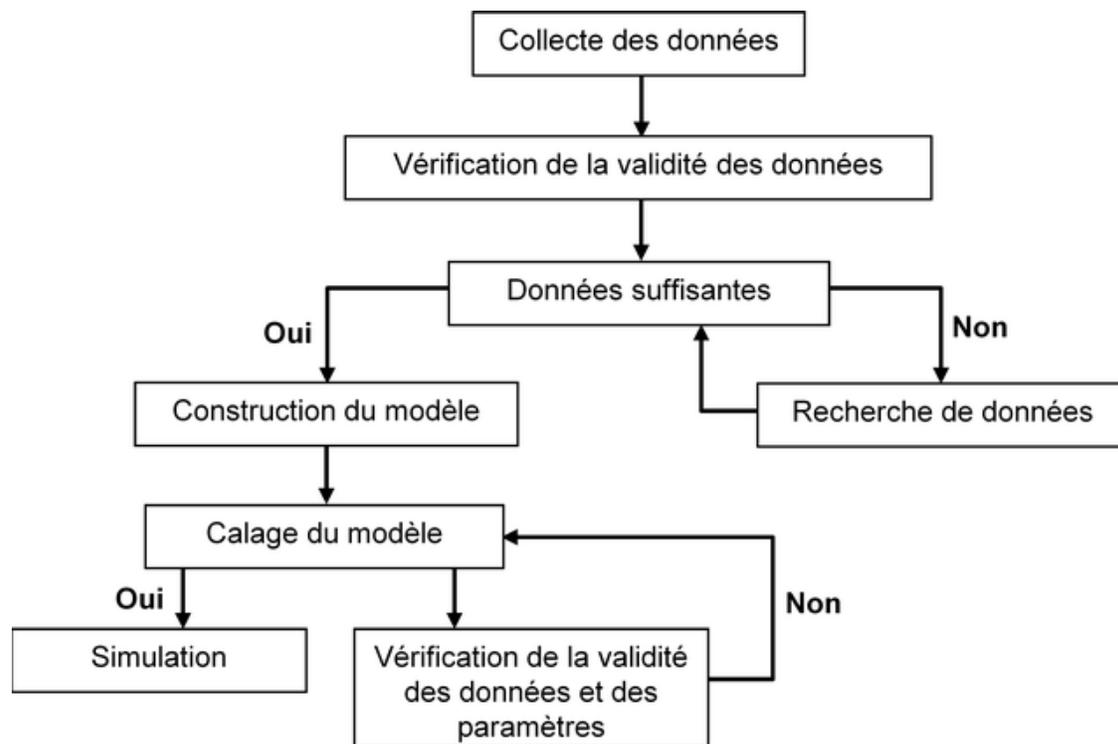


Figure V.2 : Fonctionnement du modèle PMWIN5

## V.2. Modélisation de la plaine alluviale de Maghnia

Pour appréhender le comportement hydrodynamique de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia, sa structure souterraine et la dynamique des fluides, des méthodes mathématiques ont été utilisées pour simuler au mieux la réalité. Cette nappe phréatique est utilisée pour l'alimentation en eau potable (AEP) et l'irrigation des terres agricoles.

D'une part, On remarque que les variations climatiques récentes, caractérisées par une faible pluviométrie, ont entraîné une surexploitation illégale de la nappe par la population, avec la multiplicité des puits de pompage. Cependant l'épuisement de cette réserve peut entraîner des vides et altérer la structure du sol, ce qui peut provoquer des catastrophes naturelles.

D'autre part, la plaine de Maghnia est sujette à des risques de pollution, en particulier en provenance de la frontière algéro-marocaine via l'Oued Mouillah. Cette situation pourrait entraîner une contamination de la nappe phréatique et une détérioration de la qualité de l'eau souterraine.

La modélisation hydrodynamique de cette nappe s'est avérée nécessaire voire indispensable pour maîtriser les entrées et les sorties et aider les gestionnaires à avoir un document fiable pour sa gestion. C'est dans cette optique que les travaux de thèse de Baba Hamed (2007) ont été réalisés avec le code de calcul ASMWIN (Aquifer Simulation Model). L'étude élaborée avait pour résultats plusieurs simulations ayant servi de base à d'autres auteurs.

### V.2.1. Présentation du domaine à modéliser

Un modèle n'est jamais une fin en soi c'est dans cette vision que notre travail prend son ampleur. Notre objectif est de transférer les données du modèle mathématique de Maghnia déjà réalisé par Baba Hamed en 2007 par le logiciel ASMWIN (Aquifer Simulation Model) vers le logiciel PMWIN5 (Processing Modflow for Windows 5). Cela nous permettra de bénéficier de fonctionnalités avancées, d'actualiser les données et d'explorer de nouvelles possibilités d'analyse et obtenir des résultats plus exhaustifs. Ce processus nous permettra de prendre des décisions éclairées et de mettre en œuvre des stratégies de gestion des ressources en eau pour la région de Maghnia.

### V.2.2. Discrétisation du domaine à modéliser et construction de la grille du modèle (maillage)

La plaine de Maghnia englobe un aquifère alluvionnaire à nappe libre d'âge plio-quaternaire qui s'étend sur toute la zone d'étude. Nous avons subdivisé notre secteur, d'une superficie de 351 km<sup>2</sup>, en 572 mailles carrées uniformes de 1000m de côté. Cela se traduit par un total de 26 colonnes et 22 lignes. Parmi ces mailles, 257 sont considérées comme actives (fig.V.3).

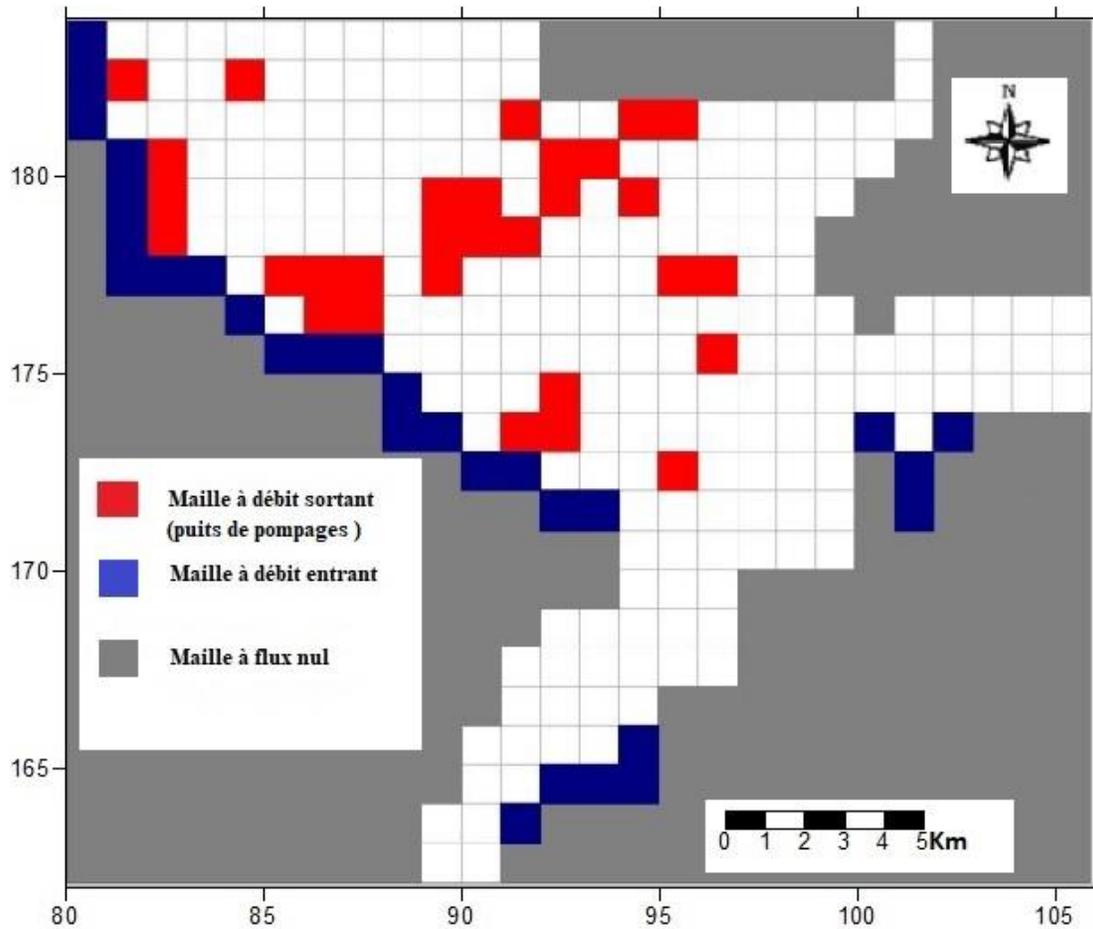


Figure V.3 :Maillage et les conditions aux limites du domaine à modéliser.

### V.2.3. Conditions aux limites

L'aquifère alluvionnaire plio-quaternaire est considéré comme une entité hydrogéologique distincte. Cette prise en compte implicite des alluvions présente également l'avantage de réduire considérablement le nombre d'éléments du modèle, diminuant ainsi les temps de calculs.

L'aquifère interagit avec son environnement, ce qui donne lieu à des entrées, des sorties et des échanges avec les formations géologiques voisines. Ces interactions jouent un rôle essentiel dans la définition des conditions aux limites qui caractérisent ce système aquifère.

#### V.2.3.1. Limite à flux imposé nul

Les limites étanches de la plaine, où aucune alimentation latérale n'a lieu, sont matérialisées par la présence de marnes miocènes affleurant le long des côtés Nord, Nord-Est et Sud-Ouest de la plaine de Maghnia (fig.V.3).

#### V.2.3.2. Limite à potentiel imposé non nul (positif)

La plaine reçoit une alimentation latérale provenant de différentes sources :

- **Du côté de la limite algéro-marocaine**, il existe une continuité hydrogéologique entre la nappe de la plaine de Maghnia et celle de la plaine des Angads au Maroc. Cela signifie que l'eau s'écoule latéralement de la plaine des Angads vers la plaine de Maghnia, contribuant ainsi à l'alimentation de la nappe de cette dernière.
- **Du côté Sud-Est**, l'alimentation latérale provient du trop-plein de la nappe du Secondaire située dans les Monts de Tlemcen. L'excès d'eau de cette nappe se déverse latéralement vers la plaine de Maghnia, rechargeant ainsi la nappe de cette zone.
- **Du côté Sud**, il y a des échanges entre la nappe de la plaine de Maghnia et l'Oued El Abbès. Ces échanges se produisent lorsque l'eau souterraine de la nappe s'écoule latéralement vers l'Oued El Abbès ou lorsque l'eau de l'oued s'infiltré dans la nappe, contribuant ainsi à l'alimentation latérale de la plaine.

### V.2.3.3. Limite à potentiel imposé non nul (négatif)

N'ayant pas la possibilité de mettre plusieurs captages dans une seule maille, nous avons regroupé les débits et les avons assemblés pour ne considérer qu'un débit global au niveau des mailles sollicitées par le pompage. Les volumes prélevés ont été extraits à partir des forages de l'ANRH (Cf. chapitre précédent).

## V.3. Calage en régime permanent

Pour le calage du modèle en régime permanent, le modèle a été développé à partir de la piézométrie choisie comme état de référence et réalisée en Février 1989. L'analyse détaillée de cette carte a été présentée dans le chapitre 4, fournissant des informations précieuses sur les niveaux d'eau souterraine dans la région d'étude.

### V.3.1. Potentiels mesurés et calculés

Le processus de calage du modèle en régime permanent vise à minimiser les écarts entre les charges hydrauliques mesurées et simulées, en se concentrant sur les valeurs de piézométrie au centre de chaque maille. Cela implique d'ajuster les paramètres de perméabilité et d'évaluer leur influence sur les variations de la piézométrie en utilisant un ensemble de points de contrôle répartis dans la zone du modèle. La calibration du modèle a été effectuée en utilisant une approche itérative où les paramètres d'entrée étaient modifiés manuellement et les statistiques de calibration étaient évaluées et optimisées. La conductivité hydraulique et les valeurs de recharge furent les principaux paramètres du modèle ajustés pendant le processus de calibration. Les résultats de ce calage sont présentés dans le tableau V.1.

L'accord entre les contours de la piézométrie de référence et les résultats du calage en régime permanent (fig.V.4) est remarquablement satisfaisant. Cette concordance est clairement démontrée dans la figure V.5, qui met en évidence la précision avec laquelle le modèle reproduit les mesures de piézométrie aux points de contrôle sélectionnés. L'écoulement de l'eau souterraine suit la topographie, tel que défini dans les hypothèses du modèle conceptuel initial.

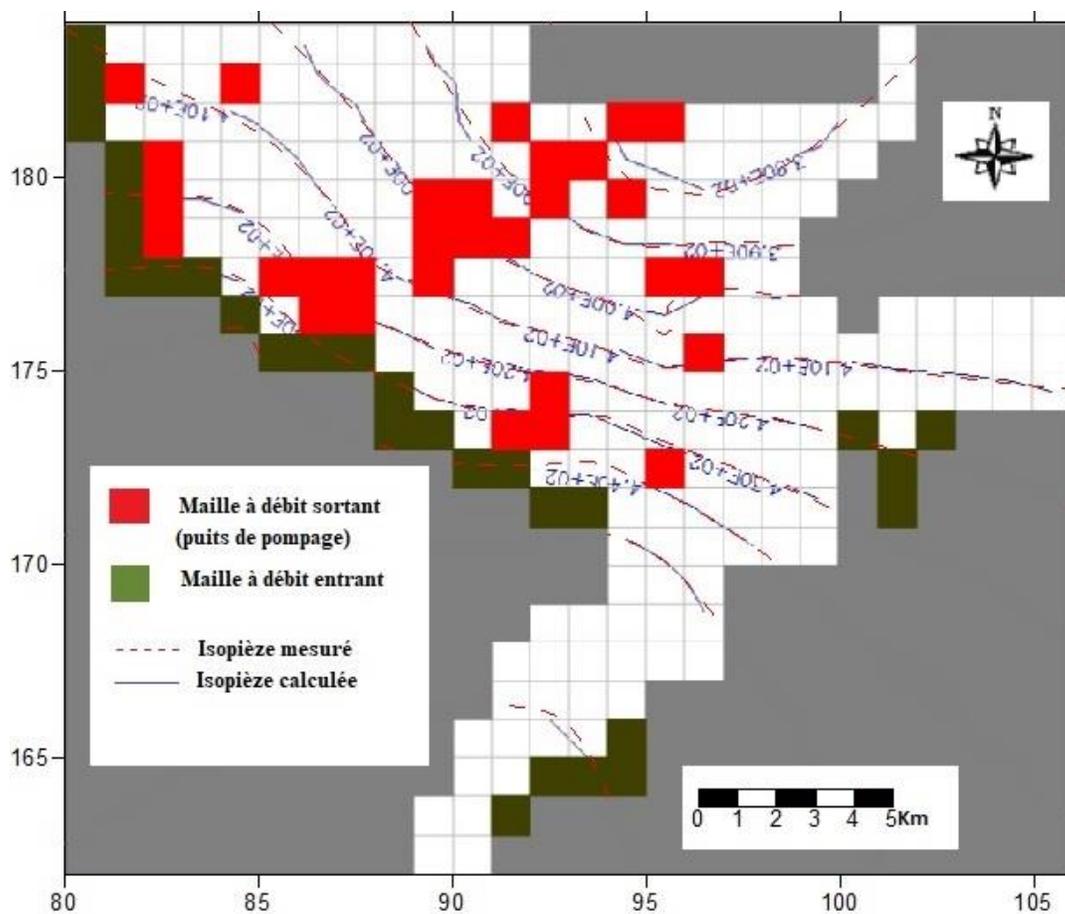


Figure V.4 : Comparaison entre la piézométrie calculée et mesurée en régime permanent.

Tableau. V.1: Écarts entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

Points de d'observation	Coordonnées (colonne, ligne)	H mesurée (m)	H calculée (m)	$H_m - H_c$
1	(-2,2)	408	408,26	-0,26
2	(3,4)	416	413,73	2,27
3	(3,5)	420	418,22	1,78
4	(16,3)	376	377,96	-1,96
5	(15,3)	378	378,007	-0,007
6	(23,10)	412	414,0119	-2,0119
7	(22,10)	413	414,37	-1,37
8	(20,9)	409	409,68	-0,68
9	(10,21)	463	461,69	1,31
10	(12,20)	462	460,37	1,63
11	(13,20)	462	461,74	0,26
12	(18,4)	379	379,17	-0,17
13	(19,9)	408	406,35	1,64

14	(19,10)	414	412,22	1,78
15	(20,10)	414	413,35	0,65
16	(22,1)	379	379,31	-0,31
17	(22,2)	380	379,31	0,69
18	(13,12)	438	436,93	1,07
19	(18,4)	379	379,17	-0,17
20	(25,9)	410	412,98	-2,98
21	(17,5)	381	379,25	1,75
22	(16,5)	381	379,08	1,92

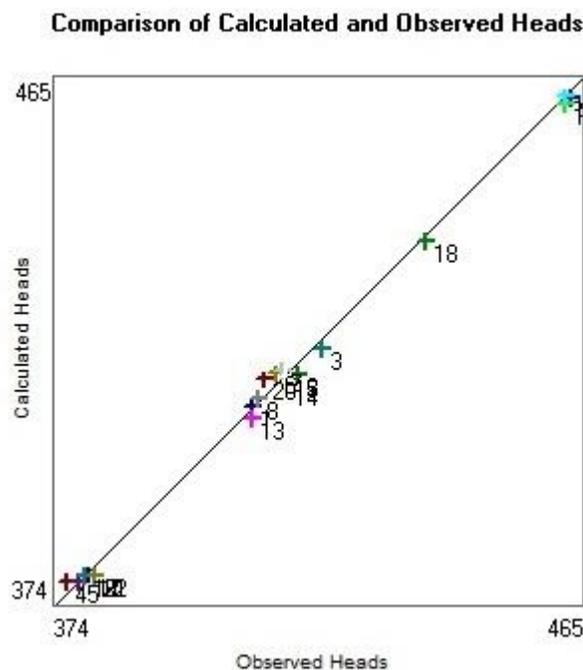


Figure V.5: Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime permanent.

### V.3.2. Répartition des valeurs des conductivités hydrauliques (perméabilité)

Dans le cadre du calage du modèle, une méthode de zonage des perméabilités a été mise en place pour prendre en compte l'hétérogénéité du terrain d'étude. Cette approche consiste à diviser le terrain en quatre plages de perméabilité, avec des valeurs variantes entre  $1.10^{-5}$  et  $3.10^{-4}$  m/s (fig.V. 6).

Les zones présentant relativement les valeurs de perméabilité les plus élevées se situent principalement au Nord (exutoire) et au Sud Est de la plaine (formations jurassiques des monts de Tlemcen), en raison de la présence d'un chenal et du talus (cf. chapitre II). Ces zones bénéficient de bonnes propriétés hydrauliques.

En revanche, les valeurs de perméabilité plus faibles se trouvent à l'Est, le long des limites étanches du Miocène. Dans cette région, la perméabilité est réduite en raison de restrictions dans la circulation d'eau.

Le reste de la plaine est caractérisé par des valeurs de perméabilité moyennes. Ces zones présentent une homogénéité relative dans leurs propriétés hydrauliques, ce qui se traduit par des débits modérés.

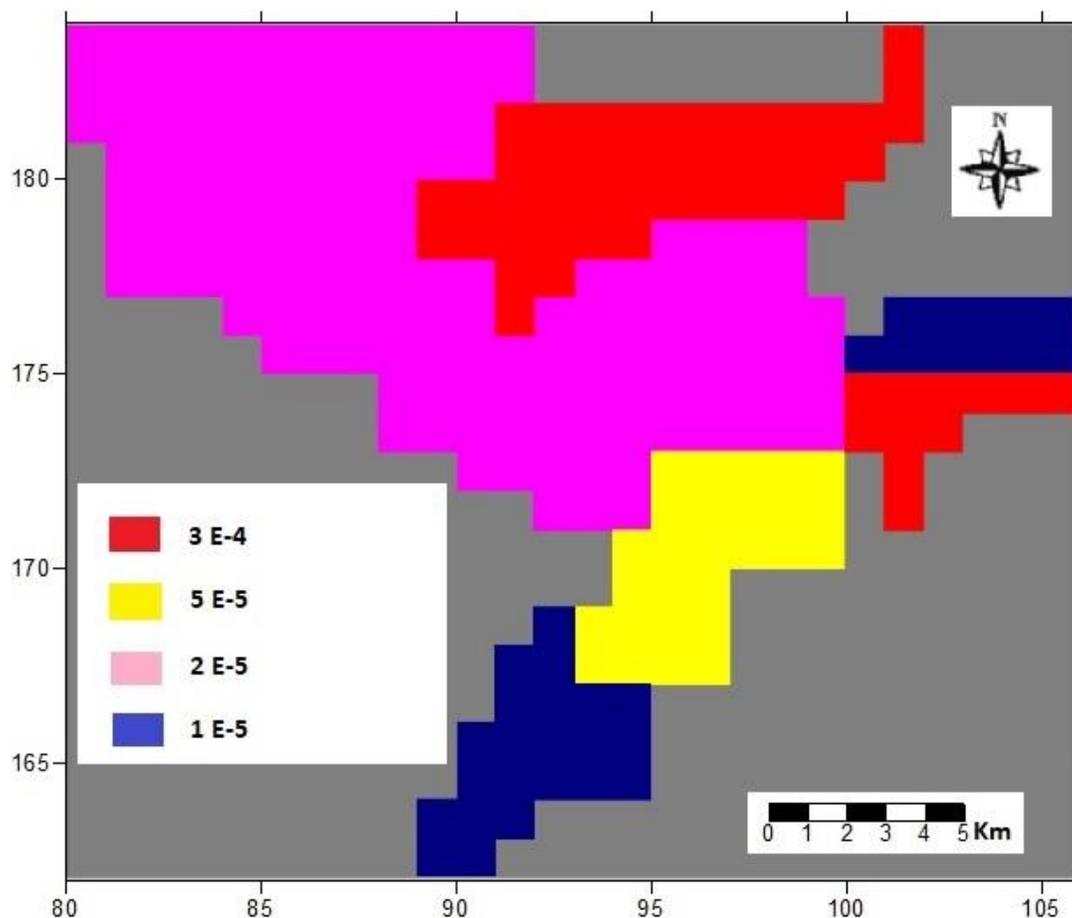


Figure V.6: Carte de la perméabilité (m/s) issue du calage en régime permanent

### V.3.3. Bilan de la nappe

#### V.3.3.1. Bilan de la nappe pour l'ensemble du domaine modélisé

En effectuant le calcul du bilan de la nappe, nous pouvons évaluer si le système est en équilibre hydrique, c'est-à-dire si les entrées et les sorties d'eau sont équilibrées. Les flux entrants comprennent l'infiltration correspondant à l'eau qui pénètre dans la nappe depuis la surface et contribue à son alimentation. Ce bilan nous offre une vision d'ensemble du fonctionnement du système aquifère, en prenant en compte les échanges avec les limites du domaine modélisé. Le tableau V.2 résume le bilan global en eau du domaine modélisé, en se basant sur les débits (exprimés en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) des échanges entre la nappe et ses limites. Les signes (-) et (+) représentent respectivement les débits sortants ou entrants dans le modèle.

Tableau V.2: Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime permanent (exprimés en m<sup>3</sup>/s).

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
CONSTANT HEAD	2.9348370E-01	5.4885175E-05	2.9342881E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.9399997E-01	-2.9399997E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	2.9404688E-01	2.9405487E-01	<b>-7.9870224E-06</b>

En combinant ces deux sources d'alimentation (les infiltrations et l'alimentation latérale), la nappe en cette période de mesure est bien approvisionnée en eau, ce qui contribue à maintenir son niveau stable.

### V.3.3.2. Bilan de la nappe au niveau du chenal

Le calcul du bilan spécifique à la zone la plus productive de l'aquifère met en évidence des informations précieuses sur la contribution des puits à l'alimentation en eau de la population (exploitation par les services d'hydraulique) et à la gestion des ressources. Cela nous permettra de mieux comprendre l'impact des activités de pompage dans cette zone particulière (fig.V.7).

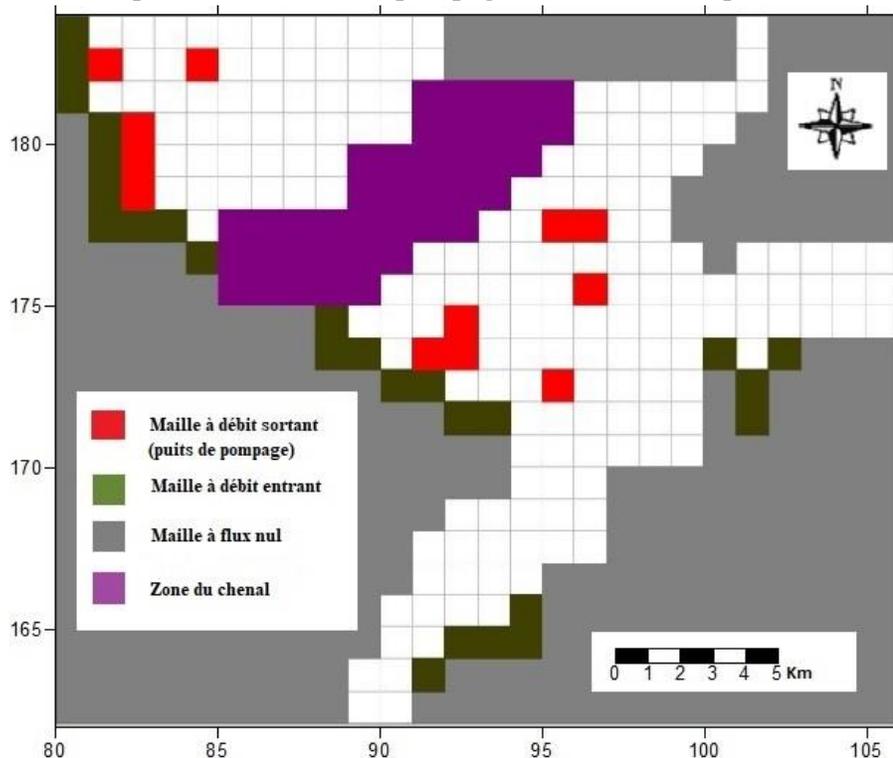


Figure V.7: Localisation du chenal dans la plaine alluviale de Maghnia

Tableau V.3: Bilan de la nappe calculé par le modèle (au niveau du chenal) en régime permanent.

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
CONSTANT HEAD	4.5793958E-02	0.0000000E+00	4.5793958E-02
HORIZ. EXCHANGE	1.9054645E-01	3.4457907E-02	1.5608855E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.0200002E-01	-2.0200002E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.3643179E-01	2.3645793E-01	<b>-2.6136637E-05</b>

L'analyse du bilan correspondant au chenal met en évidence que la majeure partie des débits sortant de la nappe se concentrent dans cette zone. Cette constatation souligne l'importance de cette région en termes d'évacuation des flux d'eau.

#### V.4. Calage en régime transitoire

Le calage en régime transitoire constitue une continuation du processus de modélisation hydrodynamique déjà effectué en régime permanent. Cette étape permet de prendre en compte les variations temporelles et les effets des différentes perturbations sur le système aquifère.

##### V.4.1. Potentiels mesurés et calculés

Le modèle en régime transitoire a pour objectif principal de calibrer le coefficient d'emmagasinement et de comprendre l'évolution de la piézométrie en réponse à différentes perturbations variables, telles que les débits extraits et l'infiltration.

La simulation se concentre sur le comportement hydrodynamique de notre système aquifère à partir de l'état de référence (Février 1989) jusqu'au Mai 1995, en considérant les débits de pompage et l'alimentation de la nappe comme constants.

Les écarts entre les charges hydrauliques mesurées et calculées au niveau des puits et forages, comme présentés dans le (tabl.V.4), (fig.V.8) montrent une très bonne corrélation. De plus, la superposition des courbes piézométriques observées et calculées après calibrage, comme illustré dans la (fig.V.9), confirme une calibration en régime transitoire plus que satisfaisant.

L'ajustement du modèle en régime transitoire permet ainsi de reproduire de manière précise les variations de la piézométrie en réponse aux différentes perturbations. Ces résultats fournissent un bon appui à la compréhension du comportement hydrodynamique du système aquifère.

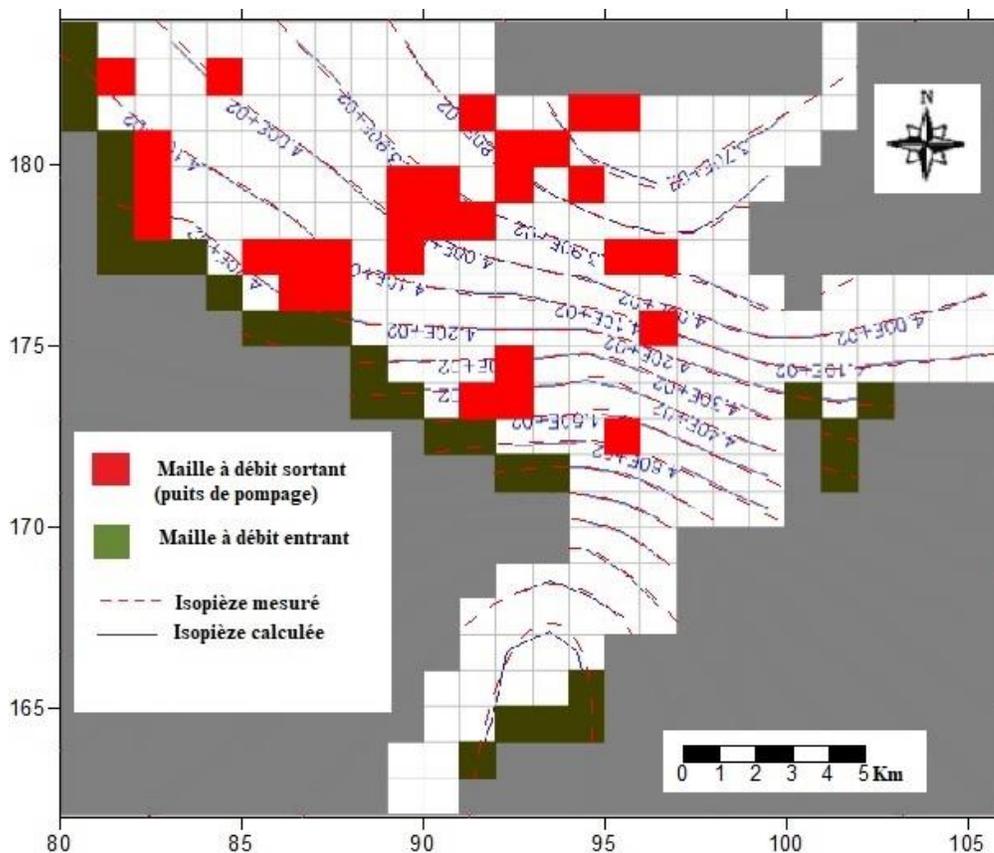


Figure V.8: Comparaison entre la piézométrie calculée et mesurée en régime transitoire.

Tableau V.4: Écarts entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire.

Points de d'observation	Coordonnées (colonne, ligne)	H mesurée (m)	H calculée (m)	$H_m - H_c$
1	(2,2)	408	408,18	-0,18
2	(3,4)	412	411,7	0,3
3	(3,5)	402	405,2	-3,2
4	(16,3)	365	365,38	-0,38
5	(15,3)	368	368,33	-0,33
6	(23,10)	410	410,00	0
7	(22,10)	410	409,1	0,9
8	(20,9)	397	396,43	0,57
9	(10,21)	515	515,01	-0,01
10	(12,20)	519	518,82	0,18
11	(13,20)	522	521,79	0,21
12	(18,4)	369	368,92	0,08
13	(19,9)	400	399,63	0,37
14	(19,10)	415	415,25	-0,25

15	(20,10)	410	410,41	-0,41
16	(22,1)	368	369,01	-1,01
17	(22,2)	370	370,6	-0,6
18	(13,12)	457	457,32	-0,32
19	(18,4)	369	369,57	-0,57
20	(25,9)	404	403,63	0,37
21	(17,5)	370	371,07	-1,07
22	(16,5)	371	370,6	0,4

Comparison of Calculated and Observed Heads

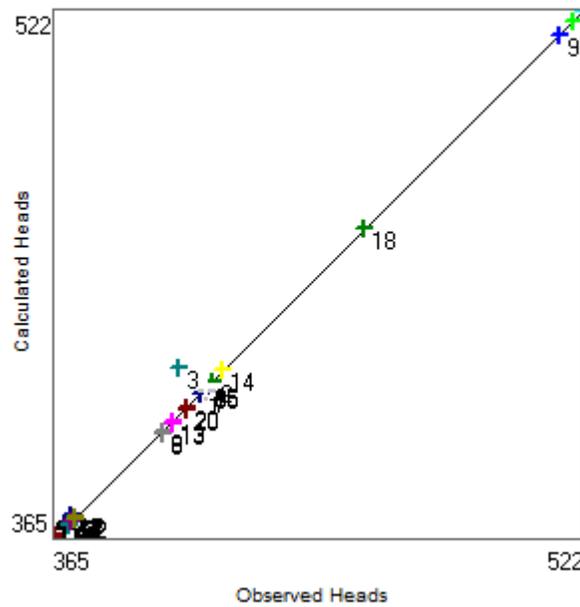


Figure V.9: Comparaison entre les potentiels mesurés et calculés après calage du modèle en régime transitoire.

**V.4.2. Répartition des valeurs du coefficient d’emmagasinement**

La répartition spatiale du coefficient d’emmagasinement à l’issue du calage en régime transitoire (fig.V.10) montre qu’il varie entre  $4.10^{-3}$  et  $4.10^{-1}$ . Ces variations reflètent les différentes capacités de stockage d’eau dans les différentes zones de l’aquifère. Les valeurs élevées du coefficient d’emmagasinement peuvent être associées à des zones plus perméables ou à une plus grande porosité, ce qui permet une plus grande capacité de stockage d’eau.

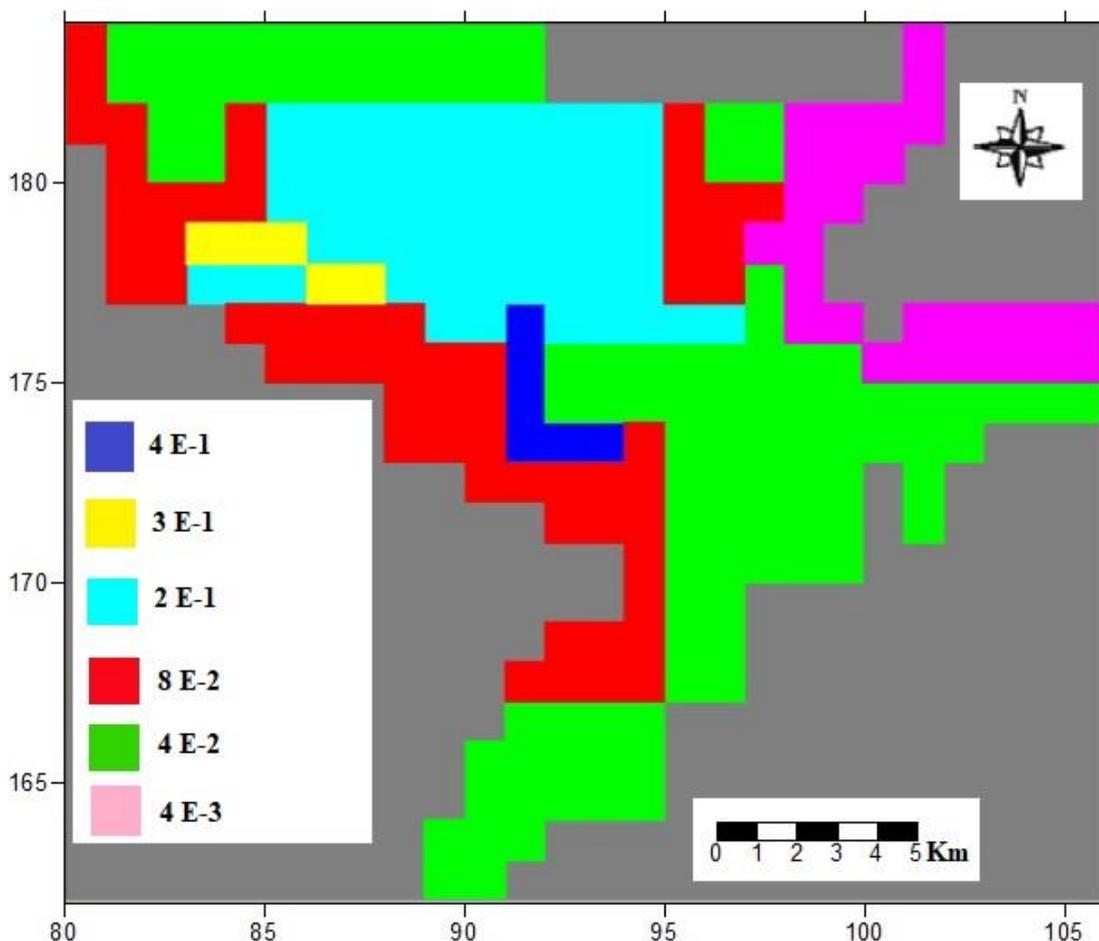


Figure V.10: Carte du coefficient d’emmagasinement issue du calage en régime transitoire.

**V.4.3. Bilan de la nappe**

**V.4.3.1. Bilan de la nappe pour l’ensemble du domaine modélisé**

On remarque qu’on a toujours un équilibre dans le bilan.

Tableau V.5: Bilan de la nappe calculé par le modèle en régime transitoire (Mai 1995) (exprimé en m<sup>3</sup>/s).

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.0000000E+00	4.5602867E+04	-4.5602867E+04
CONSTANT HEAD	3.1560236E-01	4.4984897E-03	3.1110388E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.9399997E-01	-2.9399997E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	4.5600000E+04	0.0000000E+00	4.5600000E+04
SUM	4.5600316E+04	4.5603164E+04	-2.8476563E+00

### V.4.3.2. Bilan de la nappe au niveau du chenal

L'examen du bilan de la nappe au niveau du chenal en régime transitoire confirme, l'intensité du pompage.

Tableau V.6: Bilan de la nappe calculé au niveau du chenal en régime transitoire.

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.0000000E+00	7.4001221E+03	-7.4001221E+03
CONSTANT HEAD	2.3753915E-02	0.0000000E+00	2.3753915E-02
HORIZ. EXCHANGE	4.9336243E-01	2.4254821E-01	2.5081420E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.0200002E-01	-2.0200002E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	7.4000000E+03	0.0000000E+00	7.4000000E+03
SUM	7.4005171E+03	7.4005664E+03	<b>-4.9316406E-02</b>

## V.5. Exploitation du modèle

Le modèle hydrogéologique a permis de préciser les paramètres hydrogéologiques de la plaine alluviale de Maghnia et de confirmer la nature des liens hydrauliques entre les différentes unités hydrostratigraphiques. Les statistiques de calibration démontrent la qualité du modèle numérique en régime permanent et transitoire. De ce fait, le modèle numérique permettra de simuler adéquatement l'écoulement souterrain pour des phases multiples subissant des conditions climatiques et de gestion différente. Il pourra servir d'outil décisionnel pour l'évaluation de l'impact climatique et ou anthropique.

Dans cette phase, nous tenterons d'effectuer des simulations dans l'objectif d'évaluer la réponse du système aux différentes sollicitations possibles, en utilisant à la fois des scénarii pessimistes et optimistes. Les simulations pessimistes sont basées sur des conditions défavorables, tandis que les simulations optimistes explorent des conditions favorables. Cette approche permet d'identifier les problèmes potentiels et de rechercher des solutions, tout en explorant les opportunités d'amélioration et d'optimisation du système. Ces simulations permettront de dévoiler les capacités du modèle développé PMWIN5.

### V.5.1. Scénarii pessimistes

#### V.5.1.1. Surexploitation de la nappe

Face à la demande sans cesse croissante des besoins en eau du périmètre irrigué de Maghnia et la réhabilitation des terres agricoles, une proposition a été faite pour y remédier en ajoutant 5 puits d'exploitation pour la 1<sup>ère</sup> simulation et 10 puits d'exploitation pour la 2<sup>ème</sup> simulation en longeant le chenal et provenant de la frontière algéro-marocaine. Chaque puits est conçu pour avoir un débit de 0,005 m<sup>3</sup>/s. L'objectif de cette proposition est de fournir une source supplémentaire d'eau pour répondre aux besoins croissants de la région (fig.V.11 & fig.V.12).

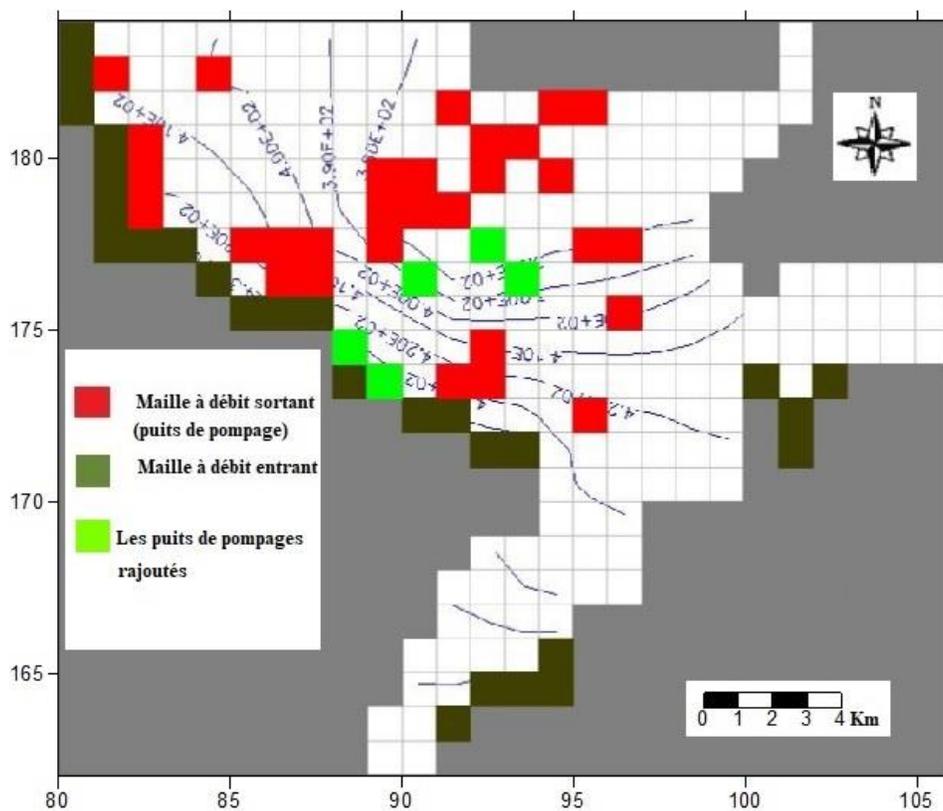


Figure V.11: Simulation hydrodynamique (surexploitation) en rajoutant 5 puits

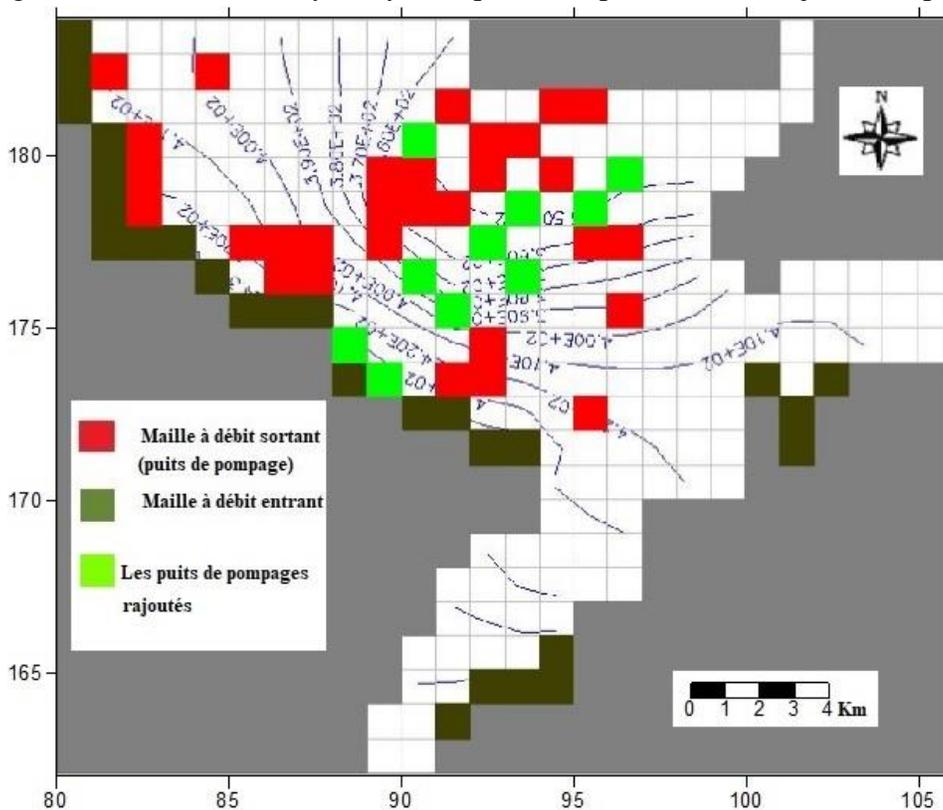


Figure V.12: Simulation hydrodynamique (surexploitation) en rajoutant 10 puits

Les figures V.11 et V.12 illustrent une diminution remarquable d'environ 1 mètre pour la première simulation et 2 mètres pour la seconde, en particulier aux alentours des puits de pompage et plus spécifiquement dans la zone du chenal. Ce rabattement significatif du niveau d'eau souligne l'impact direct du soutirage au niveau de la nappe comme illustré au paragraphe suivant (calcul des bilans).

### V.5.1.2. Bilan de la nappe

#### ❖ Première simulation (addition de cinq puits de pompage)

Tableau V.7: Bilan global de la nappe en surexploitation (addition de cinq puits)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	3.0843046E-01	0.0000000E+00	3.0843046E-01
WELLS	0.0000000E+00	3.0899996E-01	-3.0899996E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	3.0899364E-01	3.0899996E-01	<b>-6.3180923E-06</b>

Tableau V.8: Bilan du chenal en surexploitation (addition de cinq puits)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	4.7678739E-02	0.0000000E+00	4.7678739E-02
HORIZ. EXCHANGE	1.9653574E-01	3.2322384E-02	1.6421336E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.1200001E-01	-2.1200001E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.4430586E-01	2.4432239E-01	<b>-1.6525388E-05</b>

#### ❖ Deuxième simulation (addition de dix puits de pompage)

Tableau V.9: Bilan global de la nappe en surexploitation (addition de dix puits)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	3.3344021E-01	0.0000000E+00	3.3344021E-01
WELLS	0.0000000E+00	3.3399993E-01	-3.3399993E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	3.3400339E-01	3.3399993E-01	<b>3.4570694E-06</b>

Tableau. V.10: Bilan du chenal en surexploitation (addition de dix puits)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	4.9885660E-02	0.0000000E+00	4.9885660E-02
HORIZ. EXCHANGE	2.0320824E-01	3.6165614E-02	1.6704261E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.1700001E-01	-2.1700001E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.5318527E-01	2.5316563E-01	<b>1.9639730E-05</b>

### V.5.1.3. Sécheresse

Dans le but de simuler une situation de stress (sècheresse), nous avons appliqué certaines modifications aux conditions du système. Ces modifications se présentent comme suit : garder les trois puits de pompage et augmenter les débits soutirés en rajoutant à chaque puits un pompage de 0.002 m<sup>3</sup>/s et en gardant la même infiltration car elle étant très faible initialement, elle n’aura pas d’influence sur le système (fig.V.13).

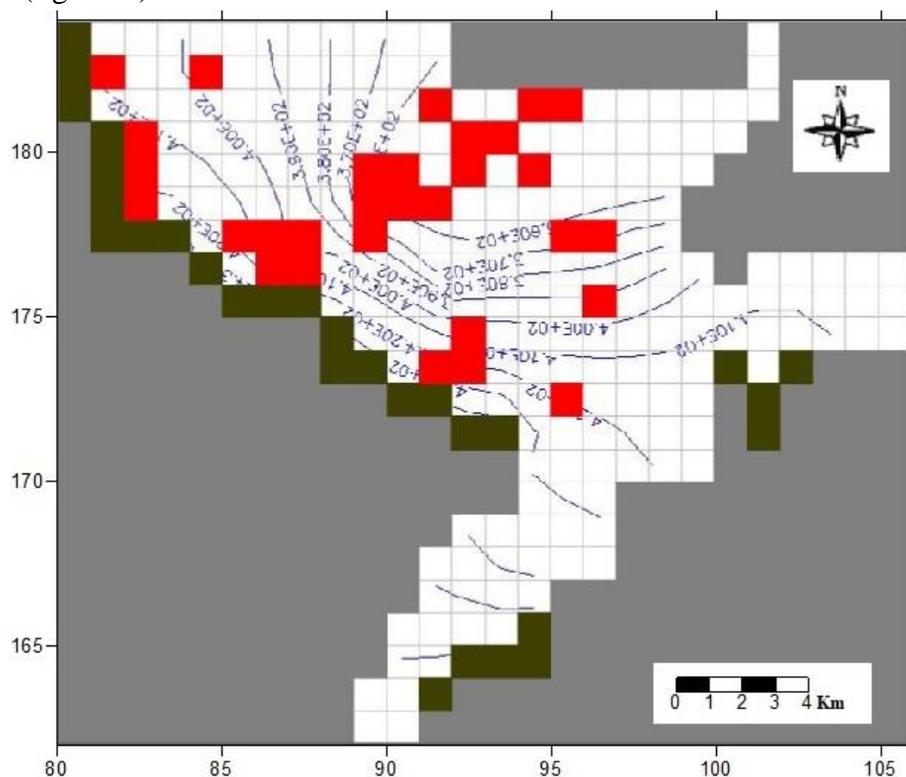


Figure V.13: Simulation hydrodynamique (sècheresse)

Lors de la simulation de la période de sècheresse, une remarque importante s’impose concernant le rabattement du niveau piézométrique qui est de 1.5 à 2 mètres. Ce rabattement, représente une baisse significative du niveau d'eau dans la nappe et des mesures de sécurité devront être prises dans

l'immédiat pour dépasser ce problème. Les résultats d'une telle situation apparaissent clairement dans les bilans suivants :

Tableau V.11: Bilan global de la nappe en situation de stress (sécheresse)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	3.5044017E-01	0.0000000E+00	3.5044017E-01
WELLS	0.0000000E+00	3.5099995E-01	-3.5099995E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	3.5100335E-01	3.5099995E-01	<b>3.3974648E-06</b>

Tableau V.12 : Bilan du chenal en situation de stress (sécheresse)

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	5.3431951E-02	0.0000000E+00	5.3431951E-02
HORIZ. EXCHANGE	2.1790740E-01	3.6420241E-02	1.8148714E-01
WELLS	0.0000000E+00	2.3499995E-01	-2.3499995E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.7143073E-01	2.7142021E-01	<b>1.0520220E-05</b>

#### V.5.1.4. Synthèse des résultats des scénarii pessimistes

La figure V.14, montre clairement que les rabattements des simulations pessimistes sont très importants dans le Nord confirmant ainsi la disposition du chenal très sollicité par le pompage et un rabattement presque nul dans le Sud. Aussi, le bilan de la nappe est déficitaire dans les cas de la surexploitation et la sécheresse.

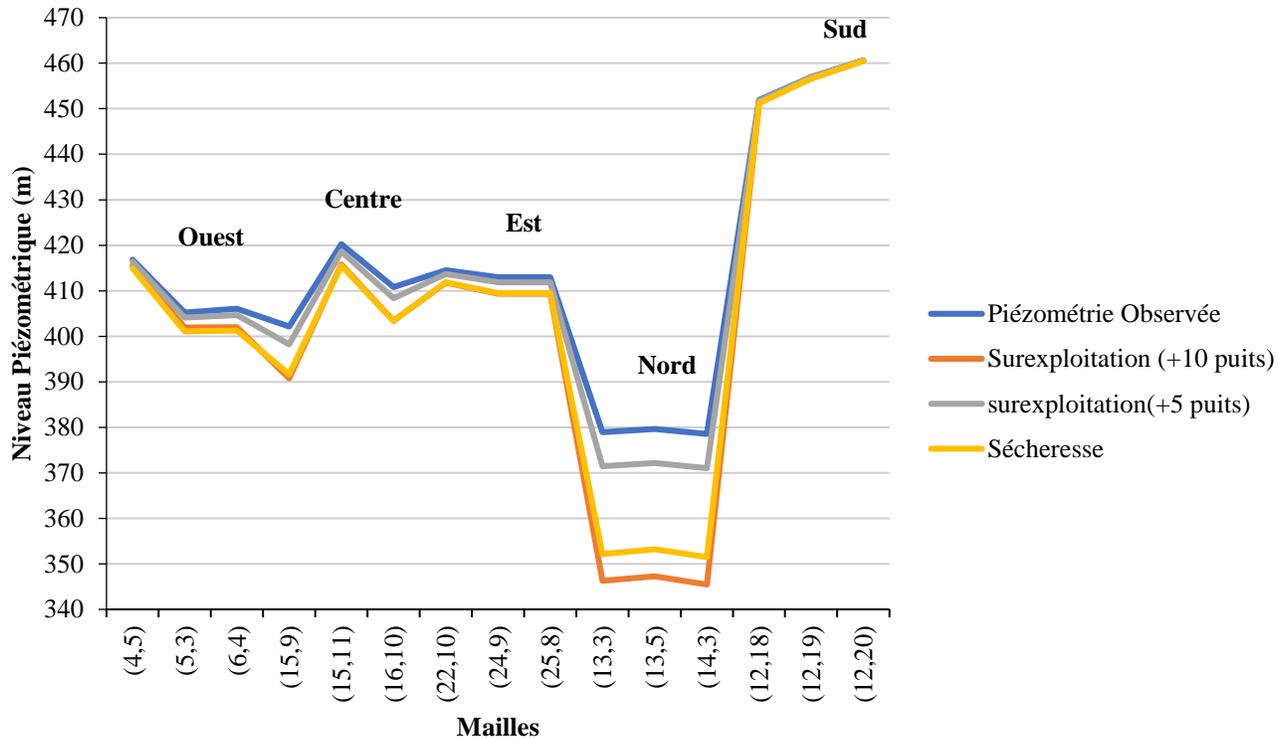


Figure V.14 :Évolution des niveaux piézométriques lors des scénarii pessimistes

## V.5.2. Scénarii optimistes

### V.5.2.1. Recharge artificielle à partir des lâchers du barrage de Boughrara

Nous avons simulé un scénario en considérant une recharge à partir d'un barrage dans des puits plus proche de l'oued Tafna (côté Est) avec un débit de  $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ . les résultats de cette simulation (fig. V.15), font apparaître une augmentation considérable du niveau piézométrique, en particulier dans la région Nord où se situe le chenal. Cette observation met en évidence l'effet significatif de la recharge artificielle sur la dynamique de l'aquifère.

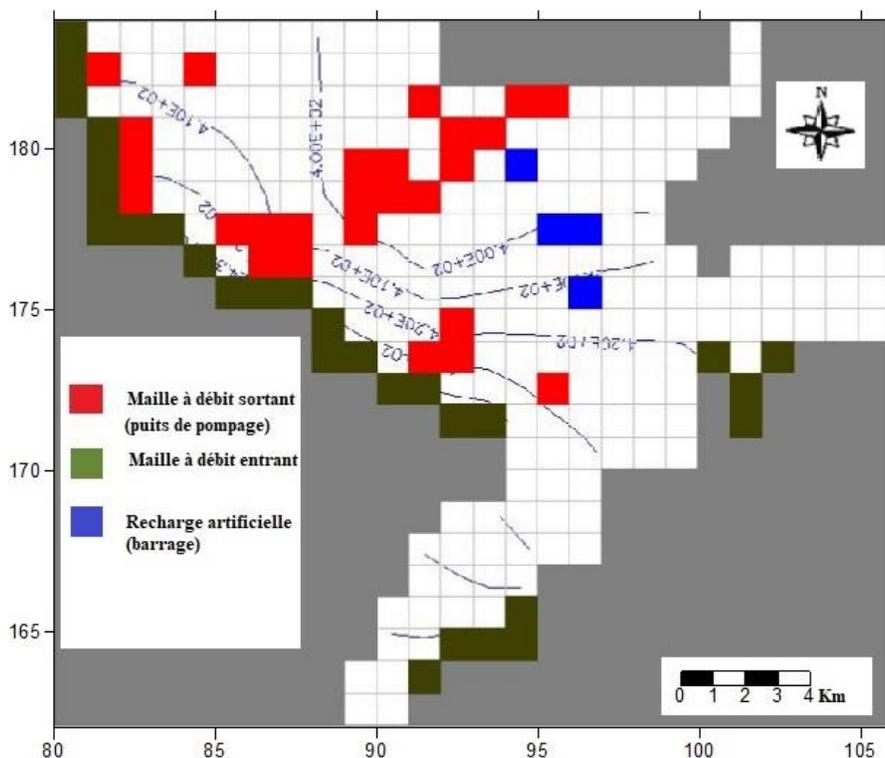


Figure V. 15: Simulation optimiste (Recharge artificielle)

Le bilan de la nappe relatif à ce scénario est comme suit :

Tableau V.13: Bilan global de la nappe en cas de recharge à partir du barrage

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	2.5712368E-01	3.7216207E-03	2.5340205E-01
WELLS	2.0000000E-02	2.7399999E-01	-2.5399998E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	2.7768683E-01	2.7772161E-01	<b>-3.4779310E-05</b>

Tableau V.14 : Bilan du chenal en cas de recharge à partir du barrage

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	4.1282259E-02	0.0000000E+00	4.1282259E-02
HORIZ. EXCHANGE	1.7457613E-01	2.4048891E-02	1.5052724E-01
WELLS	4.9999999E-03	1.9700001E-01	-1.9200002E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.2094977E-01	2.2104891E-01	<b>-9.9137425E-05</b>

### V.5.2.2. Recharge importante (augmentation de l'infiltration)

Dans ce scénario de simulation, nous avons pris en compte une recharge importante en augmentant l'infiltration et en diminuant le pompage. L'examen de la carte (fig. V.16) fait ressortir une augmentation significative du niveau piézométrique dans la région Nord indiquant une réponse positive du système aquifère à la recharge par l'infiltration. Cela laisse penser à l'efficacité de la recharge par des pluies efficaces continues dans le réapprovisionnement des réserves souterraines en eau et contribue ainsi à la durabilité de la ressource. Et donc nous suggérons la recharge par épandage en cas de surplus d'eau dans les barrages.

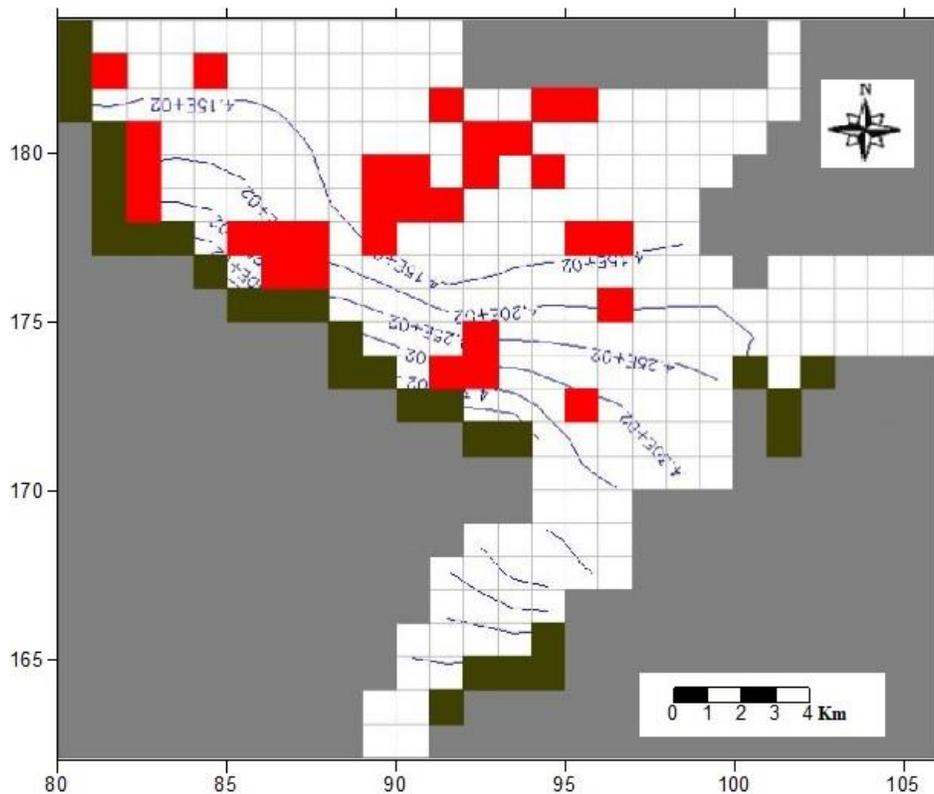


Figure V.16: Simulation optimiste (Recharge efficace)

Nous constatons une augmentation significative du niveau piézométrique dans la région Nord lors de la simulation de la recharge efficace. Cette augmentation est clairement visible dans les résultats obtenus et indique une réponse positive du système aquifère à la recharge par précipitations efficaces. Cela suppose que la recharge efficace joue un rôle crucial dans le réapprovisionnement des réserves souterraines en eau et contribue ainsi à la durabilité de la ressource. Le calcul du bilan pour ce scénario apparaît dans les tableaux qui suivent :

Tableau V.15: Bilan global de la nappe en cas de recharge efficace par les précipitations

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.8825790E-01	9.2342440E-03	1.7902365E-01
WELLS	0.0000000E+00	1.8200001E-01	-1.8200001E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	2.9640058E-03	0.0000000E+00	2.9640058E-03
SUM	1.9122191E-01	1.9123426E-01	<b>-1.2353063E-05</b>

Tableau V.16: Bilan du chenal en cas de recharge efficace par les précipitations

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	2.6352394E-02	0.0000000E+00	2.6352394E-02
HORIZ. EXCHANGE	1.3332263E-01	2.8173184E-02	1.0514945E-01
WELLS	0.0000000E+00	1.3200000E-01	-1.3200000E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	4.8100017E-04	0.0000000E+00	4.8100017E-04
SUM	1.6015603E-01	1.6017318E-01	<b>-1.7151237E-05</b>

### V.5.2.3. Recharge latérale

Nous avons effectué une simulation en considérant une recharge latérale importante du côté de la frontière algéro-marocaine avec un débit de  $0.008 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nous constatons une augmentation importante du niveau piézométrique en particulier dans la zone du chenal (fig.V.17) due à l'apport supplémentaire d'eau dans l'aquifère par le biais de la recharge latérale contribuant au soutien des réserves souterraines.

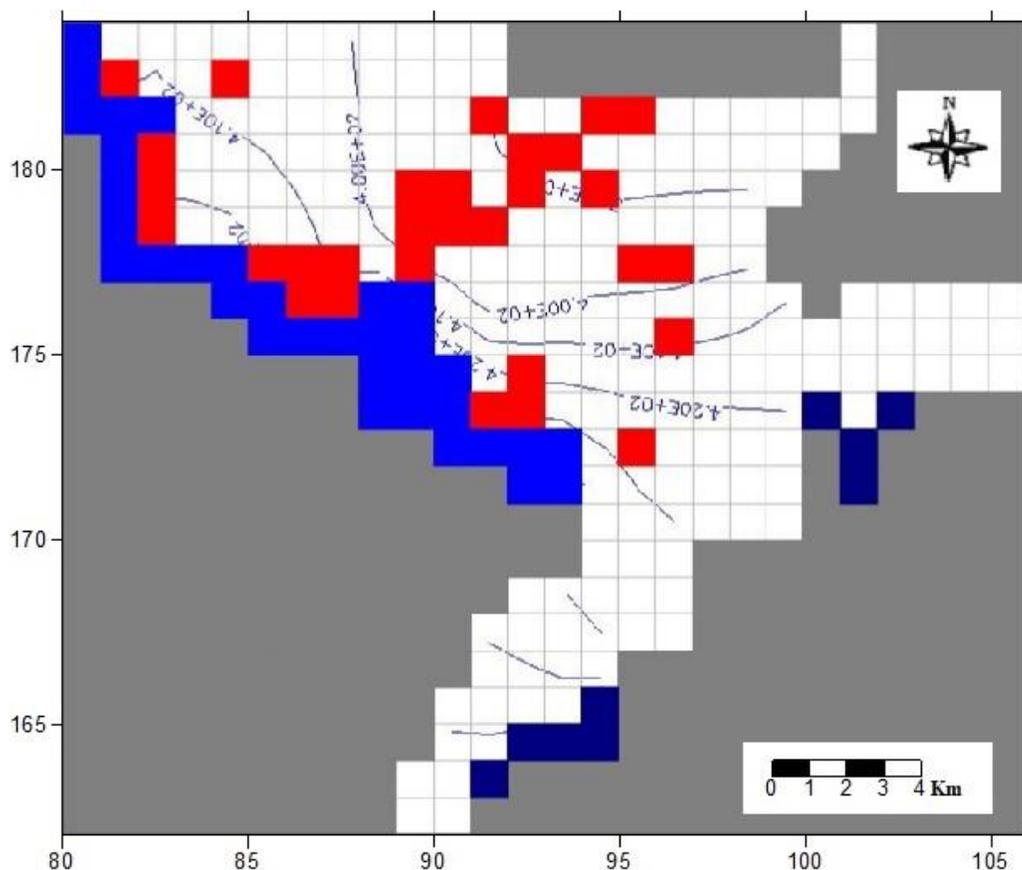


Figure V.17: Simulation optimiste (Recharge latérale)

Les résultats des bilans à l'issue de cette situation sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau V.17: Bilan global de la nappe en cas de recharge latérale

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.9093940E-01	1.5160891E-03	1.8942331E-01
WELLS	1.0400001E-01	2.9399997E-01	-1.8999997E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	5.6316069E-04	0.0000000E+00	5.6316069E-04
SUM	2.9550257E-01	2.9551607E-01	-1.3500452E-05

Tableau. V.18: Bilan global du chenal en cas de recharge latérale

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	2.9713552E-02	0.0000000E+00	2.9713552E-02
HORIZ. EXCHANGE	1.7691970E-01	4.4741336E-02	1.3217835E-01
WELLS	4.0000003E-02	2.0200002E-01	-1.6200002E-01
DRAINS	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
RECHARGE	9.1389964E-05	0.0000000E+00	9.1389964E-05
SUM	2.4672464E-01	2.4674135E-01	<b>-1.6719103E-05</b>

#### V.5.2.4. Synthèse des résultats des scénarii optimistes

A l'issue de cette situation optimiste, nous remarquons (fig. V.18), une augmentation remarquable du niveau piézométrique dans les 3 régions du domaine étudié (Ouest, Centre et Est) avec une élévation significative de la charge au Nord plus particulièrement au niveau du chenal. Par contre au niveau du Sud, nous enregistrons une superposition des courbes désignée par la stabilité.

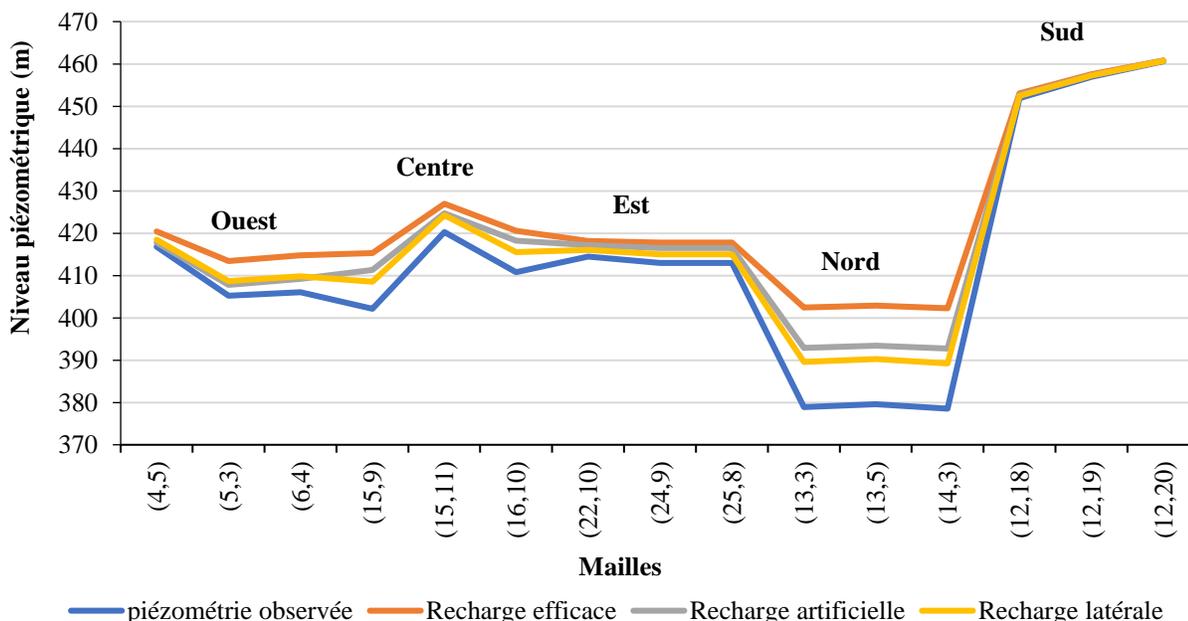


Figure V.18 : Évolution des niveaux piézométriques lors des scénarii optimistes

## V.6. Conclusion

L'un des principaux avantages de la modélisation hydrogéologique est sa capacité à fournir une représentation virtuelle de l'aquifère, basée sur des données géologiques et hydrogéologiques réelles. Elle permet à l'utilisateur de visualiser et de comprendre la distribution spatiale des propriétés de

l'aquifère tels que la conductivité hydraulique, la porosité efficace ou le coefficient d'emmagasinement.

L'utilisation du code de calcul PMWIN5 pour modéliser la nappe alluviale de Maghnia, nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de cette nappe.

Le calage du modèle en régime permanent a permis de préciser la répartition spatiale des perméabilités en appréhendant de mieux en mieux l'écoulement dans un milieu poreux et l'estimation plus fiable des flux d'eau entrants et sortants.

Le calage du modèle en régime transitoire a été une étape essentielle de la modélisation hydrodynamique. En prenant en compte les variations temporelles de la piézométrie, nous avons pu suivre les fluctuations du niveau de la nappe en fonction de la variation temporelle. En modifiant le coefficient d'emmagasinement dans le modèle, nous avons pu reproduire de manière précise les variations observées de la piézométrie dans le temps.

Grâce à la calibration du modèle en régime transitoire, nous avons également pu réaliser des simulations sur des pas de temps divers, Ces simulations ont été basées sur des scénarii prenant en compte les vicissitudes climatiques et l'action anthropique, telles que la variabilité climatique et la multiplicité des pompages et les apports latéraux.

En résumé, le modèle hydrogéologique a permis de simuler adéquatement l'écoulement souterrain à l'échelle de la plaine de Maghnia. De plus, il a permis de préciser les paramètres hydrodynamiques du site et de confirmer la nature des liens entre les différentes unités hydrostratigraphiques. En effet, le modèle a mis le point sur l'importance du chenal dans la gestion des ressources en eau de la région d'étude.

Les cartes de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement que nous avons établies pourront servir aux choix de l'implantation des futurs captages, ainsi qu'à la définition des périmètres de protection de certaines zones particulières à savoir le centre de la plaine de Maghnia (fig.V. 19).

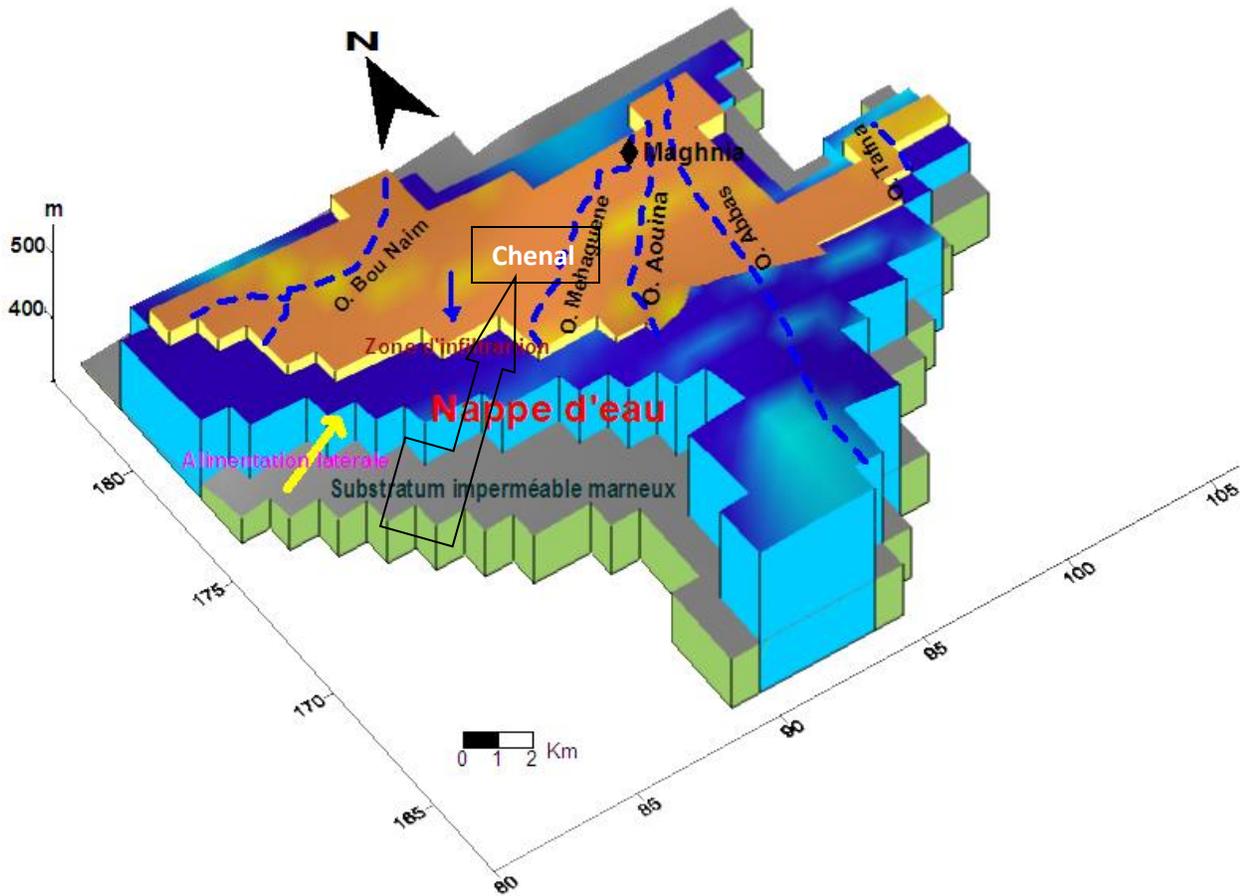


Figure V.19 : Schéma 3D de l'aquifère alluvial de Maghnia

***CONCLUSION***  
***GÉNÉRALE***

## Conclusion générale

La modélisation hydrogéologique de la plaine de la région de Maghnia, située au Nord-ouest de l'Algérie, offre des perspectives précieuses pour comprendre et gérer les ressources en eau souterraine de cette zone. À travers les différents chapitres abordant la présentation de la zone d'étude, la climatologie, l'hydrogéologie et la modélisation hydrogéologique avec le logiciel PMWIN5, nous avons pu explorer en détail les caractéristiques et les enjeux de cette région.

La plaine de Maghnia située à l'extrême ouest de l'Algérie à vocation agricole s'étend sur une superficie de 351 km<sup>2</sup> et abrite dans son sous-sol un potentiel hydrique important. L'agriculture a malheureusement connu un réel déclin suite à la parcimonie pluviométrique qui a perduré des années et qui a contraint certains agriculteurs à céder leurs terres et aux plus tenaces d'entre eux de pratiquer le captage vertical illicite de l'eau et forer à des profondeurs importantes dans la nappe sans que soit mesurés les dégâts engendrés. Une étude rigoureuse détaillée de cette plaine devient indispensable pour essayer de trouver une solution dans l'immédiat afin de réhabiliter le périmètre irrigué.

La plaine de Maghnia est traversée par deux oueds principaux à savoir oued Mouilah et oued Ouardefou qui confluent en aval de Maghnia et constituent l'exutoire superficiel formant un graben constitué de sédiments plio-quatérnaires. La région jouit d'un climat semi-aride, la moyenne des précipitations annuelles enregistrées durant la période 1977/1978- 2020/2021 est égale à 280,1mm correspondant à une température de 18°C. On y distingue deux périodes distinctes, la première humide excédentaire s'étendant de la mi-avril à la mi-octobre et l'autre déficitaire occupant le reste des mois de l'année mettent en évidence les défis liés à la recharge adéquate de la nappe aquifère pendant cette période critique. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle a révélé une forte valeur de 923,3mm et l'évapotranspiration réelle (ETR) atteint en moyenne près de 263 mm, ce qui représente environ 93 % des précipitations. Ainsi, l'écoulement ne représente qu'environ 7 % des précipitations. La connaissance de ces données est très importante pour la partie modélisation représentant ainsi les inputs dans le modèle choisi.

Sur la base des différentes investigations et des informations fournies par la direction d'hydraulique, nous avons pu dégager des résultats sur la géométrie de l'aquifère alluvial de la plaine de Maghnia et son comportement sur une échelle spatio-temporelle. L'écoulement souterrain est généralement orienté du Sud vers le Nord. L'étude piézométrique a mis en évidence trois zones d'alimentation, la première située à l'Ouest, où les flux de courant se divisent, entraînant une augmentation du niveau piézométrique en raison d'une forte alimentation en provenance du Maroc. Une seconde zone centrale caractérisée par un important débit d'écoulement dans des couches perméables et la dernière localisée à l'Est, où la surface piézométrique augmente brusquement vers le Sud, indiquant la présence d'une bande de terrain perméable en relation avec les monts de Tlemcen.

La distribution des paramètres hydrodynamiques tels que la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement (coefficient du stockage), ainsi que l'évolution du niveau piézométrique de la nappe apportent un supplément d'informations concernant la zone la plus productive de la plaine.

La modélisation hydrogéologique, réalisée à l'aide du logiciel PMWIN5 (Processing Modflow for Windows 5), représente un outil puissant pour simuler et évaluer les différents scénarios de gestion de l'eau. Par l'utilisation des données hydrogéologiques et climatiques, le modèle a permis de prédire les variations du niveau piézométrique, d'estimer les impacts de la surexploitation de la nappe et de définir des seuils critiques pour la mise en place des mesures de gestion.

L'application de la modélisation hydrogéologique à l'aquifère alluvionnaire de la plaine de Maghnia a permis de mieux appréhender les défis liés à la surexploitation de la nappe alluviale de cette région et de proposer des recommandations pour une gestion durable de cette ressource vitale.

En effet, le calage en régime permanent a montré une grande similitude entre les charges observées et celles calculées par le logiciel. L'écoulement de l'eau souterraine suit la topographie, tel que défini dans les hypothèses du modèle conceptuel initial. Cette concordance qui met en évidence la précision avec laquelle le modèle reproduit les mesures de la piézométrie. La répartition de la conductivité hydraulique adoptée pour le calage traduit l'importance du chenal.

Le calage du modèle en régime transitoire est satisfaisant, il a permis d'affiner la répartition du coefficient d'emmagasinement reflétant ainsi la capacité de stockage, et a montré aussi un grand synchronisme entre les valeurs observées et simulées de la charge hydraulique.

Les cartes de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement que nous avons établies pourront servir aux choix de l'implantation des futurs captages, ainsi qu'à la définition des périmètres de protection de certaines zones particulières à savoir le centre de la plaine de Maghnia.

La satisfaction du calage a conduit à l'exploitation du modèle à partir des simulations établies sur des pas de temps divers, Ces simulations ont été basées sur des scénarii prenant en compte les vicissitudes climatiques et l'action anthropique, telles que la variabilité climatique et la multiplicité des pompages et les apports latéraux. En effet, un pompage intensif au niveau du chenal suite à une sécheresse continue a révélé un rabattement important au niveau de la nappe dépassant les deux mètres par endroit.

La modélisation hydrogéologique de la plaine de Maghnia, réalisée avec le logiciel PMWIN5, offre une meilleure compréhension du fonctionnement de l'aquifère et des enjeux associés à sa gestion. Elle fournit des outils précieux pour anticiper les variations du niveau piézométrique, évaluer les impacts de la surexploitation et proposer des mesures de préservation adaptées. Une gestion équilibrée de cette ressource en eau souterraine est essentielle pour assurer sa durabilité et répondre aux besoins présents et futurs de la région. Le modèle que nous avons proposé n'est

pas une solution unique, il pourrait être amélioré par un nouvel apport de données permettant de conforter les résultats proposés et fixer les conditions aux limites.

En guise de recommandations, nous proposons d' :

- Etablir un système de surveillance régulier de la nappe alluviale, y compris le suivi des niveaux d'eau des prélèvements permettant de détecter rapidement les problèmes potentiels et d'ajuster les mesures de gestion en conséquence.
- Mettre en place des programmes de sensibilisation visant à informer les utilisateurs de la nappe sur les enjeux de la surexploitation et les pratiques durables de gestion de l'eau.
- Encourager l'adoption de techniques d'irrigation plus efficaces afin de réduire la dépendance excessive à la nappe.
- Limiter l'expansion des zones urbanisées et agricoles qui pourraient entraîner une augmentation de la demande en eau.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMEUR M. & SAAD F. 1989. Etude hydrogéologique de la plaine de Maghnia. Mém. Ing. Univ. Oran. 192
- AUCLAIR D. & BIEHLER J. 1967. Etudes géologiques des hautes plaines oranaises entre Tlemcen et Saïda. Publ. Serv. Géol. Algérie. Ann. Serv. n°34. Pp 3-45., 8 fig.
- AZIZ HADJIRA ET MEGUENNI TANI MERIEM 2013.  
Essai de Modélisation Hydrodynamique d'une nappe. Application à la nappe alluviale de la plaine de Maghnia. (Wilaya de Tlemcen, NW Algérie).Mémoire de Master en Hydrogéologie. Université de Tlemcen.
- BABA HAMED K. 2007. Hydrodynamique Et Modélisation d'une Nappe alluviale. Validation par l'approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW Algérien). Thèse de doctorat. Hydrogéologie. Université de Tlemcen. 161p.
- BAGNOULS F. & GAUSSEN H. 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Bull.Soc.Hist.Nat.88, Toulouse. pp, 193-239
- BENEST M. 1981. La marge nord-gondwanienne de l'Ouest algérien au Jurassique supérieur et à l'Eocrétacé: les grands traits de l'évolution tectono-sédimentaire mégarythme. Bull. Soc.Géol. France., Paris, 7e série., t.XXIII, p.663-672, 2fig.
- BENEST M. 1982. Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie occidentale). Revue de Géologie dynamique et de Géographie Physique. Vol. 23, Fasc. 5. p345-362. Paris
- BENEST M 1985. Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse. Doct. Géol. Univ. Lyon. Fasc 1., 367p., 107 fig
- BENEST M. & BENSALAH M.1999. La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine tlemcenien (avant pays d'Algérie occidentale) : Stratigraphie, paléo-environnement, Bull. Serv. Géol. Algérie. 6, n°1, p. 41 - 59, 8 fig
- BONNET M. 1965. Etude hydrogéologique de la plaine de Maghnia. Rapport S.E.S n°59/ GE. Oran. 45p
- CASTANY G. 1982. Principe et méthodes hydrogéologiques. 236p.
- (DASSARGUES, 1991). Modélisation hydrogéologique à grande échelle. Choix conceptuel et calibration. Exemple du bassin de la Dyle. Rapport de stage. 57p.
- DRIBAT A. 2015. Essai de modélisation d'une Nappe, Application à la nappe de l'Influx d'oued in Amguel (Hoggar Central-Sud algérien. Mémoire de Master en Hydrogéologie. Université de Tlemcen.140p
- ELMI S. 1972. L'instabilité des monts de Tlemcen et de Rhar - Roubane (ouest algérien) pendant le Jurassique. Interprétation paléogéographique. C. R. Acad. Géol. France, Paris. pp. 1521 - 1524 ., 1 fig.

- GUARDIA P. 1975. Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale. Thèse .Doct. Nice. 256 p., 139 fig., 5 pl. Hallaire (1960)
- KINZELBACH W. & RAUSCH R.1995. Aquifer Simulation Model. International groundwater modelling center. Netherlands. 53p
- LUCAS G. 1942. Description géologique et pétrographique des Monts de Rhar Roubane et du Sidi El Abed. Bull. Serv. Géol. Algérie, Alger, sér.2, n°16, 539p., 131fig., 34 pl. Levassor et Ledoux 1996
- MARSILY G 1981. Hydrogéologie quantitative. Collection Sciences de laTerre. Ed. Masson. 215p
- MEKAHLI L. 1988. Le Jurassique inférieur et moyen de la partie occidentale duHorst de Rhar Roubane (Tlemcen, Algérie occidentale) : Stratigraphie, sédimentologie et cadre dynamique. Thèse Magister. Univ. Oran. 260 p. 102 fig.
- THORNTHWAITE CW.& MATHER J.R . 1957. Instruction and table forcomputing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel. Inst. Technol. Pub. Clim.X(3).